# GRUPPEN FÖR VÅGENERGIFORSKNING



VÅGKRAFTBOJAR - modellförsök med energiupplagring i regelbundna vågor i bred bassäng

av

Lars Bergdahl Göran Olsson Lars-Ove Sörman

> Rapport GR:24 Göteborg den 30. mars 1980.

#### SAMMANFATTNING

Försök med en energiupptagande vågboj har utförts för tre olika upphängningssätt, för en serie olika frekvenser och dämpning hos det energiupptagande elementet.

Verkningsgrader på mellan 50 och 60% har uppmätts för det mest realistiska upphängningsättet för den ganska tunga boj som körts i försöken (Ø 300 mm = 11.5 kg).

Försöken visar att den teori som tillämpas borde duga väl till att uppskatta energiupptagningen i oregelbunden sjö. Verkningsgradskurvan från försöken innehåller dock ett oförklarat lokalt minimum vid 0.90 å 0.95 Hz, vilket starkt påverkar teorins godhet. Minimat kan inte förklaras med resonanssvängningar hos bassängen eller vågbildaren.

För försöksvärdena har en numerisk regression gjorts till den teoretiska amplitudresponskurvan. Det erhållna värdet på den hydrodynamiska dämpkonstanten  $\varepsilon = 0.17$  stämmer väl överens med tidigare försök. Värdet på koefficienten för added mass är dock endast hälften av den som tidigare använts.

#### FÖRORD

Föreliggande rapport om bojars energiupptagning i regelbundna vågor utgör ett led i den forskning över utvinning av vågenergi, som bedrivs vid Chalmers tekniska högskola i samarbete med Teknocean AB. Forskningen bekostas av Nämnden för energiproduktionsforskning.

De försök gruppen utfört tidigare med bojar utan energiupptagning och med energiupptagning i en smal ränna finns sammanfattade i grupprapporten GR16 1979.

S	i	d	•
-	_		

		<u>Sid</u> .
Samma	anfattning	I
Föroi	rd	II
Innel	nållsförteckning	
1.	Inledning	1
2.	Avsikten med modellförsöken	3
3.	Teoretisk bakgrund	4
3.1	Förutsättningar	4
3.2	Svängningsekvationen	4
3.3	Energiupptagning i regelbundna vågor	7
3.4	Fri dämpad svängning	10
4.	Försöksanordningar	12
4.1	Försöksuppställning	12
4.2	Bojen	12
4.3	Vågbassängen	13
4.4	Upphängningsanordningar	16
4.5	Den elektriska dämputrustningen	17
4.6	Mätutrustning	18
5.	Försöksförfarande och utvärderingsmetod	26
5.1	Försöksförfarande	26
5.2	Mätserier	27
5.3	Insamling av mätdata	28
5.4	Beräkningar	29
5.5	Utskrifter	30
6.	Försöksresultat	33
6.1	Verkningsgraden som funktion av dämp- konstanten vid konstant frekvens	33
6.2	Amplitudrespons, anpassningsförfarande	35
6.3	Amplitudrespons och verkningsgrad som funktion av frekvensen	37
7.	Diskussion av försöksresultat	52
7.1	Linjärt lager	52
7.2	Pendelrigg	53

#### 1. INLEDNING

Vågorna kring Sveriges kust kan ge ett icke obetydligt bidrag till den svenska elenergiförsörjningen under förutsättning att kostnaderna för utvinning av vågenergin inte blir för stora.

1

I grupprapporten Vågenergi i Sverige (GR:16 79-05-14) uppskattas den utvinningsbara nettovågenergin i svenska kustvatten till mellan 3 och 15 TWh el per år. Kostnaden för utvinning av denna vågenergi beräknas till mellan 0.20 och 0.50 kr/kWh. För att pröva antagandena i kostnadsberäkningarna och för att öka förståelsen för de problem, som är förknippade med vågenergiutvinning, studeras en omvandlare av bojtyp mera ingående av Gruppen för vågenergiforskning.

Vågenergiomvandlaren tänks utgöras av en boj enligt fig. 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.

Nedan redovisas laboratorieförsök rörande bojens energiupptagande förmåga. Parallellt med laboratorieförsöken bedrivs fältförsök i sjön Lygnern öster om Kungsbacka, där praktiska problem kan lösas under realistiska förhållanden i ungefärlig skala 1:3.



111 20 111 20 111 20 111 20 111 

Principskiss av senaste omvandlaren i sjön Lygnern. Figur 1.1

Många erfarenheter från laboratorie- och fältförsöken kan naturligtvis tillämpas även på andra typer av energiomvandlare.

#### 2. AVSIKTEN MED MODELLFÖRSÖKEN

Avsikten med de föreliggande försöken över bojars energiupptagning vid hävning (svängning i vertikalled) är att verifiera de teoretiska samband som ställts upp för energiupptagningen i regelbundna vågor. Modellförsök med energiupptagning i oregelbundna vågor kommer att genomföras under våren 1980.

I rapporterna GR:11 och GR:13 har de förberedande försök som utförts utan energiupptagning avrapporterats. De försök med energiupptagaren i funktion som genomförts av Elektromaskinlära i en ränna har rapporterats i GR:14. Resultaten från energiupptagningsförsöken i rännan gäller dock på grund av väggarnas inverkan egentligen för en rad bojar som samtidigt träffas av en vågfront.

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

#### 3. TEORETISK BAKGRUND

#### 3.1 Förutsättningar

Den matematiska modell som hittills använts vid arbetet med utvecklingen av gruppens vågenergiboj har presenterats dels i Vågenergi i Sverige (GR:16, 1979), dels utförligare i GR:10. Utgångspunkten har varit att bojen endast kan svänga i vertikalled, hävning. Den våg som sätter bojen i rörelse antas vidare sinusformad.

Vid mätningarna har fullt utbildat fortvarighetstillstånd inväntats, men mätningarna har dock skett så tidigt att obetydliga reflexioner från bassängens sidor eller vågdämpare ha nått bojen.

Under några av de redovisade försöken har bojen fått svänga på en "balansarm" så att den rört sig efter en cirkulär bana med vertikal tangent i medelvattenytan.

#### 3.2 Svängningsekvationen

Bojen kan endast svänga i vertikalled. Den infallande våg, som sätter bojen i rörelse, antas vidare vara sinusformad.

- $\zeta(t) = \zeta_0 \cos \omega t \qquad \dots (3.1)$
- ζ(t) vattenytans läge i vertikalled relativt medelvattennivån i en punkt i höjd med bojen t tiden ζ vågamplituden
- ω vågens cirkelfrekvens

Bojens rörelse bestäms enligt teorien av en andra ordningens differentialekvation. På djupt vatten gäller

$$(m+a) \ddot{z} + (b+b_{1}) \dot{z} + cz = \left[ (c-a\omega^{2})^{2} + (b\omega)^{2} \right]^{1/2} \cdot e^{-kd} \zeta_{0} \cos (\omega t+\alpha) \qquad \dots (3.2)$$

Här är

- m masströgheten hos det svängande systemet a den hydrodynamiska massan (medsvängande vattenmassa)
- z bojens läge i vertikalled relativt jämviktsläget
- b den hydrodynamiska dämpningen
- b<sub>1</sub> dämpkonstant för den yttre dämpningen som gör att energi tas från vågorna
- c fjäderkonstanten för den hydrostatiskt återförande kraften
- k vågtalet 2π/L
- D bojens sjunkdjup, avståndet från vattenytan till "kölen"
- α fasförskj. mellan den drivande kraften och vågrörelsen.

För fjäderkonstanten c gäller att

$$z = \rho g A$$

ρ

... (3.3)

där

är vattnets densitet

- g jordaccelerationen
- A bojens vattenlinjearea



Figur 3.1 Definition av några beteckningar. Den skrafferade ytan svarar mot deplacementet.

#### Masströgheten m (kg)

Observera att det svängande systemet kan ha en masströghet m som är större än deplacementets massa  $\rho V$ . Detta inträffar t.ex. då en roterande generator används som energiupptagare vare sig den placeras på bojen eller på bottnen under bojen, eller vid de försök med balansarm som redovisas i kapitel 4 . För övriga försök med helt vertikal rörelse är dock masströgheten lika med deplacementets massa så när som på en motvikt och potentiometer som gör att skillnaden högst är 2.7% vilket vid dessa senare försök försummats vid jämförelse med teorin.

#### Hydrodynamisk massa och dämpning a (kg), b (Ns/m)

Den hydrodynamiska massan, a, och dämpningen, b, varierar både med

- o frekvensen hos rörelsen
- o kroppens form och deplacement
- o vattendjupet
- o avståndet till andra begränsningen i planet.

Vid de tidigare laboratorieförsöken utan yttre dämpning har beroendet av kroppens form och deplacement undersökts. Inverkan från försöksrännornas väggar har konstaterats. Denna senare inverkan är mindre i föreliggande försök i bassängen.

Man brukar definiera två variabler  $\mu(\omega)$  och  $\epsilon(\omega)$  som

$$\mu(\omega) = a/(\rho V) \qquad \dots (3.4)$$
  

$$\varepsilon(\omega) = b/(\rho V \omega) \qquad \dots (3.5)$$

där V är deplacementets volym.

När mätresultaten jämförts med teorin har approximativt satts att  $\mu$  och  $\epsilon$  är konstanta. En jämförelse mellan amplitudresponsfunktionen för  $\mu$  och  $\epsilon$  konstanta och för  $\mu(\omega)$  och  $\epsilon(\omega)$  ger små skillnader jämfört med försöksvärdenas spridning.

Ett sätt att beskriva frekvensberoendet finns refererat i GR:10 (se även Havelock 1955).

#### Normaliserat deplacement

För uppskalnings- och jämförelseändamål uttrycks deplacementet V i våra försök med ett normaliserat deplacement  $\hat{V}$  på så sätt att aktuell deplacementsvolym divideras med volymen av ett halvklot med samma radie som bojen.

$$\hat{V} = V/(2\pi r^3/3)$$
 ... (3.6)

Jämförelser kan då direkt göras mellan bojar i olika skalor. För samma värde på  $\hat{V}$  skall t.ex. den vid resonans erhållna masskoefficienten och dämpkoefficienten  $\varepsilon$  vara lika.  $\hat{V}$  för den tidigare beskrivna halvsfären blir definitionsmässigt  $\hat{V}$  = 1.00.

#### Dämpkonstanten b<sub>1</sub> (Ns/m)

För försök med energiupptagaren i funktion har reglerutrustningen eftersträvat ett konstant värde på den yttre dämpningen så att

$$b_1 = F/\dot{z}$$
 ... (3.7)

där F är momentanvärdet av den yttre dämpkraft som härrör från den elektriska dämputrustningen och friktionen i upphängningen.

Reglersystemet är dock konstruerat så att den elektriska bromskraften hela tiden är motriktad rörelsen eller lika med noll. I närheten av ändlägena i hävningen dominerar då friktionskraften från upphängningsanordningen så att bromskraften F är konstant och motriktad rörelsen. För intressanta värden på b<sub>1</sub> ur energiupptagningssynpunkt har bortsetts från denna olinjäritet.

De värden på b<sub>1</sub> som anges vid redovisningen av försöken har beräknats som medelvärden för respektive försök. Se vidare avsnitt 5.5.

#### Vattendjupets inverkan

Ekvation (3.2) och (3.8) gäller endast då vattendjupet är så stort att vågorna inte påverkas av bottnen. När vattendjupet h är mindre än halva våglängden bör faktorn e<sup>-kD</sup> bytas mot faktorn

Vid de mätningar som redovisas i kapitel 3 är korrektionen av liten betydelse. Vid resonansfrekvensen 1Hz är den cirka 1% och vid de längsta vågorna (0.7 Hz) cirka 3%.

#### 3.3 Energiupptagning i regelbundna vågor

#### Amplitudresponsfunktionen

Vid hävningen i den antagna sinusformade vågrörelsen med energiupptagaren i funktion ges bojens hävning av lösningen till differentialekvationen (3.2). Vid lösningen av denna har antagits att alla koefficienter är konstanta med avseende på tiden dvs

differentialekvationen är linjär. Detta ger en lösning

där  $\psi$  är fasvinkeln mellan bojens hävningsrörelse och vågrörelsen. Förhållandet Y =  $z_0/\zeta_0$  kallas amplitudrespons, vilken således kan skrivas

$$Y^{2} = \left\{\frac{z_{0}}{\zeta_{0}}\right\}^{2} = \frac{(c-a\omega^{2})^{2} + (b\omega)^{2}}{(c-(m+a)\omega^{2})^{2} + (b+b_{1})^{2}\omega^{2}} e^{-2kD} \dots (3.9)$$

Exempel på teoretiska amplitudresponsfunktioner för en boj utan energiutvinning ( $b_1=0$ ) och med teoretiskt maximal energiutvinning ( $b_1=b$ ) visas i figur 3.2 nedan. Värden på a och b enligt försök har använts.



Figur 3.2

Amplitudresponsen Y som funktion av normerad cirkelfrekvens  $\omega/\omega_0$  för boj utan energiupptagning — — —

#### Bojens energiupptagning

Eftersom reglersystemet ger en kraft i upphängningen F, som är proportionell mot hastigheten (se ekv. 3.7) kan den momentant upptagna effekten skrivas

$$P(t) = F(t) \cdot \dot{z}(t) = b_1 (\dot{z}(t))^2 \qquad \dots (3.10)$$

I regelbundna sinusformade vågor erhålles genom insättning av  $z=z_0 \cos(\omega t+\psi)$  och integrering över ett jämnt antal perioder den ur vågorna upptagna medeleffekten till

$$P_{med} = \frac{b_1}{2}\omega^2 z_0$$
 ... (3.11)

Medeleffekten som funktion av frekvensen kan enkelt uttryckas med hjälp av amplitudresponsfunktionen  $Y(\omega)$  och infallande våg-amplitud  $\zeta_{0}$ .

$$P_{\text{med}}(\omega) = \frac{b_1}{2}\zeta_0^2 \ \omega^2 \ Y^2(\omega) \qquad \dots (3.12)$$

eller

$$\frac{P_{\text{med}}}{\zeta_0^2} \stackrel{(\omega)}{=} \frac{b_1}{2} \omega^2 \cdot Y^2(\omega) \qquad \dots (3.13)$$

där högerledet är oberoende av vågamplituden.

#### Hydrodynamisk verkningsgrad

Vid sinusformade vågor på djupt vatten bestäms medeleffekten per meter vågfront p av uttrycket

$$p = -\frac{\zeta^2}{4} \rho g^2 \frac{1}{\omega} \qquad ... (3.14)$$

Utgående från detta kan man teckna ett uttryck för verkningsgraden för en vågenergiomvandlares förmåga att absorbera vågornas energi. För en boj med radien r kan denna hydrodynamiska verkningsgrad skrivas

$$\eta = \frac{P_{\text{med}}}{p \cdot 2r} \qquad \dots \quad (3.15)$$

Uttrycks verkningsgraden med hjälp av amplitudresponsfunktionen fås

$$\eta = \frac{b_1 \omega^3 Y^2(\omega)}{\rho g^2 r}$$
 (3.16)

Den tillämpade definitionen av verkningsgrad kan för vissa typer av punktformiga omvandlare ge värden över 1. Detta beror på att omvandlaren i så fall tar upp energi från en större bredd än sin egen diameter eller energi reflekterad på intilliggande omvandlare. Produkten  $2r \cdot \eta$  kan uppfattas som en transferfunktion mellan vågeffekten p och den upptagna effekten  $P_{med}$ .

#### 3.4 Fri dämpad svängning

Vid försök, där bojen fått svänga i stillastående vatten efter att ha släppts från något begynnelseläge z(0), kan svängningsekvationen enligt teorien skrivas (jfr ekv 3.2)

$$(m+a)\ddot{z} + b\dot{z} + cz = 0$$
 ... (3.17)

Lösningen till denna ekvation är

$$z(t) = z(0) \cdot e^{-k_1 t} \cos(t_1 \omega_0^2 - k_1^2) \dots (3.18)$$

$$k_{1} = b/(2(a+m))$$
$$\omega_{0} = \sqrt{c/(a+m)}$$

= utgångsläget

 $\omega_0$  är den odämpade svängningens vinkelfrekvens eller naturliga frekvens. Den dämpade svängningens vinkelfrekvens är  $\sqrt{\omega_0^2 - k_1^2}$ .

Ur registrerade egensvängningsförlopp (se figur 3.3) har tidigare konstanterna b och a beräknats genom att perioden, $T=2\pi/\omega$ , och avklingningen i amplitud för successiva svängningar mätts, (se GR:16). För ett ideellt förlopp gäller nämligen

$$\frac{z(n\pi/\omega)}{z((n+2)\pi/\omega)} = e^{k} 1^{T}$$
 (3.19)

för n = 0, 1, 2....

#### Normerad frekvens

Frekvensskalan kan för jämförelser och uppskalning normaliseras med hjälp av den naturliga frekvensen  $\omega_0$  eller den uppmätta resonansfrekvensen  $\sqrt{\omega_0^2 - k_1^2}$ . I denna framställning används

$$\hat{\omega} = \hat{f} = \frac{\omega}{\omega_0}$$
 (3.20)



Figur 3.3 Exempel på registrerad dämpad svängning. Bojens läge som funktion av tiden t.

#### 4. FÖRSÖKSANORDNINGAR

#### 4.1 Försöksuppställning

Försöken har utförts med en försöksuppställning enligt den schematiska bilden figur 4.1. Vågmätningen har dock gjorts i bredd med bojen och inte framför denna.

Vid försöken har den infallande vågen, bojens hävning och dämpkraften registrerats för olika vågfrekvenser och dämpkonstanter samt för tre något olika upphängningsalternativ. Amplitudresponsen, dämpkonstanten och energiupptagningen har beräknats automatiskt i mätdatorn efter varje försök.



Figur 4.1 Schematisk bild av försöksuppställningen.

#### 4.2 Bojen

Vid försöken har en cylindrisk boj med diametern 300 mm och deplacementet 11.5 kg använts. Det är samma boj som i de tidigare försöken med yttre dämpning i ränna (GR:14). Formen framgår av fig. 4.2. För att erhålla önskad vikt (11.5 kg) placerades en järnskiva ovanpå bojen. Djupgåendet blev därvid 181 mm.



Figur 4.2 Bojens dimensioner

#### 4.3 Vågbassängen

Den för försöken uppbyggda våg assängen 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 4.3.



Figur 4.3 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 4.4 och 4.5.



Figur 4.4 Sektion av vågbildaren.



Figur 4.5 Vågbildare på plats i bassängen.

I den andra kortänden av bassängen har en vågdämpare i form av en sluttande strand byggts upp (se figur 4.6). Stranden fungerar väl vid de frekvenser (0.7 - 1.6 Hz) som använts i försöken.



Figur 4.6 Sektion av vågdämparen.

#### 4.4 Upphängningsanordningar

Modellbojen har provats i en frihetsgrad, hävning. Härvid har två olika upphängningsanordningar använts.

#### Balansarm

Vid energiupptagningsförsöken i bassängen visade det sig att den upphängningsrigg som tidigare använts i rännan inte var användbar på grund av för stora påkänningar i den kopparskena, som löper genom den linjära elmotorn (se fig.4.9). Kopparskenan ville gärna böja ut och skrapa mot magneterna i den linjära motorn. För att avlasta kopparskenan från alla horisontalkrafter byggdes därför en upphängningsrigg i form av en balansarm enligt figur 4.7.



Figur 4.7 Bojupphängning med balansarm.

Det visade sig att denna bojupphängning gav en markant annan amplitudrespons och verkningsgrad än förväntat för en boj i ren hävning. Vidare visade sig verkningsgraden bli av samma storleksordning som förväntat om bojarna riktades mot vågornas utbredningsriktning och mycket större än förväntat om den riktades med. Vågkrafternas moment kring upphängningspunkten påverkade således i alltför stor utsträckning mätresultatet för att detta skulle kunna användas för en jämförelse med tidigare försök.

#### Linjärt lager

En ny rigg, där de horisontella krafterna upptogs av ett linjärt lager och de vertikala krafterna via kulleder av den linjära motorn, byggdes och visade sig fungera tillfredsställande. Se figur 4.8.



Figur 4.8 Upphängningsanordning med linjärt lager.

#### 4.5 Den elektriska dämputrustningen

Dämputrustningen består av två delar, dels den linjära asynkronmotorn (se fig.4.9), dels en styrenhet (se fig. 4.10). Styrenhetens uppgift är att leverera en spänning till asynkronmotorn, så att motorn bromsar bojen med en kraft, F, proportionell mot bojens hastighet, ż, dvs.:

$$\frac{F}{\dot{z}} = b_1$$
 ... (4.1)

Reglersystemet har dock den begränsningen att den elektriska bromskraften hela tiden är motriktad rörelsen eller lika med noll. I närheten av vändlägena i hävningen då  $\dot{z} \rightarrow 0$  dominerar då friktionskraften så att bromskraften F under en kort tid är konstant och motriktad rörelsen. För intressanta värden på b<sub>1</sub> kan man bortse från detta förhållande. Dessutom har, för varje försök, b<sub>1</sub> beräknats som ett medelvärde. Se vidare avsnitt 5.5.

Den elektriska dämpkonstanten b<sub>1</sub> kan steglöst varieras med en potentiometer på styrenheten. Utrustningen finns närmare beskriven i GR:14.



Fig. 4.9 Den linjära asynkronmaskinen



Fig. 4.10 Styrenheten

#### 4.6 Mätutrustning

Mätutrustningen kan delas in i fyra olika kategorier av instrument, nämligen:

- o givare
- o drivenheter till givarna
- o filterenhet
- o bordsdator

#### Givare

Fyra olika parametrar registrerades i varje försök:

- o vattenytans avvikelse från lugnvattenytan
- o bojens avvikelse från det vertikala jämviktsläget
- o bojens hastighet
- o kraften varmed bojen dämpas

För detta ändamål finns tre givare, eftersom hastigheten registreras genom en analog derivering av bojavvikelsesignalen. o Våghöjdsgivare av konduktiv typ bestående av två i vattnet nedstickande metallstänger om 3 mm diameter och på ett inbördes avstånd av 1 cm (se fig. 4.11).

o Envarvig potentiometer 476  $\Omega$  med låg vridfriktion för att registrera bojavvikelsen. Potentiometern är försedd med en trissa på sin axel, och över denna hänger en tråd med en motvikt i form av en 60g mutter. Trådens andra ände fästes i bojen. (Se figur 4.12).

o Kraftgivare av typ Bofors KRK-2 med mätområde 0-10 kp, bestående av fyra resistiva trådböjningsgivare sammankopplade till en brygga.

#### Drivenheter till givarna

Till var och en av givarna finns en drivenhet som förser givaren med en växelspänning. Genom att växelspänningen förändras antingen till storlek eller frekvens, beroende på givarens aktuella tillstånd, erhålles en signal som efter likriktning och förstärkning är proportionell mot den parameter givaren avser att mäta. Den likriktade och förstärkta signalen kan matas in till datorn för registrering och vidare bearbetning. Det finns vidare på alla drivenheterna möjlighet att balansera utsignalen så att denna är noll för ett givet tillstånd hos givaren.





Figur 4.12 Potentiometerhjul med snöre och vikt

#### Filterenheter

För att skydda datorn mot för hög spänning på ingångarna har tre filterenheter tillverkats, vilka består av vardera ett filter och ett optokoppel. Optokopplen är till för att avskilja strömkretsarna till givare och dämputrustning från strömkretsen med datorn i. Filterna är av lågpasstyp med en brytfrekvens på cirka 20 Hz och brantheten 18 dB/oktav (se figur 4.13).

Att endast tre filter och optokoppel behövs beror på att våghöjdsmätaren sitter i en separat krets helt avskild från de andra mätgivarna och dämputrustningen. Det är primärt dämputrustningen som kan tänkas ge skadliga signaler på datoringångarna om dessa inte skyddas.

#### Bordsdator

För insamling och bearbetning av mätdata har en bordsdator Compucorp 625 Mark II inköpts. Denna består av ett primärminne 64 kbytes, en bildskärm, en matrisskrivare, två disketteenheter för lagring av program och data, ett alfanumeriskt tangentbord och mjukvara bestående av bl.a. operativsystem, basic interpretator m.m.



Figur 4.13

Uppmätt förstärkning och fasvridning för en sinussignal över optokopplen och filterna. Försöken har utförts för frekvensen mellan 0.5 och 1.5 Hz dvs inom de streckade linjerna.

För våra mätändamål har Scandiametric försett datorn med interface och programvara för mätinsamling på högst 16 kanaler med en samplingshastighet av högst 1 kanal/ms då färre än 12 kanaler används. Lägsta samplingshastighet äri programmet begränsat till 1 kanal/256 ms.

För bearbetningen av mätdata har framtagits ett basicprogram som beskrivs mer ingående i kapitel 5.4.

För att få bättre presentationsmöjligheter än den inbyggda matrisskrivaren erbjuder, har en Diablo 1660 inköpts.



Styrenhet för vågbladet (underst) och regler-enhet för våghöjdsgivare och lägesgivare. Fig. 4.14



Fig. 4.15 Översikt

överst	vänster: höger :	Optokoppel Styrenhet kraftgivare
under	vanster:	Skrivare
11	mitten :	Signalreglering till datorn
n	höger :	se ovan
längst	ned	
till	höger :	Remsläsare till styrenheten för vågbladet.
	överst under " längst till	överst vänster: " höger : under vänster: " mitten : " höger : längst ned till höger :



Fig. 4.16 Mätdator Compucorp 625 Mark II



Fig. 4.17 Radskrivare Diablo





Fig. 4.19 Bojupphängning i linjärt lager.



Fig. 4.20 Hydraulpaket för styrning av vågbladet.

#### 5. FÖRSÖKSFÖRFARANDE OCH UTVÄRDERINGSMETOD

#### 5.1 Försöksförfarande

Försöken inleddes med att ställa in önskad frekvens och nollamplitud på våggeneratorns styrenhet. Därefter startades våggeneratorns hydraulaggregat. I datorns mätprogram valdes sedan samplingsintervall och samplingstid. Sedan vreds önskad amplitud upp på styrenheten, och när vågrörelsen och bojrörelsen nått fortvarighetstillstånd startades mätcykeln. Mätningen skedde över cirka 10 svängningar.

Efter en okulär kvalitetskontroll startades utvärderingsprogrammet, om mätningen bedömdes som lyckad.

Nästa mätning startades när vattnet i bassängen lugnat sig.

#### Våggenerering

Genereringen av de regelbundna vågorna skedde med hjälp av den i kapitel 4 beskrivna våggeneratorn. Amplituden och frekvensen hos våggeneratorns hydraulcylinder styrdes från styrenheten vid mätdatorn. Hydraulcylinderns rörelse var sinusformad.

#### Kalibrering

Kalibrering av kraft-, läge- och nivåsignalerna utfördes före varje dags försök. Kalibreringen tillgick så att en känd läges-, nivå- eller kraftförändring utövades på respektive givare. Därefter lät man datorn utföra en mätning ur vilken en noggrann kalibreringsfaktor beräknades.

Den analoga deriveringskretsen för hastigheten kalibrerades genom att mata in en känd sinusspänning från en tongenerator i stället för bojens lägessignal. Det visade sig därvid att kalibreringskonstanten var något beroende av frekvensen inom det aktuella frekvensområdet 0.6 – 1.6 Hz. Se figur 5.1. Denna funktion lades in i utvärderingsprogrammet.



Figur 5.1 Kalibreringskonstanten för deriveringskretsen  $K_v = 2\pi f U_{in}/U_{ut}$ .

#### 5.2 <u>Mätserier</u>

Experiment har utförts med tre olika upphängningssätt nämligen



Mätserierna för respektive upphängning har varit av två slag, dels sådana där frekvensen hos vågorna hållits konstant och dämpningen varierats, dels sådana där dämpningen varit konstant och frekvensen varierats. Den första typen omfattar försök med cirka 10 olika dämpningar medan den andra typen omfattar 20 á 25 olika frekvenser för varje dämpinställning. Se sammanställningen tabell 5.2.

## Tabell 5.1 Antal utförda försöksserier med olika upphängningsanordningar.

Antal serier med	varierad dämpning f = konst	varierad frekvens b <sub>1</sub> = konst		
Upphängning				
$A \sim \Box^{\frac{6}{8}}$	3	3		
в~	1	8		
c ~ 1	_	1		

#### 5.3 Insamling av mätdata

Registrering av signalerna skedde parallellt med bordsdatorn med en skrivare. Skrivarsignalen användes för att bedöma när signalerna nått fortvarighetstillstånd då bordsdatorns registrering startades.

Varje registrering var så lång att cirka 10 perioder av svängningen registrerades. Här var vi emellertid begränsade av datorns "systemprogram" i valet av registreringstid så att antingen 6s eller 12s registrering måste göras beroende på frekvensen.

Vid registreringen försökte vi också mäta varje signal cirka 10 ggr per period. Även här begränsar systemprogrammet valet av mätintervall. Vi använde mätintervallen 80, 100 eller 120 ms beroende på frekvensen.

De insamlade mätvärdena lades efter varje mätning automatiskt ut på en skiva och fanns där tillgängliga för vidare bearbetning.

#### 5.4 Beräkningar

Efter slutförd mätning laddades ett bearbetningsprogram in i datorn från disketten. Detta program beräknar och skriver ut våghöjden, bojdubbelamplituden, amplitudresponsen, medelfrekvensen, "upptagen" medeleffekt samt verkningsgraden.

#### Våghöjd och bojdubbelamplitud

Våghöjden och bojdubbelamplituden beräknas genom att kring signalernas respektive lokala maxvärden ta ut tre punkter och anpassa en andragradskurva till dessa. Denna anpassade kurvas maximum antas vara maximum för vågen respektive bojrörelsen. På motsvarande sätt beräknas minimipunkterna och skillnaden mellan maxima och minima ger våghöjden respektive bojdubbelamplituden för varje vågperiod. Därefter bildas medelvärde och standardavvikelse för de båda mätserierna.

#### Amplitudrespons

Amplitudresponsen bestäms som medelvärde av kvoten mellan lokal våghöjd och lokal bojdubbelamplitud. Ett amplitudresponsvärde erhålles således för varje våg. Medelvärde och standardavvikelse beräknas även för dessa.

#### Medelfrekvensen

Perioden för svängningen bestämmes ur serien för lokala maxima och minima hos vattenytan, genom att samtidigt som höjden beräknas, beräkna även läget i tidsled och tidsskillnaden mellan två konsekutiva maxima respektive minima. Denna tidsskillnad utgör en period. På så sätt erhålles en serie registrerade periodtider ur vilken sedan beräknas medelfrekvensen och standardavvikelsen för frekvensen.

#### Medeleffekt

Den effekt som tas upp ur vågrörelsen och dissiperas i den linjära motorn och dess lager beräknas genom en direkt integration av produkten av bojhastigheten, ź, och kraften, F, i upphängningen delat med registreringstiden, t.

$$P_{\text{med}} = \frac{1}{t} \int_{0}^{L} \dot{z} F d\tau$$

... (5.1)

Integreringen sker med Simpsons metod.

#### Verkningsgrad

Verkningsgraden definieras som tidigare av den upptagna medeleffekten dividerat med vågornas medeleffektflöde på en bojdiameters bredd. Se ekvation (3.15). I utvärderingsprogrammet används härvid den uppmätta upptagna effekten enligt integralen (5.1) och vågornas medeleffekt beräknad ur uppmätt våghöjd, H, enligt ekvation (3.14). Således:

$$\eta_{m \ddot{a} t t} = \frac{\frac{1}{t} \int \dot{z} F d\tau}{\frac{1}{16} H^2 \rho g^2 / \omega} \qquad \dots (5.2)$$

#### Dämpkonstant

Reglerutrustningen skall hålla dämpkonstanten  $b_1$  konstant för olika inställningar av dämpningen. För att få ett medelvärde på  $b_1$  under varje försök har  $b_1$  lösts ur ekvation (3.16)

$$b_{1} = \frac{n \rho g^{2} r}{\omega^{3} y^{2}} \qquad \dots \qquad (5.3)$$

med de uppmätta värdena på Υ, ω och η insatta.

t

#### 5.5 Utskrifter

Efter varje mätning och körning av utvärderingsprogrammet skrivs resultatet automatiskt ut i en tabell (Tabell 5.2). Försök med stor standardavvikelse i någon parameter kasserades och ett liknande kördes i stället. Ett medelvärde på dämpkonstanten b<sub>1</sub> erhölls samtidigt på datorns matrisskrivare för varje försök. (Tabell 5.3). Det visade exemplet är samma som redovisas i figur 6.

#### Tabell 5.2

***************************************	* * * * * * * * * *
* FREQUENCY (HZ) * AMPL.RESP. * WAVE HEIGHT * BUDY AMPL.(M) * *	EFF1C1
**************************************	6 W 6 W
* MEAN * STILLEV. * MEAN * STILLEV * MEAN * STILLEV * MEAN * STILLEV * *	ENCY
	1 0000-01
	1 81E-01
9 - 9E = 01 + 4.3E = 02 + 1.4E = 100 + 3.2E = 02 + 3.2E = 02 + 3.2E = 03 + 4.3E = 02 + 1.4E = 03 + 3.2E = 01 + 3.2E = 02 + 3.2E = 03 + 4.3E = 02 + 1.4E = 02 + 1	2 89E-01
- * = 8.55 - 01 + 7.581 - 02 + 1.95 - 00 + 1.20 - 01 + 4.15 - 02 + 3.21 - 03 + 7.53 - 02 + 1.08 - 02 + 2.35 - 01 + 3.25 - 01 + 3.25 - 01 + 3.25 - 01 + 3.25 - 01 + 3.25 - 02 + 3.25 - 01 + 3.25 - 02 + 3.25 - 01 + 3.25 - 02 + 3.25 - 01 + 3.25 - 02	4 13E-01
* 8.89E=01 * 7.72E=02 * 2.00E=00 * 2.58E=01 * 3.94E=02 * 3.51E=03 * 7.83E=02 * 9.24E=03 * 2.36E=01 *	4.71E-01
* 8.96E-01 * 7.79E-02 * 1.85E+00 * 1.06E-01 * 4.19E-02 * 1.99E-03 * 7.76E-02 * 6.13E-03 * 7.21E-01 *	3.92E-01
* 9.10E-01 * 6.17E-02 * 1.66E+00 * 2.18E-01 * 4.07E-02 * 4.03E-03 * 6.67E-02 * 4.73E-03 * 1.79E-01 *	3.42E-01
* 9.25E-01 * 6.34E-02 * 1.58E+00 * 1.99E-01 * 3.35E-02 * 2.14E-03 * 5.27E-02 * 6.64E-03 * 1.22E-01 *	3.51E-01
* 8.92E-01 * 4.40E-01 * 2.00E+00 * 1.82E-01 * 2.72E-02 * 4.70E-03 * 5.60E-02 * 4.01E-03 * 1.43E-01 *	6.00E-01
* 9.48E-01 * 6.80E-02 * 2.09E+00 * 1.35E-01 * 2.69E-02 * 2.26E-03 * 5.63E-02 * 4.01E-03 * 1.34E-01 *	6.11E-01
-* 9.65E-01 * 4.77E-02 * 2.18E+00 * 1.36E-01 * 3.03E-02 * 3.38E-03 * 6.61E-02 * 8.73E-03 * 2.02E-01 *	7.35E-01
- * 9 65E-01 * 6.49E-02 * 2.24E+00 * 1.64E-01 * 3.07E-02 * 3.94E-03 * 6.84E-02 * 7.87E-03 * 2.10E-01 *	7.50E-01
- * - 9.77E-01 * - 5.11E-02 * - 1.92E+00 * - 7.30E-02 * - 3.54E-02 * - 3.01E-03 * - 6.74E-02 * - 4.86E-03 * - 1.95E-01 *	5.28E-01
* 1.00E+00 * 8.19E-02 * 1.89E+00 * 9.84E-02 * 3.29E-02 * 2.29E-03 * 6.22E-02 * 2.20E-03 * 1.83E-01 *	5.91E-01
* 1.02E+00 * 7.13E-02 * 1.48E+00 * 6.31E-02 * 4.02E-02 * 1.62E-03 * 5.94E-02 * 3.51E-03 * 1.82E-01 *	4.01E-01
-* 1.05E+00 * 8.23E-02 * 1.28E+00 * 4.97E-02 * 4.58E-02 * 2.00E-03 * 5.83E-02 * 2.70E-03 * 1.85E-01 *	3.22E-01
1.04E+00 * 5.20E-02 * 1.07E+00 * 5.22E-02 * 5.05E-02 * 1.84E-03 * 5.41E-02 * 3.34E-03 * 1.44E-01 *	2.37E-01
* 4 1.40E+00 * 9.98E-01 * 8.79E-01 * 1.37E-01 * 5.26E-02 * 5.40E-03 * 4.56E-02 * 1.54E-03 * 1.26E-01 *	2 32E-01
* ¥ 2.63E+00 * 2.54E+00 * 2.13E+00 * 3.02E+00 * 3.95E+02 * 9.18E+03 * 5.87E+02 * 2.93E+03 * 2.09E+01 *	1.23E+00
* 1.04E+00 * 4.29E-02 * 1.40E+00 * 5.42E+02 * 4.24E+02 * 9.90E+04 * 5.93E+02 * 1.86E+03 * 1.78E+01 *	3.5/E-01
* 1.01E+00 * 4.23E-02 * 1.77E+00 * 9.53E-02 * 3.39E-02 * 2.50E-03 * 6.00E-02 * 4.27E-03 * 1.87E-01 *	5.70E-01
* 7.88E-01 * 5.38E-02 * 2.22E+00 * 1.41E-01 * 3.15E-02 * 1.64E-03 * 6.98E-02 * 4.38E-03 * 2.58E-01 *	8.85E-01
7.83E-01 * 8.22E-02 * 2.20E+00 * 1.08E-01 * 3.17E-02 * 2.19E-03 * 6.97E-02 * 3.33E-03 * 2.23E-01 *	7.58E-01
* 7.73E-01 * 5.91E-02 * 2.28E+00 * 1.34E-01 * 3.10E-02 * 3.61E-03 * 7.03E-02 * 5.33E-03 * 2.22E-01 *	7.84E-01
* 9.7/E=01 * 5.80E=02 * 2.25E+00 * 9.58E=02 * 3.20E=02 * 3.31E=03 * 7.13E=02 * 7.75E=03 * 2.35E=01 *	/ 79E-01
· / JOLETTI · 4. JETTUZ · 2. IZETTU · 1. ZETTUI · 2. YEETUZ · 1. 54E-03 · 3. 33E-02 · 3. 39E-03 · 1. 33E-01 ·	5.77C-01 E 0EE-01
- アース SSE 191 キード・1.10と1702 キー 1.32と190 キー 1.77と101 キー 2.388と202 キー 3.98と103 キー 3.41と202 キー 6.88と103 キー 1.34と101 キー - チータ 9月111 キーズ・17月1102 キー 1.98と103 キー 1.20とした キーブ 20日 クロース マックビ クスーム 7.00日 ウスーム 7.00日 マック・7.00日	5 00E-01 /
	5 80E-01 x
	******

Körning 79–07–19 i regelbundna vågor med dömpinställning 4.5 som innebär en dämpning på ca 10 Us/m Bojtyp II Viktv\*\*\*\*\*

Vikt \* 11 5 kg

De med ? markerade körningarna är osäkra. Körningen svarar mot Fig. 6.9. Tabell 5.3 Calibration Factors(till körning Fig. 6.9). Wave height: 0.0168 m/V Buoyamplitude 0.0121 m/V Force 9,561 N/V

		DAM	1 I	PING	(Ns/m)		
15	946	1	0	059		10	402
14	109		9	657		10	820
9	918		8	980		9	598
9	632		9	651		9	539
9	807		9	968			
9	243		9	912			
9	617		9	994		9	596
10	351	?	6	121		9	906
12	282	?	0	865		10	497
9	579		9	475		9	926
						9	709
		<u>Mv.</u>	9.	. 87			

De med ? markerade körningarna är osäkra.

#### 6. FÖRSÖKSRESULTAT

#### 6.1 <u>Verkningsgrad som funktion av dämpkonstanten vid</u> konstant frekvens

Några försöksserier har körts med konstant frekvens och varierad dämpning. Målsättningen för dessa försök var att experimentellt bestämma en optimal dämpfaktor b<sub>1</sub>. För upphängningen med det linjära lagret har två olika frekvenser körts, och för pendelriggen vänd mot vågorna en serie. Seriernas frekvens valdes nära bojens förväntade resonansfrekvens. För pendelriggen vänd mot vågrörelsen visade det sig senare att resonansfrekvensen låg vid 0.85 Hz, där verkningsgraden överträffade den för det linjära lagret.

För det linjära lagret, det vill säga ren hävning, verkar optimum ligga mellan 6 och 10 Ns/m (Fig. 6.1). För pendelriggen vänd mot vågorna tycks optimum ligga mellan 8 och 13 Ns/m (Fig. 6.2).

Om optimum antas inträffa för

$$b_1 = b = \rho \nabla \omega \varepsilon \qquad \dots \qquad (6.1)$$

vilket gäller enligt teorien, så kan den dimensionslösa dämpkonstanten  $\varepsilon$  beräknas för respektive försök. För den rena hävningen erhålles då  $\varepsilon$  = 0.08 à 0.13, för pendelriggen erhålles  $\varepsilon$  = 0.10 à 0.18.

De i figurerna inlagda kurvorna  $\eta = f(b_1)$  är den teoretiska verkningsgraden enligt ekvation (3.16)

$$\eta = \frac{b_1 \omega^3 Y^2}{\rho g^2 r} ... (6.2)$$

med de värden på masskoefficienten  $\mu$  och dämpkoefficienten  $\varepsilon$ som erhållits i medeltal vid anpassning av amplitudresponskurvan till försöksvärden enligt nästa avsnitt.

Med de använda koefficienterna tycks enligt figuren teorin ge en underskattning av verkningsgraden. På grund av mätpunkternas spridning är det svårt att säga något om optimums läge i jämförelse med teorin.



Figur 6.1 Verkningsgraden,  $\eta$ , som funktion av dämpningen, b<sub>1</sub>, för en boj Ø 300 mm och massan 11.5 kg. Linjärt lager. f = 1.05 - 1.07 Hz



Figur 6.2 Verkningsgraden,  $\eta$ , som funktion av dämpningen, b<sub>1</sub>, för en boj Ø 300 mm och massan 11.5 kg. Pendelrigg vänd mot vågorna. f = 1.01-1.03 Hz.

#### 6.2 Amplitudrespons, anpassningsförfarande

För att kunna avgöra hur väl de uppmätta amplitudresponserna ansluter till den uppställda teorin måste de båda koefficienterna för added mass  $\mu$  och hydrodynamisk dämpning  $\varepsilon$  bestämmas.

Detta görs genom att för varje försöksserie med bestämd yttre dämpning b<sub>1</sub> och varierad frekvens f anpassa den teoretiska amplitudresponskurvan till de uppmätta amplitudresponserna. Anpassningen ges av ett variationsförfarande, där  $\mu$  och  $\varepsilon$  varieras tills bästa anpassning erhållits i minsta kvadratmetodens mening, dvs följande funktion minimeras

 $\varphi = \sum_{i} (\Upsilon^{2} (\omega_{i}, \mu, \epsilon) - \widetilde{\Upsilon}_{i}^{2}) \qquad \dots \qquad (6.3)$ 

där Y är den teoretiska amplitudresponsen

$$Y = \sqrt{\frac{(c - V_{\mu}\omega^{2})^{2} + \rho V \varepsilon^{2} \omega^{2}}{(c - (m + \rho V_{\mu})\omega^{2})^{2} + (\rho V \varepsilon \omega + b_{1})^{2} \omega^{2}}} \frac{\cosh (k(h-d))}{\cosh (kh)}$$
(6.4)

och  $\tilde{Y}_i$  är den för respektive frekvens  $f_i$  uppmätta amplitudresponsen( $\omega_i = 2\pi f_i$ ). För övriga beteckningar se kapitel 3. För det linjära lagret gäller m =  $\rho V$  = 11.5 kg. För pendelriggen gäller m = 11.5 kg  $\rho V$  = 10.2 kg.

Anpassningen har utförts på Göteborgs Datacentrals dator och för detta har ett fortranprogram skrivits i vilket minimeringen utförts med Davidon-Fletcher-Powells metod.

I tabell 6.1 nedan redovisas de medelvärden på  $\mu$  och  $\varepsilon$  som erhållits för de olika riggarna. I figur 6.3 redovisas dessutom  $\varepsilon$  och  $\mu$  som funktion av den pålagda dämpningen b<sub>1</sub>. Som synes är dämpkoefficienten  $\varepsilon$  i stort sett lika för de elva i figuren redovisade försöken, medan koefficienten för added mass  $\mu$  är betydligt större för pendelriggen än för det linjära lagret.

Resultatet från pendelriggen riktad med vågorna avviker kraftigt från resultaten för de övriga och har därför inte prickats in i diagrammet.

Tabell	6.1	Medelvärden	på ı	l och	ε	som	erhållits	från
		kurvpassninc	r av	ampl	itι	idres	sponsförsöl	٤.





Figur 6.3 Koefficienten µ och ɛ som erhållits vid kurvpassning till försöksvärden från amplitudresponsförsök vid olika yttre dämpning b<sub>1</sub>.

#### 6.3 <u>Amplitudrespons och verkningsgrad som funktion av</u> frekvensen.

#### Linjärt lager

Tre försöksserier med olika dämpningar har körts för varierad frekvens. Målsättningen för dessa försök var att experimentellt bestämma verkningsgrad och amplitudrespons samt jämföra dessa med teorin.

I figur 6.4a till 6.6a redovisas uppmätt amplitudrespons för de tre olika dämpningarna. För varje försöksserie har  $\mu$  och  $\varepsilon$  bestämts med hjälp av minsta kvadratmetoden så att amplitudresponskurvan fått så god anpassning till punkterna som möjligt i minsta kvadratmetodens mening.

I figur 6.4b till 6.6b redovisas uppmätt verkningsgrad för samma försök. För de teoretiska kurvorna har här använts samma värden på  $\mu$  och  $\epsilon$  som erhölls vid anpassningen av samhörande amplitudresponskurva.

Försöksvärdena för både amplitudresponskurvan och verkningsgraden uppvisar lokala minima vid 0.90 – 0.95 Hz, trots att reflexionerna från bassängens sidor är obetydliga jämfört med vid tidigare försök i rännor. Anpassningen mellan försöksvärdena och amplitudresponskurvan är inte speciellt bra. Trots detta är det ganska god överensstämmelse vad beträffar verkningsgraden.

#### Pendelrigg riktad mot vågorna

Atta försöksserier med olika dämpningar har körts för varierad frekvens med pendelarmen riktad mot vågornas utbredningsriktning. I figur 6.7 till 6.14 redovisas dessa försök.

Allmänt kan sägas att punkternas anslutning till kurvan för dessa försök är sämre än i fallet med det linjära lagret, vilket till stor del beror på att det tidigare noterade minimat vid 0.90-0.95 Hz här ligger vid resonanstoppen. Resonansfrekvensen är här något lägre bl.a. beroende på att deplacementet var  $\rho V =$ 10.2 kg och massan m = 11.5 kg. I försöken med det linjära lagret var den svängande massan lika med deplacementets massa m =  $\rho V = 11.5$  kg. Även verkningsgradsförsöken gav markanta minima vid 0.90-0.95 Hz, med stor avvikelse mellan teoretisk kurva och försöksvärden som följd.

#### Pendelrigg riktad med vågorna

En försöksserie har körts för varierad frekvens med pendelarmen riktad med vågornas utbredningsriktning.

För denna serie har ingen rimlig anpassning till försöksvärdena erhållits av den teoretiska funktionen. Egentligen erhölls två olika minima varav den till synes bästa är presenterad i figur 6.15. Dämpkoefficienten  $\varepsilon$  har här ett negativt värde vilket är svårt att förklara. För den andra erhållna matematiska regressionen var  $\varepsilon$  positiv men nästan noll. Denna senare kurva hade dock en okulärt sämre anpassning till försökspunkterna.



Fig.6.4b. Verkningsgrad som funktion av frekvensen för samma försök som ovan. För den teoretiska kurvan har använts de värden på ω och ε som erhölls við anpassningen av amplitudresponskurvan ovan.



Fig.6.5a.

Anpassning av amplitudresponskurva enligt teorin till försökspunkter vid dämpinställningen b. = 10.1 Ns/m. Upphängningsrigg: linjärt lager. Boj Ø 300 mm. Massa 11.5 kg.



Fig.6.5b.

Verkningsgrad som funktion av frekvensen för samma försök som ovan. För den teoretiska kurvan har använts de värden på  $\omega$  och  $\varepsilon$  som erhölls vid anpassningen av amplitudresponskurvan ovan.



Fig.6.6a.

Anpassning av amplitudresponskurva enligt teorin till försökspunkter vid dämpinställningen b. = 16.8 Ns/m. Upphängningsrigg: linjärt lager. Boj Ø 300 mm. Massa 11.5 kg.



Fig.6.6b. Verkningsgrad som funktion av frekvensen för samma försök som ovan. För den teoretiska kurvan har använts de värden på  $\omega$  och  $\varepsilon$  som erhölls vid anpassningen av amplitudresponskurvan ovan.





Anpassning av amplitudresponskurva enligt teorin till försökspunkter vid dämpinställningen b = 4,4 Ns/m. Upphängning: pendelrigg mot vågorna. Boj Ø 300 mm. Massa 11.5 kg Deplacement 10.2 kg.





Verkningsgrad som funktion av frekvensen för samma försök som ovan. För den teoretiska kurvan har använts de värden på  $\omega$  och  $\varepsilon$  som erhölls vid anpassningen av amplitudresponskurvan ovan.





Anpassning av amplitudresponskurva enligt teorin till försökspunkter vid dämpinställningen b = 6,3 Ns/m. Upphängning: pendelrigg mot vågorna. Boj Ø 300 mm. Massa 11.5 kg Deplacement: 10.2 kg.



Fig.6.8b. Verkningsgrad som funktion av frekvensen för samma försök som ovan. För den teoretiska kurvan har använts de värden på ω och ε som erhölls vid anpassningen av amplitudresponskurvan ovan.



Fig.6.9a. Anpassning av amplitudresponskurva enligt teorin till försökspunkter vid dämpinställningen b<sub>1</sub> = 9.9 Ns/m. Upphängning: pendelrigg mot vågorna. Boj Ø 300 mm. Massa 11.5 kg Deplacement 10.2 kg.





Verkningsgrad som funktion av frekvensen för samma försök som ovan. För den teoretiska kurvan har använts de värden på  $\omega$  och  $\varepsilon$  som erhölls vid anpassningen av amplitudresponskurvan ovan.



Fig.6.10a.

Anpassning av amplitudresponskurva enligt teorin till försökspunkter vid dämpinställningen b = 12.5 Ns/m. Upphängning: pendelrigg mot vågorna. Boj Ø 300 mm. Massa 11.5 kg Deplacement 10.2 kg.



Fig.6.10b.

Verkningsgrad som funktion av frekvensen för samma försök som ovan. För den teoretiska kurvan har använts de värden på  $\omega$  och  $\varepsilon$  som erhölls vid anpassningen av amplitudresponskurvan ovan.





Anpassning av amplitudresponskurva enligt teorin till försökspunkter vid dämpinställningen b<sub>1</sub> = 13.1 Ns/m. Upphängning: pendelrigg mot vågorna. Boj Ø 300 mm. Massa 11.5 kg Deplacement 10.2 kg.



Fig.6.11b.

Verkningsgrad som funktion av frekvensen för samma försök som ovan. För den teoretiska kurvan har använts de värden på  $\omega$  och  $\varepsilon$  som erhölls vid anpassningen av amplitudresponskurvan ovan.



Fig.6.12a. Anpassning av amplitudresponskurva enligt teorin till försökspunkter vid dämpinställningen b = 15.5 Ns/m. Upphängning: pendelrigg mot vågorna. Boj Ø 300 mm. Massa 11.5 kg

Deplacement 10.2 kg.



Fig.6.12b.

Verkningsgrad som funktion av frekvensen för samma försök som ovan. För den teoretiska kurvan har använts de värden på  $\omega$  och  $\varepsilon$  som erhölls vid anpassningen av amplitudresponskurvan ovan.



Fig.6.13a.

Anpassning av amplitudresponskurva enligt teorin till försökspunkter vid dämpinställningen b<sub>1</sub> = 17.8 Ns/m. Upphängning: pendelrigg mot vågorna. Boj Ø 300 mm. Massa 11.5 kg Deplacement 10.2 kg.



Fig.6.13b.

Verkningsgrad som funktion av frekvensen för samma försök som ovan. För den teoretiska kurvan har använts de värden på  $\omega$  och  $\varepsilon$  som erhölls vid anpassningen av amplitudresponskurvan ovan.



Fig.6.14a.

Anpassning av amplitudresponskurva enligt teorin till försökspunkter vid dämpinställningen b<sub>1</sub> = 25.9 Ns/m. Upphängning: pendelrigg mot vågorna. Boj Ø 300 mm. Massa 11.5 kg Deplacement 10.2 kg.



Fig.6.14b.

Verkningsgrad som funktion av frekvensen för samma försök som ovan. För den teoretiska kurvan har använts de värden på  $\omega$  och  $\varepsilon$  som erhölls vid anpassningen av amplitudresponskurvan ovan.



Fig. 6.15a. Anpassning av amplitudresponskurva enligt teorin till försökspunkter vid dämpinställningen b<sub>1</sub> = 12.8 Ns/m. Upphängning: pendelrigg med vågorna. Boj Ø 300 mm. Massa 11.5 kg. Deplacement 10.2 kg.



Fig.6.15b. Verkningsgrad som funktion av frekvensen för samma försök som ovan. För den teoretiska kurvan har använts de värden på  $\omega$  och  $\varepsilon$  som erhölls vid anpassningen av amplitudresponskurvan ovan.

7. DISKUSSION AV FÖRSÖKSRESULTAT

#### 7.1 Linjärt lager

#### Hydrodynamiska konstanter

I tabell 7.1 nedan återges de värden på "added mass" koefficient  $\mu$  och dämpkoefficient  $\varepsilon$  som erhållits vid tidigare försök och vid föreliggande försök med samma boj Ø 300 mm, massa 11.5 kg och rundade hörn.

Tabell 7.1Sammanställning av olika erhållna  $\mu$  och  $\epsilon$  för bojØ 300 mm, massa 11.5 kg och rundad nos $\Box$ 

		New York and the second se
Försök	μ	ε
Egensvängningsförsök ränna och bassäng (GR:16) utan yttre dämpning	0.42	0.19
Okulär anpassning till amplitudrespons- kurvan, bassängförsök (GR:16), utan yttre dämpning	0.47	0.17
Okulärt anpassad kurva till försök med yttre dämpning i ränna bredd 1.82 m (GR:14)	0.33	0.07
Regressionsanpassad kurva till föreliggande försök med yttre dämpning i bassäng, linjärt lager	0.23	0.17

Det framgår av tabellen att den hydrodynamiska dämpkonstanten  $\varepsilon$ stämmer bra överens för alla försök utom för energiupptagning i en ränna.  $\varepsilon$  är proportionell mot den energi som radieras ut från bojen, och i en smal ränna reflekteras en del energi i rännans väggar och återvänder till bojen, varför värdet på  $\varepsilon$  skulle kunna bli mycket lågt. För egensvängningsförsöken utnyttjades endast 1.5 period av svängningen varför reflektionerna aldrig hann påverka mätresultatet.

Varför värdet på koefficienten för "added mass" i föreliggande försök bara är hälften av vid de andra försöken är svårt att förklara. Tillsvidare får vi lov att konstatera detta, eftersom resultatet är entydigt från de tre utförda serierna. Se figur 6.3.

#### Energiupptagning

Verkningsgraden eller upptagningsbreddskvoten (capture width ratio) är vid de föreliggande försöken något större än vad vi tidigare uppskattat och tillämpat t.ex. i examensrapporten Vågenergi för Gotland (Byström m.fl. 1980). De funna konstanterna ger trots skillnad i  $\mu$  ingen avsevärt stor ändring av energiupptagningsförmågan. Ur dimensioneringssynpunkt är det dock viktigt att känna  $\mu$  noggrannare eftersom koefficienten påverkar konstruktionens storlek.

En slutgiltig utvärdering av energiupptagningsförmågan avses utföras, när de försök med energiupptagning i oregelbundna vågor fullföljts, som nu drivs i laboratoriet.

#### Amplitudrespons

De försök som har utförts i den breda bassängen uppvisar fortfarande ett lokalt minimum mellan 0.90 och 0.95 Hz. Det torde vara svårt att förklara detta minimum eftersom det finns många andra "övertoner" i bassängen som borde slå igenom på samma sätt. Se tabell 7.2. Vid frekvensanalys av vågorna i bassängen utan boj kan frekvensen inte spåras.

#### 7.2 Pendelrigg

För pendelriggen upphängd mot vågorna har beträffande verkningsgraden en liten förbättring erhållits gentemot det linjära lagret. Värdet på dämpkonstanten  $\varepsilon$  var ungefär lika som för det linjära lagret  $\varepsilon$  = 0.20. Masskoefficienten var dock 2.6 ggr större, se tabell 6.1. Anpassningen mellan kurvor och försökspunkter är sämre än för det linjära lagret.

För pendelriggen upphängd med vågorna erhölls en tre ggr större verkningsgrad än för de övriga försöken. Detta kan förklaras med det moment horisontalkraften påverkar upphängningen med. Se följande figur.

. 53

Tabell	7.2	Frekvens bassängen	för i	olika sidled	resc och	onanssvängningar längsled.	i

LAENGD:	= 17.9	M	BREDD=	9.3 M	0JUP= .67		
	VAAGL.		VAAGL.	PER	PER	FREK.	FREK
N	LAENGO		BREDD	LAENGD	BREDO	LAENGU	BREDD
1.07	35.8000	,	18.6000,	13.9962,	7.3165/	0.0714,-	0.1367
2.0,	17.9000	,	9.3000,	7.0459,	3.7478,	0.1419.	0.2669
30,	11 9333	,	6.2000.	4 7495,	2.5924,	0.2105.	0.3957
4 0,	8 9500		4 6500.	3 A157.	2 0354.	0 27AA.	0 4913
5 A.	7 1400		3 7200.	ο φ <u>λ</u> εφ.	1 7134	A 3305.	A 5974
Δ.Ο. 4 Ο		<i>.</i>	7 1000	0 EATX	1 SASA	A 7000	0 44A0
17 A	0.2007 # 11472	,1	0.1000) 0.2304	2 202707	4 77.47.44 4 77.47.44	A ARAE	0.0041 0.77250
0 A	0.1170 A A7780	,	<u>.</u>	4 07240		0.4040) A #AZZ	
$\circ$ $\circ$	****/	ŧ	2.3230) 5.773	1.7744/77	a a stand of the second se	V.UVOO) A EEE4	V./7/0 A CEAE
	3.7//3		4 0/00///	1.00107	a. 17.7409 4. 4.747777	O COULS A ZAAM	U. 0444 1 A. 0AZZ
	0.00VV 7.0545	1	1.0000	1.00000	1.1000)		- V. 7VQ-3 
alan Qar alman Art	0.2040 0.0077	•	1.8707/	1.00000	1.04/%)	U.0420) 0.0420)	0.7043
1.21.V) 1.77 A	2.7833	3	1.3000,	1.46/1)	1	V.8816) 0.7404	· 0.7773
1.0.05 4.8 A	2.7000	1	1.4300)	1.3741)	0.7077)	U./189) 0 7500	1.0417
1.44.Q)	2.00/1	2	1.32007	1.04847	U. 7241)	0./0 <i>2</i> ///	LUMAL
15.0,	2.386/	, <b>1</b>	1.2400.	1.2732)	0.8922)	0.7854	1.1208
16.05	2.2375	,	1.1625,	1.2252)	0.8635,	0.8162/	1.1581
17.0,	2.1059	1	1.0941,	1.1829,	0.8375,	0.8454,	1.1940
18.04	1.9889	ļ.	1.0333,	1.1451,	0.8138	0.8733,	1.2288
19.07	1.8842	,	0.9789,	1.1112)	0.7920)	0.8999,	1.2627
20.07	1.7900	,	0.9300,	1.0805.	0.7719,	0.9255	1.2955
21.07	1.7048	,	0.8857,	1.0524,	0.7532)	0.9502,	1.3276
22.0,	1.6273	į	0.8455,	1.0267,	0.7359,	0.9740,	1.3589
23.0,	1.5565.	;	0.8087,	1.0029,	0.71975	0.9971.	1.3894
24.0,	1.4917.	÷	0.7750,	0.9809,	0.7046,	1.0195,	1.4193
25.0,	1.4320	,	0.7440,	0.9604,	0.6903/	1.0413,	1.4436
26.0,	1.3769.	,	0.7154,	0.9412,	0.6769,	1.0625,	1.4773
27.0,	1.3259	,	0.3889,	0.9232)	0.6643.	1.08325	1.5055
28.0+	1.2786	,	0.6643,	0.9062.	0.65237	1.1035,	1.5331
29.07	1.2345	3	0.6414,	0.8902,	0.6409.	1.1234,	1.5602
30.0,	1.1933	į.	0.6200.	0.8750/	0.6302)	1.1428.	1.5869
31.0,	1.1548	,	0.6000,	0.8606,	0.6199	1.1620.	1.6131
32.0,	1.1188	,t	0.5813,	0.8439,	0.6102.	t teo7.	1.6389
33.0.	1.0848	,	0 5636.	0 8339.	0 4008.	1 1992.	1 AAAA
34.07	1.0529		0 5471.	0 8215.	0 5919.	1 2173,	1 8994
X55 0. V	1 0229		Λ Ψ\X+Δ.	0 2094.	0 5032.	1 0740	1 7140
	A 9922		∩ 5147.	6 <b>70</b> 00	V elber	4 (1000) (1000) 4 (1000) (1000)	4 7702
7777 A.	0 947A		A 5477	A 7974.	Δ Ξ 4 7 8 .	4 97A+.	4 72.57
WA AL	6 Q421		A <u>A</u> QOR.	6 77XQ	A 5500	4 <b>707</b> 0	1 79AC
70 A	A 0170	1	A 4772.0	N 7220	A REPORT	4 170 A A	4 0A07
an o			V. M7 0777 A 435A	V.ZOISA A 77570	V.UU1/3 A #A#77	a ny manany a na kaominina dia mampi	ふしつくてい キーの穴のみ
AT A		,	A ARTT	ు విజిరియిగ గా రాశాలల	9999 - 1999 1999 - 1999 - 1999 - 1999 - 1999 1999 - 1999 - 1999 - 1999 - 1999 - 1999 - 1999 - 1999 - 1999 - 1999 - 1999 - 1	a ny mpiny avala. Ny manjara ava	1.0124 4.055777
and an	V. GZ G4. A <b>GR</b> OA	3	V. MUDZO A AAMM	N . / m / 7 . A . mmana		ತ್ರ - ಆಕರ್ಷನ್ ಮುಂಗ ಕೃಷ್ಣ ಕ್ರಾಮಾನಗಳ ಗಳ	a s Danarah a mamana y
ann a' seachann. Anns an seachann	9.0324 A.07707		9.100 A.C.A.C.A.C.A.C.A.C.A.C.A.C.A.C.A.C.A.C	9.70077 6.77707	చించియియింది. ఈ భాగాగరి	ఉందిఉంచింది. శి. ఝారణారం	
an an saonan saonan an saonan saonan sao Tao an saonan	2.0040 A 0177	j.	V. ** 3 4.3 × A Amm	NELZ INDER A maren	V. V. 40 m.) A staav	1	
a dit at	V. 4130 A marz		VI. MELLIN N. AAMM	9000 ala Miri Alama marika	V. 22VA) A malam		
승규가 있는 것이 같아.	- V. ZYCÓ		V. 41.227	오늘 가슴 소문 것	見した乱差のと	그는 사람은 한 것	이 생각 영화 가격이 있다.

#### Mot vågorna

momenten motverkar rörelsen i både uppåtgående och nedåtgående rörelse.

### <u>Med vågorna</u>

momenten medverkar vertikalkraften i både uppåtgående och nedåtgående rörelse.







Den höga verkningsgraden för pendelriggen upphängd med vågornas utbredningsriktning torde vara korrekt. Den kan förklaras med att två frihetsgrader hävning och stampning utnyttjas samtidigt. Upphängningsanordningen torde dock vara helt orealistisk för större maskiner. Den i denna rapport använda teorin är dessutom helt otillräcklig för att beskriva dess uppförande.