V16

GRUPPEN FÖR VÅGENERGIFORSKNING

Vågkraftbojar - modellförsök i regelbundna vågor i med hassäng

av

Lars Bergdahl
Lars-Ove Sörman
Lars Wernersson

Rapport GR:13

Göteborg den
20 mars 1979

SAMMANFATTNING

Svängningarna hos en vågenergiomvandlare av bojtyp antas kunna beskrivas av en andra ordningens differentialekvation med konstanta koefficienter. Målsättningen med de försök som redovisas i föreliggande rapport har varit att bestämma dessa koefficienter för olika utformningar av vågbojen, samt att undersöka hur väl svängningar i regelbundna vågor beskrivs av differentialekvationen.

Tre olika former på bojarna har undersökts med vardera tre deplacement. Försök har gjorts dels i regelbundna vågor, dels som egensvängningsförsök. Jämförelse med tidigare i rännor utförda försök görs.

För jämförelse av uppmätt amplitudresponskurva med beräknad kurva har koefficienterna i svängningsekvationen först bestämts ur egensvängningsförsök. Erhållna koefficienter har sedan satts in i den teoretiska amplitudresponsfunktionen.

Överensstämmelsen mellan uppmätta kurvor och beräknade kurvor är god för de föreliggande försöken i bassängen. De uppmätta kurvorna är i allmänhet något bredare än de beräknade, vilket innebär att ett direkt utnyttjande av de teoretiska sambanden för beräkning av energiupptagning kommer att ge någon underskattning av energiupptagningen.

Skillnaderna mellan försök i rännor och försök i en bred bassäng förklaras kvalitativt av speglingar i rännans väggar. Allmänt sett fungerar den använda förenklade teorin väl för en ensam boj, medan en samverkande bojrad måste beräknas med kompletterande samband för samverkan mellan bojarna.

Masskoefficienten μ och dämpkoefficienten ε anges som funktioner av det normerade deplacementet $\hat{V} = V/(\pi r^3\ 2/3)$, där V är deplacementet och r bojens radie. Samma typ av funktion som valts vid rännförsöken används, nämligen $\mu = c_1\ \hat{V}^{c_2}$ och $\varepsilon = c_3\ \hat{V}^{c_4}$. Koefficienterna c_1 och c_3 varierar med kroppens form så att de minskar med ökad strömlinjeform. Exponenterna c_2 och c_4 är approximativt oberoende av bojtyp.

Slutligen visas några exempel på teoretisk verkningsgrad hos bojarna vid energiutvinning. För beräkningarna har de mätta koefficienterna använts.

FÖRORD

Föreliggande rapport om bojars hävning utgör ett led i den forskning över utvinning av vågenergi, som bedrivs vid Chalmers Tekniska Högskola i samarbete med Birger Ludvigson Ingenjörsbyrå AB. Forskningen bekostas av Nämnden för energiproduktionsforskning.

Rapporten är en direkt fortsättning på interimsrapporten GR:11, som behandlar hävningsförsök i en ränna med en bredd svarande mot 6 bojdiametrar. I den föreliggande rapporten redovisade försök är utförda i en bred bassäng (31 bojdiametrar), varför resultaten bör bättre motsvara egenskaperna för en ensam boj.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

SAMMANFATTNING		I
FÖRORD		III
INNEHÅLLSFÖRTECKNING		IV
1.	INLEDNING	1
2.	AVSIKT MED MODELLFÖRSÖKEN	3
3.	TEORETISK BAKGRUND	4
3.1	Förutsättningar	4
3.2	Svängningsekvationen	4
3.3	Fri dämpad svängning	5
3.4	Amplitudresponsfunktionen	6
4.	FÖRSÖKSUTRUSTNING	8
4.1	Provade bojar	8
4.2	Vågbassängen	9
4.3	Upphängningsriggen	11
4.4	Mätutrustning	12
5.	FÖRSÖKSUTFÖRANDE OCH UTVÄRDERINGSMETODER	15
5.1	Egensvängningsförsök	15
5.2	Försök i regelbundna vågor	16
6.	UTFÖRDA FÖRSÖK	18
7.	FÖRSÖKSRESULTAT	19
7.1	Egensvängningsförsöken	19
7.2	Försök i regelbundna vågor	22
8.	JÄMFÖRELSE MED TEORI	29
9.	JÄMFÖRELSE MED RÄNNFÖRSÖK	34
10.	BERÄKNADE VERKNINGSGRADER	39
REFERENSER		44

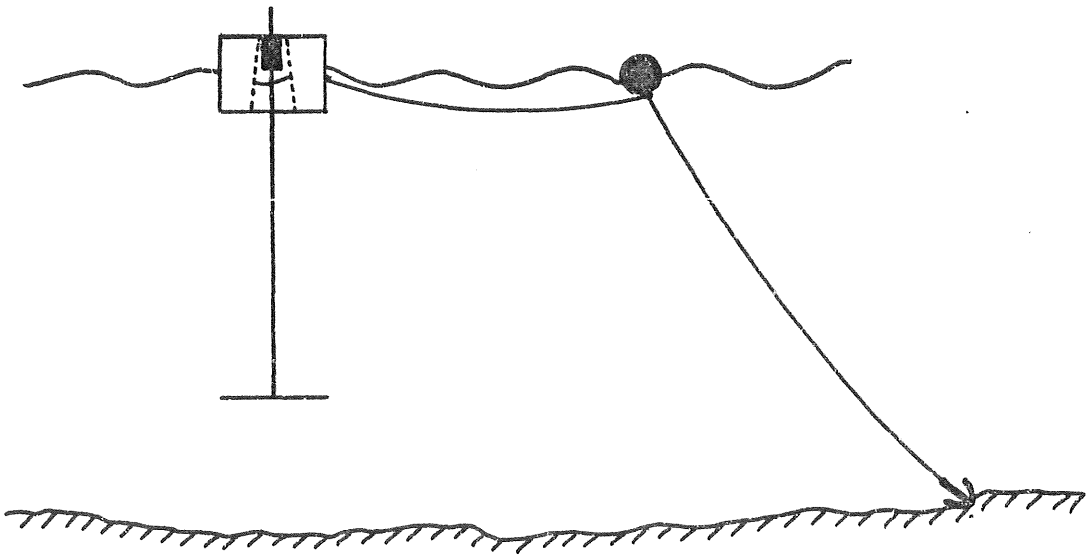
1. INLEDNING

Vågorna kring Sveriges kust är en energikälla som kan ge ett bidrag till den svenska energiförsörjningen under förutsättning att kostnaderna för utvinning inte blir för stora.

I planeringsrapporten: Vågenergi i Sverige (NE 1977:4) redovisas preliminära uppskattningar av tillgänglig vågenergi i Sverige och en kostnadsberäkning för energi utvunnen med hjälp av en omvandlare av bojtyp. För att pröva antagandena i kostnadsberäkningen och för att öka förståelsen för de problem, som är förknippade med vågenergiutvinning, studeras nu en omvandlare av bojtyp mera ingående av Gruppen för vågenergiforskning.

Vågenergiomvandlaren tänks utgöras av en boj enligt figur 1.1. Genom bojen löper en stång, som i sin nedre ände är försedd med ett mothåll i form av en skiva. I sin övre ände är stången försedd med dels en magnetstav, vilken fungerar som den fasta delen i en linjär elgenerator, dels en mindre flytkropp för att hålla stången uppe. Bojen, som drivs av vågornas rörelse, bär elgeneratorns induktordel.

Den föreliggande rapporten är ett led i bestämningen av bojens hydrauliska egenskaper, vilka man måste känna för att kunna beräkna effektupptagningen ur vågorna. Parallellt med laboratorieförsöken bedrivs fältförsök i sjön Lygnern öster om Kungsbacka, där praktiska problem kan lösas under realistiska förhållanden i ungefärlig skala 1:3.



Figur 1.1 Principskiss av senaste omvandlaren i sjön Lygnern.

2. AVSIKT MED MODELLFÖRSÖKEN

Avsikten med de försök över bojars hävning (svängning i vertikalled) som utförs vid institutionen för vattenbyggnad och skeppshydromekanik är dels att verifiera de teoretiska samband som ställts upp, dels att bygga upp mätteknik, beräkningsmetoder och erfarenheter för de mera komplicerade kompletta försöken med energiupptagaren i funktion.

I en tidigare rapport GR:11 från Gruppen för vågenergiforskning har de försök som utförts i rännor avrapporterats. De försöken gäller i sträng mening för en rad bojar som samtidigt träffas av en vågfront, fastän försöken utvärderats så att de redovisade resultaten approximativt skulle gälla för en enstaka omvandlare. Då dessa försök utfördes fanns inte vågbassängen.

De i denna rapport redovisade försöken har utförts i den 9.3 m breda vågbassängen i vattenbyggnadslaboratoriet, varför försöken gäller för en ensam boj.

Försök med energiupptagaren i funktion har utförts av Institutionen för elektromaskinlära i vågrännan hos Skeppshydromekanik: Rapport GR:14 från Gruppen för vågenergiforskning. Motsvarande försök kommer också att genomföras i bassängen.

3. TEORETISK BAKGRUND

3.1 Förutsättningar

Svängningarna hos en vågboj eller energiomvandlare antas kunna beskrivas av en linjär differentialekvation av andra ordningen, vilket beskrivits ingående i gruppraporten GR:10 eller mera översiktligt i planeringsrapporten: Vågenergi i Sverige (NE 1977:4). Den i den föreliggande rapporten direkt tillämpade teorin återfinns också i rapporten om hävningsförsöken i rännor (GR:11, 1978). Här kommer endast vissa resultat ur teorierna att anges.

Till skillnad från vid försöken i vågrännorna har vid försöken i bassängen avläsningen av svängningarna skett så pass sent i vågtåget att fullt utbildat fortvarighetstillstånd erhållits, men dock så tidigt att inga reflexioner från bassängens sidor eller vågdämpare nått bojen.

3.2 Svängningsekvationen

En kraftjämvikt för en vågenergiomvandlare av bojtyp, som svänger i vertikalled på grund av en infallande sinusvåg $\zeta = \zeta_o \cos \omega t$, ger följande svängningsekvation

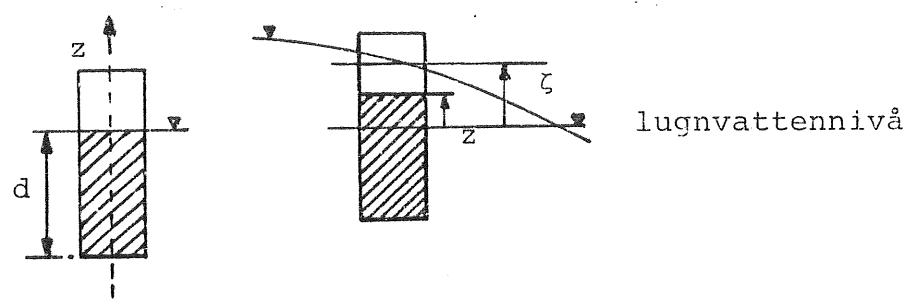
$$(m+a)\ddot{z}+(b+b_1)\dot{z}+cz = F \cos (\omega t+\alpha) \qquad \ldots (3.1)$$

där

m	är	bojens massa, inklusive de delar av generatorn som är fästa på bojen
a		den medverkande vattenmassan (added mass)
b		den hydrodynamiska dämpningen
b_1		dämpkonstanten för den energiupptagande generatorn (Energiupptagningen antas proportionell mot hastigheten)
c		fjäderkonstanten för den hydrostatiskt återförande kraften ($c=\rho gA$, där A är vattenlinjearean)
z		förskjutning från jämviktsläget (se fig.3.1)
F		amplituden hos den drivande kraften
k		vågtalet $2\pi/L$
L		våglängd
ω		cirkelfrekvensen för vågrörelsen $2\pi/T$

T	vågperiod
t	tiden
α	fasförskjutningen mellan den drivande kraften och vågrörelsen
d	sjunkdjupet (se fig. 3.1)

Den medverkande vattenmassan a och den hydrodynamiska dämpningen b är funktioner av frekvensen hos vågrörelsen, bojens form och djupgående. Approximativt har antagits att a och b är oberoende av bojens förskjutning från jämviktsläget och att värdena på a respektive b/ω vid resonansfrekvensen gäller för hela frekvensområdet.



Figur 3.1 Definition av några beteckningar.

3.3 Fri dämpad svängning

Värdena på a och b vid resonansfrekvensen kan bestämmas med försök där man förskjuter bojen en viss sträcka från sitt jämviktsläge och sedan släpper den momentant. Ur formen på den uppmätta dämpade svängningen beräknas sedan a och b samt resonansfrekvensen ω_o.

$$\omega_o = \sqrt{c/(a + m)} \qquad \ldots (3.2)$$

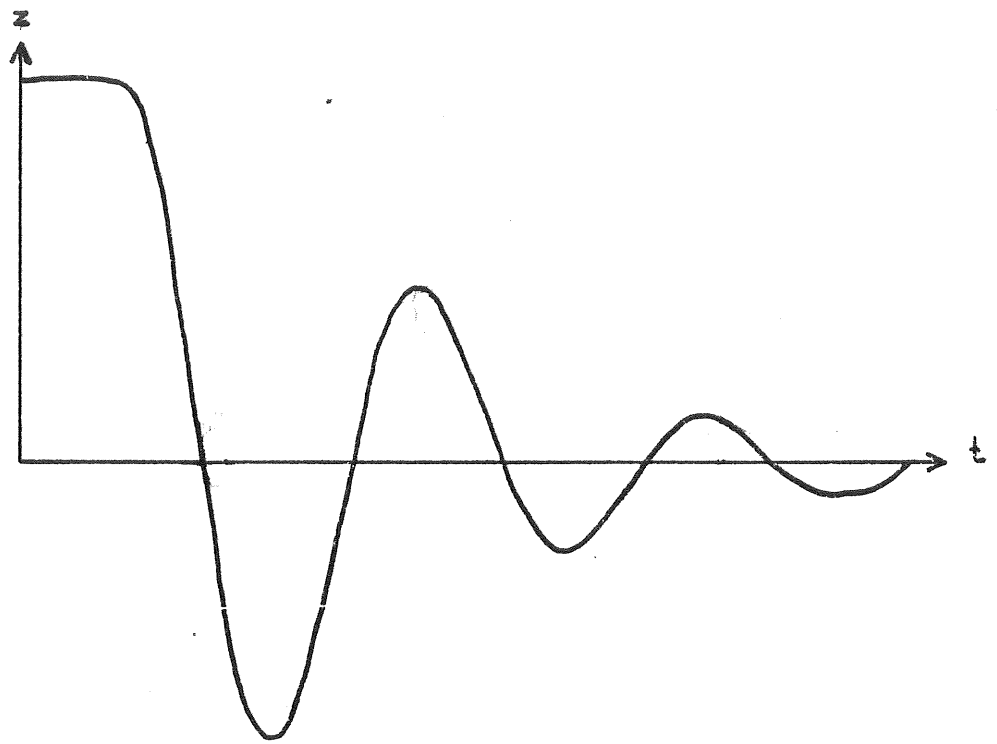
Ett exempel på en registrering visas i fig. 3.2. För de olika bojarna har sedan de dimensionslösa storheterna masskoefficienten

$$\mu = a/m = a/(\rho V) \qquad \ldots (3.3)$$

och dämpkoefficienten

$$\varepsilon = b/(m\ \omega) = {}^{b}/(\rho V\omega) \qquad \ldots (3.4)$$

båda uppritats som funktioner av det normerade deplacementet $\hat{V} = V/(\pi r^3\ 2/3)$, där V är deplacementet och r bojens radie.



Figur 3.2 Exempel på registrerad dämpad svängning. Bojens läge som funktion av tiden t.

3.4 Amplitudresponsfunktionen

Ur den linjära teorin erhålles förhållandet mellan bojens amplitud och vågens amplitud på grunt vatten till

$$Y = \frac{z_o}{\zeta_o} = \left[\frac{(c-a\omega^2)^2 + (b\omega)^2}{(c-(m+a)\omega^2)^2 + (b\omega)^2}\right]^{1/2} \cdot \frac{\cosh k(h-d)}{\cosh k\ h} \qquad \ldots (3.5)$$

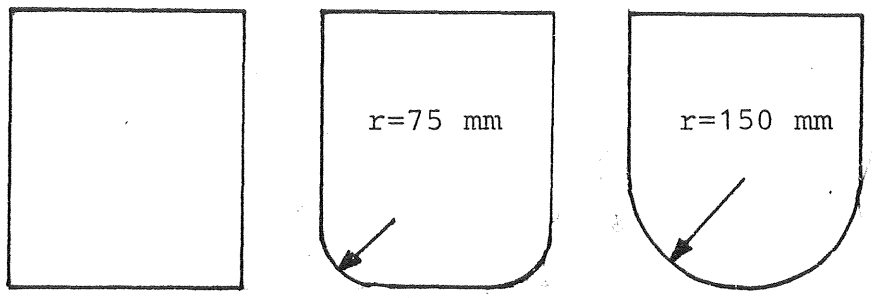
Y kallas amplitudresponsfunktionen, h är vattendjupet. På djupt vatten kan de hyperboliska funktionerna bytas mot exponentialfunktionen e^{-kd}.

Vid försöken har amplituderna z_o och ζ_o uppmätts för olika frekvenser, bojvikter och bojformer, och förhållandet $Y = z_o/\zeta_o$ har uppritats som funktion av frekvensen $f = \omega/2\pi$. Jämförelse mellan teori och försök samt mellan försöken i bassängen och de tidigare försöken i rännan har gjorts.

4. FÖRSÖKSUTRUSTNING

4.1 Provade bojar

I bassängen har de tidigare använda större bojarna med diametern 300 mm provats. Bojarna har cirkulärt tvärsnitt i planet. I figur 4.1 visas bojarnas elevation. Deplacements-vikterna 5.50, 8.50 och 11.50 kg har provats vilket ger djup-gåendena enligt tabell 4.1 nedan. De olika vikterna åstad-koms genom att ställa vikter på bojarna.



Bojtyp I II III

Figur 4.1 Elevation av de provade bojarna.

Tabell 4.1 Djupgåenden (mm) för de tre bojarna vid olika deplacementsvikt.

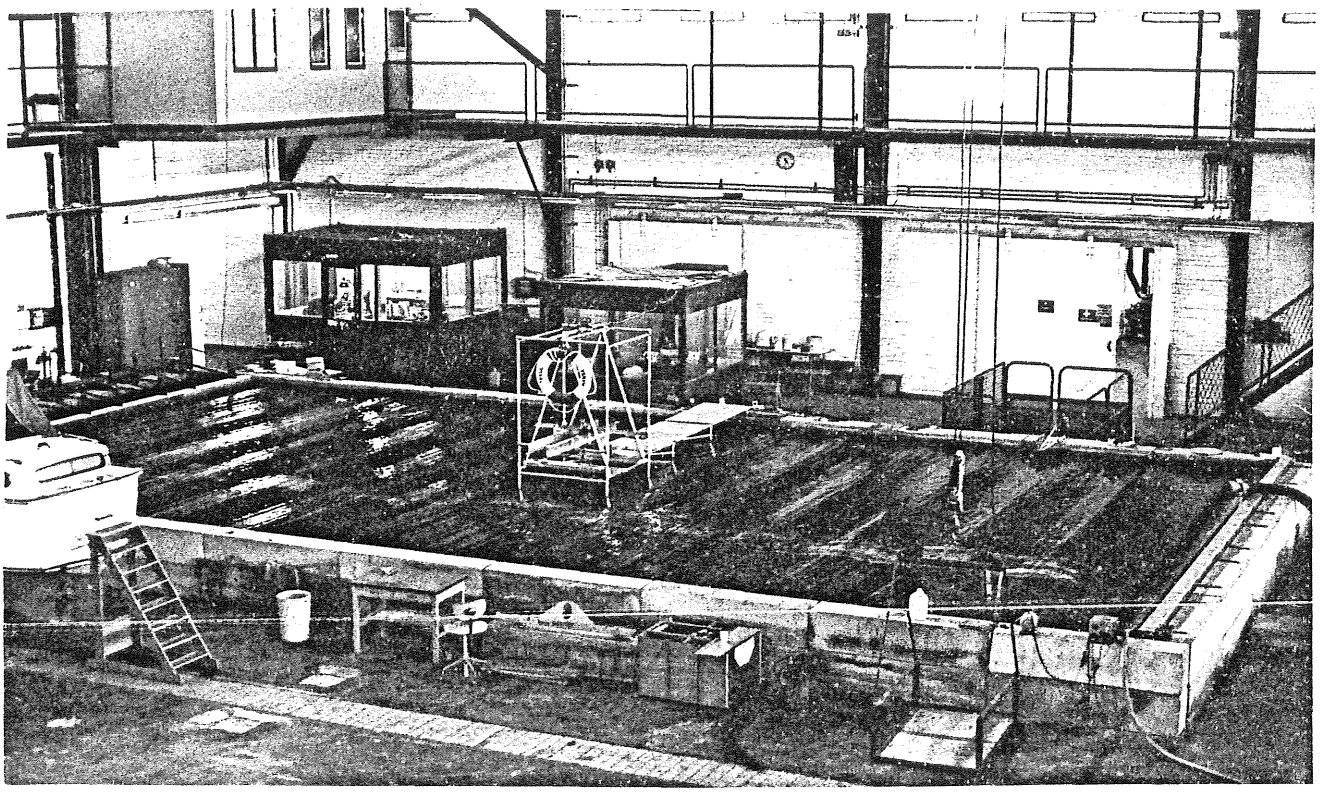
Massa m (kg)	5.50	8.50	11.50
Normerat deplacement $\hat{V}$	0.78	1.20	1.63 x)
Bojtyp I	78	120	163
II	96	138	181
III	157	199	242

Modellbojarna tillverkades av bonocell och svarvades till önskad form. De ströks med topcoat två gånger och målades med högblank färg för att erhålla önskad ytfinish.

x) Normerat deplacement är deplacementsvolymen V dividerat med volymen av en halvsfär med samma radie r som bojen
$\hat{V} = V/(2\pi r^3/3) = m/(2\rho\pi r^3/3)$

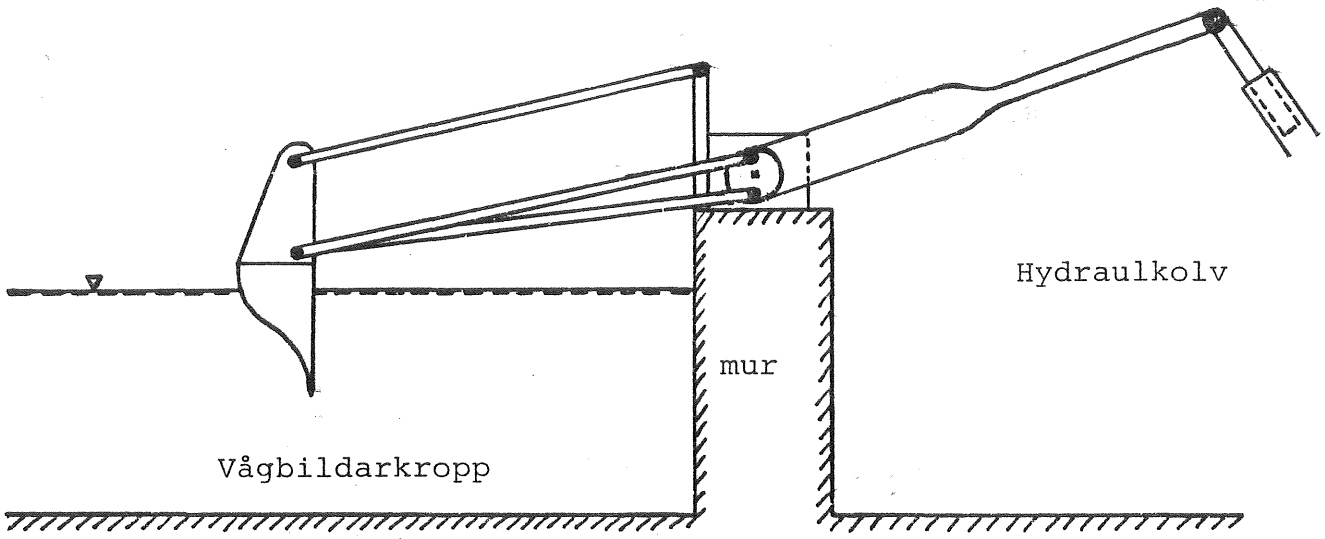
4.2 Vågbassängen

Den för försöken uppbyggda vågbassängen har måtten (L x B x D) = 18,3 x 9,3 x 0,8 m. Mitt i bassängen har en ställning av aluminiumrör placerats för att möjliggöra montage av bojarnas upphängningsanordning. En landgång på stöttor leder ut till ställningen. Se figur 4.2.

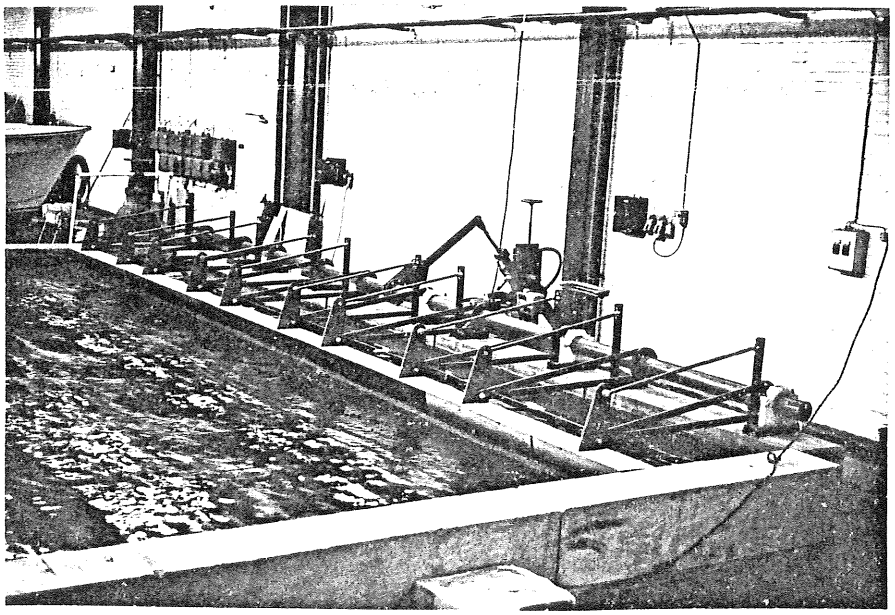


Figur 4.2 Bassäng med mätställning i vattenbyggnadslaboratoriet.

I bassängens ena kortände har en våggenerator av kiltyp satts upp. Vågbildarens kil drivs med hjälp av en servostyrd hydraulcylinder. I de försök, som redovisas här, har kilen fått beskriva en sinusformad rörelse för att åstadkomma regelbundna vågor. Senare skall oregelbundna vågor genereras för att undersöka bojarnas beteende i oregelbunden sjö. Se figur 4.3 och 4.4.

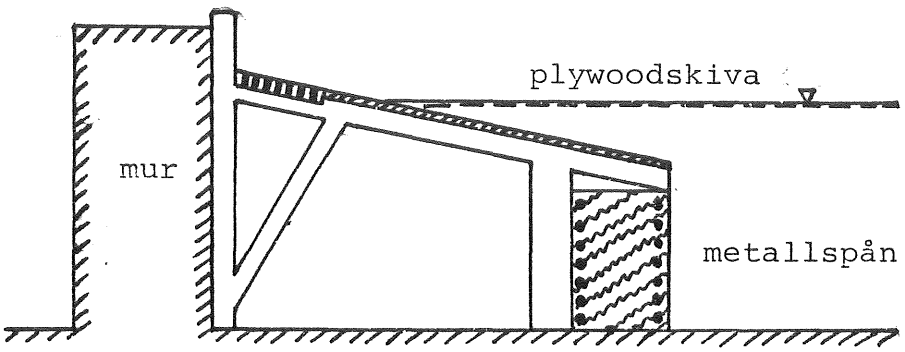


Figur 4.3 Sektion av vågbildaren.



Figur 4.4 Vågbildare på plats i bassängen.

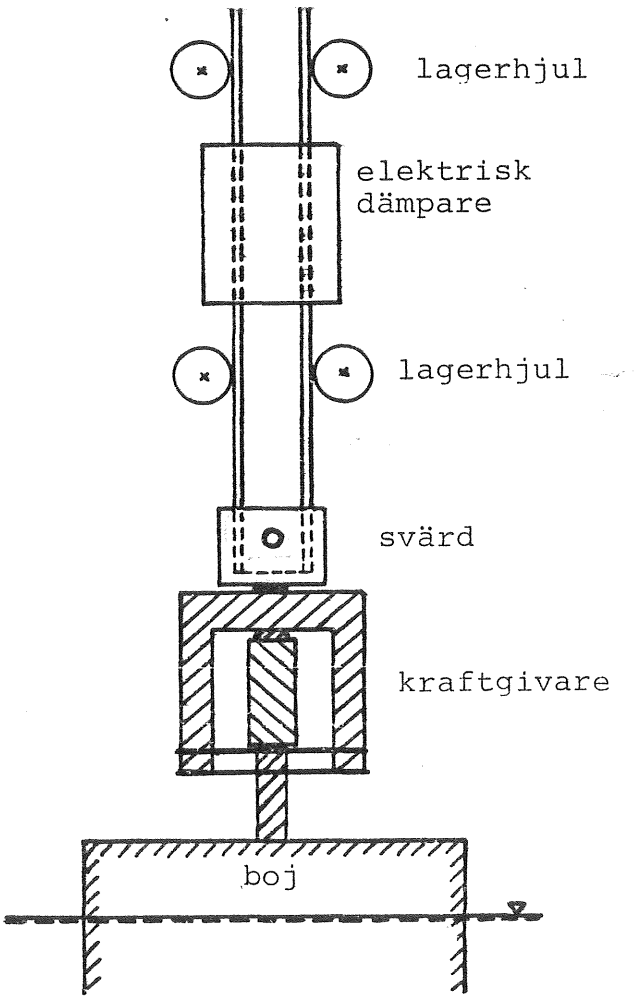
I den andra kortänden av bassängen har en vågdämpare i form av en sluttande strand byggts upp (se figur 4.5). Stranden fungerar väl vid de frekvenser (0.7 - 1.6 Hz) som använts i försöken.



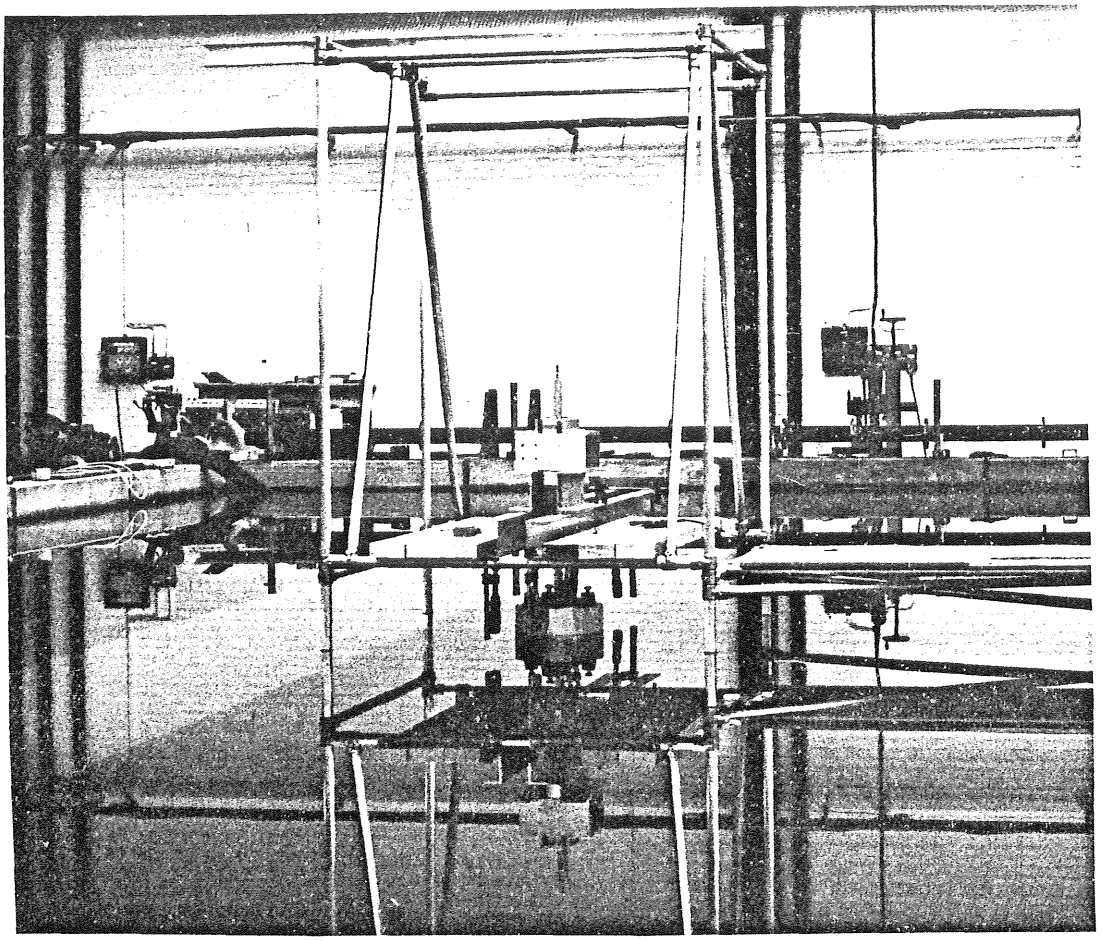
Figur 4.5 Sektion av vågdämparen.

4.3 Upphängningsriggen

Modellbojarna provades i en frihetsgrad, hävning, dvs rörelse i vertikalled. En upphängningsrigg med fyra lagerhjul enligt figur 4.6 användes. Riggens utformning bestämdes bl.a. utgående från den linjära elmotor som används vid försöken med elektriskt dämpad boj.



Figur 4.6 Sektion av upphängningsriggen.



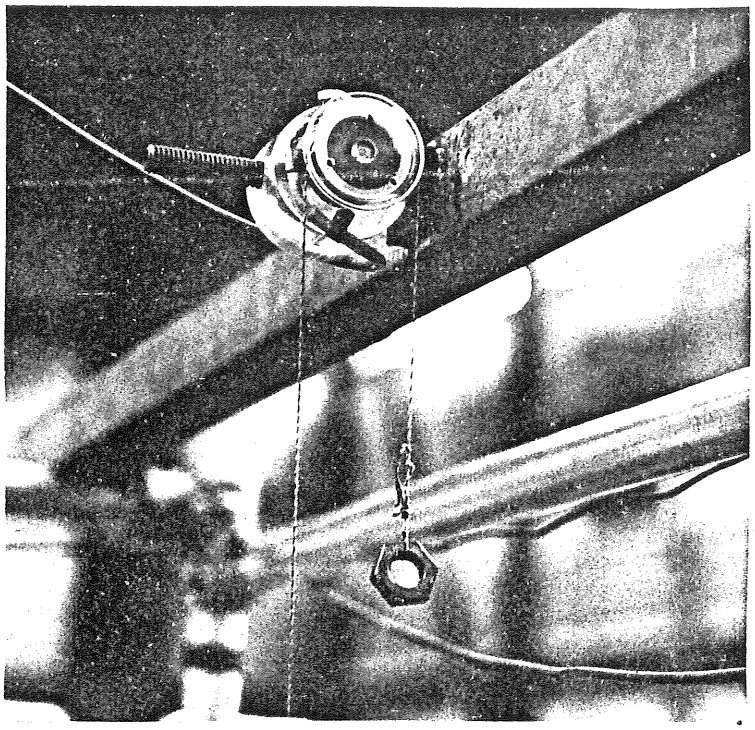
Figur 4.7 Foto av riggen monterad i bassängen.

4.4 Mätutrustning

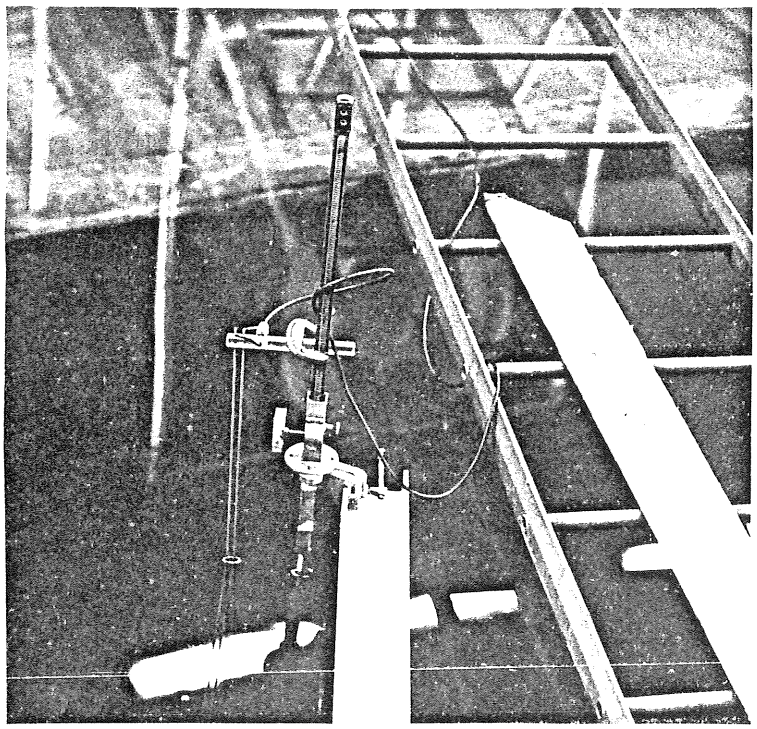
Modellbojarnas rörelse registrerades med hjälp av en potentiometer genom att från bojen sträcka en tråd över en trissa på potentiometeraxeln. Tråden hölls sträckt med en vikt på 60 g i den fria änden (se fig. 4.8). Potentiometern, som hade försumbar friktion, matades från en enhet där utsignalen kunde balanseras och förstärkas. Linjäriteten var god.

Vågorna mättes i en punkt i höjd med modellen mitt mellan denna och sidoväggen. Våggivaren var av konduktivitetstyp och matades med en växelspänning med hög frekvens (1 kHz) från en enhet i vilken mätsignalen balanserades och förstärktes (se figur 4.9).

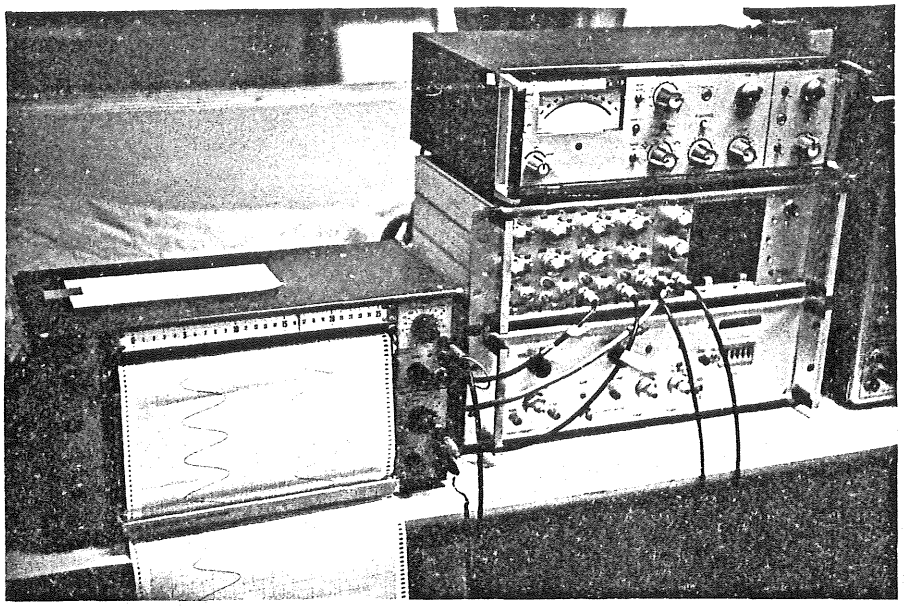
Mätsignalerna registrerades på en 2-kanals bläckskrivare (se figur 4.10).



Figur 4.8 Potentiometerhjul med snöre och vikt



Figur 4.9 Våggivare.



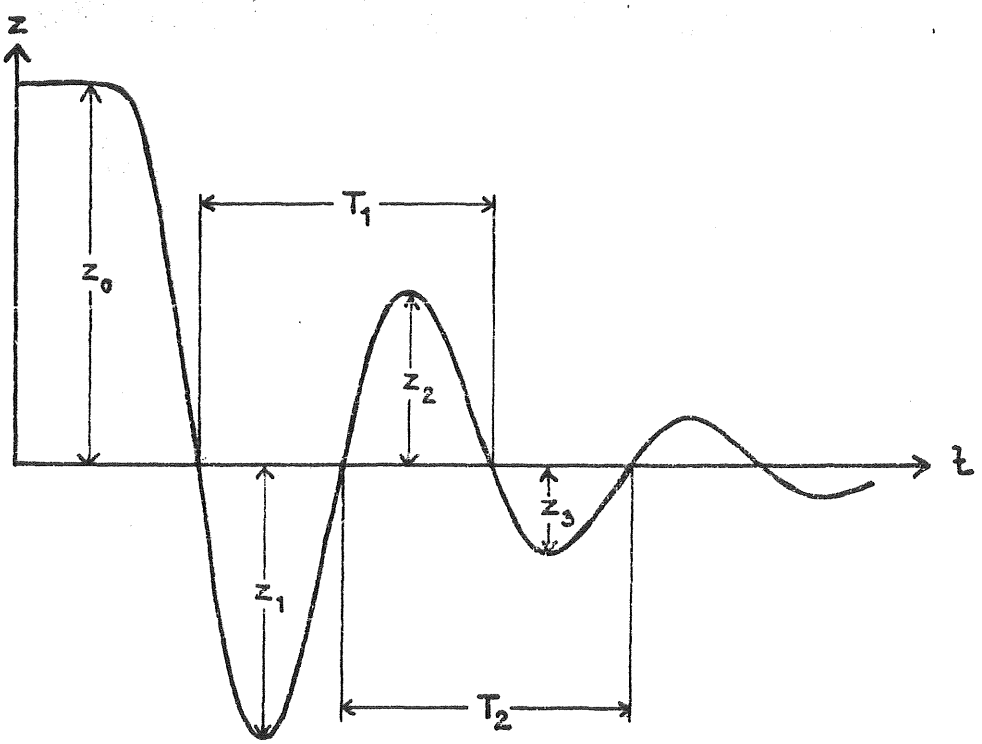
Figur 4.10 Förstärkarenheten för våggivare och lägesgivare (Dansk Hydraulisk Institut) samt tvåkanals servoskrivare (Hewlett Packard).

5. FÖRSÖKSUTFÖRANDE OCH UTVÄRDERINGSMETODER

5.1 Egensvängningsförsök

Före varje försök i regelbundna vågor utföres egensvängningsförsök för den aktuella bojen (Jfr avsnitt 3.3). Modellen lyftes då en bestämd sträcka och släpptes momentant, varvid egensvängningsrörelsen registrerades på skrivaren. Därefter gjordes motsvarande försök med modellen nedtryckt lika lång sträcka.

Ett av skrivaren registrerat typiskt förlopp visas i figur 5.1. På skrivarpappret mättes den ursprungliga släpphöjden z_o och de tre efterföljande svängningsutslagen z_1, z_2 och z_3, liksom perioderna T_1 och T_2, alla definierade i figuren.



Figur 5.1 Exempel på registrering av egensvängningsförsök.

Dämpkonstanten k_i har sedan beräknats som

$$k_i = (1/T_i) \ln (z_{i-1}/z_{i+1}) \qquad \ldots (5.1)$$

där för index i=1 har använts T_1, z_o och z_2

och för index i=2 T_2, z_1 och z_3.

Den medsvängande vattenmassan a_i och den hydrodynamiska dämpningen b_i har därefter erhållits som

$$a_i = \frac{c}{(2\pi/T_i)^2 + k_i^2} - m \qquad \ldots (5.2)$$

$$b_i = 2k_i \ (a_i + m) \qquad \ldots (5.3)$$

Slutligen har de dimensionslösa talen $\mu_i = a_i/m$ (masskoefficienten) och $\varepsilon_i = b_i \ T_i/(m2\pi)$ (dämpkoefficienten) beräknats. Medelvärden har beräknats för de försök som utförts för varje speciell kombination av bojmodell och bojvikt.

5.2 Försök i regelbundna vågor

Excentriciteten (amplituden) och perioden ställdes in på styrenheten till vågbildaren. Den senare startades sedan genom att sätta på arbetstrycket till hydraulpumpen. Samtidigt slogs pappersmatningen på till skrivaren. I allmänhet används pappershastigheten 5 mm/s. Vågor och bojrörelser registrerades under cirka 1 minut efter det att vågfronten nått bojen. Kalibrering av läges- och nivåmätning utfördes före och efter varje dags försök. Anmärkningsvärda företeelser antecknades i protokollet.

Ett representativt förlopp visas i figur 5.2. Ett stycke in i registreringen, där vågrörelsen och bojens rörelse blivit ganska regelbundna, bestämdes medelvärden av dubbelamplitud $2\,\bar{z}_o$, $2\bar{\zeta}_o$ och periodtid över vanligtvis tio perioder.

Utvärderingsavsnittet ligger så tidigt i registreringen att reflexioner från bassängens strandände (vågdämpare) eller mellan boj och bassängens sidor inte har hunnit påverka rörelsen.

Amplitudresponsen Y dvs förhållandet mellan bojens rörelseamplitud $\bar{z}_o$ och vågamplituden $\bar{\zeta}_o$ har slutligen uppritats som funktion av frekvensen.

$$Y = \frac{\bar{z}_o}{\bar{\zeta}_o} \qquad \ldots (5.4)$$

Försök nr: 781013-33

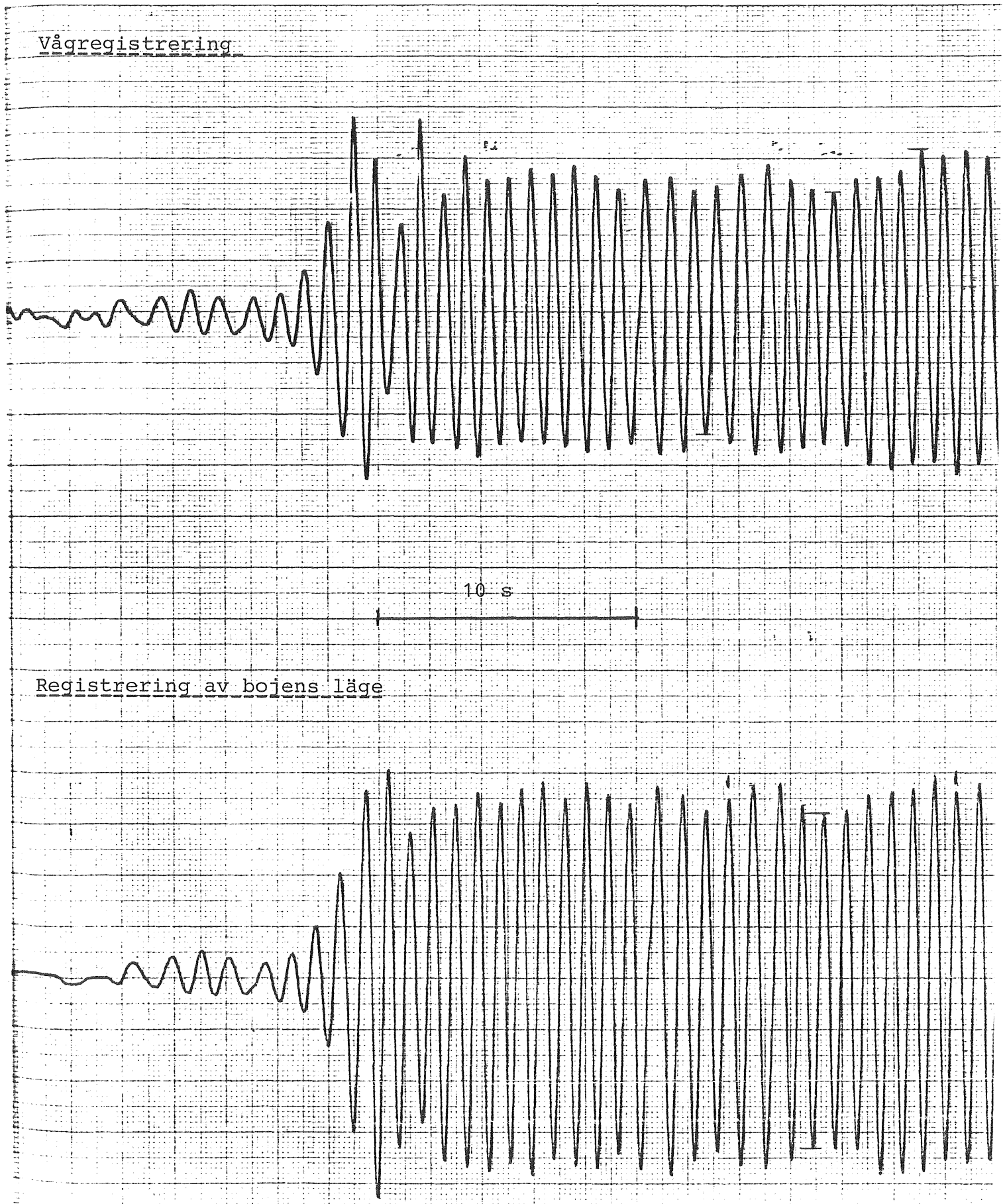


Fig. 5.2 Försök i regelbundna vågor.

6. UTFÖRDA FÖRSÖK

De tre bojmodeller och tre bojvikter, som tidigare provats i den breda rännan (1.82 m) hos skeppshydromekanik har nu provats i bassängen. Bojarna är beskrivna i avsnitt 4.1. Varje kombination av boj och bojvikt har körts i regelbundna vågtåg med cirka femton olika frekvenser från 0.7 Hz till 1.6 Hz. Till grund för de redovisade amplitudresponskurvorna ligger således c:a 3 x 3 x 15 = 135 försök.

Före varje försök i regelbundna vågor har minst fyra egensvängningsförsök utförts med den aktuella bojen. Vid dessa försök har bojen släppts från en nivå av 50 och 40 eller 30 mm över respektive under sitt jämviktsläge. För varje bojtyp och vikt föreligger således minst 4 försök ur vilka vardera 2 värden på μ, ε och ω erhållits. Medelvärde och spridning har beräknats på dessa 8 (ibland 12) värden.

7. FÖRSÖKSRESULTAT

7.1 Egensvängningsförsöken

Resultaten från egensvängningsförsöken är redovisade dels i tabell 7.1 till 7.3 och dels i diagram 7.1 och 7.2. Redovisade värden är medelvärdet $\bar{x}$ och standardavvikelsen s_x för 8 (alt. 12) värden för en boj vid ett visst mättillfälle.

Samma kvalitativa slutsatser kan dras som för de tidigare försöken i rännorna. Masskoefficienten $\mu = a/(\rho V)$ avtar med ökande deplacement V eller djupgående d hos varje bojtyp. Likaså avtar masskoefficienten för ökande "strömlinjeformighet" hos kroppen.

Resultaten för den dimensionslösa dämpkoefficienten $\varepsilon = b/(\rho V \omega)$ visar också att denna avtar med ökande djupgående för varje bojtyp. Den rakt avskurna bojen (typ I) har högre dämpkoefficient än de två andra typerna. Skillnaden mellan typ II och III är dock obetydlig.

Tabell 7.1
Masskoefficienten μ för olika bojmodeller och deplacementsvikter ρV, Ø 300 mm.
Försök i bassäng med vattendjup 0.663 m.
$\bar{\mu}$ medelvärde, S_μ standardavvikelse.

Bojtyp		I		II		III	
ρV (kg)	$\hat{V}$	$\bar{\mu}$	S_μ	$\bar{\mu}$	S_μ	$\bar{\mu}$	S_μ
5.50	0.78	1.19	0.12	0.89	0.18	0.73	0.11
8.50	1.20	0.85	0.09	0.59	0.12	0.50	0.08
11.50	1.63	0.63	0.13	0.50	0.11	0.36	0.02

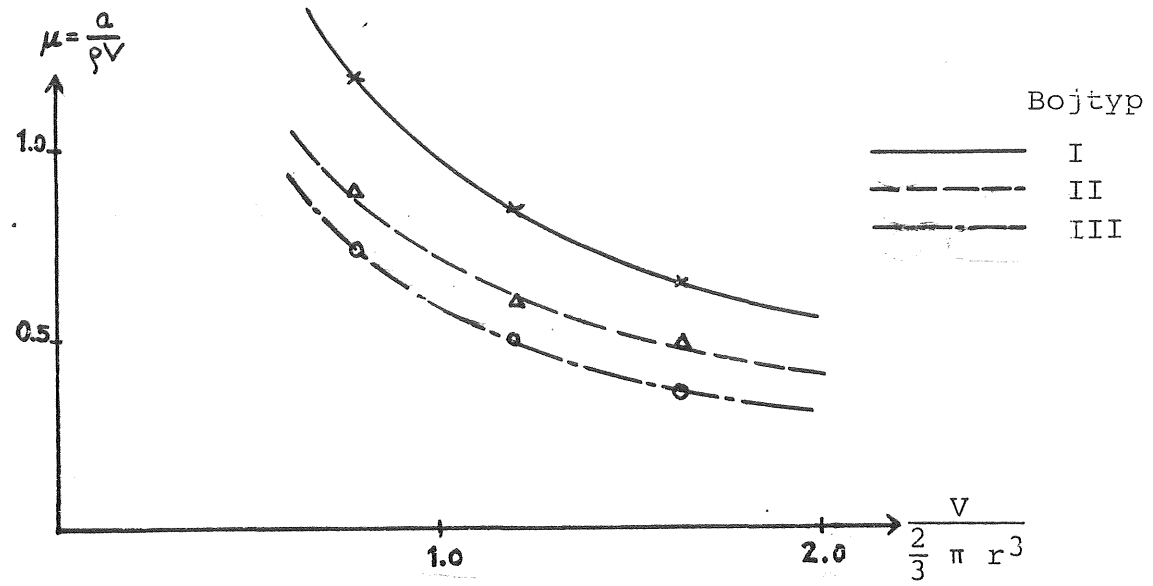
Tabell 7.2
Dimensionslös dämpkoefficient ε för olika bojmodeller och deplacementsvikter ρV, Ø 300 mm.
Försök i bassäng med vattendjup 0.663 m.
$\bar{\varepsilon}$ medelvärde, S_ε standardavvikelse.

Bojtyp		I		II		III	
ρV(kg)	$\hat{V}$	$\bar{\varepsilon}$	S_ε	$\bar{\varepsilon}$	S_ε	$\bar{\varepsilon}$	S_ε
5.50	0.78	0.59	0.09	0.45	0.05	0.45	0.05
8.50	1.20	0.39	0.08	0.25	0.04	0.26	0.03
11.50	1.63	0.25	0.03	0.20	0.03	0.18	0.03

Tabell 7.3
Uppmätt cirkelfrekvens (1/s) för den dämpade svängningen för olika bojmodeller och deplacementsvikter ρV, Ø 300 mm.
Försök i bassäng med vattendjup 0.663 m.
$\bar{\omega}$ medelvärde, S_ω standardavvikelse.

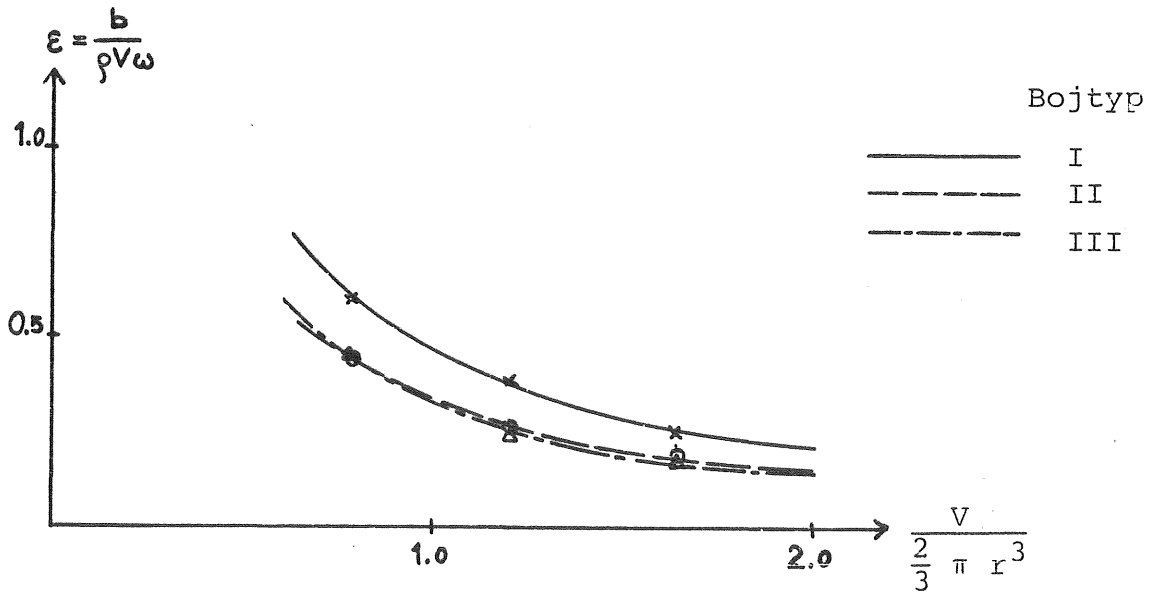
Bojtyp		I		II		III	
ρV(kg)	$\hat{V}$	$\bar{\omega}(s^{-1})$	$S_\omega(s^{-1})$	$\bar{\omega}(s^{-1})$	$S_\omega(s^{-1})$	$\bar{\omega}(s^{-1})$	$S_\omega(s^{-1})$
5.50	0.78	7.52	0.19	8.13	0.37	8.49	0.24
8.50	1.20	6.61	0.16	7.14	0.27	7.35	0.18
11.50	1.63	6.07	0.23	6.33	0.22	6.63	0.06

De i tabell 7.1 och 7.2 angivna medelvärdena på μ och ε har anpassats till funktioner av det dimensionslösa deplacementet $\hat{V} = V/(\pi r^3\ 2/3)$. Funktionerna är av typen $y = ax^b$. Ett program för linjär regression har använts, i vilket funktionen först omvandlats till $\ln y = \ln a + b \cdot \ln x$. Funktionerna av typen $y = a\ x^b$ visade sig ge bäst anpassning av de funktioner som undersökts i de tidigare utförda försöken i rännor och bassäng. (Se grupprapport GR:11). I tabellerna 7.4 och 7.5 nedan ges konstanterna a och b samt korrelationskoefficienten r för de anpassade ekvationerna för masskoefficienten respektive den dimensionslösa dämpkoefficienten. Motsvarande funktioner är inritade i figur 7.1 och 7.2



Figur 7.1 Medelvärdet för masskoefficienten μ för de tre provade bojformerna som funktion av det dimensionslösa deplacementet $\hat{V}$.

Försöksvärden enligt tabell 7.1 och anpassade kurvor enligt tabell 7.4.



Figur 7.2 Medelvärdet för den dimensionslösa dämpkonstanten ε som funktion av det dimensionslösa deplacementet $\hat{V}$. Försöksvärden enligt tabell 7.2 och anpassade kurvor enligt tabell 7.5.

Tabell 7.4

Konstanterna c_1 och c_2 samt korrelationskoefficienten r för funktionen $\mu = c_1 \hat{V}^{c_2}$ för försök i bassäng med boj Ø 300 mm.

Bojtyp	I	II	III
c_1	0.97	0.72	0.58
c_2	-0.86	-0.79	-0.95
r	-0.998	-0.998	-0.998

Tabell 7.5

Konstanterna c_3 och c_4 samt korrelationskoefficienten r för funktionen $\varepsilon = c_3 \hat{V}^{c_4}$ för försök i bassäng med boj Ø 300 mm.

Bojtyp	I	II	III
c_3	0.45	0.33	0.33
c_4	-1.15	-1.12	-1.24
r	-0.992	-0.989	-1.00

7.2 Försök i regelbundna vågor.

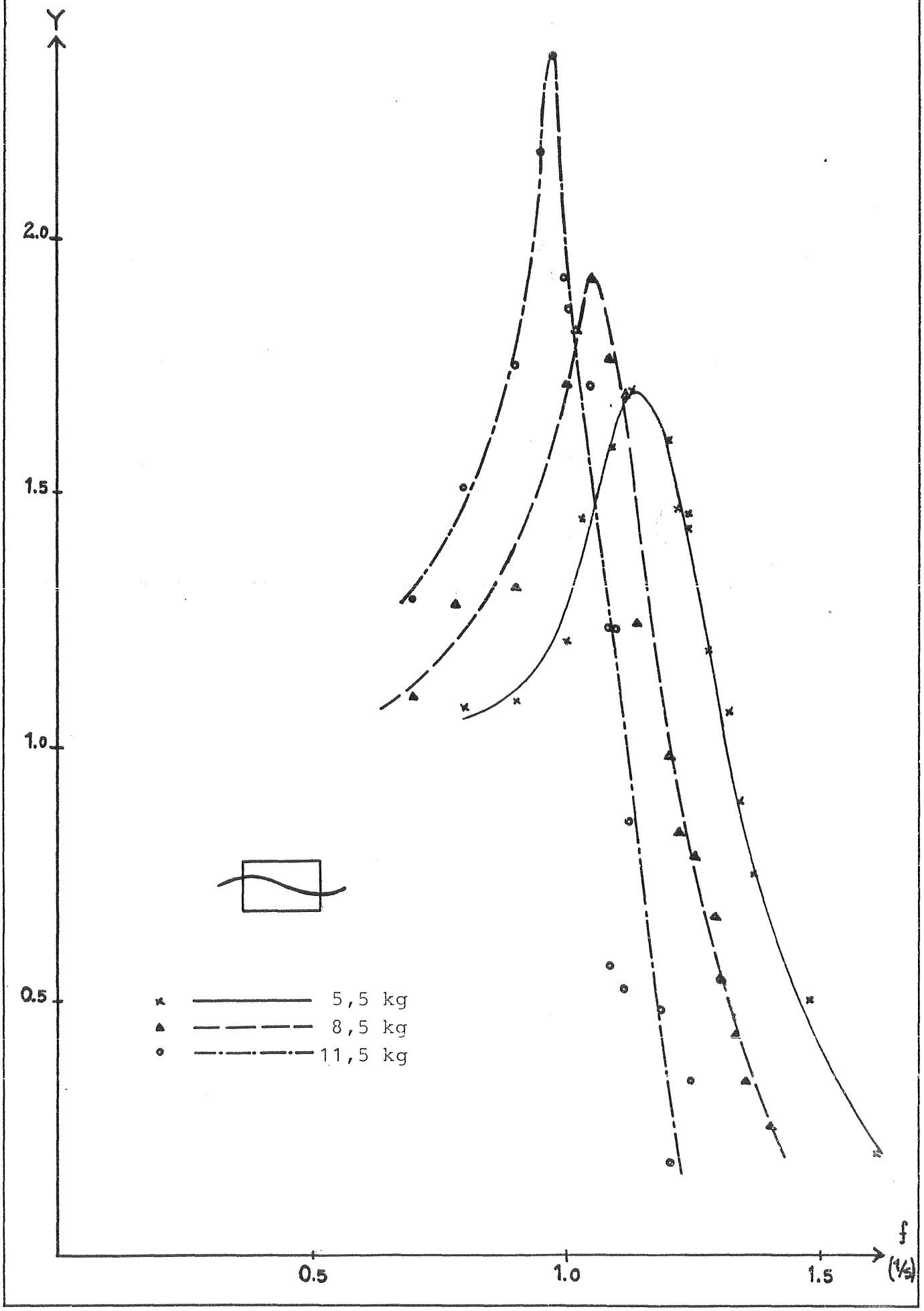
Resultaten från försöken i regelbundna vågor är redovisade i olika diagramserier nedan.

Den första serien diagram avser amplitudresponskurvor för samma bojtyp men med olika massa. Dessa diagram innehåller de plottade försöksvärdena, till vilka kurvor anpassats för hand (Figur 7.3-7.5).

Den andra serien utgör en jämförelse mellan de inpassade kurvorna för bojar med samma deplacement men med olika form (Figur 7.6 - 7.8).

Figur 7.3

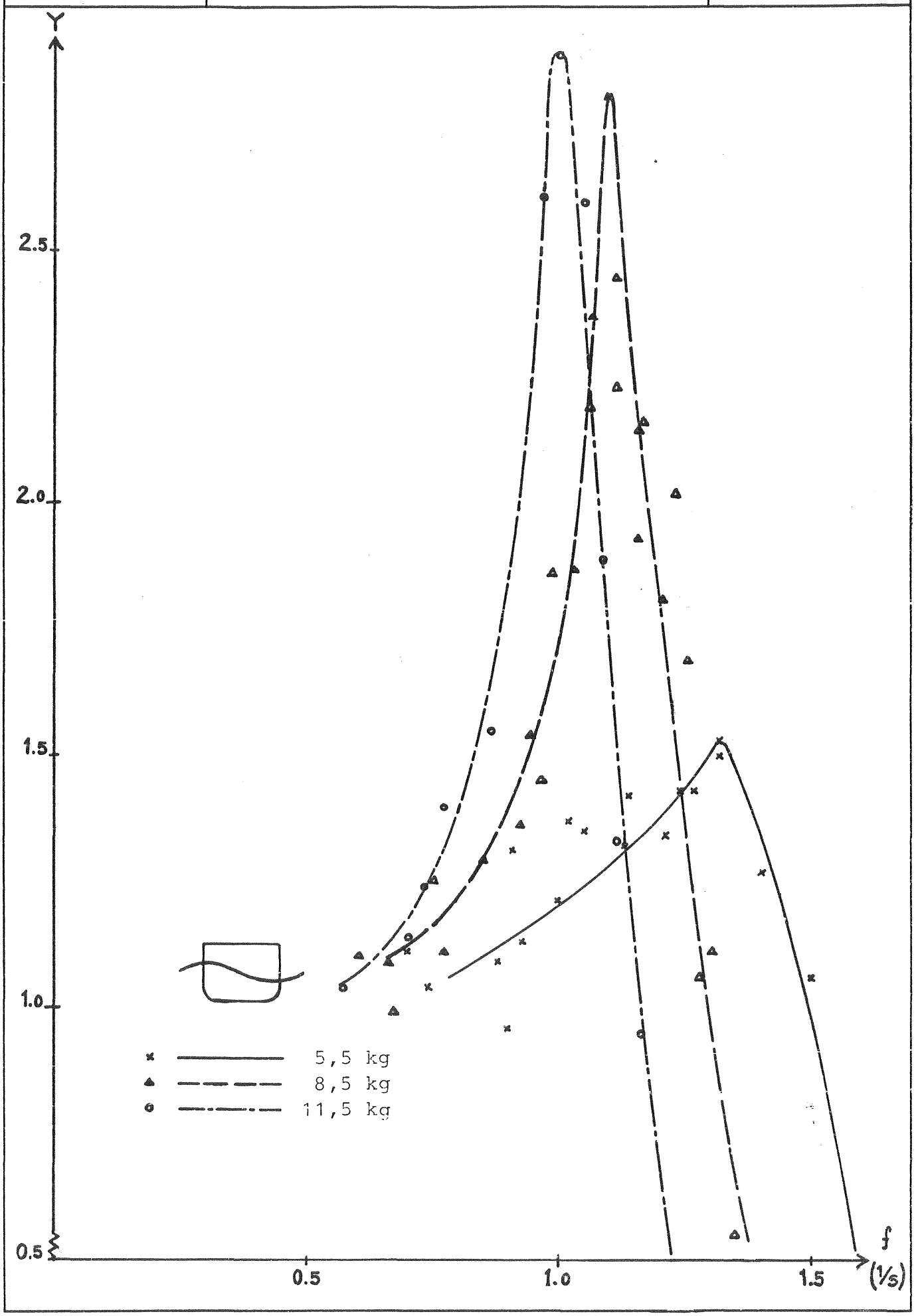
Uppmätt amplitudrespons Y som funktion av vågfrekvensen f för boj typ I med tre olika massor. Inprickade försöksvärden och kurvor inpassade för hand.



ESSELTE
7225

Figur 7.4

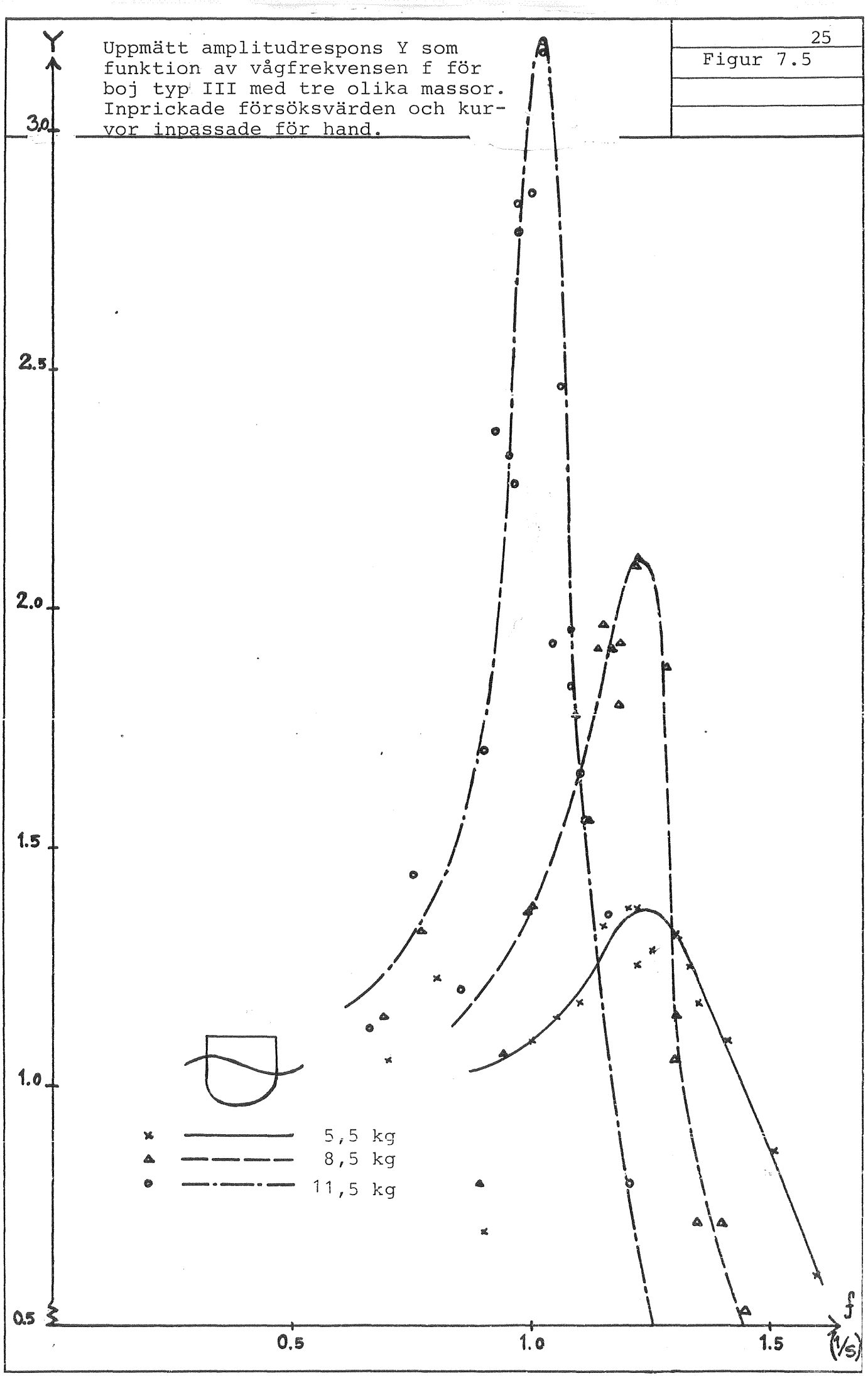
Uppmätt amplitudrespons Y som funktion av vågfrekvensen f för boj typ II med tre olika massor. Inprickade försöksvärden och kurvor inpassade för hand.



ESSELTE
17225

Figur 7.5

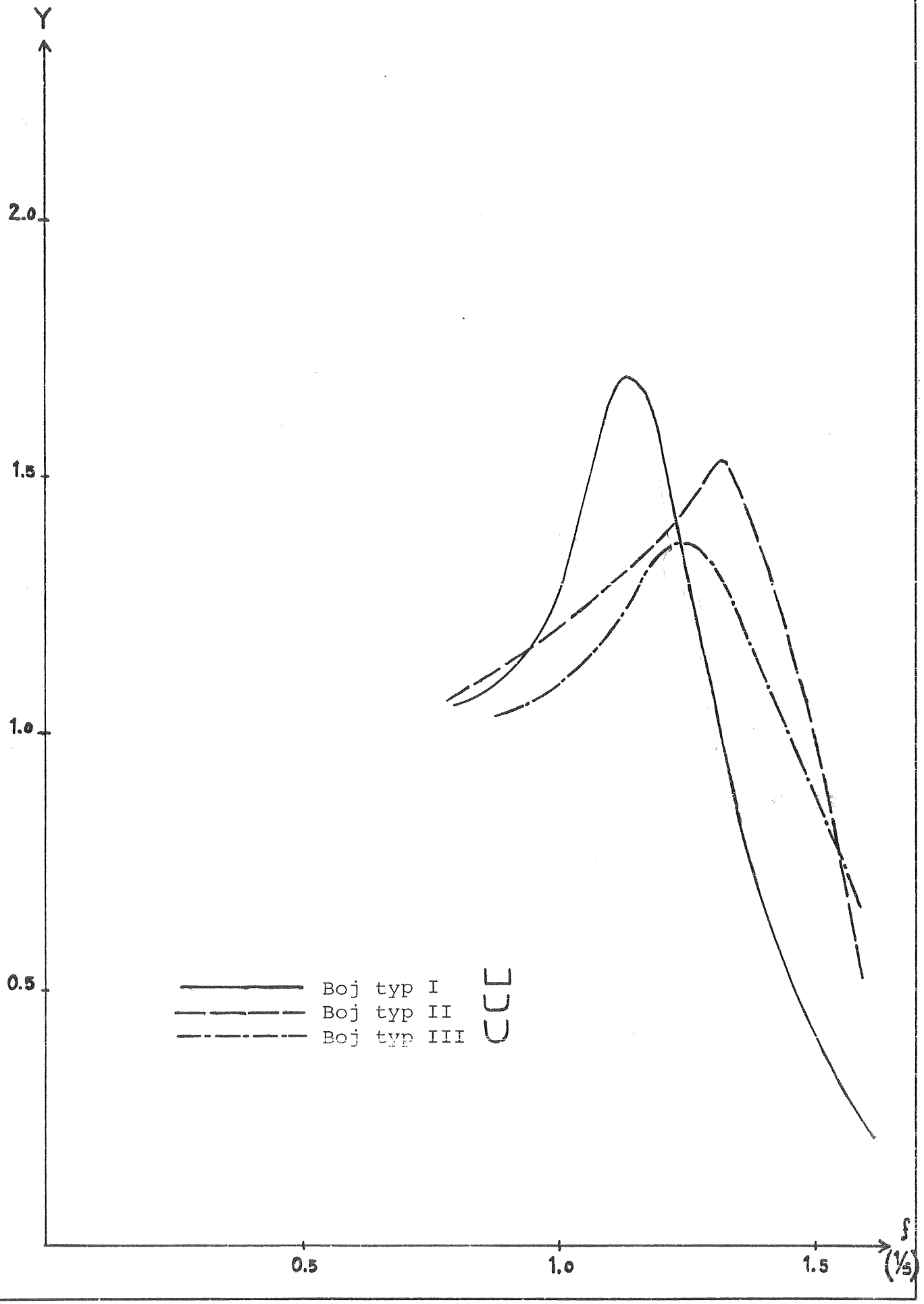
Uppmätt amplitudrespons Y som funktion av vågfrekvensen f för boj typ III med tre olika massor. Inprickade försöksvärden och kurvor inpassade för hand.



ESSELTE
17225

Figur 7.6

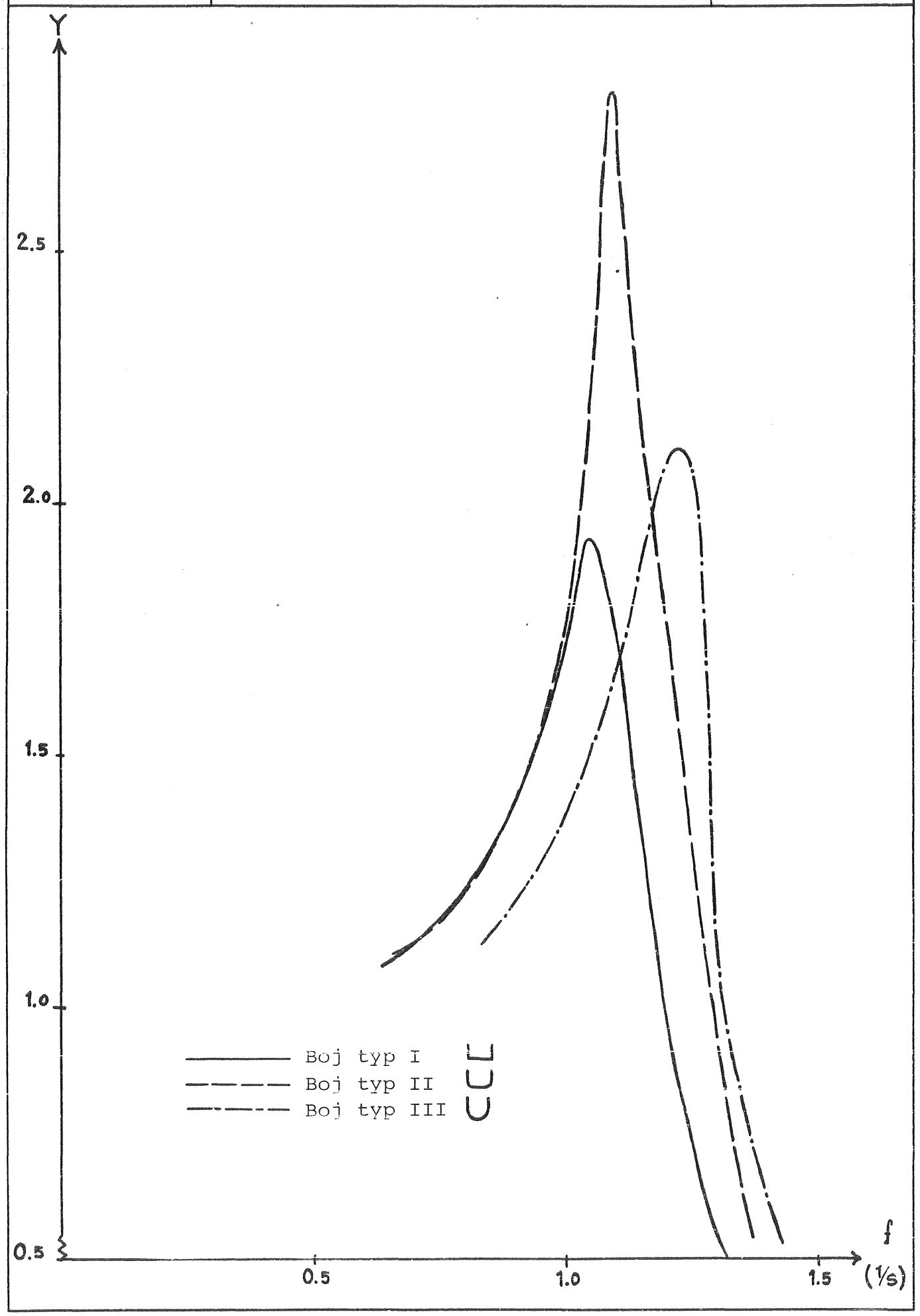
Amplitudresponskurvor från försöken för bojar med deplacementsvikten 5,5 kg



ESSELTE
7225

Figur 7.7

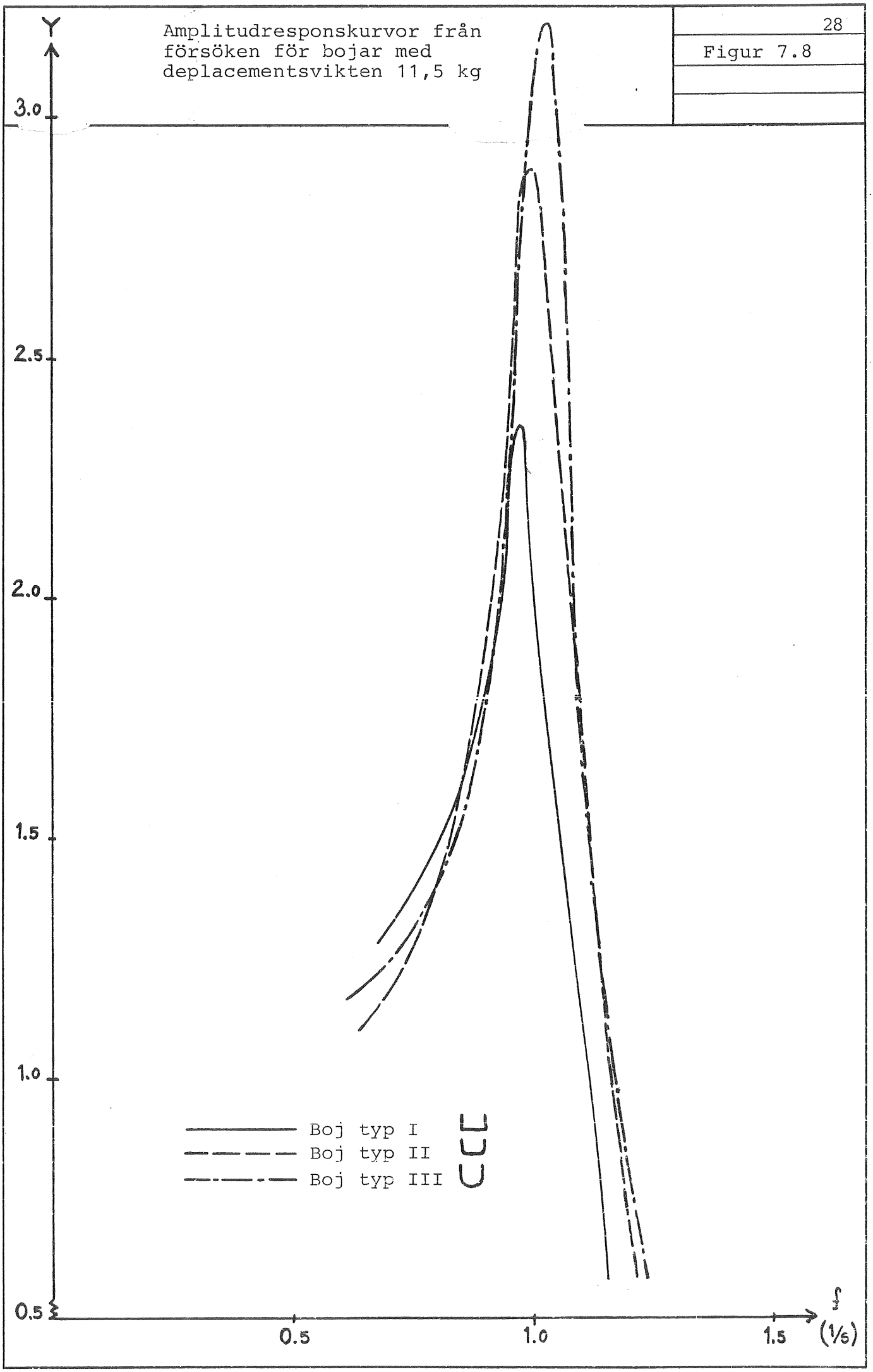
Amplitudresponskurvor från försöken för bojar med deplacementsvikten 8,5 kg.



ESSELTE
17225

Figur 7.8

Amplitudresponskurvor från försöken för bojar med deplacementsvikten 11,5 kg



ESSELTE
7225

8. JÄMFÖRELSE MED TEORI

I diagrammen figur 8.1 - 8.3 är de experimentella och beräknade amplitudresponskurvorna uppritade. Koefficienterna μ och ε i ekvation (3.5) har tagits från samhörande egensvängningsförsök. Sjunkdjupet för bojen har antagits lika med deplacementets medeldjup V/A dvs lika för bojar med samma massa och diameter. Detta är ett osäkerhetsmoment i den använda ekvationen (3.5) speciellt vad gäller den sfäriska bojen (typ III) eftersom det ostörda hydrodynamiska trycket är exponentiellt avtagande med djupet och inte linjärt avtagande. I tabellen 8.1 nedan redovisas värden på insatta storheter i amplitudresponsfunktionens ekvation (3.5).

Tabell 8.1
Storheter insatta i amplitudresponsfunktionen, ekvation (3.5).

Vattendjup $h = 0.663$ m
Fjäderkonstant $c = 693.4$ kg/s^2 (=N/m)
Jordaccelerationen $g = 9.81$ m/s^2

Bojtyp	Massa m (kg)	Masskoeff. μ -	Dämpkoeff. ε -	Sjunkdjup d (m)	Resonansfrekv. f 1/s
I	5.50	1.19	0.59	0.078	1.13
	8.50	0.85	0.39	0.120	1.00
	11.50	0.63	0.25	0.163	0.94
II	5.50	0.89	0.45	0.078	1.22
	8.50	0.59	0.25	0.120	1.11
	11.50	0.50	0.20	0.163	0.99
III	5.50	0.73	0.45	0.078	1.27
	8.50	0.50	0.26	0.120	1.14
	11.50	0.36	0.18	0.163	1.04

Överensstämmelsen mellan de teoretiskt beräknade kurvorna och de experimentella måste betecknas som god. För de tyngsta bojarna (m = 11.5 kg) är överensstämmelsen t.o.m. mycket god både med avseende på maximal amplitudrespons och med avseende på frekvensen för denna.

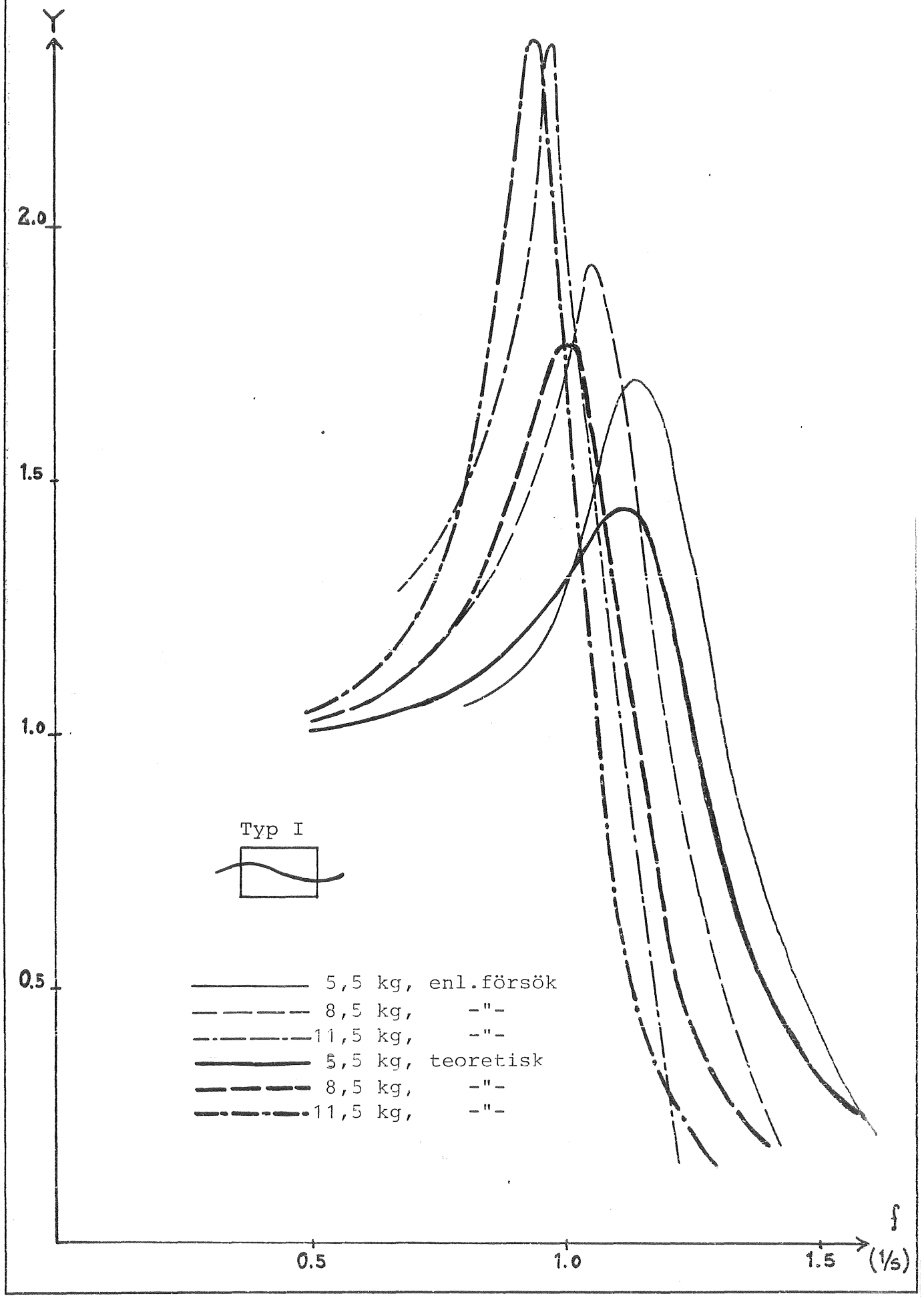
För de medeltunga bojarna (m = 8.5 kg) är överensstämmelsen något sämre. Speciellt gäller detta frekvensen för maxamplituden hos den sfäriska bojen (typ III, fig. 8.3)

För de lättaste bojarna (m = 5,5 kg) är avvikelsen måttlig men oregelbunden. På grund av friktion i upphängningen av bojen och vissa störningar i vågtågen är resultaten från dessa försök kvalitativt sett sämre än de andra försöken.

De uppmätta kurvorna är i allmänhet bredare än de beräknade, vilket innebär att ett direkt utnyttjande av de teoretiska sambanden för beräkning av energiupptagning kanske ger en underskattning av energiupptagningen.

Jämförelse mellan amplitudresponskurvor från försök och enligt teori. Bojar av typ I med olika vikt.

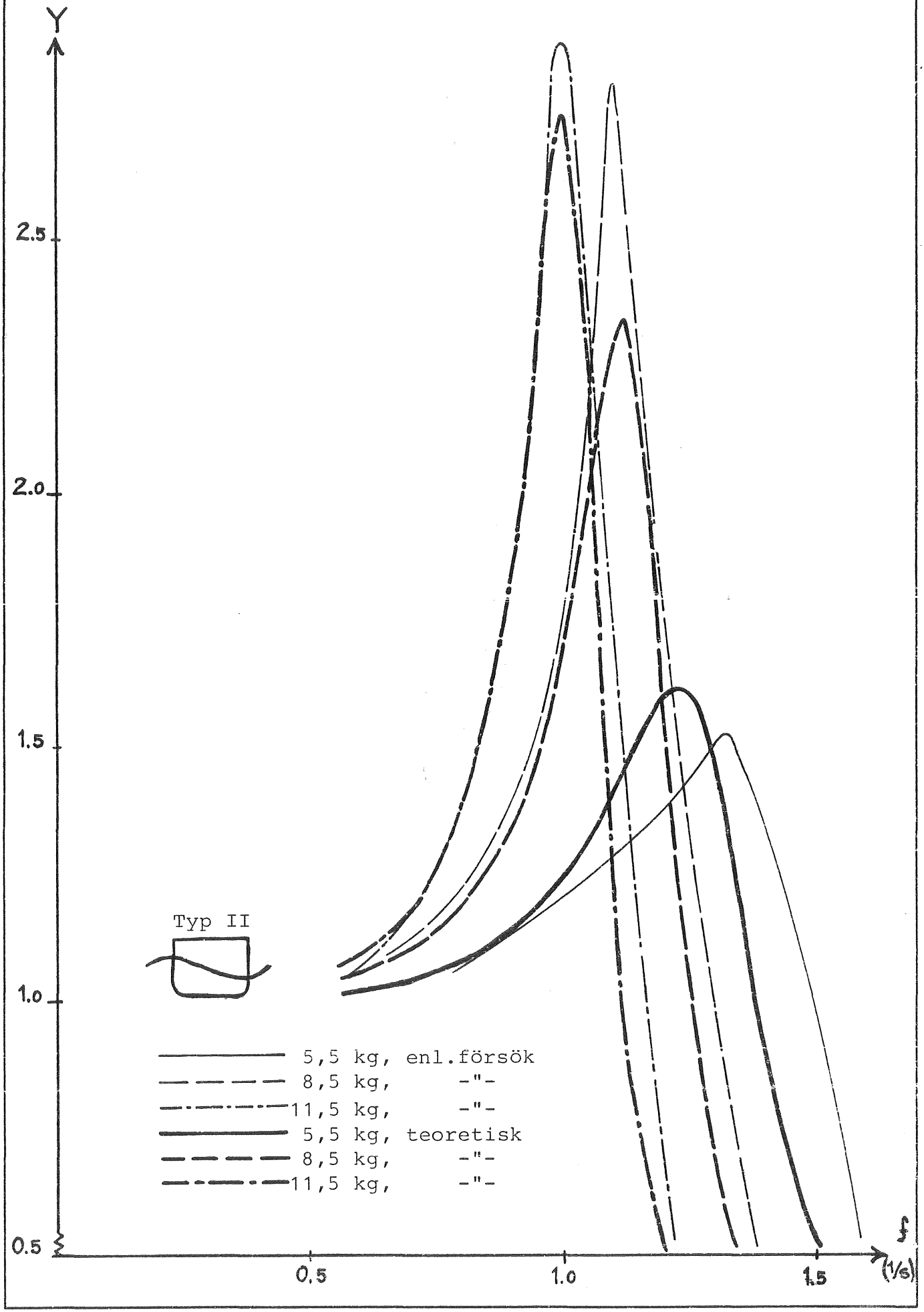
Figur 8.1



ESSELTE
7225

Figur 8.2

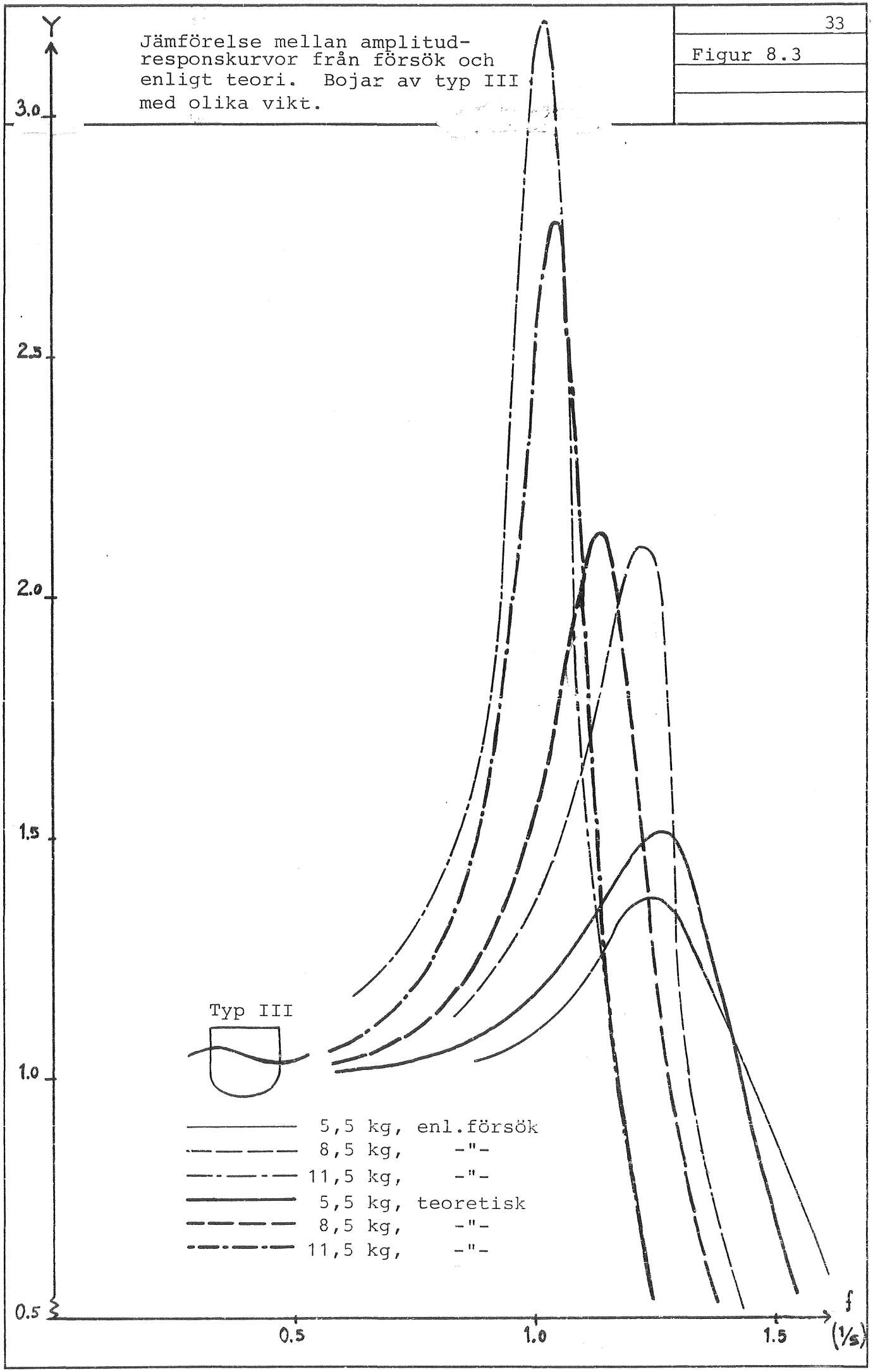
Jämförelse mellan amplitudresponskurvor från försök och enligt teori. Bojar av typ II med olika vikt.



ESSELTE
7225

Figur 8.3

Jämförelse mellan amplitud-responskurvor från försök och enligt teori. Bojar av typ III med olika vikt.



ESSELTE
17225

9. JÄMFÖRELSE MED RÄNNFÖRSÖK

I figur 9.1 - 9.3 redovisas de experimentella kurvorna från de tidigare utförda vågförsöken i skeppshydromekaniks ränna tillsammans med de nu i bassängen erhållna försökskurvorna. Försöken i rännan har tidigare redovisats i Grupprapport GR:11 från gruppen för vågenergiforskning.

Innan jämförelse görs, bör noteras, att vattendjupet i rännan hölls 0.78 m djupt, men att djupet i bassängen inte kunde hållas större än 0.66 m. En insättning av de olika djupen i amplitudresponsfunktionen visar emellertid att skillnaden i amplitud vid de två olika djupen är obetydlig enligt teorien: Vid f=0.94 Hz och boj typ III, vikt 11.5 kg ger de två djupen 0.78 och 0.663 m amplitudresponsfaktorn 2.3697 respektive 2.3579. Frekvensen påverkas enligt teorin inte av vattendjupet.

De registrerade olikheterna i amplitudresponsfunktionerna för bojarna bör således bero enbart på skillnaden i vattenområdets bredd, i rännan 1.82 m och i bassängen 9.3 m.

Den mest påfallande olikheten mellan försöken i den 1.82 m breda rännan och i bassängen är den stora skillnaden i amplitud för de tyngsta bojarna (11.5 kg) för frekvenserna 0.90-1.05 Hz. För bojen typ I har detta resulterat i en markant amplitudresponsminskning på höger sida om resonanstoppen.

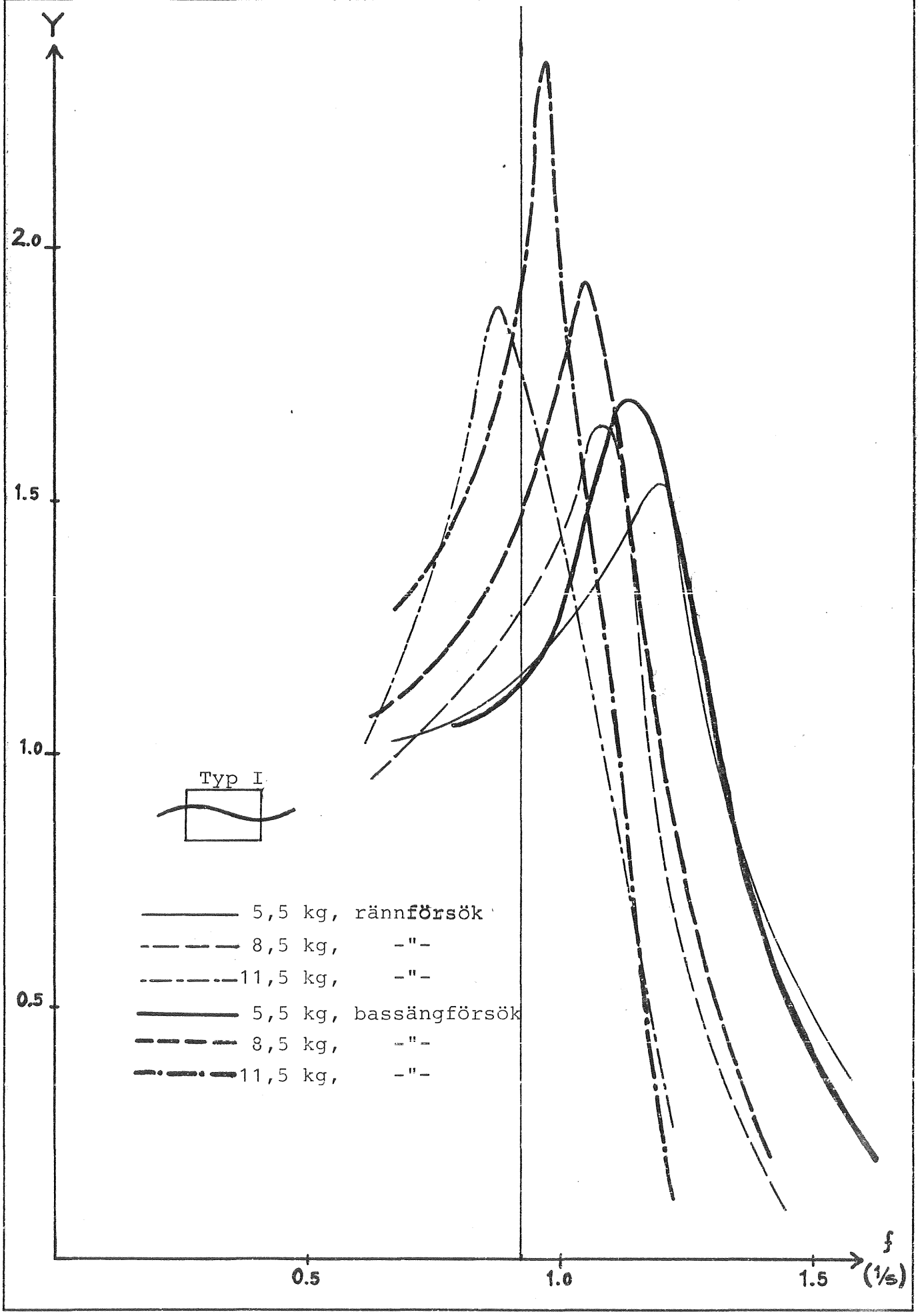
Även för bojen typ III (11.5 kg) kan man tydligt se att kurvan från rännförsöket påverkats av rännans bredd. Denna kurva är påverkad på vänstra sidan av toppen vilket är inom ungefär samma frekvensområde som för bojen typ I.

För bojen typ II är skillnaden i amplitud ganska stor men kurvan har inte deformerats lika utpräglat. Vid jämförelsen med teorin i den förra rapporten (GR:11) användes för denna boj bojens djupgående för d i amplitudresponsekvationen (ekv 3.5). Överensstämmelsen med teorin blev då ganska god även för rännförsöken. Allmänt sett bättre överensstämmelse har nu erhållits för försöken i bassängen, genom att för alla bojarna använda medelsjunkdjupet V/A, som är lika för samma deplacement V och vattenlinjearea A.

Den stora skillnaden vid 0.90 - 1.05 Hz förklaras av att vid 0.92 Hz är rännbredden lika med en våglängd (L = B = 1.82 m, vattendjup 0.78 m). Vid 1.31 Hz är rännbredden lika med två våglängder. Inverkan av reflektionerna från rännans väggar var vid rännförsöken således betydande trots att utvärdering av försöken skedde så tidigt som möjligt i vågtågen.

Figur 9.1

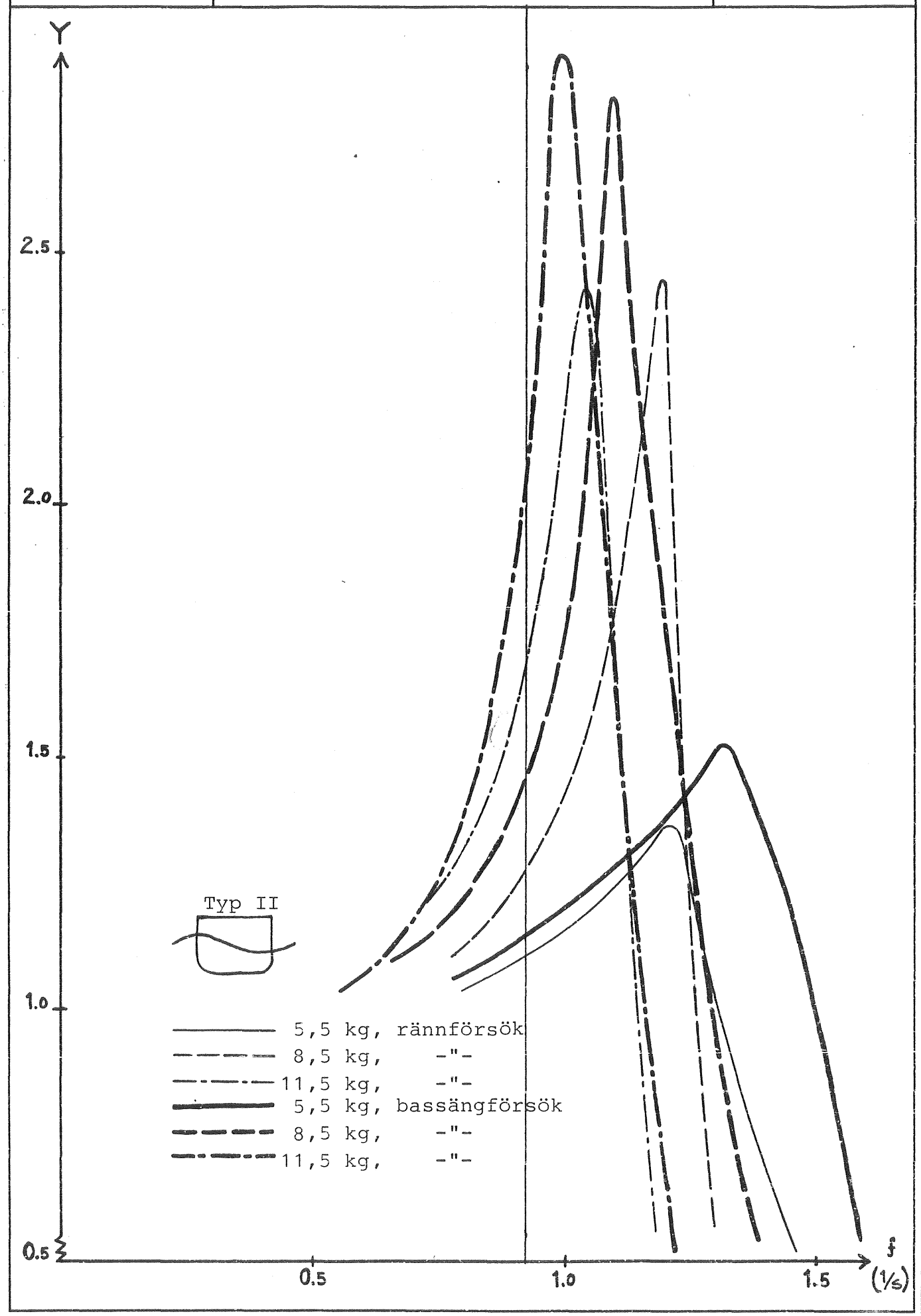
Jämförelse mellan experimentella amplitudresponskurvor erhållna vid försök i ränna med bredden 1.82 m och i bassäng med bredden 9.3 m. Boj typ I med olika vikt.



ESSELTE
7225

Figur 9.2

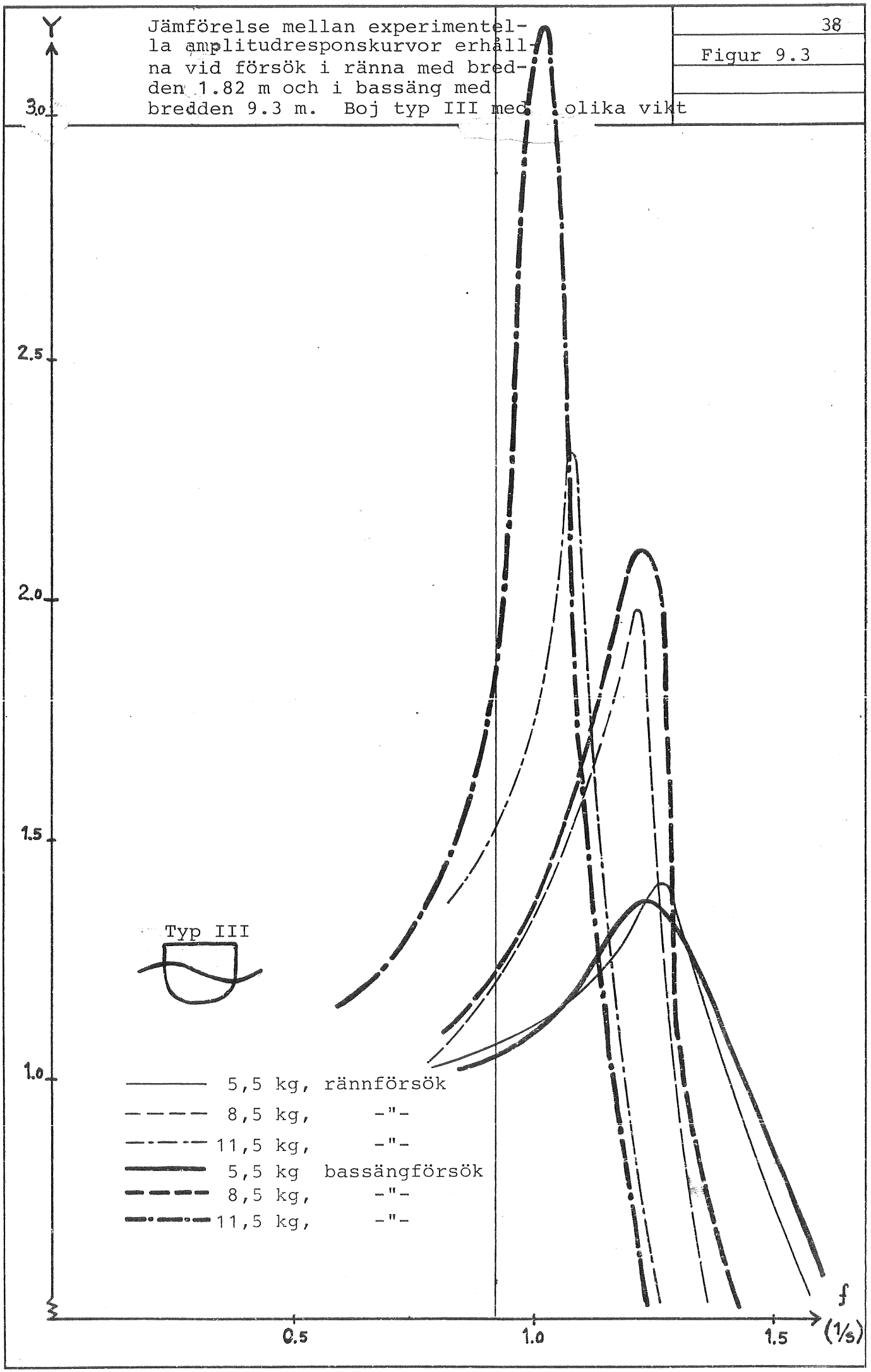
Jämförelse mellan experimentella amplitudresonskurvor erhållna vid försök i ränna med bredden 1.82 m och i bassäng med bredden 9.3 m. Boj typ II med olika vikt.



ESSELTE
7225

Figur 9.3

Jämförelse mellan experimentella amplitudresponskurvor erhållna vid försök i ränna med bredden 1.82 m och i bassäng med bredden 9.3 m. Boj typ III med olika vikt



ESSELTE
17225

10. BERÄKNADE VERKNINGSGRADER.

De uppmätta koefficienterna har nedan utnyttjats för att beräkna "verkningsgraden" hos några energiomvandlare av samma typ som de i försöken provade bojarna. I regelbundna sinusvågor med våghöjden H gäller att den av bojen upptagna medeleffekten P_u kan bestämmas med hjälp av amplitudresponsfunktionen Y (ekv. 3.5):

$$P_u = (b_1/8)\ H^2\ \omega^2\ Y^2 \qquad \ldots (10.1)$$

Medeleffekten i vågorna är per längdenhet vågfront

$$P_m = \rho g\ \frac{H^2\omega}{16k}\ (1 + kh/\sinh 2kh) \qquad \ldots (10.2)$$

och en verkningsgrad η på bojens diameter 2r kan definieras som

$$\eta = \frac{P_u}{P_m \cdot 2r} = \frac{b_1\ \omega k\ Y^2}{\rho g\ r}\ (1 + kh/\sinh 2\ kh)^{-1} \qquad \ldots (10.3)$$

I figurerna nedan visas exempel på verkningsgrader hos de använda bojarna. I figur 10.1 och 10.2 har verkningsgraden uppritats som funktion av den yttre dämpningen b_1. För varje bojtyp och vikt har den frekvens för vilken $Y = Y_{max}$ använts. Man kan lägga märke till att η_{max} inträffar för $b = b_1$ och att verkningsgraden är måttligt känslig för variationer i b_1, om inte denna väljes för låg eller mycket för stor.

I figur 10.3 har verkningsgraden som funktion av frekvensen uppritats för vikten 5.50 kg och alla tre bojtyperna. Vattendjupet h har satts till 0.663 m. Dessa verkningsgradskurvor kan uppfattas som en transferfunktion mellan vågeffekten inom varje frekvensband och upptagen effekt, dvs

$$P_u(\omega) = 2r \cdot \eta(\omega) \cdot P_m\ (\omega) \qquad \ldots (10.4)$$

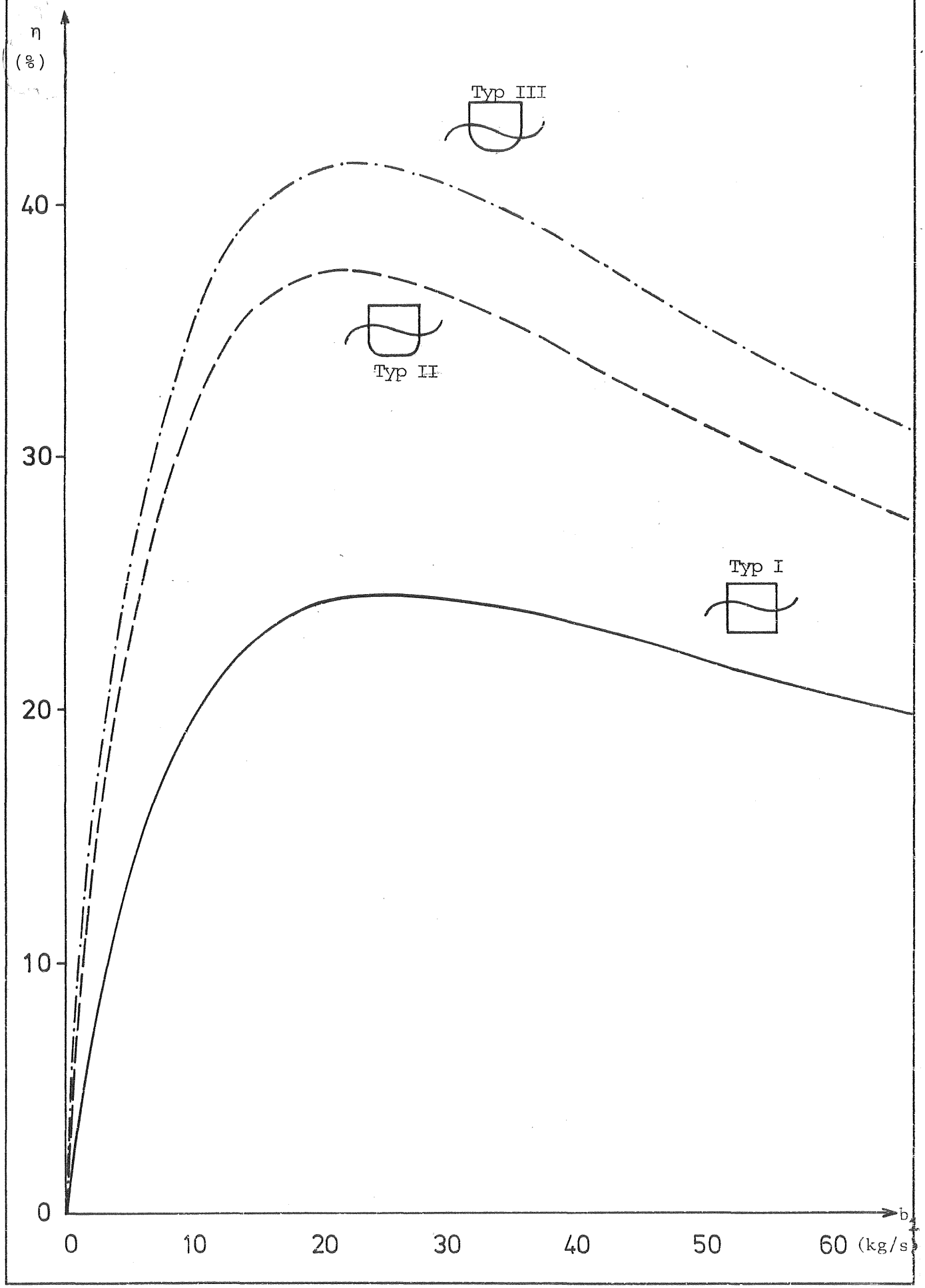
Av figur 10.3 framgår att verkningsgraden för bojar med konstant yttre dämpning b_1 är mycket känslig för frekvensändringar. En annan slutsats är att bojens kanter bör utföras avrundade. Skillnaden mellan bojtyp II och III är dock i detta avseende obetydliga. Om den direkt uppmätta amplitudresponsen Y användes i ekvation (10.3) i stället för den ur egensvängningsförsöken beräknade skulle skillnaden vara mindre.

Typ II skulle t.o.m. kunna visa sig något "effektivare" än typ III.

Avsikten är att vid försök i bassängen direkt mäta upptagen effekt och verkningsgrad. Institutionen för elektromaskinlära har redan genomfört en sådan försöksserie i Skepps-hydromekaniks 1.82 m breda ränna, där tyvärr reflektionerna från rännans väggar påverkar resultatet så att egenskaperna hos en enstaka energiomvandlare inte går att utvärdera på ett enkelt sätt. Resultatet skall sedan användas för att ånyo uppskatta möjligheterna att utvinna energi med ett kraftverk av bojtyp.

Figur 10.1

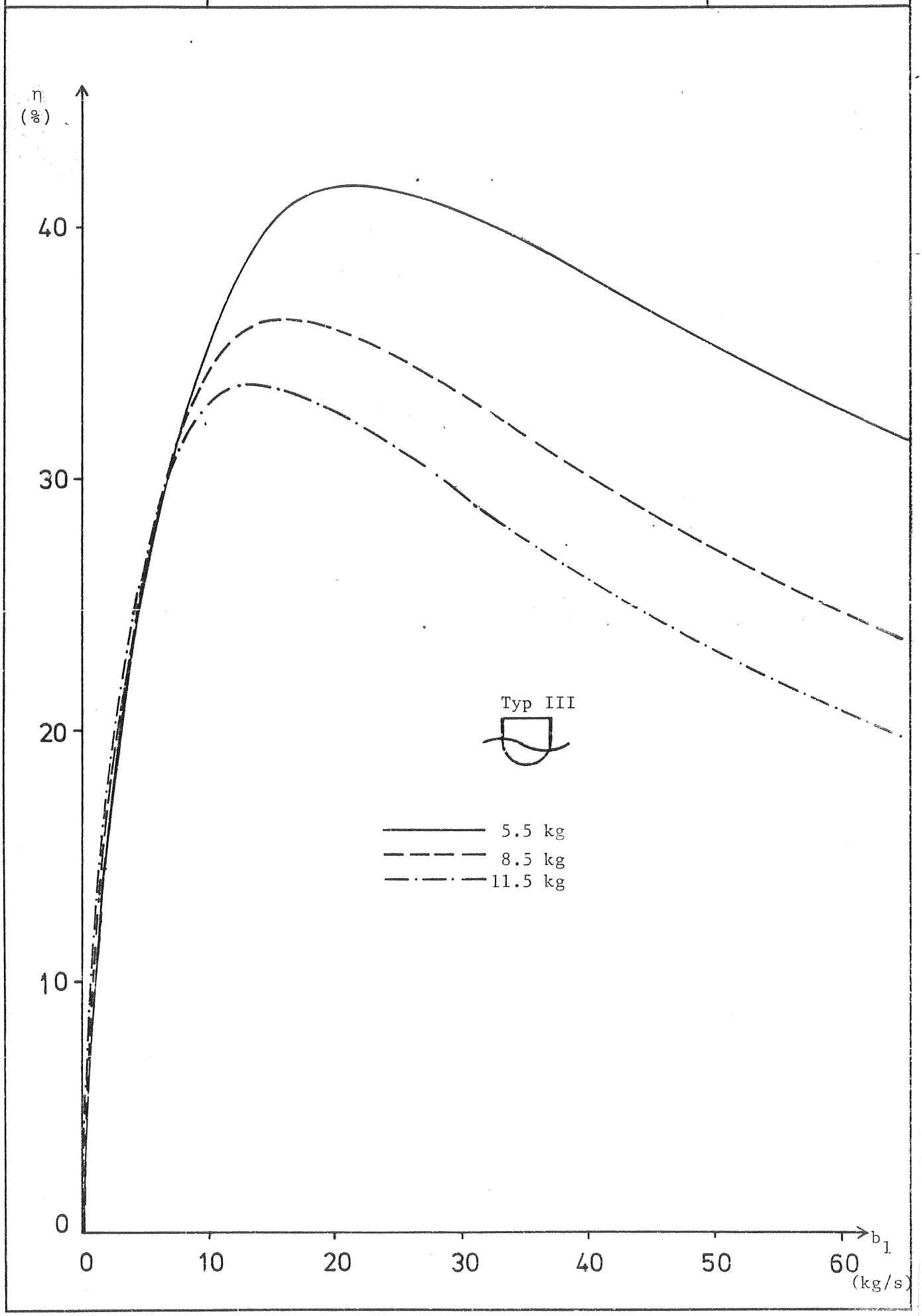
Beräknad "verkningsgrad" som funktion av elektrisk dämpning för bojar med deplacementsvikten 5.50 kg och av olika typ vid resp. resonansfrekvens.



ESSELTE
7225

Figur 10.2

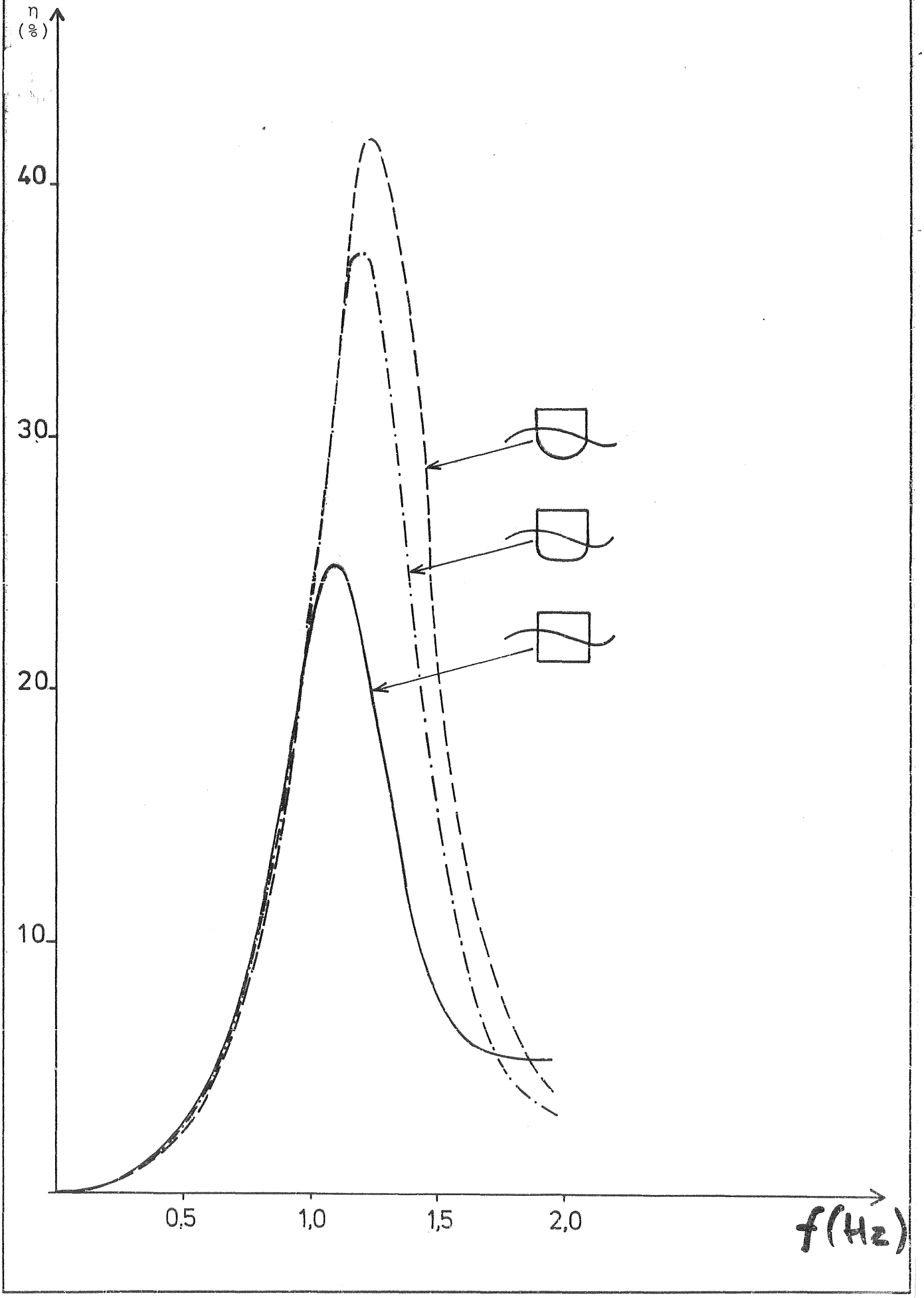
Beräknad "verkningsgrad" som funktion av elektrisk dämpning för boj typ III med olika deplacementsvikt vid resp. resonansfrekvens.



ESSELTE
7225

Figur 10.3

Beräknad "verkningsgrad" som funktion av frekvensen för deplacementsvikten 5.5 kg och olika bojtyper med yttre dämpning konstant lika med den vid resonansfrekvensen optimala: $b_1 = b_o = \varepsilon\omega_o m$.



ESSELTE
7225

REFERENSER

Planeringsrapport

Vågenergi i Sverige. Planeringsrapport 1977:4
Nämnden för energiproduktionsforskning.

Gruppraporter från Gruppen för vågenergiforskning

GR:10
Lars Bergdahl, Lennart Claesson och Johannes K Lunde,
Linjär teori för energiupptagning hos en oscillerande vågenergiomvandlare av bojtyp. 1978-05-12.

GR:11
Lars Bergdahl, Anders Rylander, Lars-Ove Sörman och Lars Wernersson,
Vågkraftbojar - modellförsök i regelbundna vågor.
1978-08-30.

GR:14
Per Andersson och Jan Forsberg
Vågkraftbojar - modellförsök med energiupptagning i regelbundna vågtåg. 1979-03-21.