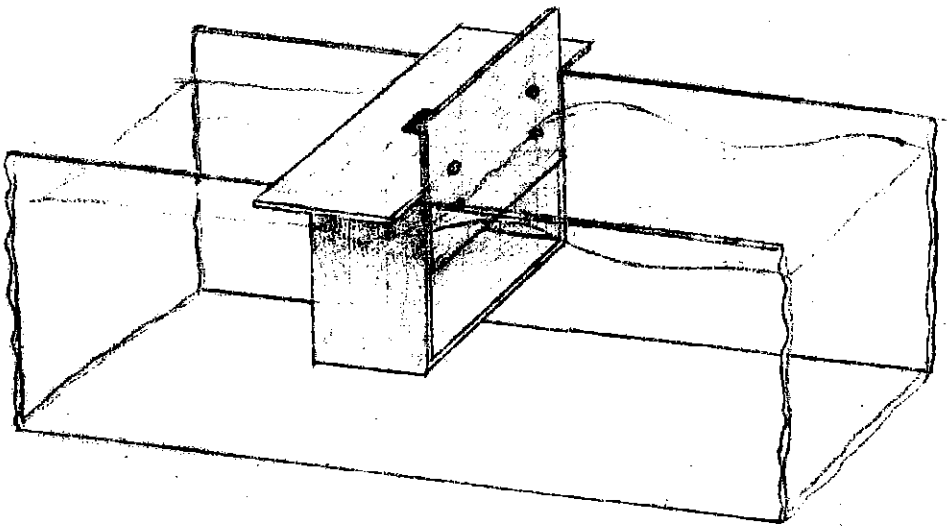
Cvb
CHALMERS TEKN. HÖGSKOLA
Sektion V, biblioteket
1981 -09- 17

Modellförsök med vågkraftverk av typ OWC

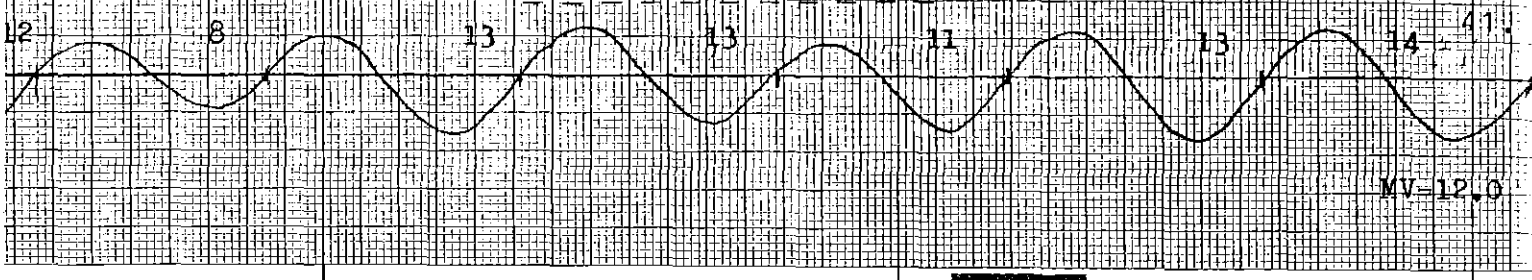


av

Dan Jannesson

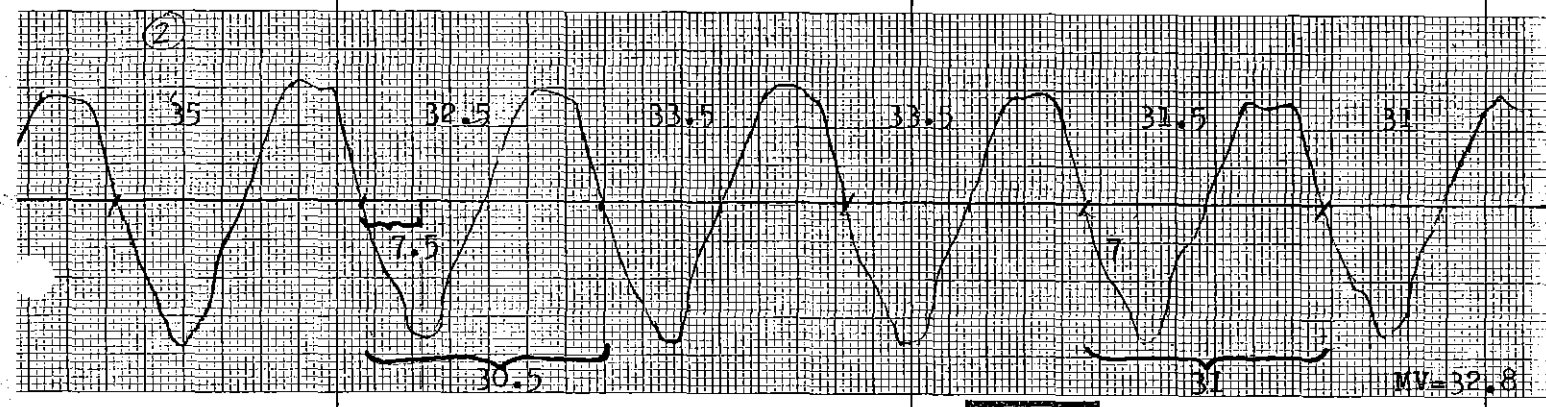
Sofia Jannesson

MÄTKURVOR VID FÖRSÖKET

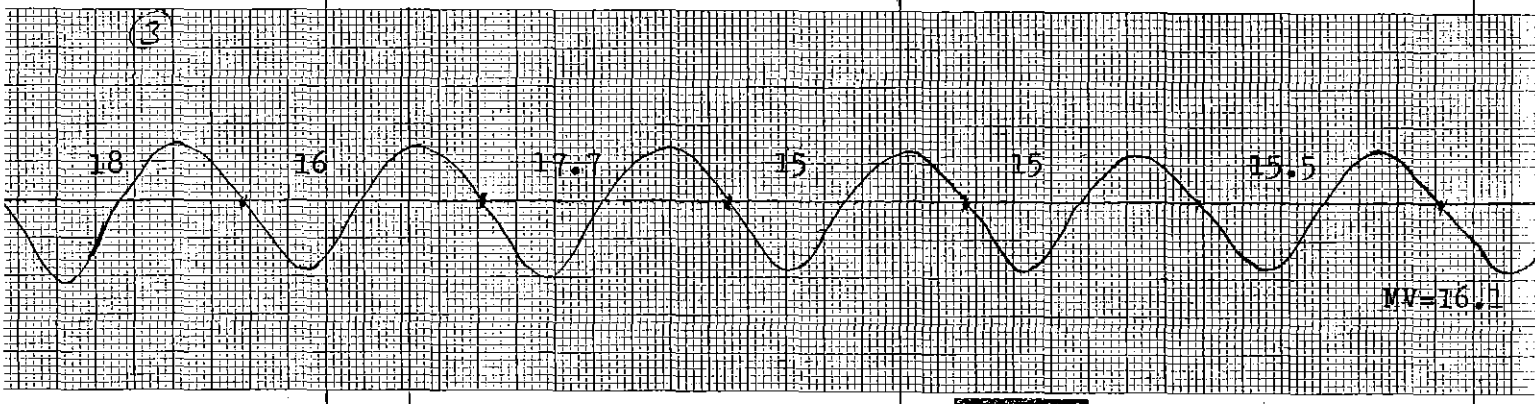


Denna sida ersätter sid. 41

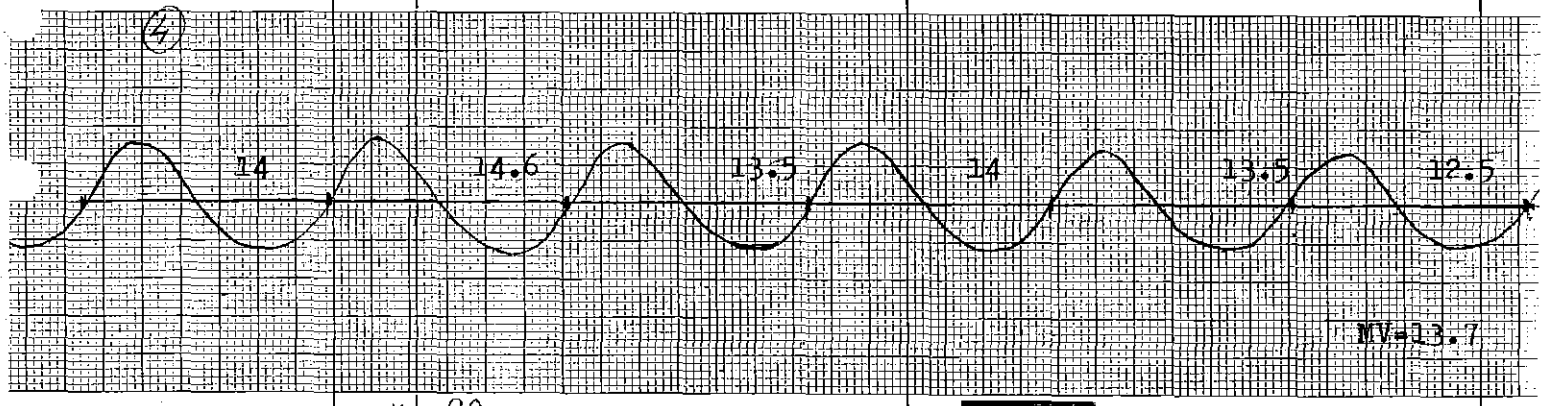
MFE SALEM, N.H. U.S.A.



MFE SALEM, N.H. U.S.A.



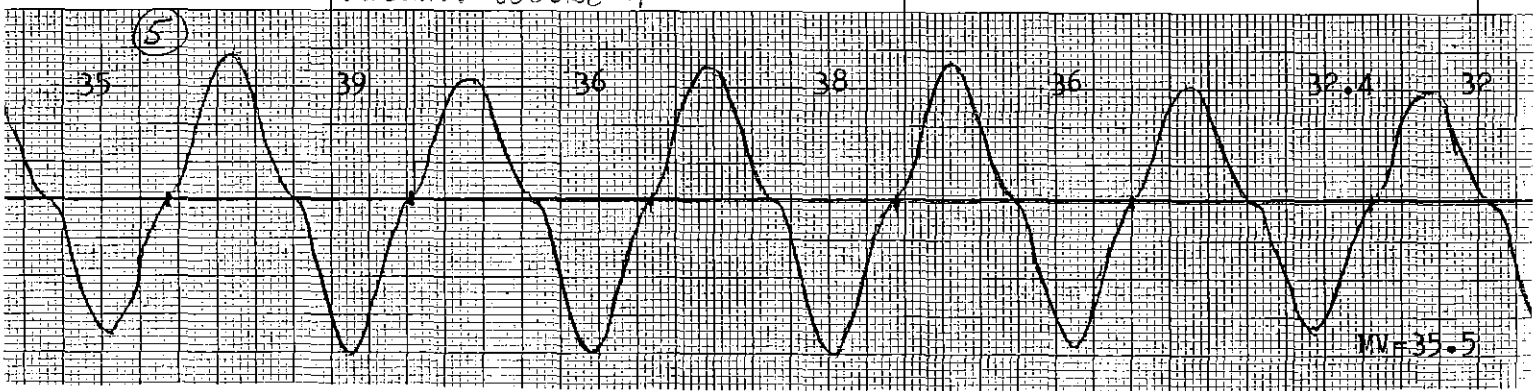
MFE SALEM, N.H. U.S.A.



y = 20cm

MFE SALEM, N.H. U.S.A.

Datum: 800623-4

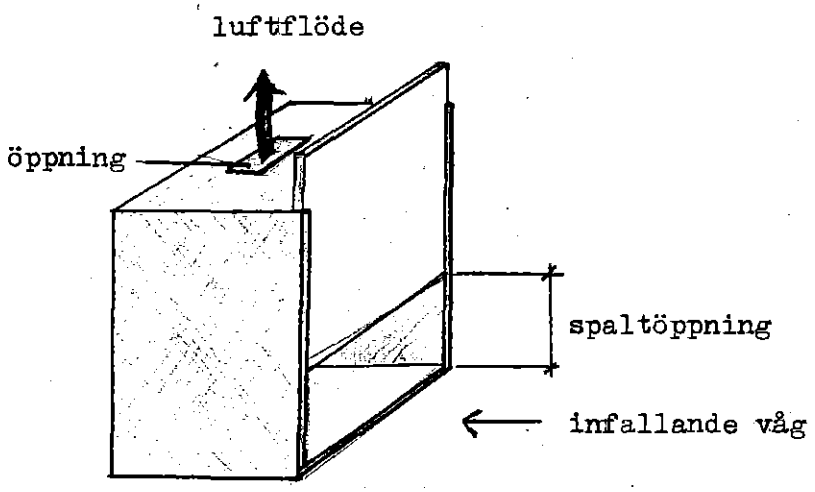


INNEHÅLLSFÖRTECKING

		sid.
	SAMMANFATTNING	1
1.	INLEDNING	3
2.	ALLMÄNT OM FÖRSÖK	4
2.1	Utvecklandet av den oscillerande vattenpelaren (OWC)	4
2.2	Kamei	17
2.3	Vickers anordning	18
3.	TEORETISKA GRUNDBEGREPP FÖR VÅGENERGI	19
3.1	Definitioner och härledningar	19
3.2	Teori för dimensionering av luftklocka	23
3.3	Formelsamling	25
4.	MÄTUTRUSTNING	27
5.	BESKRIVNING AV ARBETSMOMENT	30
5.1	Kalibrering av givare	30
5.2	Beskrivning av laborationsförsök	32
5.3	Utvärdering av mätresultat	33
6.	RESULTAT OCH KOMMENTARER	37
6.1	Beräkningsexempel	37
6.2	Spalthöjdens inverkan på verkningsgraden	42
6.3	Dämpningens inverkan på verkningsgraden samt dess frekvensberoende	44
6.4	Amplitudresponsen som funktion av frekvensen	47
7.	REFERENSLISTA	52
8.	BETECKNINGSLISTA	53
	BILAGA: Kommentarer till diagram	

SAMMANFATTNING

Detta examensarbete har tillkommit inom Gruppen för Vågenergiforskning vid Chalmers Tekniska Högskola. Avsikten har varit att genom försök med modellen nedan studera hur vågenergi upptas.



Energiupptagningen ur vågorna erhålls genom att den luft, som finns inne i modellen (luftklockan), pressas ut genom en öppning och driver en tillkopplad turbin.

Genom laborationsförsök har den hydrodynamiska verkningsgraden studerats. Med hjälp av olika dämpningar, vågfrekvenser samt en varierbar spaltöppning har förhållandena varierats. Vidare har dämpningens frekvensberoende samt vågamplitudresponsen studerats.

Det visade sig att den största spaltöppningen gav det bästa resultatet med avseende på verkningsgraden. Det maximala värdet blev närmare 100% då vågfrekvensen var ca 1Hz.

Vidare är verkningsgraden starkt beroende av hur luftflödet dämpas. En öppning på 5 x 5 cm gav bäst resultat. Den största dämpningen vid olika spaltöppningar erhölls för vågfrekvenser inom intervallet 0,6 - 0,9 Hz.

Då amplitudresponsen studerades fann vi att det maximala värdet uppnåddes för en frekvens som var lägre än modellens resonansfrekvens. Den största orsaken till detta är att en större vattenmassa än den som finns inne i luftklockan kommer i svängning, vilket minskar resonansfrekvensen.

Arbetet omfattar enbart modellförsök. Den ekonomiska sidan av vågenergin kommer därför inte att behandlas här.

1. INLEDNING

Vårt första mål var att komma fram till en konstruktion med lämpliga dimensioner. Redan på detta stadium fick vi stor hjälp av vår handledare Göran Olsson. Då dimensionerna äntligen var färdiga återstod problemet att förverkliga konstruktionen. Det var vid denna tidpunkt som vi insåg betydelsen av praktisk hjälp.

Tack vare 1:e instrumentmakare Georg Nilsson vid vattenbyggnadsinstitutionen blev luftklockan färdig och placerad i vattenrännan. De elektriska detaljerna fixade Bengt Carlsson. Teoretisk vägledning har vi också fått av Lars Bergdahl.

Under sommaren 1980 utfördes en mångfald laborationsförsök. Protokoll och utskrifter till dessa försök finns sparade i pärmar.

2. ALLMÄNT OM FÖRSÖK

2.1 Utvecklandet av den oscillerande vattenpelaren (OWC)

R Meir (National Engineering Laboratory) - Glasgow.

NEL har arbetat ca 3 år med vågenergiforskning. I fig. 2 visas den första modellen som användes. Modellen, som var tillverkad av splitterfritt glas, utgjordes av en låda som nertill var öppen. Upptill var lådan stängd förutom en öppning.

Den inkommande vågen förmår vattenpelaren att oscillera vilket i sin tur orsakar ett luftflöde genom öppningen. I kammaren uppmättes vattenytans förskjutning samt lufttrycket.

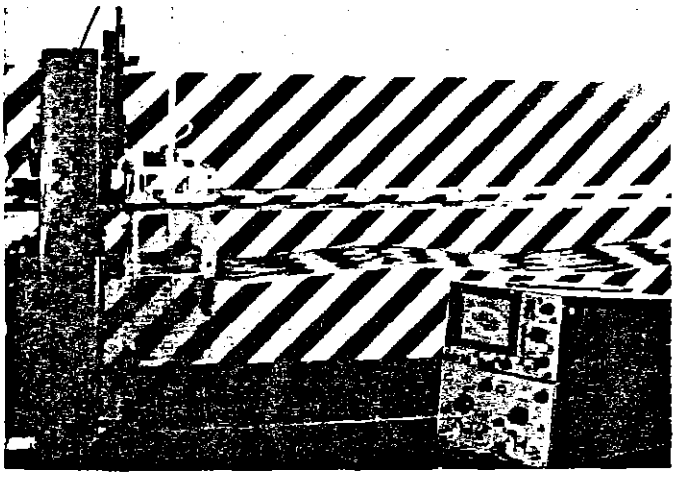


Fig. 1 Modell i vattenränna

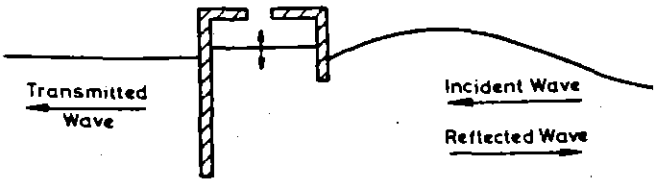


Fig. 2 Två-dimensionellt oscillerande vattenpelare

På detta sätt erhölls ett tryck/volym-diagram, vilket är synligt på oscilloskåpet i fig. 1. Detta är ett mått på den av anordningen upptagna effekten.

Vid undersökningarna har man använt sig av två-dimensionella modeller, dels den fysiska modellen i den smala rännan och dels en numerisk modell.

Den numeriska eller matematiska modellen ger information om vad som händer, vilket skulle vara svårt att erhålla från mätinstrumenten i rännan. Den fysiska modellen talar om vad som händer i tillstånd då den numeriska modellens antaganden inte längre är gällande.

När amplitudresponsen blir mycket stor gäller inte längre linjära antaganden.

I båda fallen har man kunnat identifiera storleken av de infallande, reflekterade och transmitterade vågorna samt utfört en energibalans.

Vissa ändringar av lådkonstruktionen gjordes. Genom att låta baksidan gå djupare ner än framsidan reducerades storleken av den transmitterade vågen. Vidare erhölls det högsta värdet på upptagen effekt, då vattenpelarens resonansfrekvens överensstämde med den infallande vågens frekvens.

Slutligen kom man fram till en konstruktion med den mest lämpliga geometrin för en två-dimensionell vattenpelare (se fig. 3).

Modellen är asymmetrisk. Vidare är pelarens "mynning" (spaltöppning) riktad framåt hellre än nedåt, vilket förbättrar förbindelsen mellan vattenpelaren och vågorna eller mer exakt, vilket ökar den tillagda dämpningen av pelaren.

Om man kan få en hög dämpning, öka de dämpande krafterna relativt tröghets- och styvhetskrafter, fås en bra bandbredd (se fig. 4).

Det finns ett optimalt värde på spaltöppningen. Om denna är för liten, så stryps vattenpelaren, och om den är för stor, försämras dämpningen.

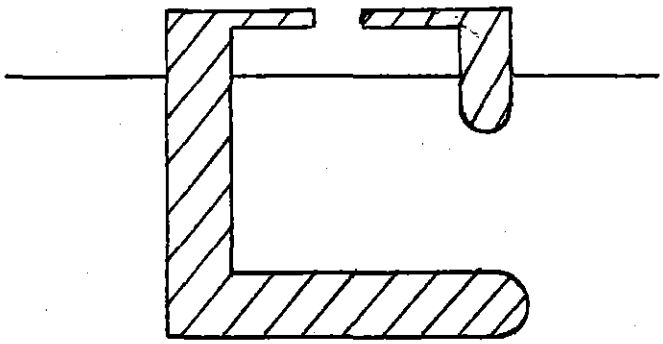


Fig. 3 Två-dimensionellt oscillerande vattenpelare

I fig. 4 visas verkningsgraden som funktion av vågperioden för olika lådkonstruktioner.

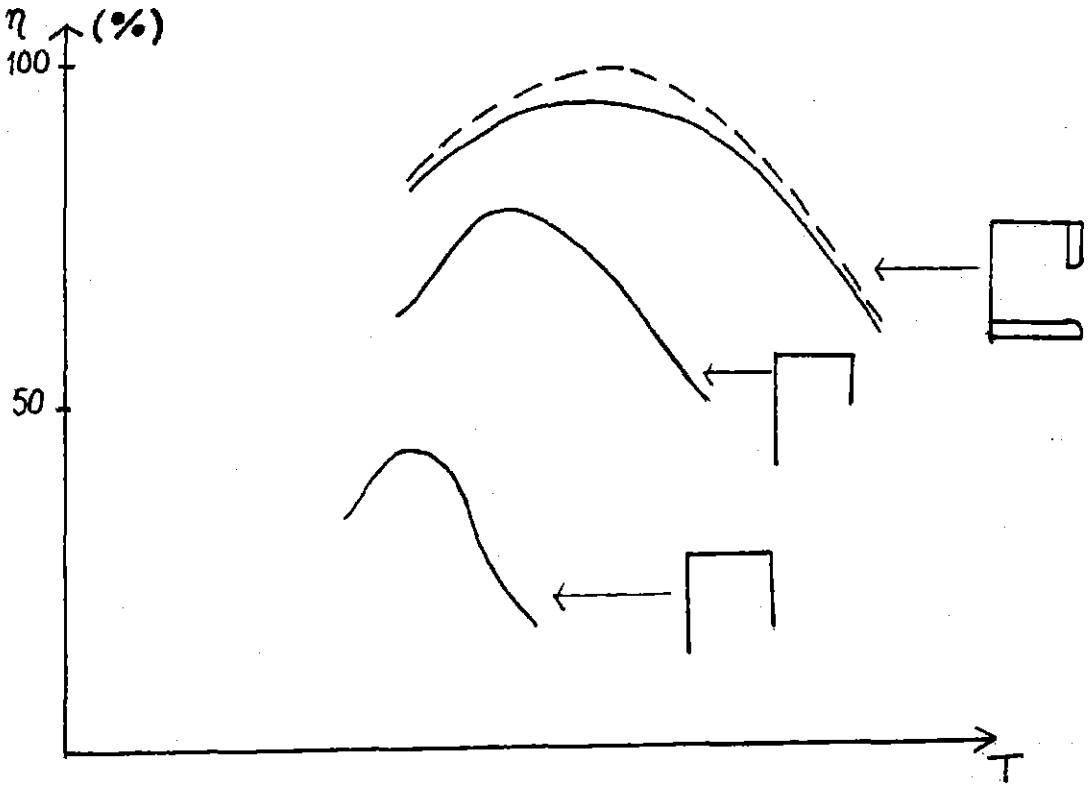


Fig. 4 Hydrodynamisk verkningsgrad som funktion av vågperioden för olika lådkonstruktioner.

Den streckade kurvan, som representerar den numeriska modellen, ger en bra jämförelse med modell 3. Kurvorna 1 och 2 har mindre bandbredd än kurva 3 och dessutom är den maximala verkningsgraden lägre för dessa beroende på vattenvirvlar.

Det är ganska väl känt att en symmetrisk anordning aldrig kan få en verkningsgrad överstigande 50%.

Försök har även gjorts med en tredimensionell axelsymmetrisk vattenpelare. Det visade sig att denna anordning gav verkningsgradskurvor med för liten bandbredd för att de skulle ha någon praktisk betydelse.

Där den praktiskt utnyttjbara vågenergin finns, måste man räkna med mycket stora krafter. Problemet kan då vara att klara av dessa krafter. Exempel på lösningar är:

1) överföra dem till sjöbädden

2) överföra dem till angränsande vågor

3) balansera dem med lokala tröghetskrafter

Alternativ nr 1 är troligen begränsat till grunt vatten, vilket innebär att problemet inte är fullständigt löst, eftersom resurserna oftast finns på djupt vatten.

I alternativ nr 2 kan krafterna överföras antingen längs vågen, i vågriktningen eller vinkelrätt mot denna, tvärs över vågkammen. Att överföra krafterna vinkelrätt mot vågriktningen innebär stora strukturella problem.

NEL har satsat på det tredje alternativet, vilket alltså innebär att lokalt motstå krafterna, inte överföra dem på något märkbart avstånd.

De mothållande krafterna utgörs av konstruktionen bakom pelaren samt vattenmotståndet runt omkring anordningen. Problem uppstår om vattenmassan rör sig, eftersom det då är sannolikt att vågor alstras, vilket skulle leda bort den energi från anordningen som borde ha tagits upp.

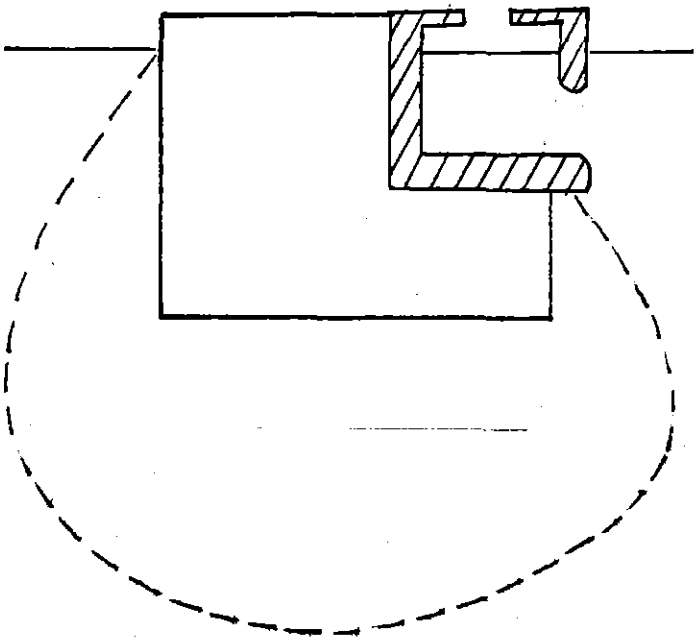


Fig. 5 Förankrad luftklocka

Vid utvecklandet av en flytande konstruktion har man studerat en plattas svängningsrörelse i vatten (se fig. 6).

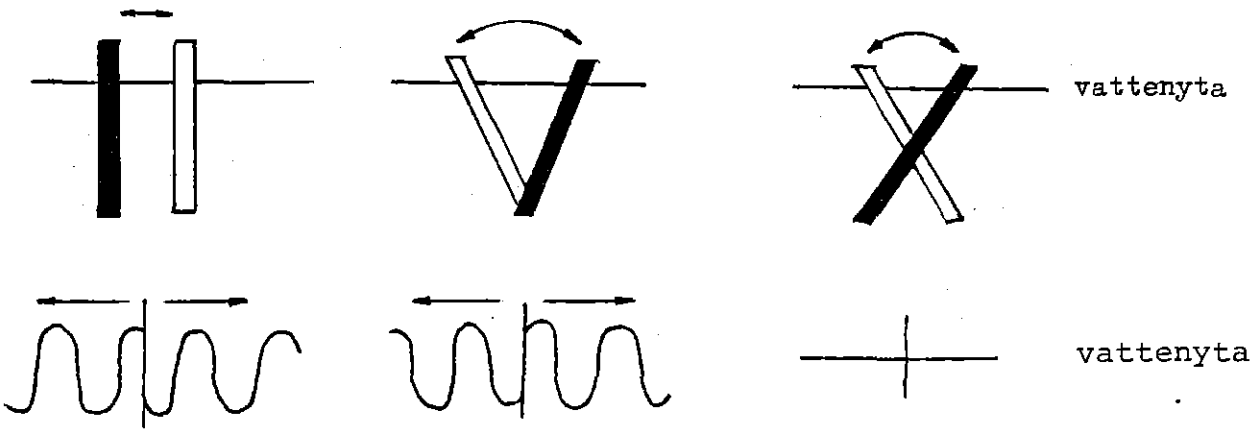


Fig. 6 Upphävning av vågor

Det är ett välkänt fenomen, att om man väljer plattans geometri rätt, ställer den vid rätt nivå och sätter igång den vid rätt frekvens, kommer den inte att alstra vågor på någon sida.

I fallet med den flytande luftklockan är antalet frihetsgrader mycket större och problemet medför fler komponenter men principen är densamma.

Modellen i fig. 7 kan åstadkomma upphävning av vågor i mycket hög grad. Konstruktionens dimensioner är blygsamma i jämförelse med vågornas geometri; djupet till den horisontella plattan är ungefär 1/10 av våglängden och den totala dimensionen från fram- till baksidan är ungefär en fjärdedels våglängd.

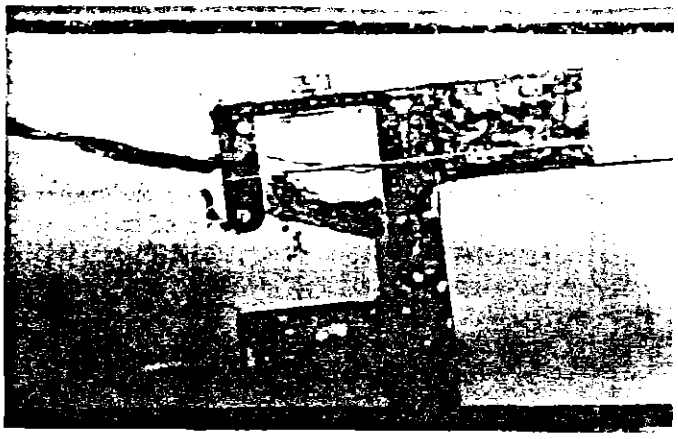


Fig. 7 Flytande konstruktion

Fig. 8 jämför verkningsgraden för modellerna i fig. 5 och 7. Trots en relativt hög verkningsgrad för den flytande luftklockan, beroende på vågupphävning, erhölls inte total upphävning, vilket förklarar gapet mellan kurvorna. Troligen

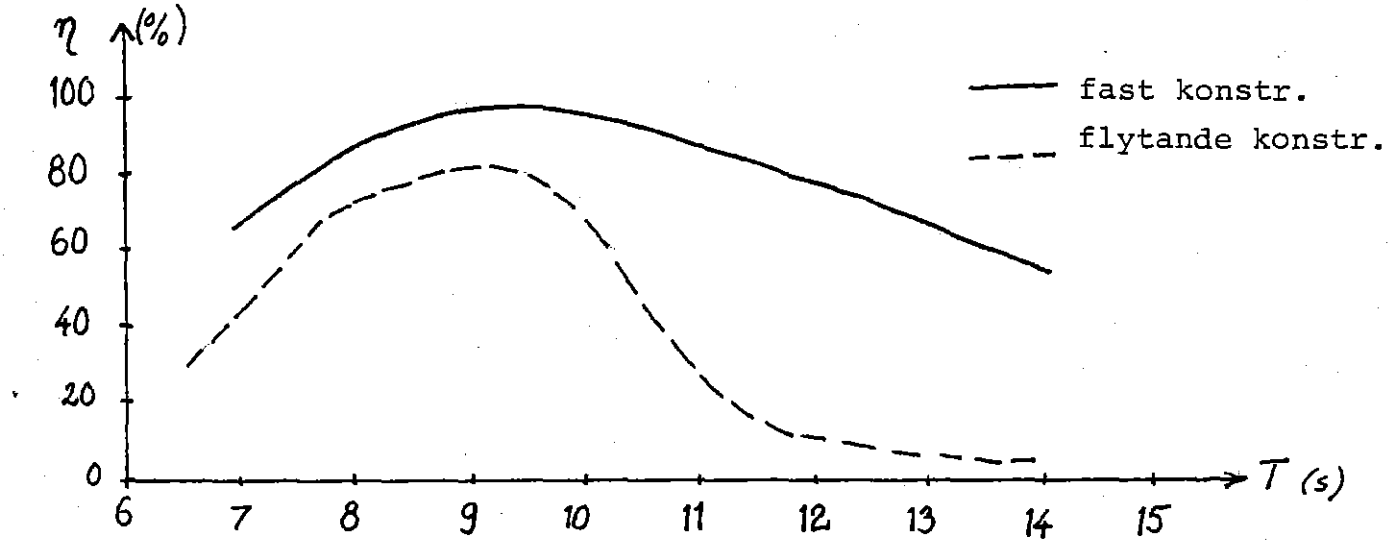


Fig. 8 Jämförelse mellan fast och flytande konstruktion

kommer gapet att kunna minskas genom ytterligare arbete, men konstruktionerna kommer aldrig att bli likvärdiga.

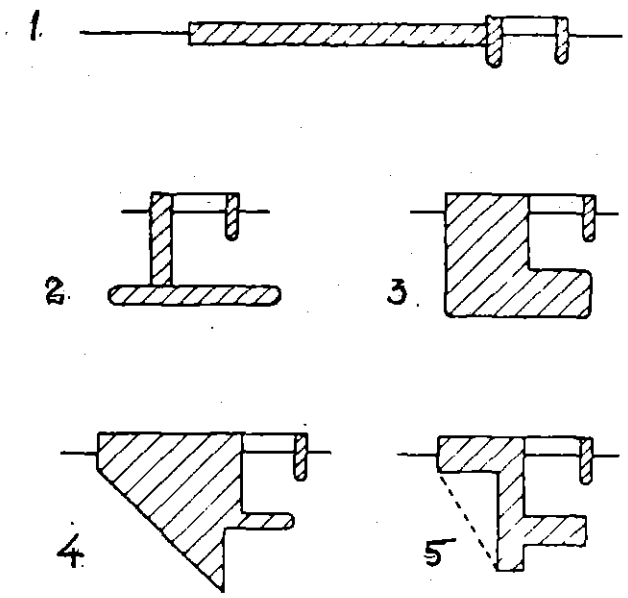


Fig. 9 Olika typer av flytande konstruktioner

Fig. 9 visar några av de former som har använts. De tre sista uppvisar liknande resultat, medan de två första inte fungerade tillfredsställande.

Modell nr 1 hade en maximal verkningsgrad långt under 50% medan den för modell nr 2 var strax under 50%. Den fjärde modelltypen var den första som upphävde vågor. Eftersom modell nr 5 uppträder ungefär som nr 4 och dessutom har mindre volym än denna, är den femte att föredraga. Den tredje typen kan vara praktisk att använda om den är tillverkad av armerad betong.

Utvinning av energi från luftklockan

Det mest uppenbara sättet är att ersätta öppningen som användes i experimentmodellerna med en luftturbin. I det här fallet är detta det bästa sättet, eftersom den turbindiameter som erfordras för att klara av det tillgängliga luftflödet är mycket mindre än själva luftklockan.

Kombinationen av luftklocka och turbin kan betraktas som en lufttrycksutrustning (pneumatic gear). Betydelsen av detta är återigen beroende av problemet med vågkraft. Vågenergin är förenad med stora krafter som rör sig med låga hastigheter. I den här anordningen omvandlas den till liten kraft och hög hastighet.

Fig. 10 visar anslutning turbin-luftklocka.

Krav vid utformning av turbin:

		Lösning:
1)	effektiv likriktning	4-ventils likriktare
2)	bra verkningsgrad över ett brett kraftområde	variabel geometri
3)	linjär karakteristik	Francis turbin

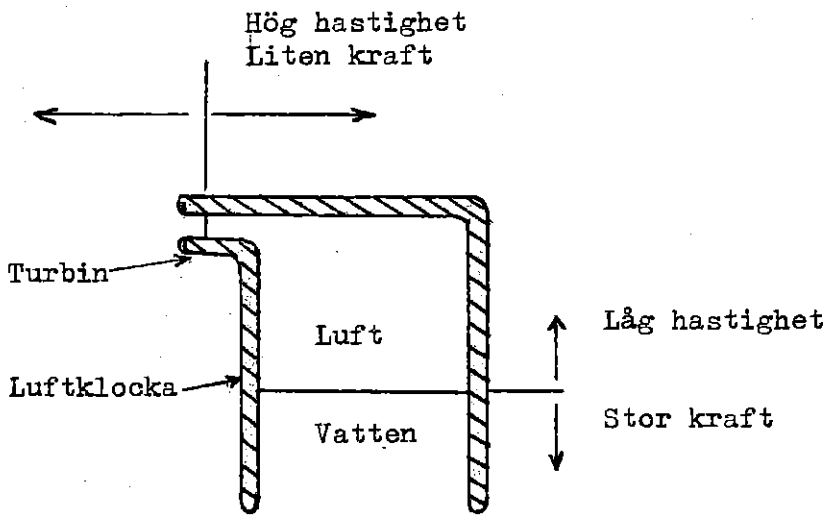


Fig. 10 Anslutning turbin-luftklocka

4)	god tillförlitlighet	robust maskin, tillgänglig och ersättningsbar
5)	jämn uteffekt	svänghjul
6)	möjlighet att skingra överskottskraft	strypning
7)	tolerans av vattenintrång	vattenlås

Då luftklockan höjes är ett par ventiler öppna och luften kan passera genom turbinen från vänster till höger. När klockan sänkes passerar luften också från vänster till höger genom turbinen. Turbinen måste behandla ett pulserande flöde.

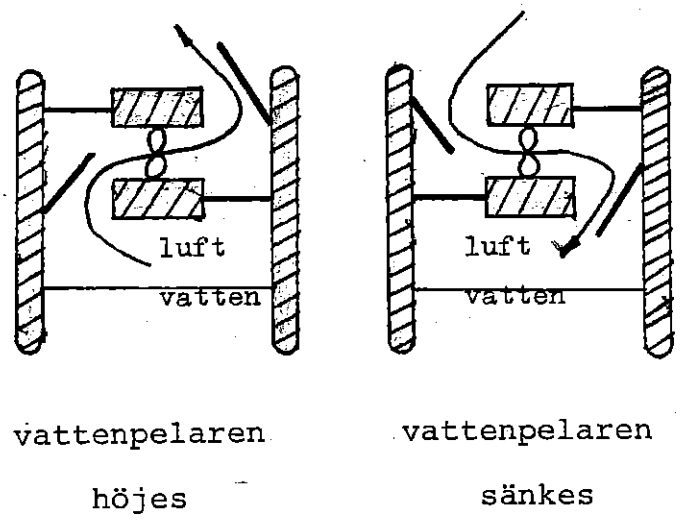
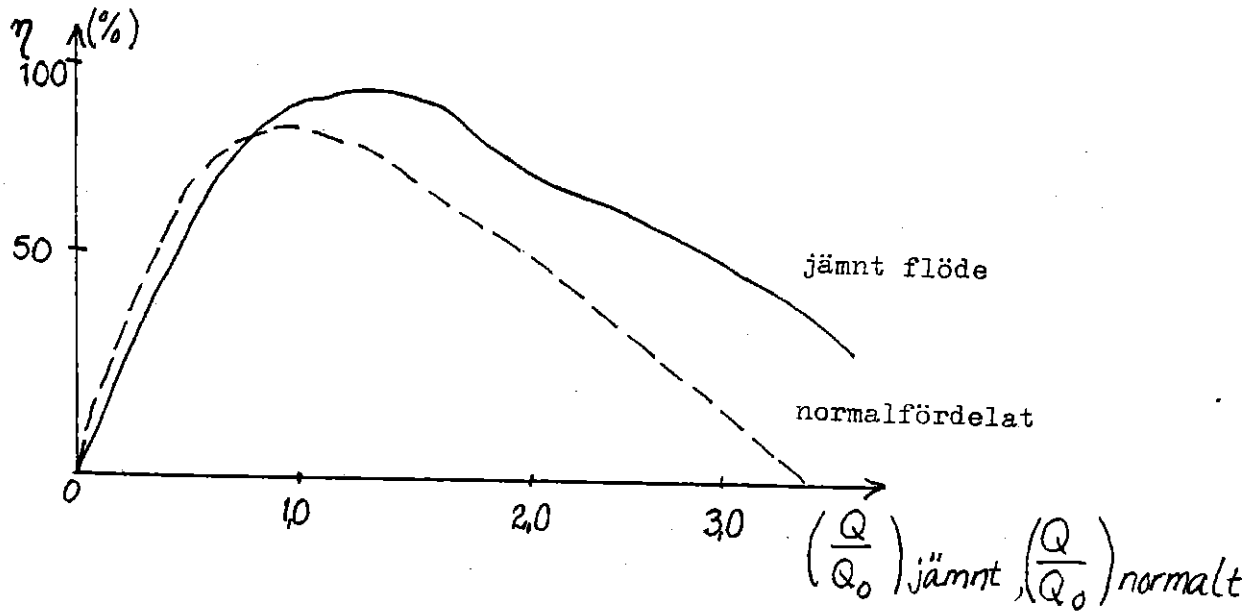


Fig. 11 Fyra-ventils likriktare

Turbinens verkningsgrad för ett jämnt flöde och ett normalfördelat

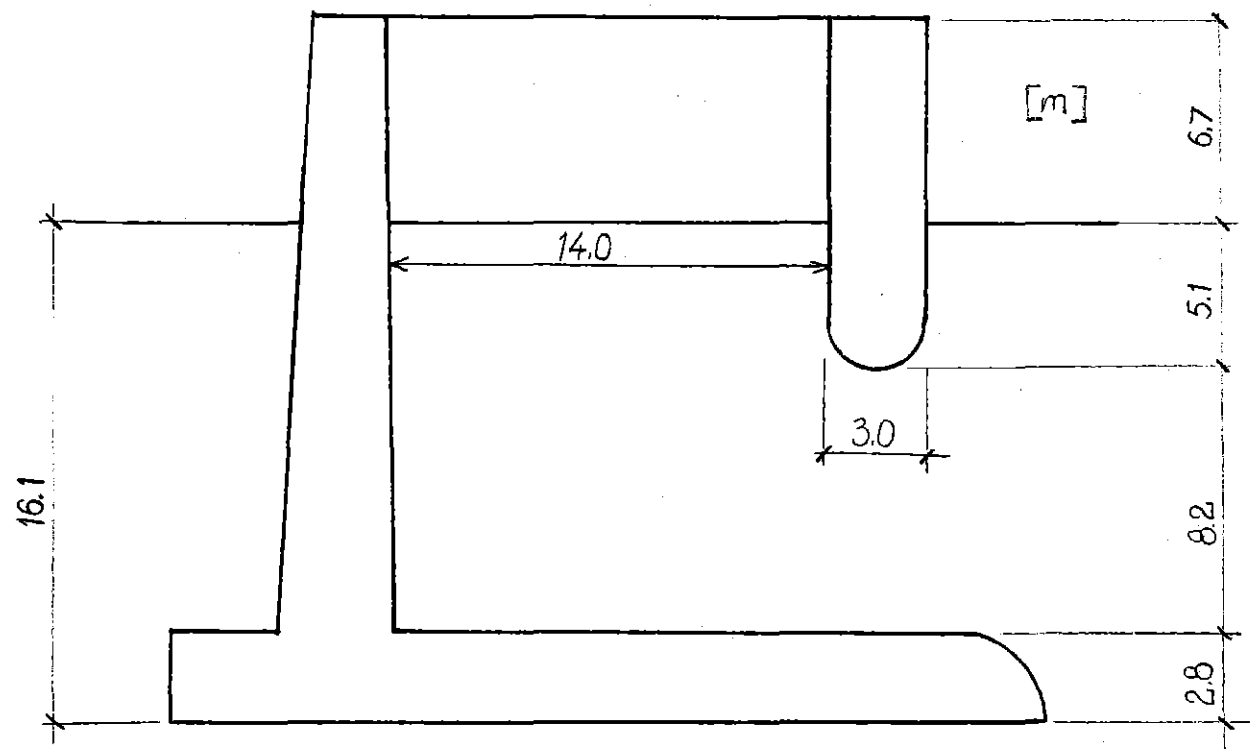


På den horisontella axeln utsätts kvoten mellan det aktuella flödet genom turbinen och flödet, Q_o, vid den högsta verkningsgraden. Den övre kurvan är bedömningen för turbinen, då den har testats under ett jämnt flödestillstånd vid olika flödesvärden. Den andra kurvan visar mer vad man kan vänta sig ute till havs.

Vid en speciell placering kan medelvärdet av den årliga verkningsgraden uppskattas till ca 70%. Hela det pneumatiska systemet kan ha ett årsmedelvärde på ca 60% under antaganden att allt skall fungera (inklusive kanalförluster, ventilläckage och drivkraftförluster).

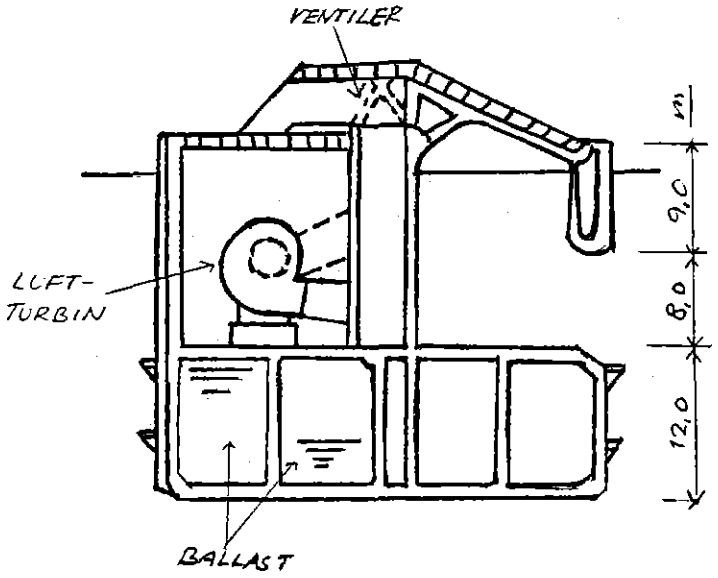
Än så länge är detta energialternativ inte speciellt konkurrenskraftigt beroende bl a på förtöjningsproblem och den låga kraftproduktionen.

Konstruktion placerad på botten i grunt vatten

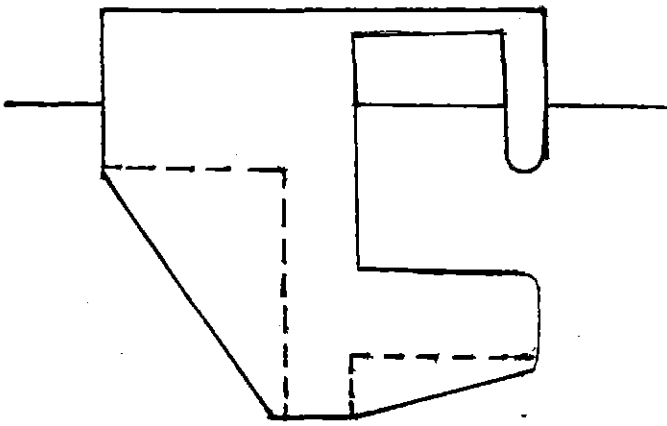


Denna typ är troligen oekonomisk eftersom det åtgår mycket material. Den är dimensionerad för stjälpning och glidning.

Flytande konstruktioner

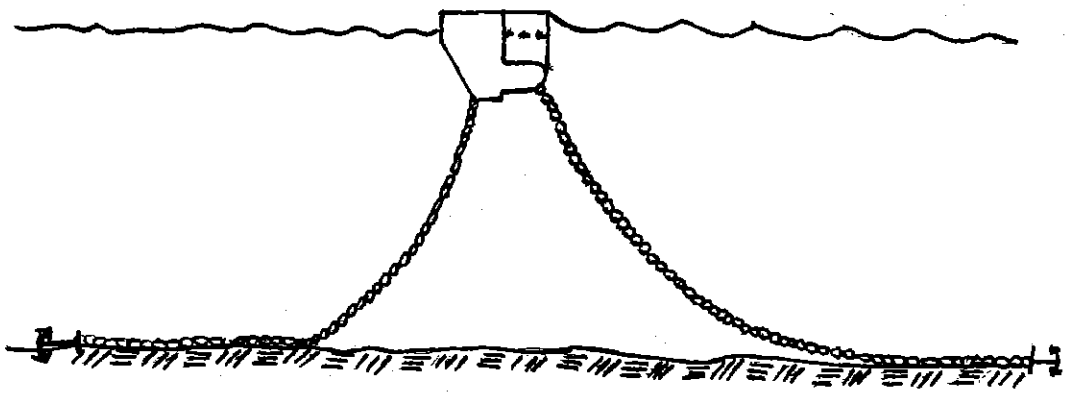


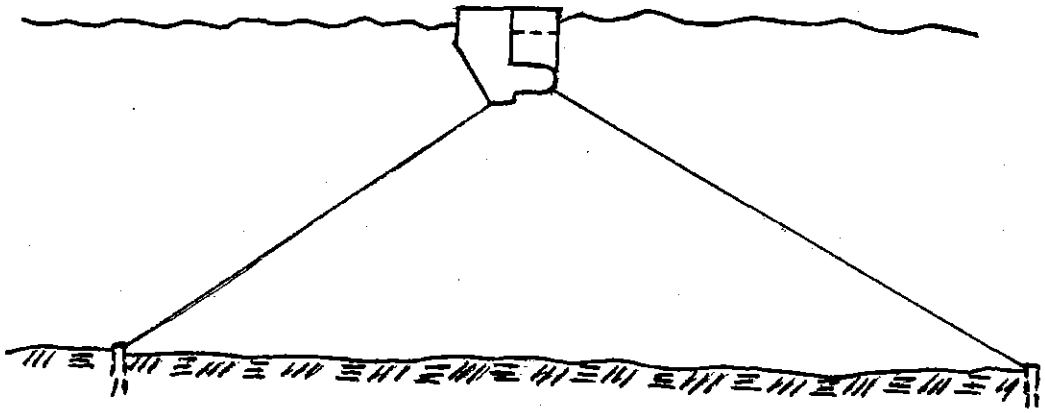
a) Betongversion

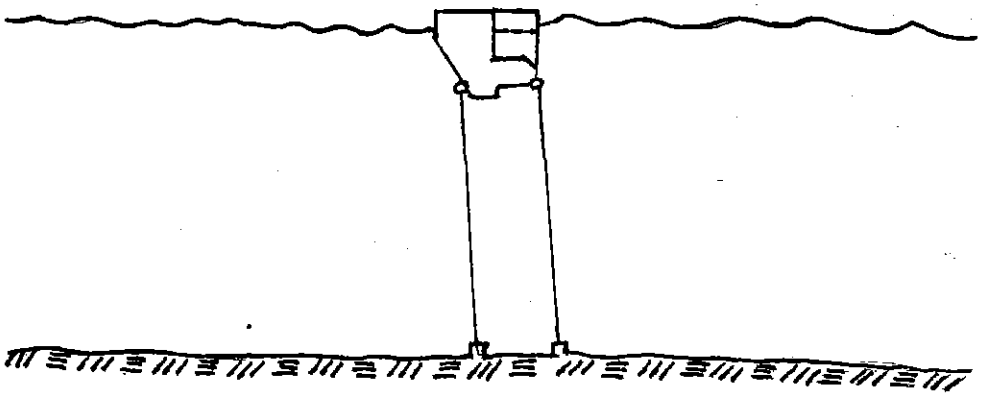


b) Stålversion

Olika typer av förankringar för flytande konstruktioner







2.2 Kamei

I Japan har Yoshido Masuda utvecklat ett enkelt och robust system. Hans idé har lett till en prototyp som har formen av ett 80 m långt fartyg (se fig 12). Skrovet är indelat i sektioner varav ett flertal saknar botten. I dessa kommer vattenytan att höja sig och sänka sig i takt med vågorna och därvid pressa ut eller suga in luften ovanför genom en turbin (se fig 13). Fartygen förtöjs på konventionellt sätt och elenergin föres i land via kabel. Prototypen beräknas ge 1 MW utanför Japan. Den kommer att studeras inom International Energy Agency, en internationell sammanslutning där Sverige är medlem.

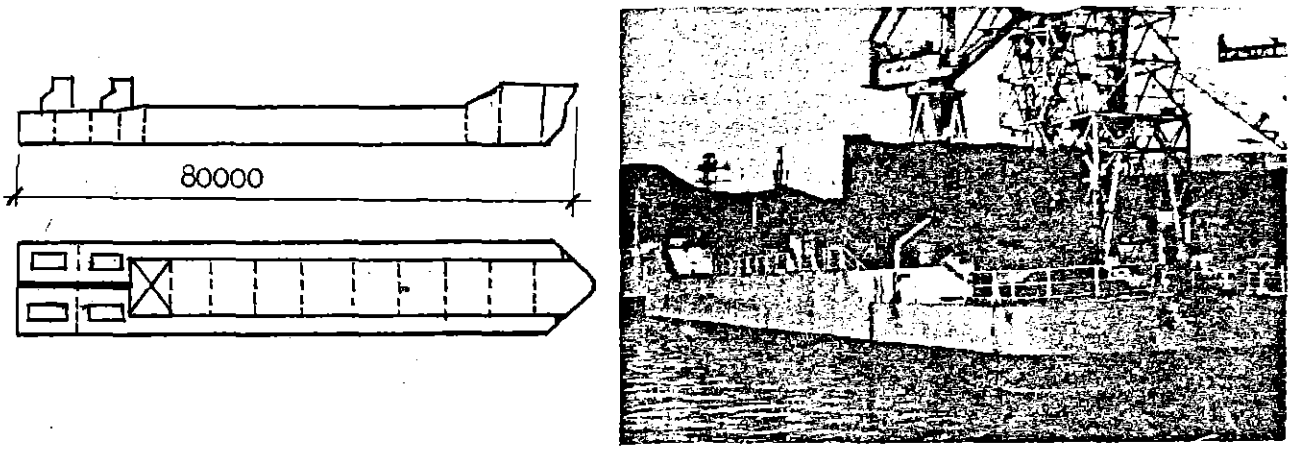


Fig. 12 Kraftverksprototypen "KAIMEI"

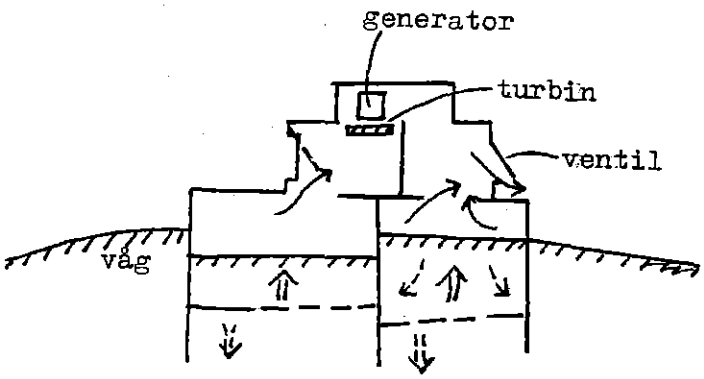


Fig. 13 Turbinarrangemang

2.3 Vickers anordning

Vid Vickers Ltd i England har en bottenförlagd typ av omvandlare provats i modell. Den består av en luftkammare som påverkas av vågornas tryckvariationer, varvid en vattenpelare försätts i svängning. Härvid rinner vattnet över ett överfall och orsakar en tryckskillnad som utnyttjas via en turbin (se fig. 14).

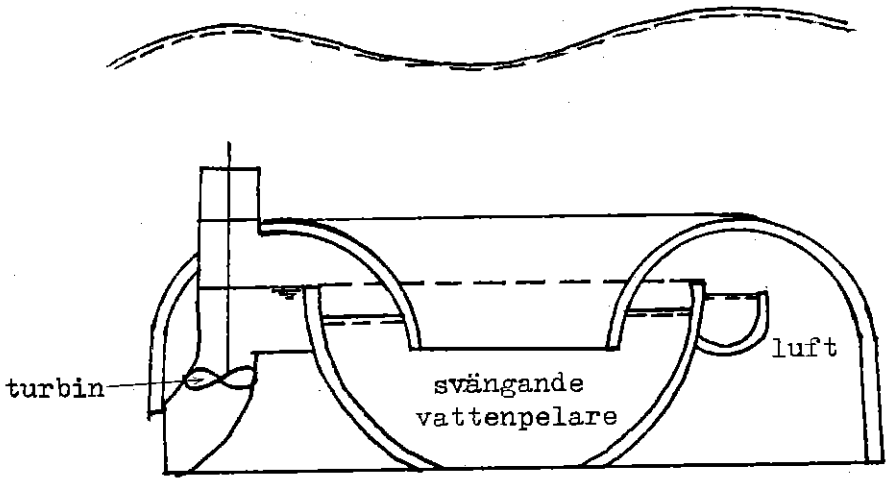


Fig. 14a Tvärsnitt

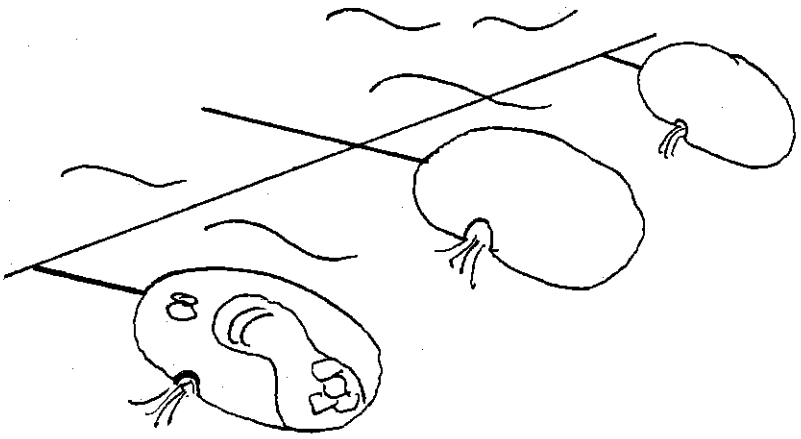


Fig. 14b Plan

2.3 Vickers anordning

Vid Vickers Ltd i England har en bottenförlagd typ av omvandlare provats i modell. Den består av en luftkammare som påverkas av vågornas tryckvariationer, varvid en vattenpelare försätts i svängning. Härvid rinner vattnet över ett överfall och orsakar en tryckskillnad som utnyttjas via en turbin (se fig. 14).

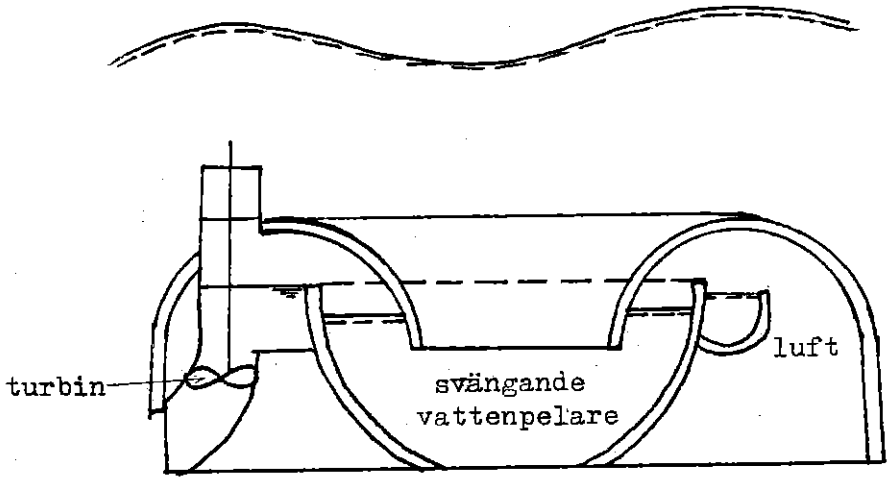


Fig. 14a Tvärsnitt

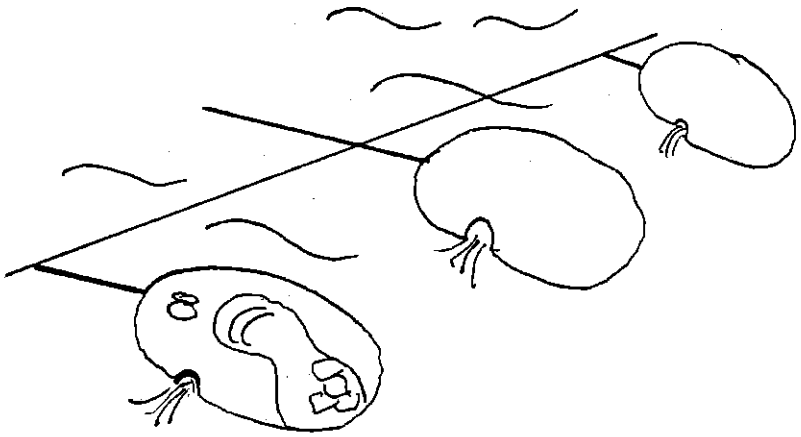
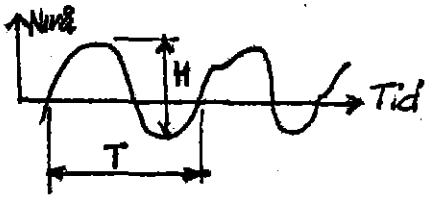


Fig. 14b Plan

3. TEORETISKA GRUNDBEGREPP FÖR VÅGENERGI

3.1 Definitioner och härledningar

Våghöjd: H (m)
Våghöjden H är det vertikala avståndet mellan en vågdal och efterföljande vågtopp.



Vågamplitud: x_o, ζ_o (m)
Vågamplituden är det vertikala avståndet från vågtopp eller vågdal till medelvattenytan. För en sinusvåg är $H = 2 \cdot x_o = \zeta_o \cdot 2$

Signifikant våghöjd H_s (m)
Sign. våghöjden är medelvärdet av de N/3 högsta våghöjderna i en lång serie om N vågor.

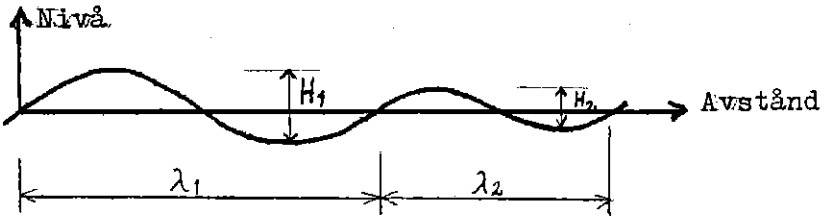
Vågperiod T (s)
En vågperiod är tiden mellan två på varandra följande skärningar (nollgenomgångar) uppåt av medelvattenytan.

Medelvågperiod T_z (s)
Medelvågperioden eller nollgenomgångsperioden för ett vågtåg är medelvärdet av alla vågperioder T_i i vågtåget.

Frekvenser f(Hz), f_2(Hz) och w(s^{-1})
Vågornas frekvens är $f = 1/T$.
Nollgenomgångsfrekv. är $f_z = 1/T_z$.
Vågornas vinkelfrekvens är $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$

Våglängd λ

Våglängden är det horisontella avståndet mellan två intilliggande skärningar med medelvattenytan med positiv lutning.



ögonblicksbild av ett vågtåg

Vågenergi E (J/m^2)

Vågenergin är tidsmedelvärdet av vågrörelsens energi i en ytenhet av havet. För en sinusvåg gäller

$$E = \rho g \zeta_o^2 / 2$$

Vågeffekt P (W/m)

Vågeffekten är för en vågrörelse med ensartad utbredningsriktning energiflödet genom en vertikal yta parallell med vågkammarna. För en sinusvåg gäller på djupt vatten

$$P = EL/2T = 0,5\ gE/\omega$$

Vågspektrum s(f) (m^2s)

Ett oregelbundet vågtåg som kan beskrivas av en summa av sinusfunktioner med hjälp av fourierserieanalys.

Härledning av tryckets amplitudförstärkning och fasvridning

Trycket och vattenytan inne i luftklockan antages variera enligt en sinuskurva med en viss fasförskjutning ε.

Antag vidare ett linjärt system.

Med dämpningen b blir systemets rörelseekvation

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + k_x x = F \qquad \ldots\ldots \qquad (1)$$

Antag kraften $F = \hat{F} \sin \omega t$ där $\hat{F}$ är reell

- " - också $x = \hat{x} \sin (\omega t + \varepsilon$ där $\hat{x}$ - " -

Omskrivning till komplexa tal:

$$F = \hat{F} e^{i\omega t}$$

$$x = \hat{x} e^{i(\omega t + \varepsilon)}, \quad \dot{x} = i\omega \hat{x} e^{i(\omega t + \varepsilon)}, \quad \ddot{x} = -\omega^2 \hat{x} e^{i(\omega t + \varepsilon)}$$

Med insatta värden blir ekv. (1):

$$e^{i\varepsilon}(-m\omega^2 \hat{x} e^{i\omega t} + b \cdot i \cdot \omega \hat{x} \cdot e^{i\omega t} + k_x \hat{x} e^{i\omega t}) = \hat{F} e^{i\omega t}$$

$$\Longrightarrow \frac{\hat{F}}{\hat{x}} = e^{i\varepsilon} (-m\omega^2 + b \cdot i\omega + k_x)$$

Om $A = \frac{x}{F}$, där A är komplex och innehåller fasskillnaden mellan F och x samt amplitudförstärkningen, erhålles

$$|A(\omega)| = \left| \frac{1}{-m\omega^2 + k_x + ib\omega} \right| = \sqrt{\frac{1}{(k_x - m\omega^2)^2 + b^2\omega^2}}$$

$$\varepsilon = \arg (A(\omega)) = \arg \left(\frac{1}{-m\omega^2 + k_x + ib\omega} \right) =$$

$$= 0 - \arg (-m\omega^2 + k_x + ib\omega) = -\arctan \left(\frac{b\omega}{(k_x - m\omega^2)} \right)$$

Härledning av upptagen effekt

Antag att vattenytan inne i luftklockan rör sig sinusformat

$$x = x_o \sin \omega t; \qquad \dot{x} = \omega x_o \cos \omega t \quad \ldots\ldots \quad (1)$$

Antag vidare att överföringen mellan vattenytan och trycket är linjär. Då varierar också trycket sinusformat med en fasvridning ε.

$$p = p_o \sin (\omega t + \varepsilon) \quad \ldots\ldots \quad (2)$$

Dessutom gäller för den upptagna effekten

$$P_{upp} = F\dot{x} \quad \ldots\ldots \quad (3)$$

där F är den kraft som verkar på vattenpelaren

$$F = p \cdot A \quad \ldots\ldots \quad (4)$$

A = vattenpelarens tvärsnittsarea

= B x D

Ekvationerna (1), (2) och (4) insättes i (3).

$$P = p_o \sin (\omega t + \varepsilon) B \cdot D \omega x_o \cos \omega t = p_o \sin (\omega t + \varepsilon) \cos \omega t B D \omega x_o =$$

$$= p_o \left\{ \sin \omega t \cdot \cos \varepsilon + \cos \omega t \cdot \sin \varepsilon \right\} BD \omega x_o \cos \omega t =$$

$$= p_o BD \omega x_o \left\{ \sin \omega t \cdot \cos \varepsilon \cdot \cos \omega t + \cos^2 \omega t \cdot \sin \varepsilon \right\}$$

Medeleffekten över en vågperiod blir

$$\frac{1}{T}\int_0^T Fxdt = \frac{1}{T}\int_0^T p_o BD\omega x_o \left\{\sin\omega t\cdot\cos\varepsilon\cdot\cos\omega t + \cos^2\omega t\cdot\sin\varepsilon\right\}dt=$$

$$= \frac{1}{T} P_o BD\ x_o\omega \left\{\int_0^T \sin\omega t\ \cos\varepsilon\cdot\cos\omega t\ dt + \int_0^T \cos^2\omega t\cdot\sin\varepsilon dt\right\}=$$

$$= \frac{1}{T} P_o BDx_o\omega\cdot\left\{\cos\varepsilon\int_0^T \sin\omega t\cdot\cos\omega t dt + \sin\varepsilon\int_0^T \cos^2\omega t\ dt =\right.$$

$$= \frac{1}{T} P_o BDx_o\omega\left\{\cos\varepsilon\int_0^T \underbrace{\frac{1}{2}\sin\ 2\omega t\ dt}_{=0} + \sin\int_0^T \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\underbrace{\cos 2\omega t\ dt}_{=0} =\right.$$

$$= \frac{1}{T} P_o BDx_o\omega\sin\varepsilon\ \frac{1}{2}T = \frac{1}{2} P_o BDx_o\omega\sin\varepsilon$$

<u>Härledning av formel för beräkning av infallande, transmitteral och reflekterad effekt</u>

Momentan effekt: $P(t) = F(t)\cdot\dot{x}(t) = b(\dot{x}(t)^2)$, där b= dämpn.

I regelbundna sinusformade vågor erhålles genom insättning av $x=x_o\sin wt$ och integrering över ett jämnt antal perioder medeleffekten

$$P_{med} = \frac{b}{2}\omega^2 x_o$$

Medeleffekten som funktion av frekvensen kan enkelt uttryckas med hjälp avaamplitudresponsfunktionen Y(w) och infallande vågamplitud ζ_o.

$$P_{med}(\omega) = \frac{b}{2}\zeta_o^2\omega^2 Y^2(\omega)$$

där högerledet är oberoende av vågamplituden.

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

$$P = \frac{\zeta_o^2}{4} \rho g^2 \cdot \frac{1}{\omega} = \frac{\zeta_o^2 \rho g^2}{8\pi f} \quad [W/m]$$

3.2 Teori för dimensionering av luftklocka

Luftklockan placeras tvärs över vattenrännan i Vattenbyggnadslaboratoriet. Med hjälp av en motor kan vågor med olika frekvenser alstras i rännan.

För att kunna variera förhållandena inne i luftklockan har denna försetts med en skjutbar lucka på framsidan. Konstruktionens väggar, tak och botten utgörs av 15 mm plywood medan luckan är av 6 mm PVC-plast.

En vattenpelare tänkes oscillera inuti luftklockan, varvid luft pressas ut genom en varierbar öppning i taket (se fig. 15

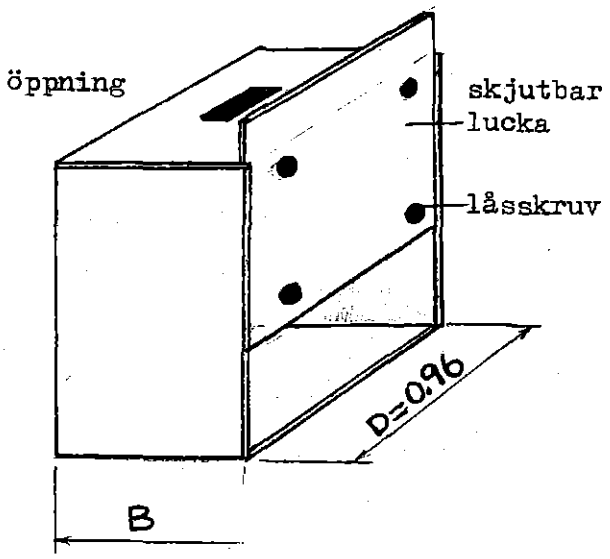


Fig. 15 Luftklocka

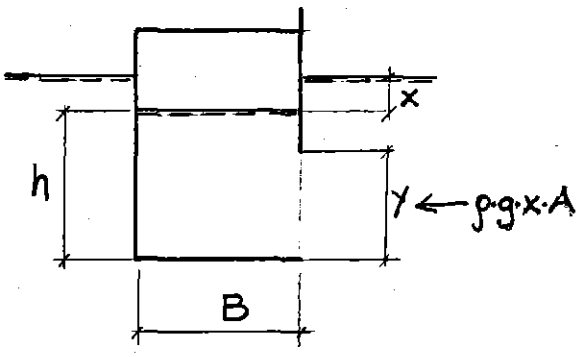


Fig. 16 Verkande kraft på vattenpelaren

Vid dimensionering av luftklockan kan vattenpelarens oscillation betraktas som ett massa-fjädersystem.

Fjäderkonstanten k_x : (se fig. 16)

$$k_x x = \varrho g x A$$

$$k_x = \varrho g A \quad \text{där } A = B \cdot D$$

$$D = 96 \text{ cm}$$

Rörelseekvarion för systemet:

$$mx + k_x . x = 0$$

Egenvinkelfrekvensen blir:

$$\omega_e = \sqrt{\frac{k_x}{m}} \quad \text{där} \quad m = m_w = h \cdot B \cdot D \cdot 1000$$

$$\omega_e = \sqrt{\frac{1000 \cdot g \cdot B \cdot D}{h \cdot B \cdot D \cdot 1000}} = \sqrt{\frac{B}{B \cdot h} g} = \sqrt{\frac{g}{h}}$$

Lämplig vågfrekvens är 1Hz m.h.t. motorns varvtal

Värden på h antas för beräkning av vågfrekvensen.

Antag: h = 0,25m

$$f = \sqrt{\frac{9,81}{0,25}} \Big/ 2\pi = 0,99\text{Hz}$$

Antag: $h = 0{,}245$ m

$$f = \sqrt{\frac{9{,}81}{0{,}245}} \Big/ 2\pi = 1{,}00\text{Hz}$$

Välj luftklockans dimensioner till:

150 x 500 x 960 mm

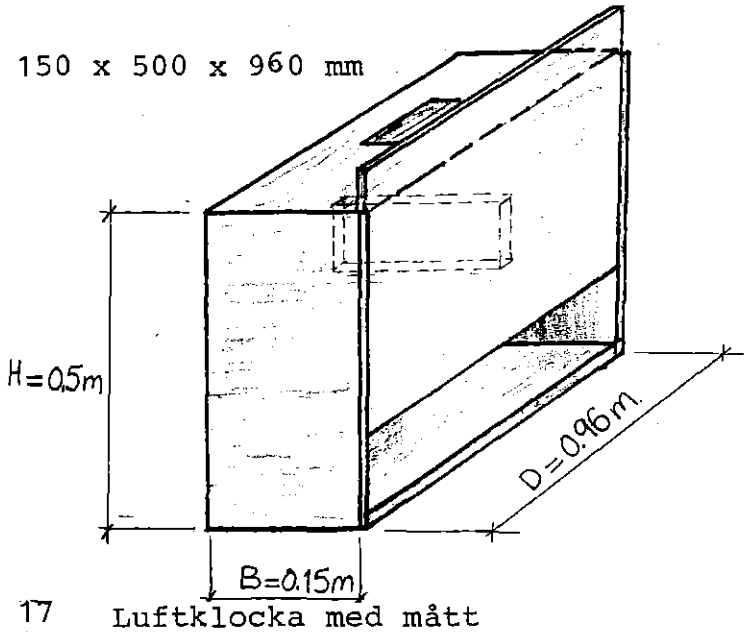


Fig. 17 Luftklocka med mått

3.3 Formelsamling

Infallande, transmitterad och reflekterad effekt

$$P = \frac{\rho g^2 \cdot \zeta_o^2}{8\pi f \cdot D} \quad [W]$$

ζ_o = våghöjdsamplitud för infallande, transmitterad resp. reflekterad våg

ρ = vattnets densitet= 1000 kg/m^3

Upptagen effekt:

$$P_{upp} = \frac{1}{2} p_o \cdot B \cdot D \cdot x_o \cdot 2\pi f \cdot \sin \varepsilon$$

$$= \frac{1}{2} p_o \cdot 0{,}15 \cdot 0{,}96 \cdot x_o \cdot 2\pi f \cdot \sin \varepsilon$$

p_o= tryckamplitud

BxD=luftklockans tvärsnittsarea

f = vågfrekvens

ε = fasvinkel

x_o= våghöjdsampl. inne i luftklockan

Beräkning av verkningsgrad

$$\eta_1 = \frac{P_1 - P_2 - P_3}{P_1}$$

$$\eta_2 = \frac{P_{upp}}{P_1}$$

P_{upp} = upptagen effekt

P_1 = infallande våg

P_2 = transmitterad effekt

P_3 = reflekterad effekt

Amplitudrespons

$$Y = \frac{x_o}{\zeta_{o,i}}$$

x_o = våghöjdsampl. inne i luftklockan

$\zeta_{o,i}$ = - " - för infallande våg

Beräkning av dämpning

Vid beräkning av dämpningen har vi använt oss av gfv´s teoretiskt framtagna formel för den hydrodynamiska verkningsgraden.

$$b = \frac{\eta \cdot \rho \cdot g^2 \cdot D}{\omega^3 \cdot Y^2(\omega)}$$

gfv = gruppen för vågenergiforskning

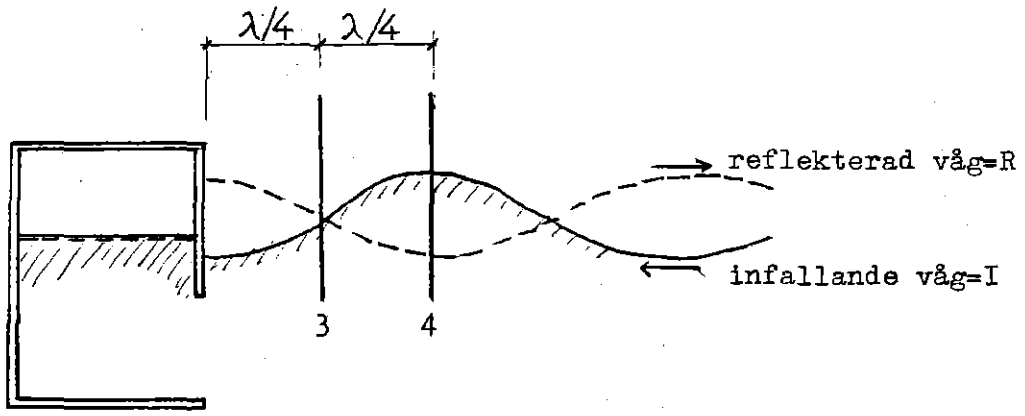
ω = vinkelfrekvens

4. MÄTUTRUSTNING

För att kunna beräkna infallande och reflekterad effekt placeras två stycken våghöjdsgivare framför luftklockan. Givaren närmast denna ställes i en nod medan den andra placeras i en buk. Då frekvensen f > 1 Hz utnyttjas sambandet

$$\lambda = 1{,}56 \left(\frac{1}{f}\right)^2$$

Den första noden befinner sig på avståndet $\lambda/4$ från luftklockan och motsvarande buk på avståndet $\lambda/2$.



I buken fås en förstärkning = I + R = H_4.

I noden fås en försvagning = I - R = H_3.

Den infallande våghöjden blir då

$$\frac{H_3+H_4}{2} = \frac{I-R+I+R}{2} = I$$

På motsvarande sätt blir den reflekterade våghöjden:

$$\frac{H_4-H_3}{2} = \frac{I+R-(I+R)}{2} = R$$

Den upptagna effekten kan beräknas genom att en våghöjdsgivare inne i luftklockan registrerar vågamplituden samt att en tryckgivare mäter skillnaden i tryck utanför och inuti klockan. För att kunna uppmäta den transmitterade

vågen placeras en våghöjdsgivare bakom luftklockan. De fyra våghöjdsgivarna kopplas till en elektronisk del, där känsligheten för dessa kan varieras var för sig. Tryckgivaren kopplas till en separat bärfrekvensbrygga. För att mätvärdena lätt skall kunna avläsas kopplas samtliga givare till en snabb 6-kanalsskrivare.

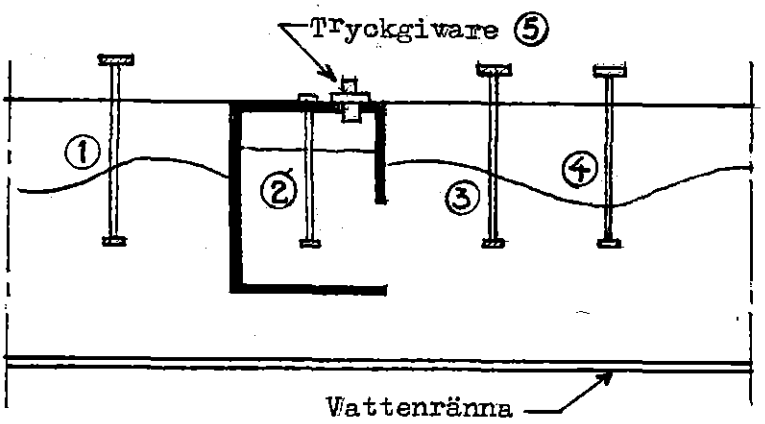
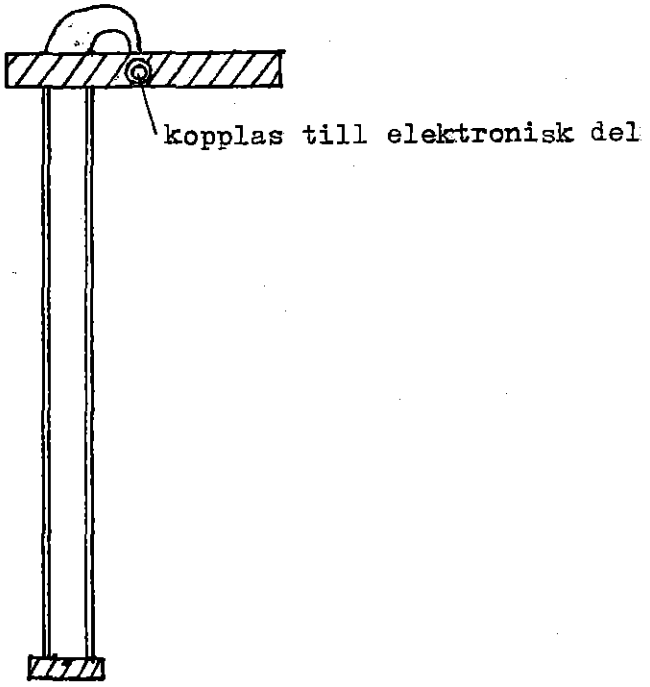


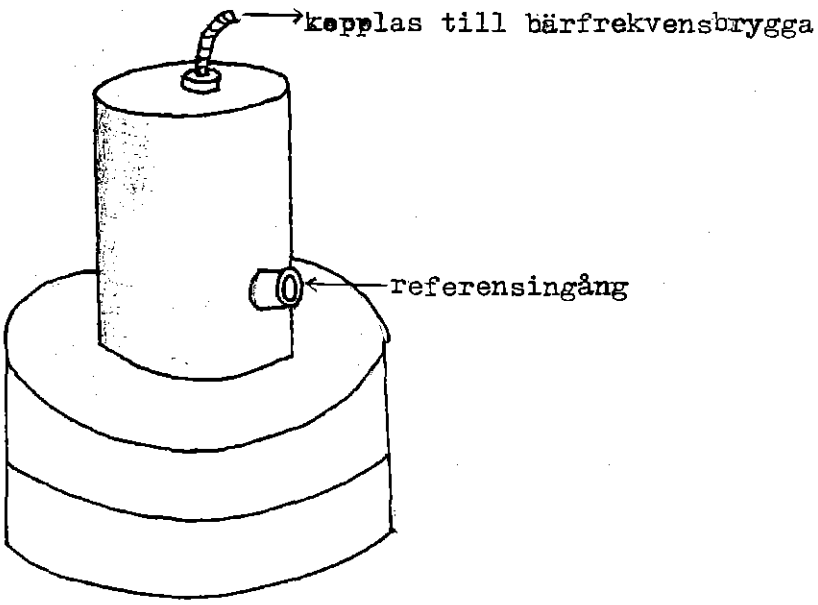
Fig. Anläggning med inplacerade våghöjdsgivare och tryckgivare,
Våghöjdsgivare: 1,2,3 och 4
Tryckgivare: 5

De givare som har använts vid försöken visas nedan.

Våghöjdsgivarna är tillverkade av DANSK HYDRAULISK INSTITUT.



Tryckgivaren är tillverkad av SWEMA.



5. BESKRIVNING AV ARBETSMOMENT

5.1 Kalibrering av givare

Våghöjdsgivare

För att mätningarna skall ge så exakta resultat som möjligt måste givarna kalibreras varje dag, innan försöken påbörjas. De olika momenten i kalibreringsförfarandet kan beskrivas enligt följande:

1. Avläs vattenytan (en linjal tejpas fast på rännans sida)
2. Nollställ alla kanaler på skrivaren
3. Fyll på vatten (öka vattendjupet ca 5 cm)
4. Avläs alla våghöjdsmätare
5. Nollställ alla våghöjdsmätare

Ex.

Antag att vattenytans läge enligt punkt 1 är belägen vid nollnivån på linjalen.

Antag vidare att vattendjupet har ökat 5 cm efter påfyllning och att maximiutslaget på skrivaren för exempelvis våghöjdsgivare 2 är 1,85 cm.

Givarens kalibreringsfaktor k_2, kan då beräknas. Skillnaden mellan de två vattendjupen är 5 cm.

$$k_2 = \frac{5,00}{1,85} = 2,70 \text{ cm/cm}$$

Ett givarutslag på 1 cm motsvarar alltså en förändring i vattendjup på 2,70 cm.

Tryckmätare

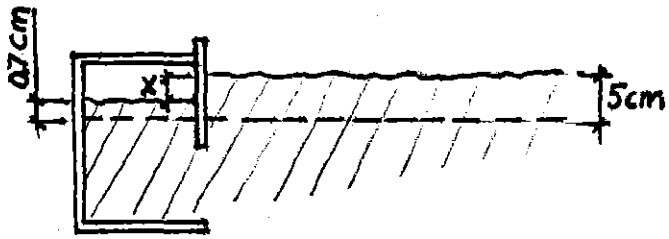
Denna behöver inte kalibreras lika ofta som våghöjdsgivarna. Förfarandet beskrives nedan.

1. Då vattenytan är vid nollnivån på linjalen öppnas luftventilen.
2. Vattenytan sänkes ca 5 cm.
3. Öppningen i locket på luftklockan tätas med hjälp av en plastremsa, en träbit och tejp.
4. Nollställ våghöjdsgivarna och tryckgivaren.
5. Fyll på vatten till nollnivån.
6. Avläs instrumenten.

Ex.

Antag att vattenytan har höjts 5 cm medan den inne i luftklockan bara har ökat med 0,7 cm.

Skillnaden i vattennivå utanför och inuti luftklockan blir då
x = 5 - 0,7 = 4,3 cm.



Det relativa trycket; $p = \rho gh = 1000 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}043 = 421{,}8$ N/m. Antag att utslaget på skrivaren för trycket är 0,9 cm. Kalibreringsfaktorn för trycket blir då

$$k = \frac{421{,}8}{9} = 46{,}87 \text{ N/m}^2 \cdot \text{mm}$$

1 mm på skrivaren motsvarar alltså ett relativtryck på 46,87 Pa.

OBS! Max.tryck samt vattenhöjning inne i luftklockan skall avläsas vid samma tidpunkt.

5.2 Beskrivning av laborationsförsök

För att kunna studera hur dämpningen av den svängande vattenpelaren inne i luftklockan påverkar verkningsgraden η, har följande dämpningar valts:

a) öppning 14,5 x 19,0 cm

b) öppning 7,0 x 7,0 cm

c) öppning 5,0 x 5,0 cm

d) cirkulär öppning, ϕ = 2,0 cm

e) perforerad gummipropp

f) enkelt melittafilter 5,0 x 5,0 cm

g) helt tät

Luftklockans skjutlucka låses fast i fyra olika lägen. Dessa spalthöjder är:

y = 5 cm
y = 10 cm
y = 15 cm
y = 20 cm

Försöken skall utföras med olika vågfrekvenser. Dessa har valts till

f = 0,65 Hz
f = 0,80 "
f = 0,96 "
f = 1,18 "
f = 1,42 "

För vissa utvalda försök skall även följande vågfrekvenser användas:

f = 0,30 Hz
f = 0,35 "
f = 0,50 "
f = 0,68 "
f = 1,05 "
f = 1,30 "
f = 1,50 "

Exempel på en serie försök:

I
Sätt vågfrekvensen f = 0,65 Hz
Sätt dämpningen b = öppning 5 x 5 cm
Sätt spalthöjden y = 5 cm

II
Sätt vågfrekvensen f = 0,65 Hz
Sätt dämpningen b = öppning 5 x 5 cm
Sätt spalthöjden y = 10 cm

III
Sätt vågfrekvensen f = 0,65 Hz
Sätt dämpningen b = öppning 5 x 5 cm
Sätt spalthöjden y = 15 cm

IV
Sätt vågfrekvensen f = 0,65 Hz
Sätt dämpningen b = öppning 5 x 5 cm
Sätt spalthöjden y = 20 cm

Efter dessa fyra försök kan vågfrekvensen f ändras till 0,80 Hz medan dämpningen b låtes vara oförändrad. Då kan en ny serie försök göras med spalthöjden y = 5, 10, 15 och 20 cm.

När samtliga vågfrekvenser har använts ändras dämpningen. Som ny dämpning kan exempelvis det enkla melittafiltret väljas. Vågfrekvensen sättes till 0,65 Hz och spalthöjden varieras från 5-20 cm osv.

5.3 Utvärdering av mätresultat

Samtliga värden erhålles i form av sinuskurvor på skrivaren. Eftersom utslagen är olika stora från försök till försök måste känsligheten på skrivaren för de olika kanalerna varieras.

Det är mycket viktigt att inte glömma ändra kalibreringsfaktorn för en givare, då känsligheten på skrivaren har ändrats.

I annat fall är det lätt hänt att exempelvis värdet på trycket blir hälften av det verkliga eller dubbelt så stort.

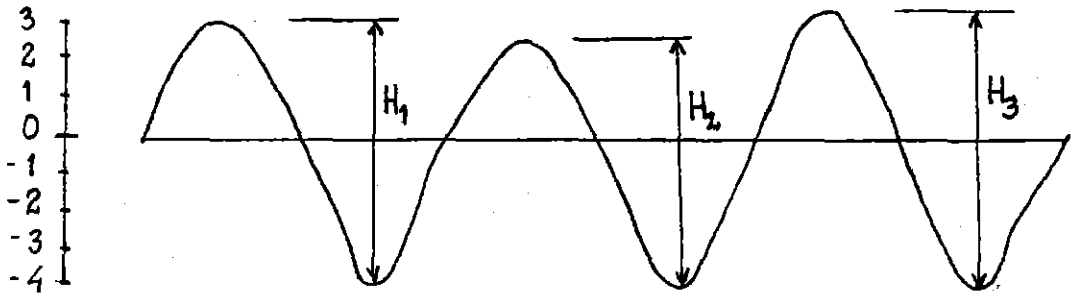
Exempel på utskrift visas på nästa sida.

Den femte kurvan, som representerar tryckvariationen, är något oskarp beroende på att känsligheten är hög.

1) våghöjdsgivare bakom luftklockan
2) våghöjdsgivare inne i luftklockan
3) våghöjdsgivare framför luftklockan
4) våghöjdsgivare framför luftklockan
5) tryckgivaren på luftklockan

Genom att mäta på kurvorna erhålls våghöjdsamplitud och tryckamplitud.

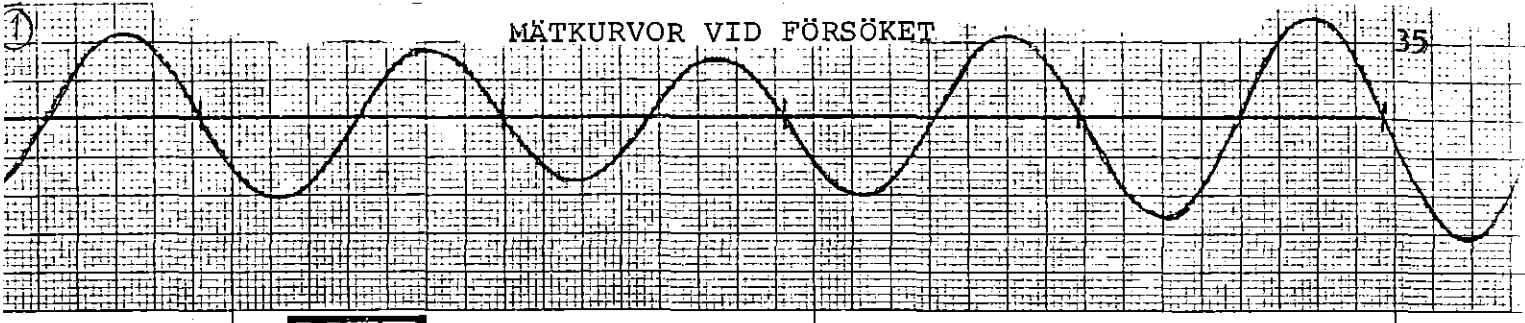
Ex. Våghöjdskurva



$H_1 = 7,0$
$H_2 = 6,5$ MV = 7,0 Våghöjdsamplituden $x_o = \frac{7,0}{2} = \underline{3,5}$.
$H_3 = 7,5$ För att erhålla den verkliga amplituden måste 3,5 multipliceras med motsvarande kalibreringsfaktor.

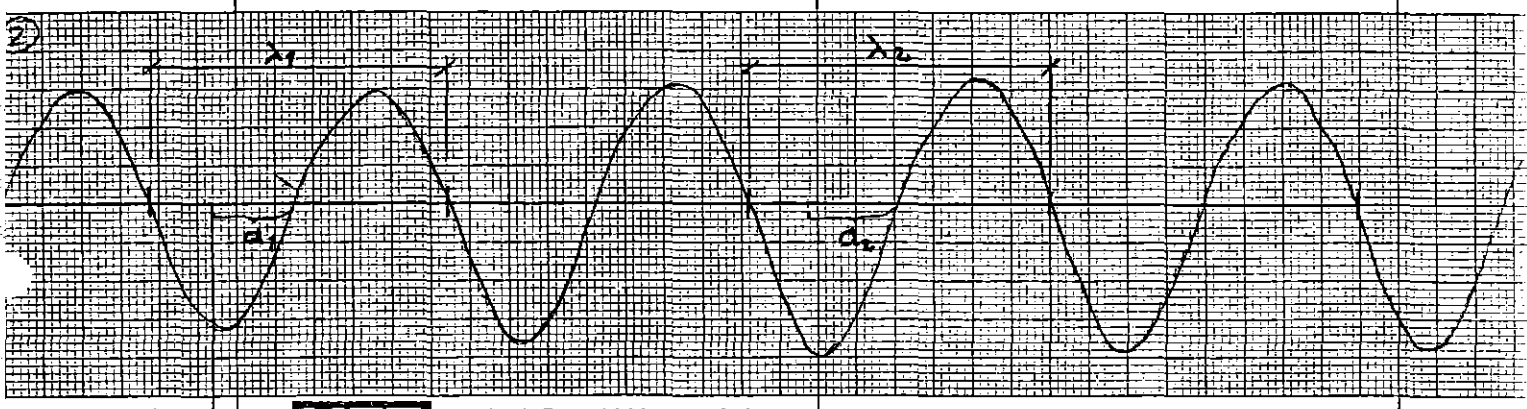
En representativ amplitud för kurvan erhålls om man tittar på en bit som innehåller fem våglängder och beräknar medelvärdet av amplituden för denna.

1



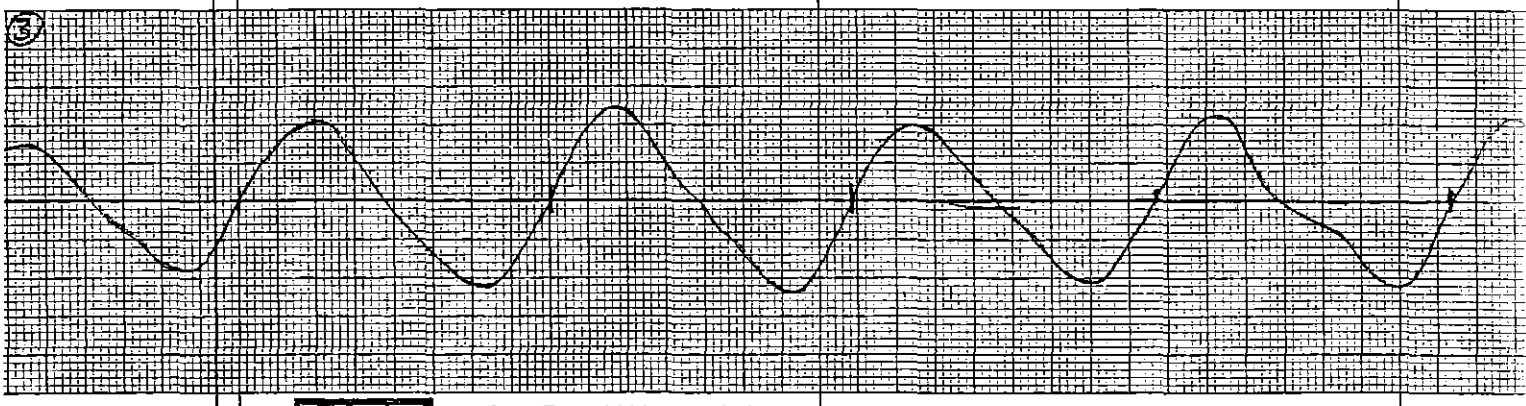
MFE SALEM, N.H. U.S.A.

2



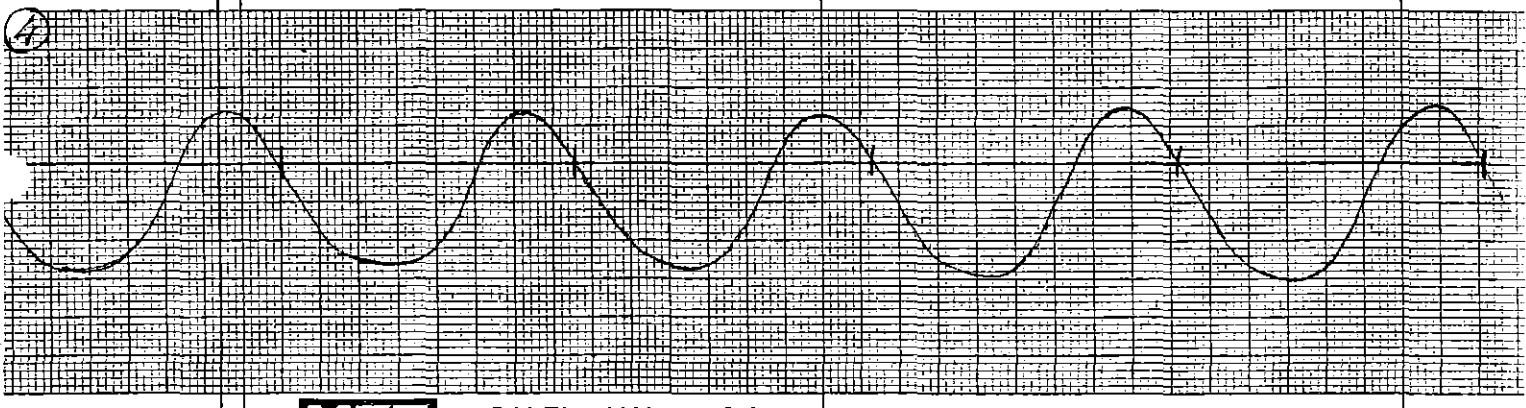
MFE SALEM, N.H. U.S.A.

3



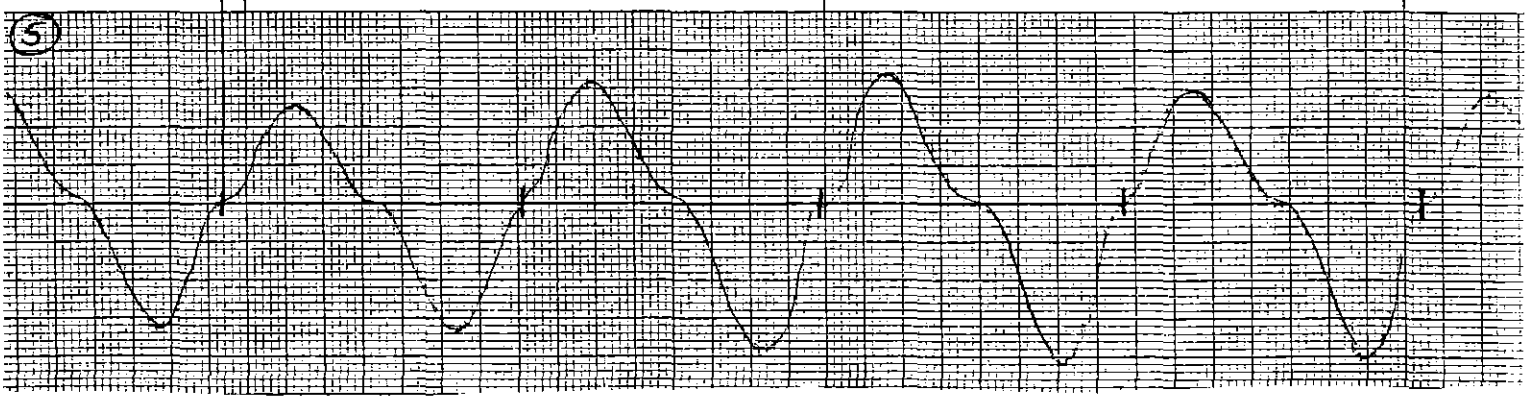
MFE SALEM, N.H. U.S.A.

4



MFE SALEM, N.H. U.S.A.

5



Fasskillnaden, ε

Denna kan beräknas genom att studera kurvorna nr 2 och nr 5. En linje dras från en nod på kurva nr 5 vertikalt upp till kurva nr 2. Avståndet a uppmätes liksom våglängden λ (se sid. 35). Två stycken mätningar utföres.

Fasskillnaden, ε , beräknas ur formeln:

$$\varepsilon_1 = \frac{a_1}{\lambda_1} \cdot 360^\circ, \qquad \varepsilon_2 = \frac{a_2}{\lambda_2} \cdot 360^\circ$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$$

6. RESULTAT OCH KOMMENTARER

6.1 Beräkningsexempel

Vi skall använda spalthöjden 20 cm, dämpningsöppningen 5 x 5 cm och vågfrekvensen 0,80 Hz.

Bestäm den hydrodynamiska verkningsgraden på två olika sätt (η_1 och η_2) samt dämpningen b_2.

Kalibreringsfaktorn för trycket, k_5, är 8,68 Pa/mm.

Innan försöket påbörjas kalibreras de fyra våghöjdsgivarna. Dessa blev: $k_1 = 1{,}15$, $k_2 = 2{,}30$, $k_3 = 2{,}30$, $k_4 = 4{,}10$.

Resultat:

Relativtrycket och våghöjderna uppmätes på kurvutskrifterna och förs in i bifogade protokoll. (se sid 40)

Genom att multiplicera dessa värden med motsvarande kalibreringsfaktorer erhålles de verkliga värdena.

Fasskillnaden ε blir

$$\varepsilon = \left(\frac{7{,}5}{30{,}5} + \frac{7}{31}\right) \cdot 360 \cdot \frac{1}{2} = 84{,}9^{\circ}$$

$$\text{Infallande våghöjd} = \frac{(H_3+H_4)}{2} = \frac{(37{,}1 + 56{,}2)}{2} = 46{,}6 \text{ mm}$$

$$\text{Reflekterad våghöjd} = \frac{(H_4-H_3)}{2} = \frac{(56{,}2-37{,}1)}{2} = 9{,}6 \text{ mm}$$

Transmitterad våghöjd= $H_1 = 13{,}8$ mm

$$\text{Amplitudresponsen; } Y = \frac{H_z}{\text{infallande våghöjd}} = \frac{75{,}5}{46{,}6} = 1{,}62$$

H_z = våghöjd inne i luftklockan

Beräkning av effekt

Infallande effekt

$$P_1 = \frac{\rho g^2 \cdot \zeta_o^2}{8 \cdot \pi f \cdot D} = \frac{1000 \cdot 9{,}81^2 \cdot (0{,}0466/2)^2}{8 \cdot \pi \cdot 0{,}80 \cdot 0{,}96} = 2{,}71 \text{ W}$$

Transmitterad effekt:

$$P_2 = \frac{\rho g^2 \cdot \zeta_o^2}{8 \cdot \pi \cdot f \cdot D} = \frac{1000 \cdot 9{,}81^2 \cdot (0{,}0138/2)^2}{8 \cdot \pi \cdot 0{,}80 \cdot 0{,}96} = 0{,}24 \text{ W}$$

Reflekterad effekt:

$$P_3 = \frac{\rho \cdot g^2 \cdot \zeta_o^2}{8 \cdot \pi \cdot f \cdot D} = \frac{1000 \cdot 9{,}81^2 \cdot (0{,}0096/2)^2}{8 \cdot \pi \cdot 0{,}80 \cdot 0{,}96} = 0{,}11 \text{ W}$$

Upptagen effekt:

$$P_{upp}^{(2)} = \frac{1}{2} \cdot p_0 \cdot B \cdot D \cdot x_o \cdot 2\pi f \cdot \sin\varepsilon = \frac{1}{2} \cdot \frac{308{,}1}{2} \cdot 0{,}15 \cdot 0{,}96 \cdot \frac{0{,}0755}{2} \cdot$$

$$\cdot 2 \cdot \pi \cdot 0{,}80 \cdot \sin 84{,}9^{\circ}$$

$$P_{upp}^{(2)} = 2{,}10 \text{ W}$$

$P_{upp}^{(1)} = P_1 - P_2 - P_3 = 2{,}71 - 0{,}24 - 0{,}11 = 2{,}36\text{W}$ (ej korrekt bl.a. beroende på att friktionsförluster inte beaktas)

Hydrodynamisk verkningsgrad

$$\eta_1 = \frac{P^1_{upp}}{P_1} = \frac{2,36}{2,71} = 87,1\%$$

$$\eta_2 = \frac{P^2_{upp}}{P_1} = \frac{2,10}{2,71} = 77,5\%$$

Dämpning

$$b_2 = \frac{\eta_2 \cdot \rho \cdot g^2 \cdot D}{(2\pi f)^3 \cdot Y^2} = \frac{0,775 \cdot 1000 \cdot 9,81^2 \cdot 0,96}{(2\pi \cdot 0,80)^3 \cdot 1,62^2} = 214,8 \text{ Ns/m}$$

OBS! Endast η_2 kommer att presenteras i diagram, eftersom värdet på η_1 troligen är felaktigt (för stort).

Samtliga mätvärden förs in i protokollsidorna A och B

Sida A: kalibreringsfaktorer

Datum: 80 06 23

Vattenyta före: 4,2 cm

Vattenyta efter: 0,3 cm

Skillnad: 3,9 cm

Utslag på skrivaren:

Kanal	1	0,85 cm	$k_1 = 4,59$
-"-	2	0,85 cm	$k_2 = 4,59$
-"-	3	0,85 cm	$k_3 = 4,59$
-"-	4	0,95 cm	$k_4 = 4,10$

Kalibreringsfaktorer

Vattenytan	1	$k_1 = 0,46$	(1) 200
-"-	2	$k_2 = 2,3$	(2) 1
-"-	3	$k_3 = 2,3$	(3) 1
-"-	4	$k_4 = 4,10$	(4) 2
			(5) 100

Tryck 43,4/5 = 8,68 Pa/mm

1 Givare bakom klockan
2 Givare inne i klockan
3 Första givaren framför klockan
4 Andra givaren framför klockan

Sida B: mätvärden samt beräkningar

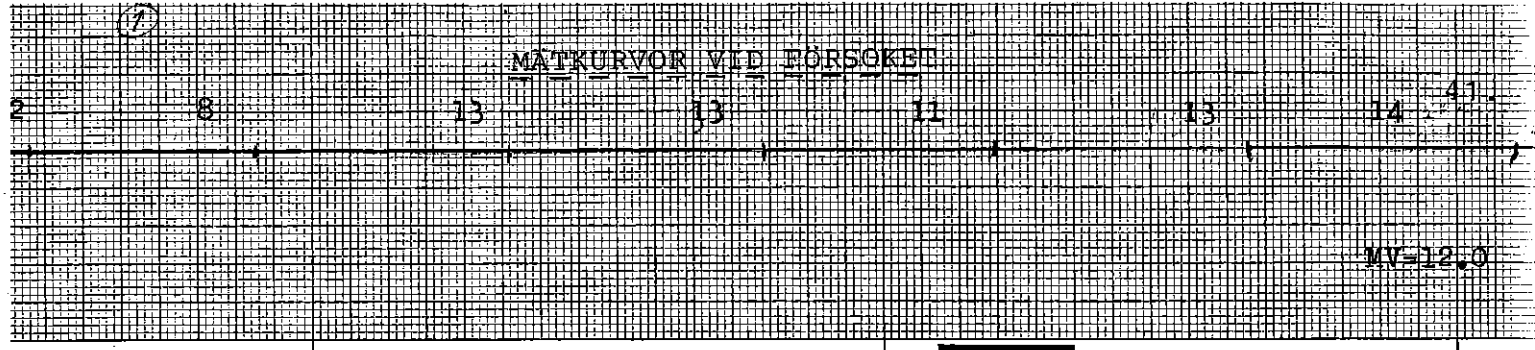
Försök nr 4 Datum: 80 06 23 - 4

Dämpning: helt öppet, 5 x 5 cm Frekvens: 0,80 Hz

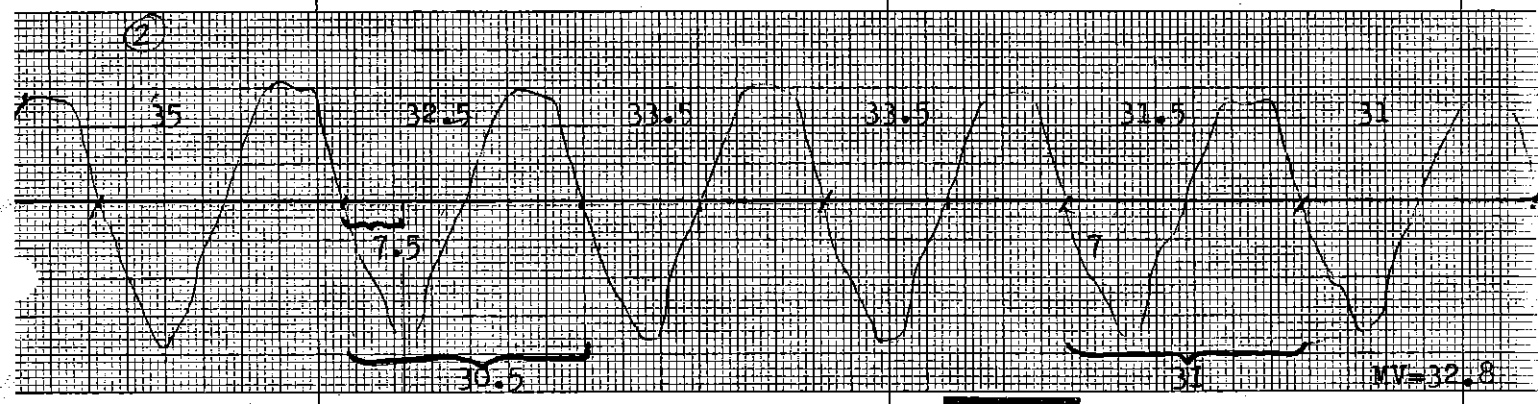
Spalthöjd: 20 cm Ändring: $k_1 = 1,15$

Våglängd = 2,4 m			
		mm skrivaren	mm verklighet
Våghöjd	1	12	13,8
	2	32,8	75,5
	3	16,1	37,1
	4	13,7	56,2
Tryck		35,5	308,1 N/m^2
Fasvinkel = 84,9°			

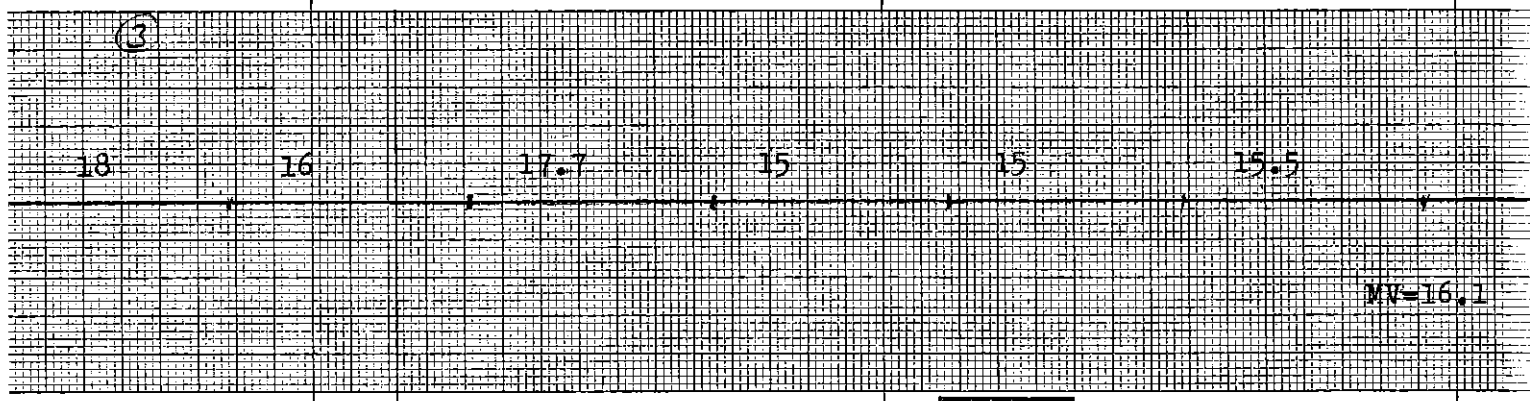
MÄTKURVOR VID FÖRSÖKET



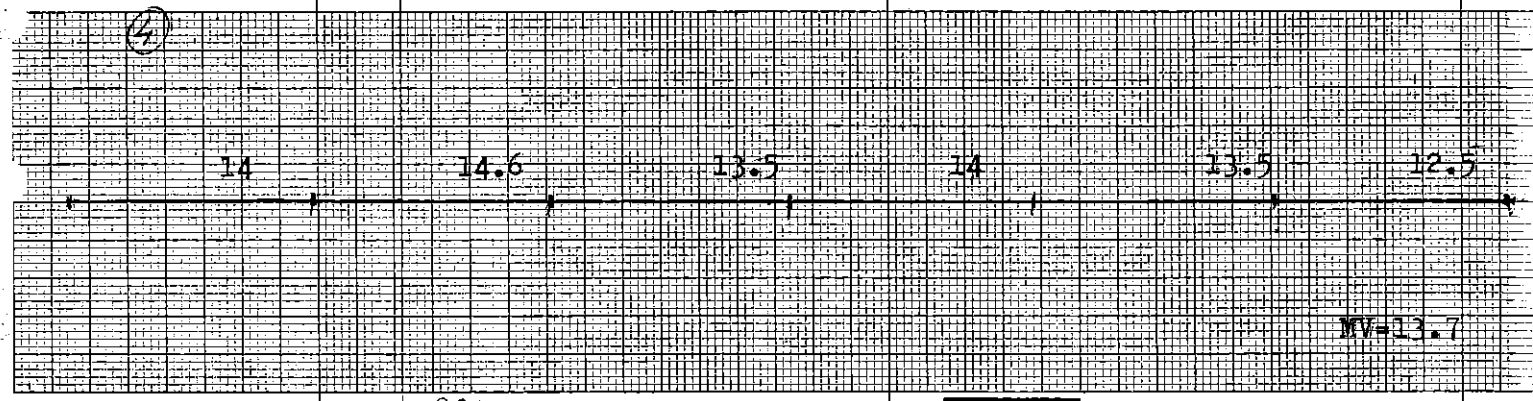
MFE SALEM, N.H. U.S.A.



MFE SALEM, N.H. U.S.A.



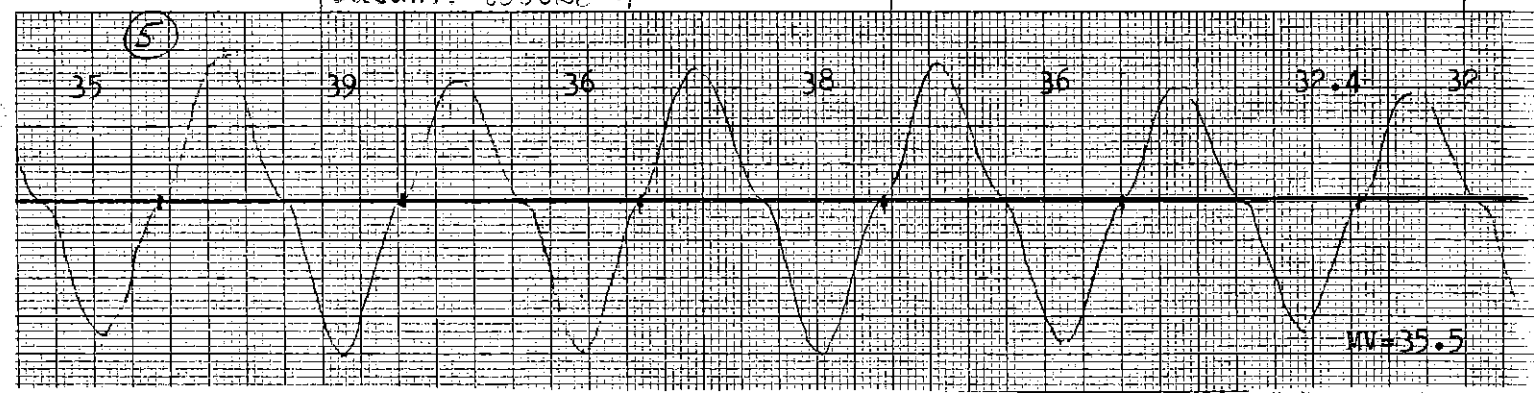
MFE SALEM, N.H. U.S.A.



y = 20cm

MFE SALEM, N.H. U.S.A.

Datum: 800623-4



Infallande våghöjd = 46,6 mm Y = 1,62

Reflekterad våghöjd = 9,6 mm

Transmitterad våghöjd = 13,8 mm

Infallande effekt = 2,71 W

Transmitterad effekt = 0,24 W

Reflekterad effekt = 0,11 W

Upptagen effekt = 1) 2,36 W 2) 2,10 W

Verkningsgrad η_1 = 87,1%

η_2 = 77,5%

Dämpning: b_2 = 214,8 Ns/m

6.2 Spalthöjdens inverkan på verkningsgraden

För att en konstruktion skall kunna uppta en stor del av den inkommande vågenergin krävs en lämplig vågamplitudrespons med tillhörande tryckamplitud.

Den minsta spalthöjden (5 cm) gav för små värden på både amplitudrespons och tryck.

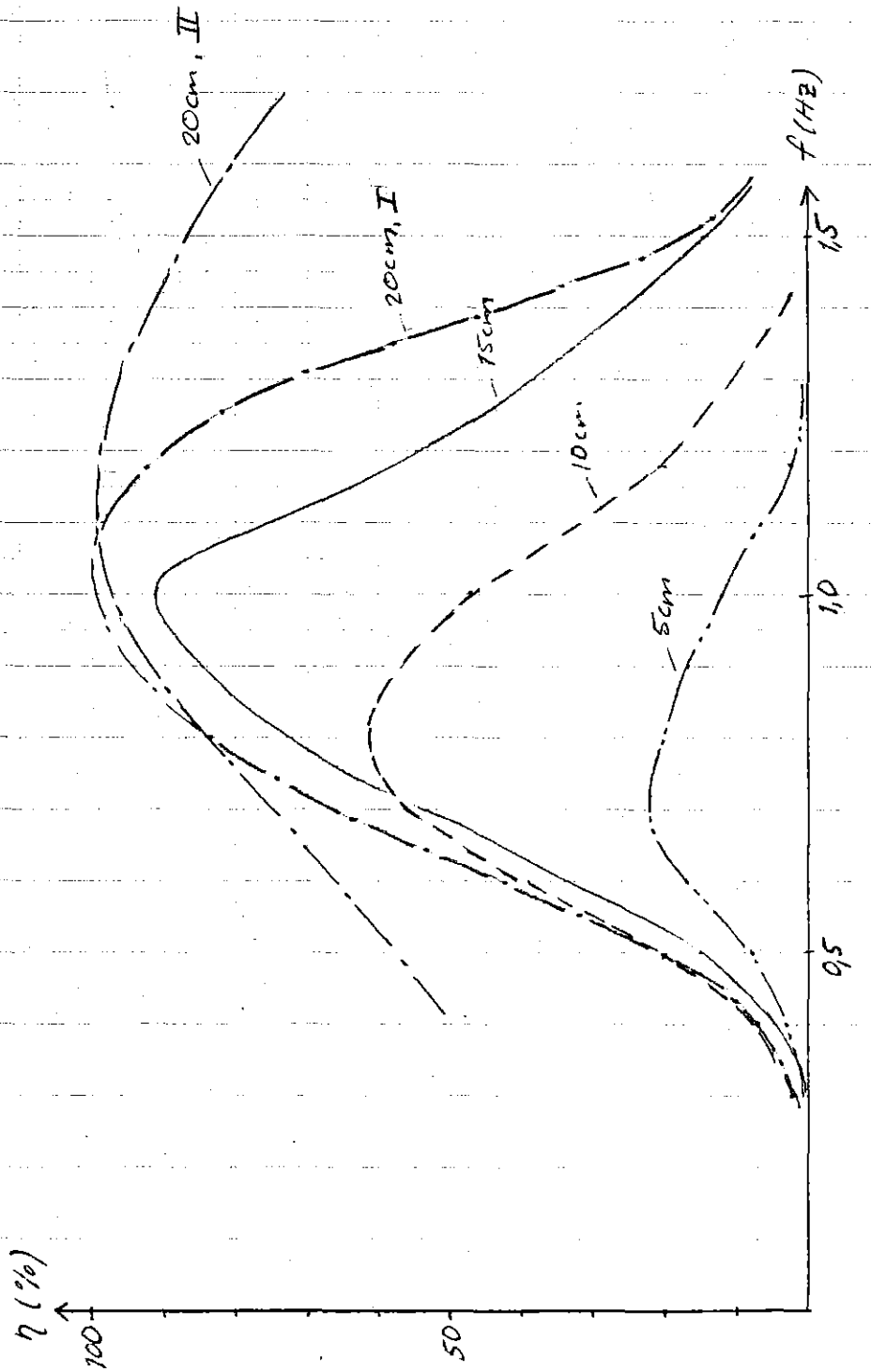
Då spalthöjden ökades till 10 cm blev tryckamplituden betydligt större medan amplitudresponsen fortfarande var ganska låg. Verkningsgraden blev ungefär tre gånger större.

En spalthöjd på 15 cm ökade ytterligare amplitudrespons och tryckamplitud. Detta gav en hög verkningsgrad men ganska liten bandbredd.

Diagram 1 Verkningsgraden η som funktion av vågfrekvensen f

Spalthöjder: 5, 10, 15 och 20 cm

Dämpnigsöppning: 5x5 cm



Det klart bästa resultatet uppnåddes med spalthöjden 20 cm. Här blev den maximala verkningsgraden 90-100%. Bandbredden blev också betydligt större jämfört med den erhållna för spalthöjd 15 cm. Om friktionsförlusterna kan minimeras fås en ännu större bandbredd (se kurva II för y = 20 cm.) Verkningsgraden beräknas enligt η_1 sid. 26.
På sid. 43 visas i diagram 1 verkningsgraden som funktion av vågfrekvensen för olika spalthöjder med dämpningsöppningen 5 x 5 cm

6.3 Dämpningens inverkan på verkningsgraden samt dess frekvensberoende

Dämpningens inverkan på verkningsgraden

Försök gjordes med olika dämpningar; a-g (se s. 32). De öppningar som var större än 5 x 5 cm gav stora amplitudresponser medan tryckamplituden blev mycket liten.

Motsatsen gällde för dämpningsöppningar mindre än 5 x 5 cm. Tryckamplituden blev alltså mycket hög, medan vattenytans rörelse inne i luftklockan var obetydlig.

Det största värdet på verkningsgraden uppnåddes då dämpningsöppningen var 5 x 5 cm.

Om man ritar upp sambandet dämpning-verkningsgrad för en viss frekvens då spalthöjden varieras observeras att verkningsgraden är störst då dämpningen är 200-300 Ns/m, (se diagram 2 nästa sida).

Dämpningens frekvensberoende

Allmänt gäller för samtliga spalthöjder att dämpningen är liten då vågfrekvensen är < 0,5 Hz eller > 1,5 Hz. Den största dämpningen erhölls i intervallet 0,60 - 1,0 Hz. Dämpningens frekvensberoende vid olika spalthöjder för dämpningsöppning 5 x 5 cm visas i diagram 3.

Diagram 2 Verkningsgraden som funktion av dämpningen b
Spalthöjder: 5, 10, 15 och 20 cm
Frekvens: 0,96 Hz

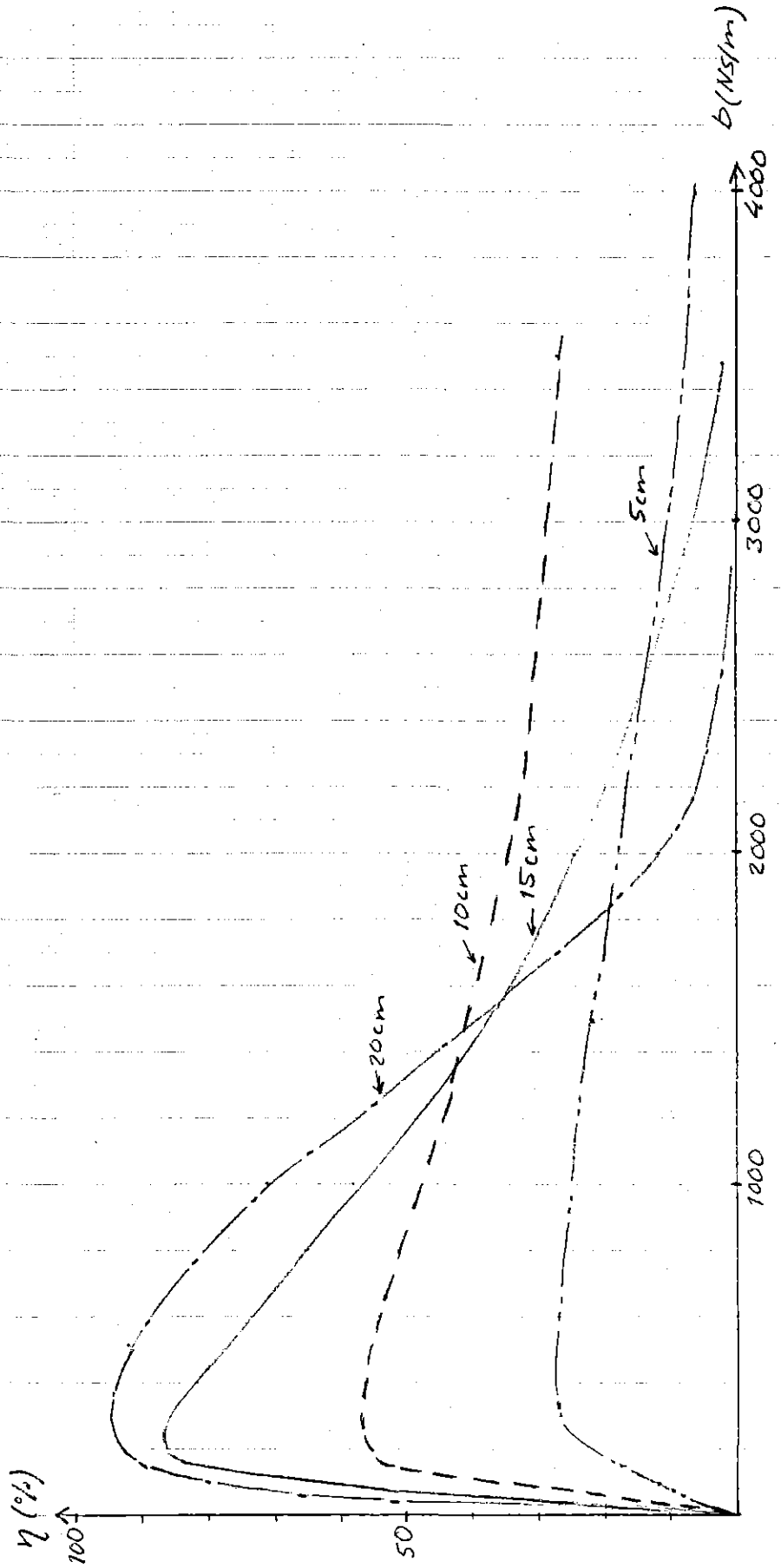
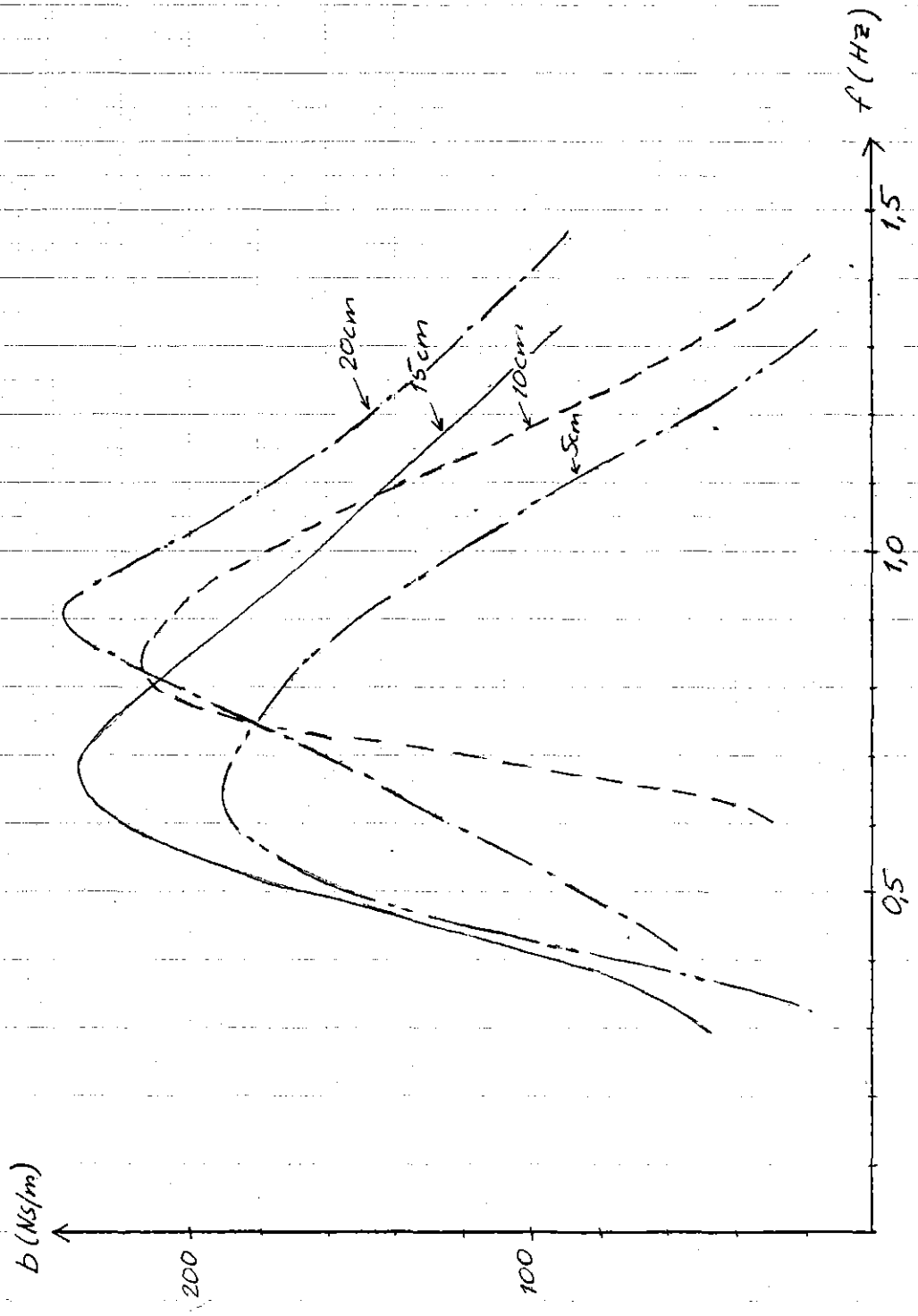


Diagram 3 Dämpningens frekvensberoende

Spalthöjder: 5,10,15 och 20 cm

Dämpningsöppning: 5 x 5 cm



6.4 Amplitudresponsen som funktion av frekvensen

För samtliga spaltöppningar har maximal amplitudrespons erhållits för en frekvens som är lägre än vattenpelarens resonansfrekvens (1Hz).
Möjliga orsaker till detta kan vara inverkan av dämpning eller att en större vattenmassa än den som finns inne i luftklockan kommer i svängning (added mass, se figur nr. 18)

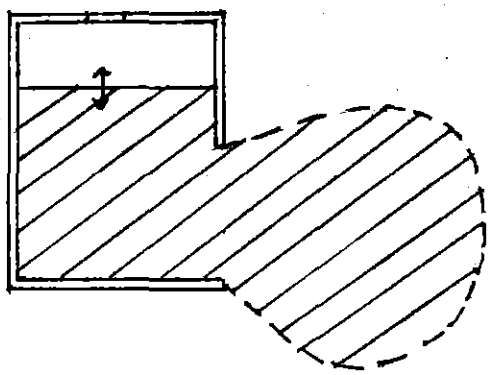
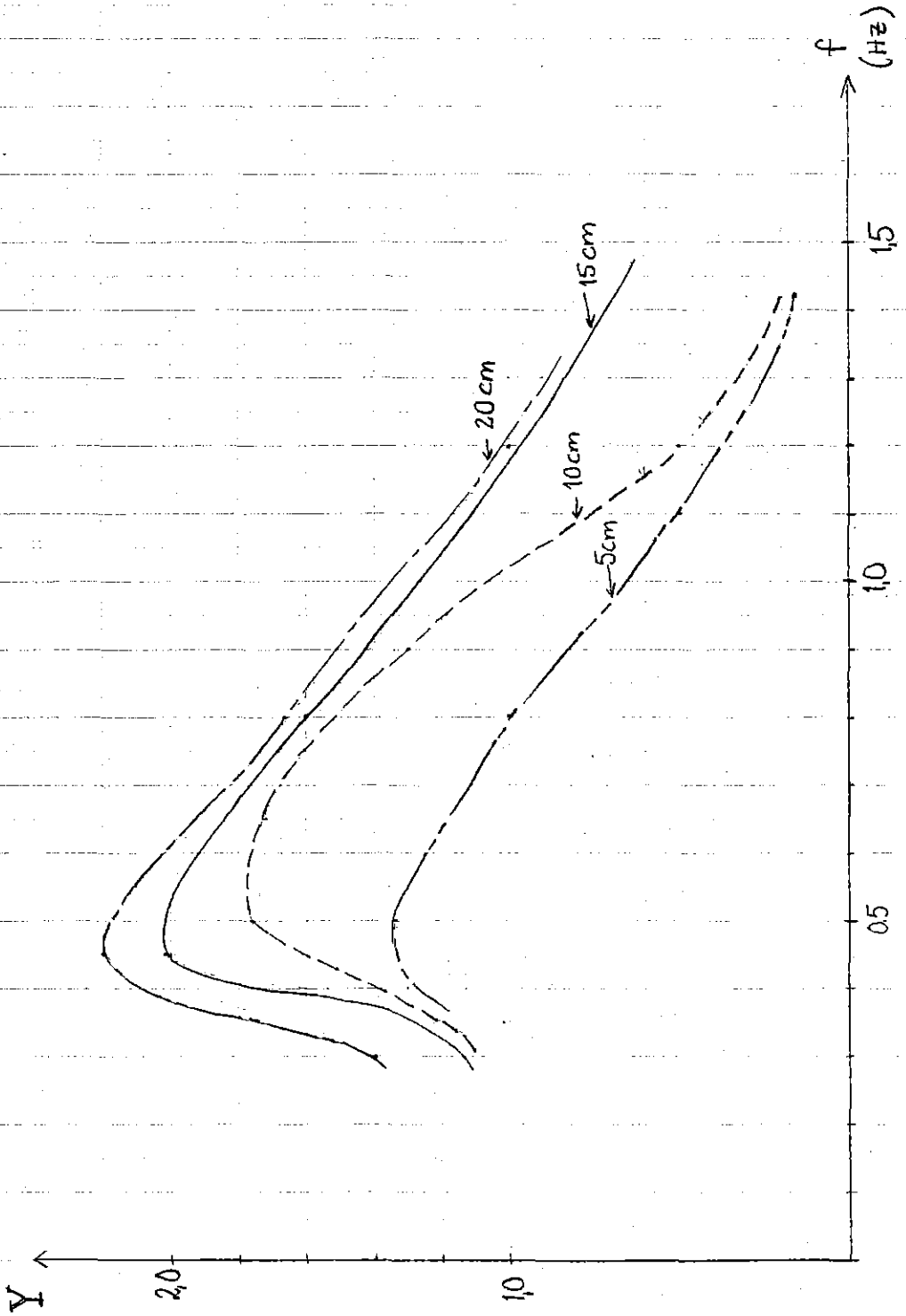


Fig. 18 Inverkan av added mass

På nästa sida visas amplitudresponsen som funktion av vågfrekvensen vid olika spaltöppningar.
De maximala värdena ligger i frekvensintervallet 0,4-0,5 Hz.

Amplitudresponsen Y som funktion av vågfrekvensen f
Spalthöjder: 5, 10, 15 och 20 cm
Dämpningsöppning: 5 x 5 cm



Tryckets amplitudförstärkning som funktion av frekvensen

Om den teoretiskt framtagna formeln för amplitudförstärkningen används, fås ett samband med vågfrekvensen.

$$\left|A(\omega)\right| = \sqrt{\frac{1}{(k_x - m\omega^2)^2 + b^2\omega^2}} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

a) Försumma dämpningens inverkan.
Då blir

$$\left|A(\omega)\right| = \left|\frac{1}{k_x - m\omega^2}\right| \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

$h = 0{,}25\text{m}$

$m = \rho hBD = 1000 \cdot 0{,}25 \cdot 0{,}15 \cdot 0{,}96$

$m = 36$ kg

$k_x = \rho gA = \rho gBD =$

$= 1000 \cdot 9.81 \cdot 0.15 \cdot 0.96 = 1{,}41 \cdot 10^3$ kg/s^2

f (Hz)	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1.1	1.2
A (ω)	$1{,}0 \cdot 10^{-3}$	$1{,}1 \cdot 10^{-3}$	$1{,}4 \cdot 10^{-3}$	$2{,}0 \cdot 10^{-3}$	$3{,}9 \cdot 10^{-3}$	$89{,}1 \cdot 10^{-3}$	$3{,}2 \cdot 10^{-3}$	$1{,}6 \cdot 10^{-3}$

∴ Maximal amplitudförstärkning vid f = 1,0 Hz

b) Beakta inverkan av dämpning

Välj spaltöppningen 15 cm och dämpningsöppning 5 x 5 cm.

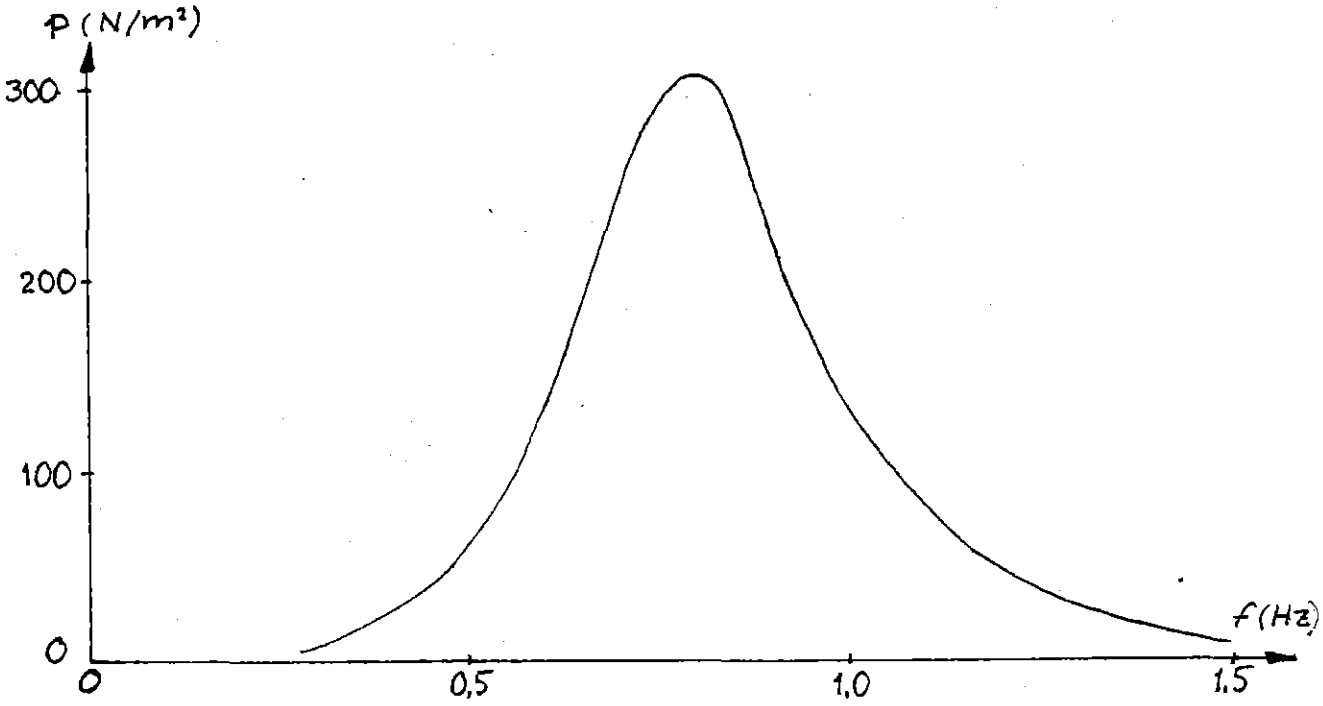
Ur diagram 3, sid. 46 fås dämpningen b.

Insättning i ekvation (1) ger då

f (Hz)	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
b (Ns/m)	165	220	234	210	185	162	140	120
$A(\omega)$ (m/N) x 10^{-3}	0,8	0.8	0,8	0.9	0,9	1,4	1,0	0,9

Dämpningen påverkar alltså inte läget av den maximala amplitudförstärkningen.

Den laborationsmässigt framtagna tryckkurvan för spaltöppning 15 cm visas nedan. Här kan man se att det maximala värdet på trycket fås vid f = 0,8 Hz.



c) Beakta inverkan av added mass. Vi söker den vattenmassa som ger max. tryckamplitud vid f = 0.8 Hz.

Antag exempelvis m_1 = 2m och sätt in värdet i ekv. (2)
Beräkna $A(\omega)$ för f = 0,7-0,8-0,9-1,0 Hz

f (Hz)	0,7	0,8	0,9	1,0
$A(\omega)$ (m/N) x 10^{-3}	58,4	2,4	1,1	0,7

Antag m_1 = 1,5

$\Longrightarrow$

f (Hz)	0,7	0,8	0,9	1,0
$A(\omega)$ (m/N) x 10^{-3}	2,7	21,9	3,2	1,4

Om vattenmassan ökas med 50% fås maximal amplituförstärkning vid f = 0,8 Hz.
Då spaltöppningen var 20cm erhölls dock maxvärdet vid f=1,0 Hz (ingen förskjutning av kurvan)

7. REFERENSLISTA

Wave energy conference

Heathrow hotel - London
22-23 November 1978
Proceedings

First Symposium on Wave Energy Utilization
Chalmers University of Technology
Gothenburg, Sweden
30 October - 1 November 1979

Havets vågor - energikälla för framtiden.
Lennart Claesson

Planeringsrapport NE 1977:4, Vågenergi i Sverige

Förteckning av grupprapporter (GR) från gruppen för vågenergiforskning

GR:5 28 Aug. 1979 Effektupptagning i oregelbundna vågor hos en vågboj med linjär dämpning av Lars Bergdahl

GR:14 Vågkraftbojar - modellförsök med energiupptagning i regelbundna vågor, 21 Mars 1979, av Per Andersson och Jan Forsman

GR:16 Vågenergi i Sverige. 79 05 14

GR:24 Vågkraftbojar - modellförsök med energiupptagning i regelbundna vågor i bred bassäng av Lars Bergdahl, Göran Olsson, Lars-Ove Sörman

GFV Havets vågor - en energikälla för framtiden

8. BETECKNINGSLISTA

A	=	vattenpelarens tvärsnittsarea	$[m^2]$
$A(\omega)$	=	amplitudförstärkning	$[m/N]$
B	=	luftklockans bredd	$[m]$
b	=	hydrodynamisk dämpning	$[Ns/m]$
D	=	luftklockans längd	$[m]$
E	=	vågenergi	$[J/m^2]$
F	=	den kraft som verkar på vattenpelaren	$[N]$
f	=	vågfrekvens	$[Hz]$
f_z	=	nollgenomgångsfrekvens	$[Hz]$
H	=	våghöjd	$[m]$
H_s	=	signifikant våghöjd	$[m]$
H_1	=	våghöjd vid våghöjdsgivare nr 1	$[m]$
H_2	=	våghöjd vid våghöjdsgivare nr 2	$[m]$
H_s	=	våghöjd vid våghöjdsgivare nr 3	$[m]$
H_4	=	våghöjd vid våghöjdsgivare nr 4	$[m]$
h	=	vattennivå i luftklockan	$[m]$
I	=	infallande våg	
K	=	kalibreringsfaktor	
K_1	=	kalibreringsfaktor för våghöjdsgivare nr 1	
K_2	=	- " - -"- - " - nr 2	
K_3	=	- " - -"- - " - nr 3	
K_4	=	- " - -"- - " - nr 4	
K_5	=	kalibreringsfaktor för tryckgivaren	$[N/m^2mm]$
K_x	=	fjäderkonstant	
m	=	hydrodynamisk massa	$[kg]$

P	=	vågeffekt	[W/m]
P_1	=	infallande effekt	[W/m]
P_2	=	transmitterad effekt	[W/m]
P_3	=	reflekterad effekt	[W/m]
P_{upp}	=	upptagen effekt	[W/m]
p	≡	relativt tryck	[N/m^2]
p_o	=	tryckamplitud	[N/m^2]
R	=	reflekterad våg	
$S(f)$	=	vågspektrum	[m^2·s]
T	=	vågperiod	[s]
$T(z)$	=	medelvågperiod	[s]
x	=	vattenytans läge inne i luftklockan	[m]
x_o	=	våghöjdsamplitud inne i luftklockan	[m]
Y	=	amplitudrespons	
$Y(w)$	=	amplitudsresponsfunktionen	
y	=	spalthöjd eller spaltöppning	[m]
ε	=	fasförskjutning	
J_o	=	våghöjdsamplitud för infallande våg	[m]
η	=	hydrodynamisk verkningsgrad	[%]
λ	=	våglängd	[m]
w	=	vinkelfrekvens	[rad/s]
w_e	=	egenvinkelfrekvens	[rad/s]

BILAGA: Kommentarer till diagram

Diagram 1: (bilaga 1:5)

Maximal amplitudrespons uppnås då vågfrekvensen är 0,4-0,5 Hz. Luftklockans resonansfrekvens är 1,0 Hz.

Vi har alltså fått en förskjutning av toppvärdet, vilket bl.a. kan bero på dämpningens inverkan. Den största orsaken är troligen att en större vattenmassa kommer i svängning än den som finns inne i luftklockan (added mass).

Diagram 2: (bilaga 1:6)

Vid vågfrekvensen 1 Hz fås en verkningsgrad på ca 90%. Vid en jämförelse med diagram 1 observerar man att verkningsgraden är mycket låg, då värdet på amplitudresponsen är stort. Detta beror på att trycket är lågt vid motsvarande vågfrekvens. Tryckets variation med frekvensen visas i följande diagram.

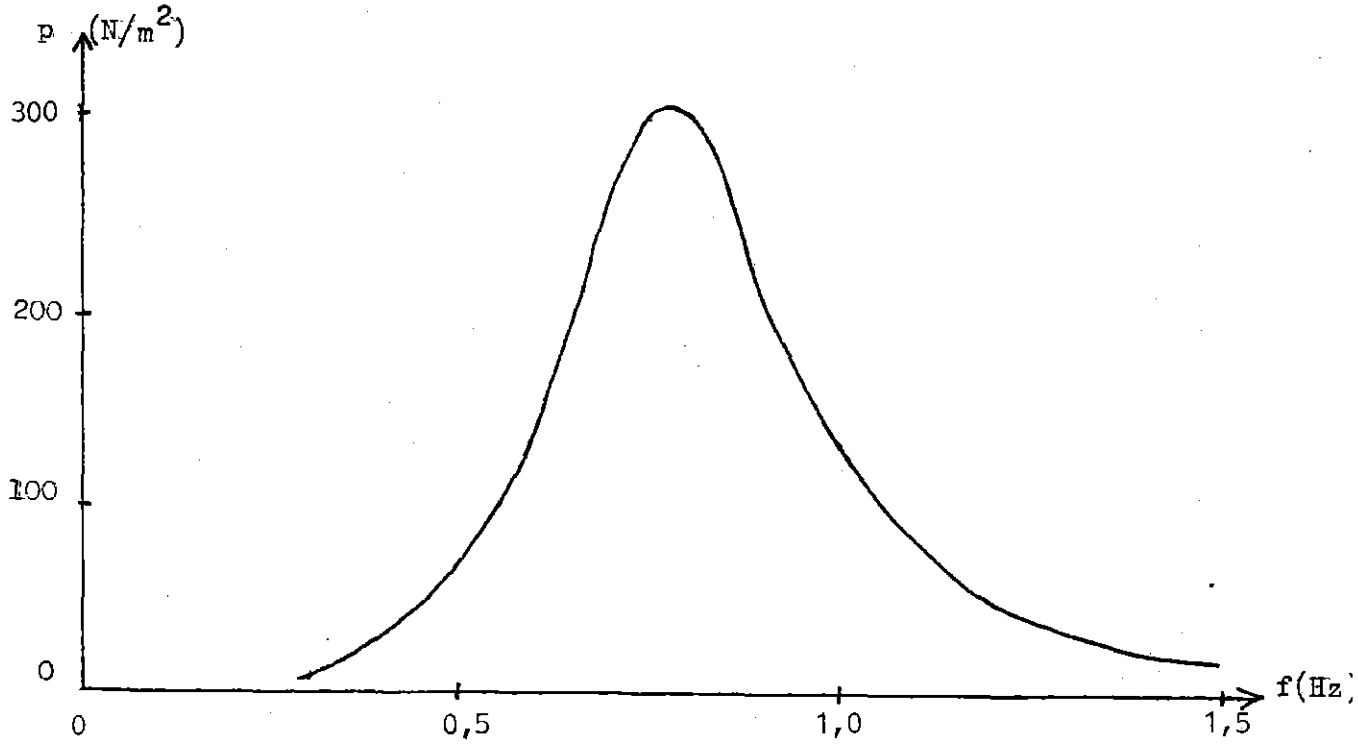


Diagram 3: (bilaga 1:7)

Dämpningens variation beror troligen på att antagandet, F proportionell mot hastigheten $\dot{x}$, inte gäller. Maximal dämpning erhölls för f=0,6-0,7 Hz. Då trycket är högt är också dämpningen betydande.

Diagram 4: (bilaga 1:8)

Dämpningen är störst då frekvensen är ca 0,6 - 0,8 Hz. Då frekvensen är ca 1 Hz fås den bästa verkningsgraden med en dämpning på ca 150 Ns/m. Om dämpningen är större eller mindre än 150 Ns/m kommer verkningsgraden att minska. Vid en vågfrekvens som är mindre än ca 0,5 Hz eller större än 1,30 Hz blir värdena på dämpning och verkningsgrad små.

Diagram 5: (bilaga 1:9)

Maximal amplitudrespons uppnås då vågfrekvensen är 0,4 - 0,5 Hz (jämför diagram 1). Luftklockans resonansfrekvens är 1,0 Hz. Även här är alltså toppvärdet förskjutet i förhållande till vattenpelarens resonansfrekvens.

Diagram 6: (bilaga 1:10)

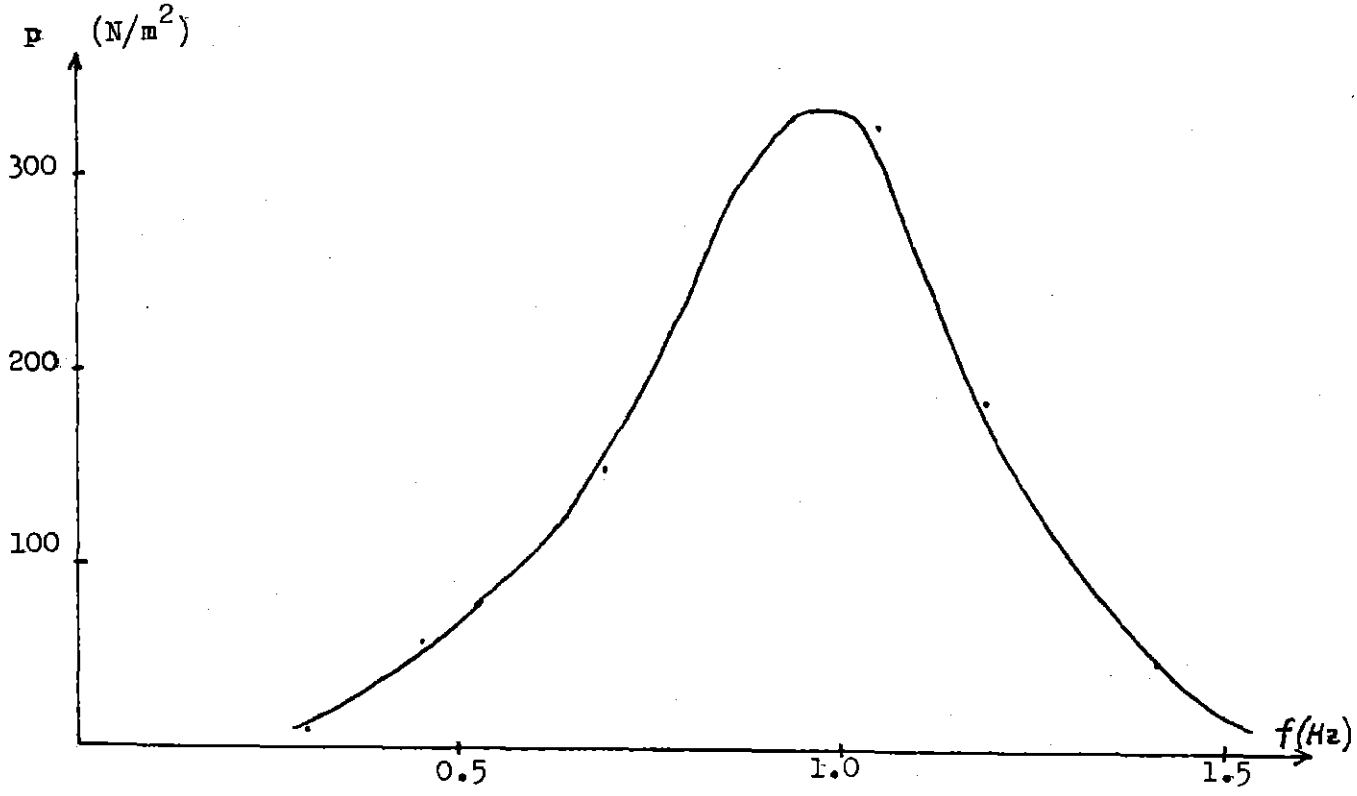
Vid en vågfrekvens på ca 1 Hz fås en verkningsgrad på 95-100%. Om man gör en jämförelse med diagram 5 observeras även här att verkningsgraden är låg, då värdet på amplitudresponsen är stort. Detta beror på att trycket är lågt vid motsvarande vågfrekvens.

Bandbredden är störst då spaltöppningen är 20 cm (jämför diagram 2). Även det största värdet på verkningsgraden uppnåddes för denna spaltöppning.

Om vi jämför denna verkningsgradskurva med motsvarande kurva för NEL:s modell sid.10, fig. 8, observeras att toppvärdet

är väl så bra för vår modell medan bandbredden är betydligt mindre. En ökning av de dämpande krafterna skulle förmodligen förbättra bandbredden.

Tryckets variation med frekvensen visas i följande diagram.



Verkningsgraden är störst vid den frekvens där trycket är maximalt.

Diagram 7: (bilaga 1:11)

Dämpningens variation beror troligen på att antagandet, F proportionell mot hastigheten $\dot{x}$, inte gäller.
Maximal dämpning erhölls för f = 0,85 - 0,95 Hz. Ganska stor likhet med motsvarande tryckkurva. Högt tryck ger stor dämpning medan lågt tryck ger liten dämpning.

Diagram 8: (bilaga 1:12)

Dämpningen är störst då frekvensen är ca 0,6 - 0,8 Hz. En frekvens på ca 1 Hz ger den bästa verkningsgraden med en dämpning på ca 170 Ns/m.

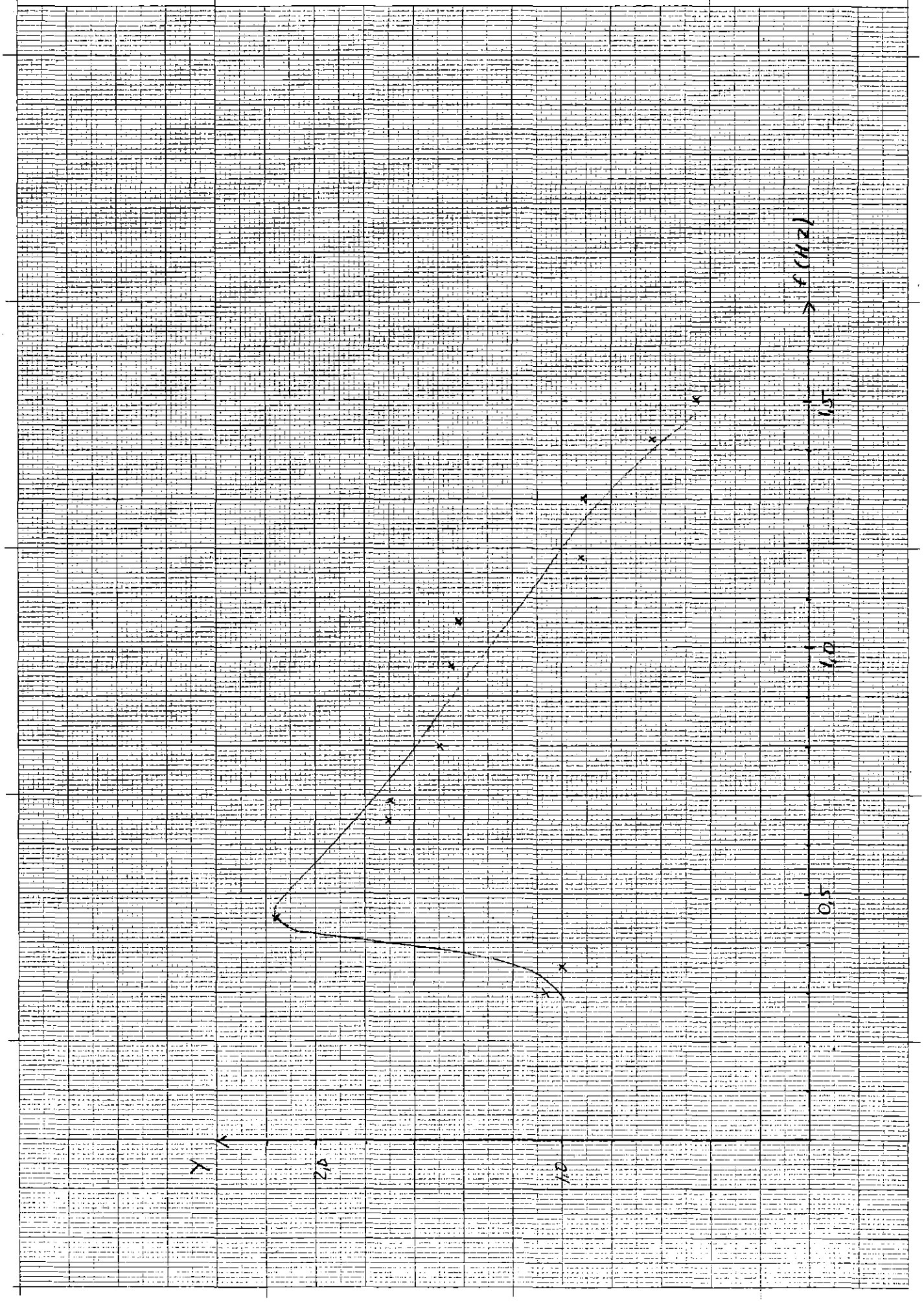
Om dämpningen är större eller mindre än 170 Ns/m kommer verkningsgraden att minska.

Vid en vågfrekvens som är mindre än ca 0,5 Hz eller större än 1,45 Hz blir värdena på dämpning och verkningsgrad små.

1

Amplitudresponsen Y som funktion
av vågfrekvensen f.
Spalthöjd: 15 cm
Dämpning: öppning 5 x 5 cm

Bilaga 1:5

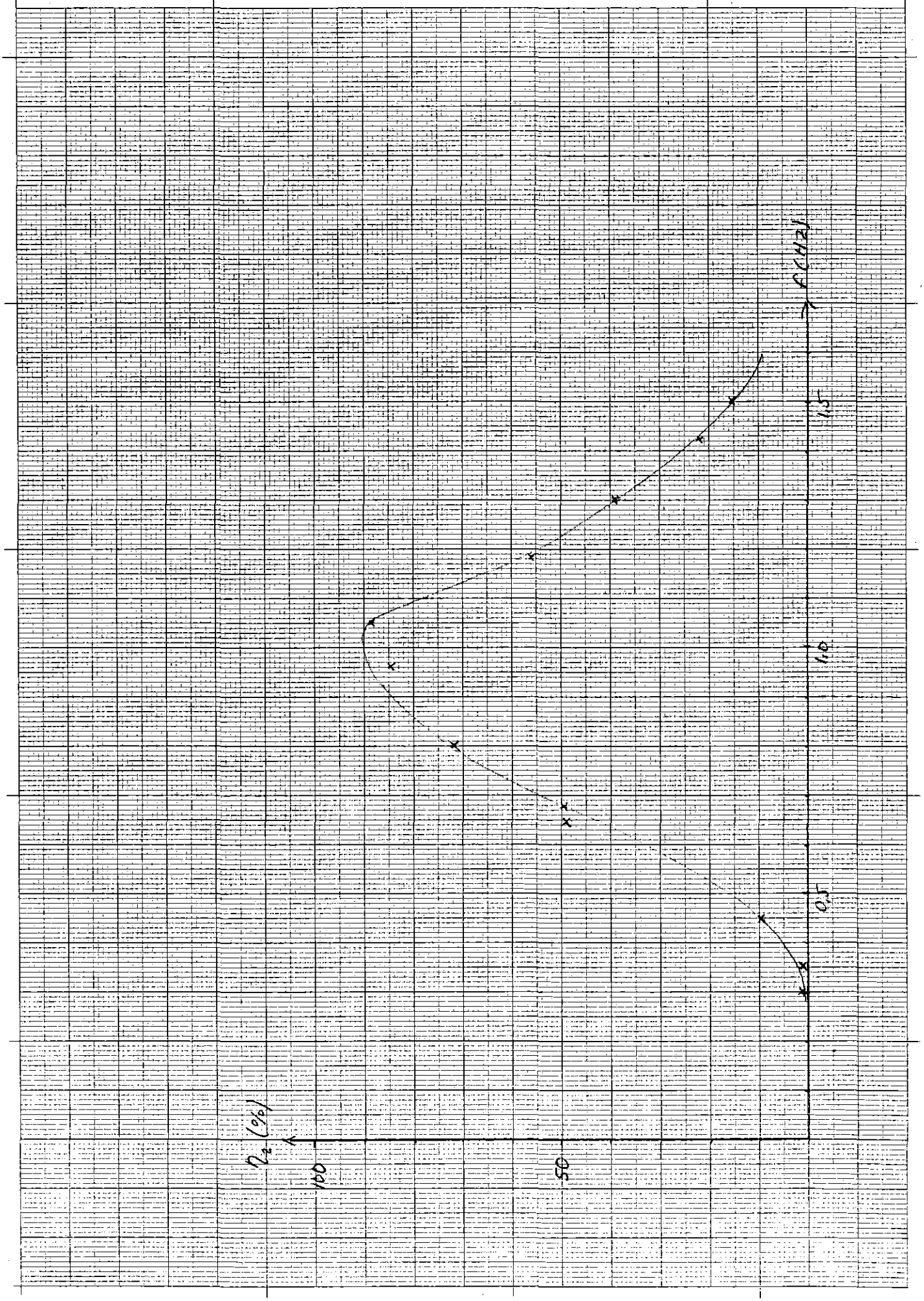


SSELTE
441

2

Verkningsgraden som funktion av vågfrekvensen f
Spalthöjd: 15 cm
Dämpning: öppning 5 x 5 cm

Bilaga 1:6

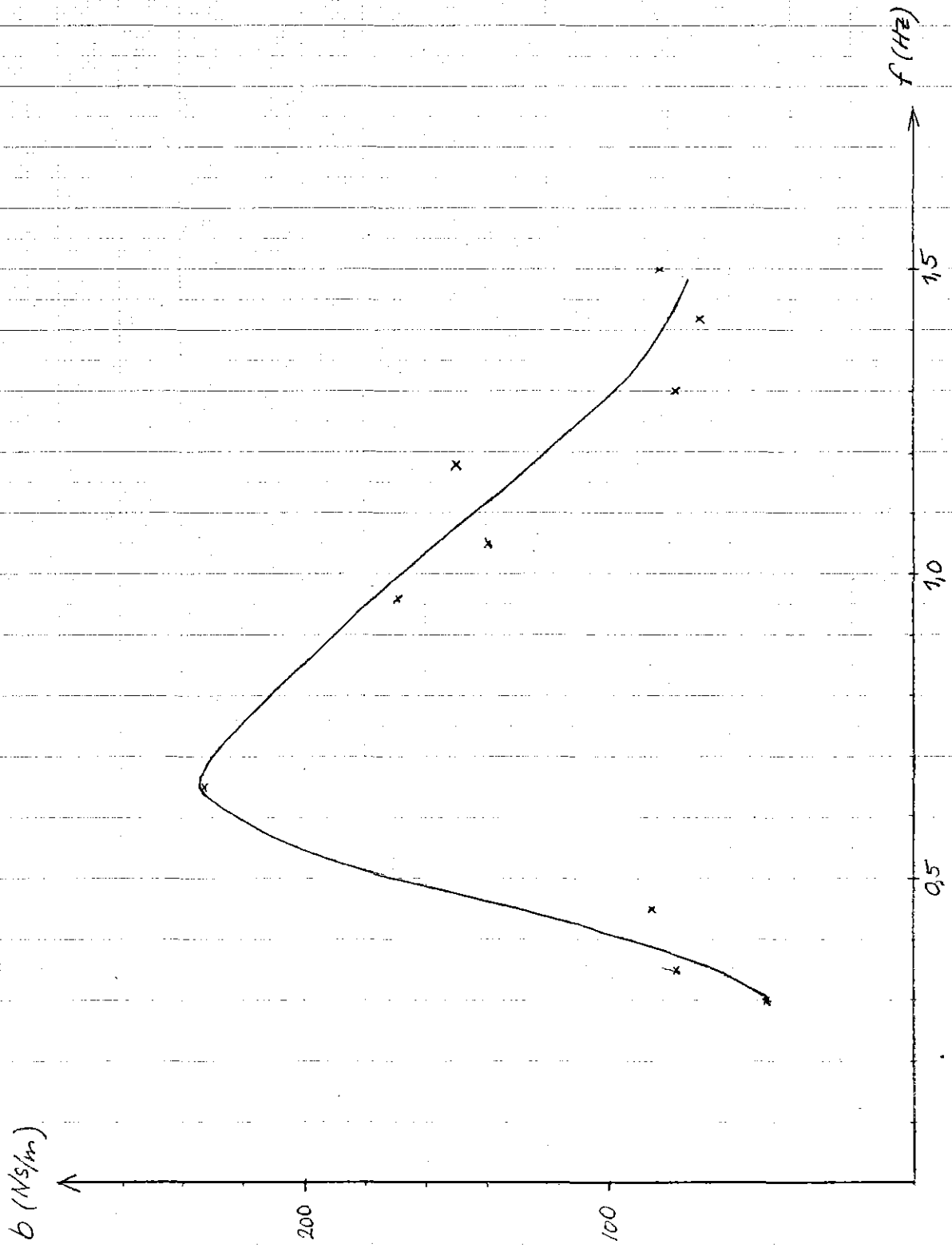


SELTE
141

3

Dämpningen b som funktion av frekvensen f
Spalthöjd: 15 cm
Dämpning: öppning 5 x 5 cm

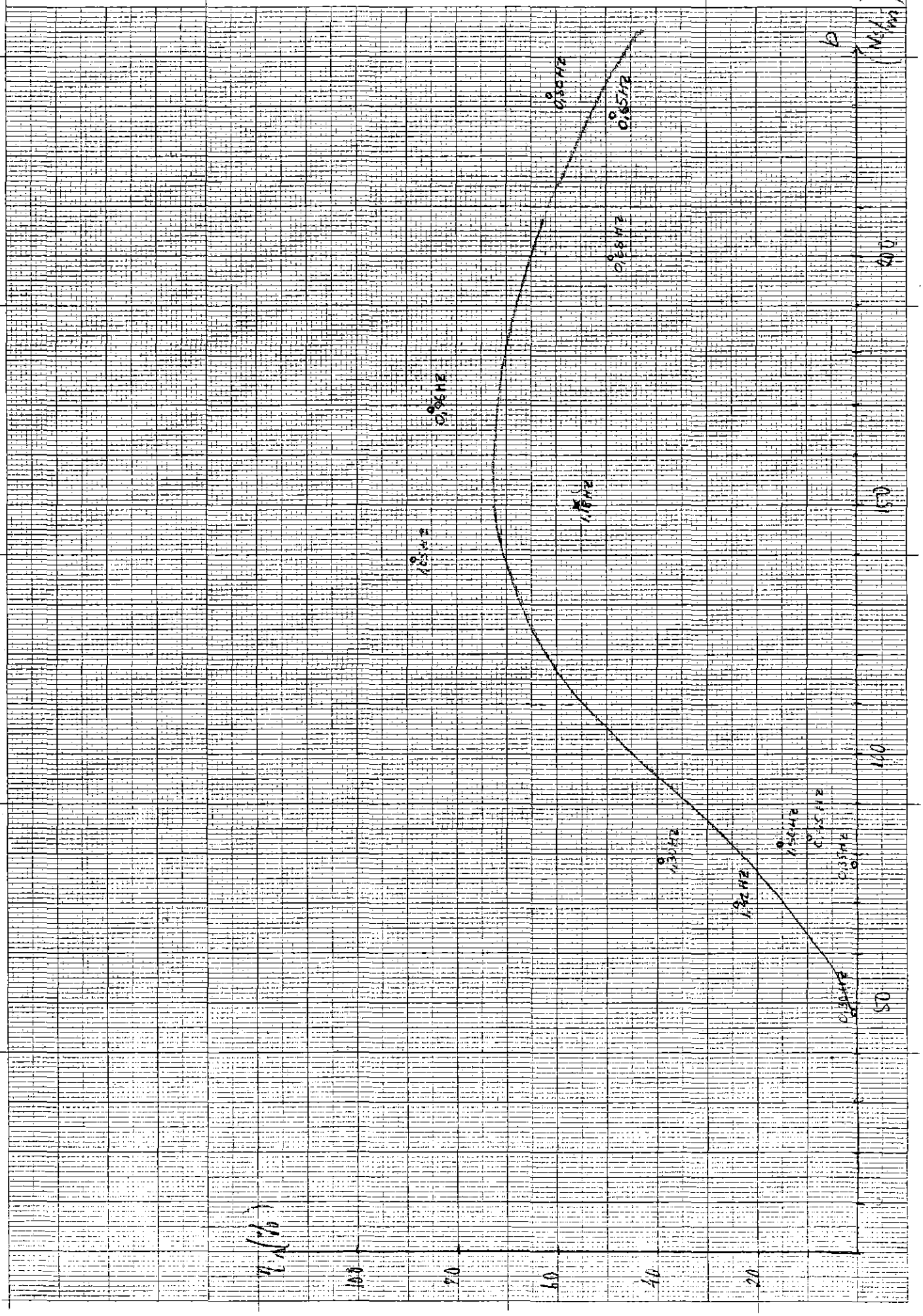
Bilaga 1:7



4

Verkningsgraden η som funktion av dämpningen b vid olika vågfrekvenser
Spalthöjd: 15 cm
Dämpning: öppning 5 x 5 cm

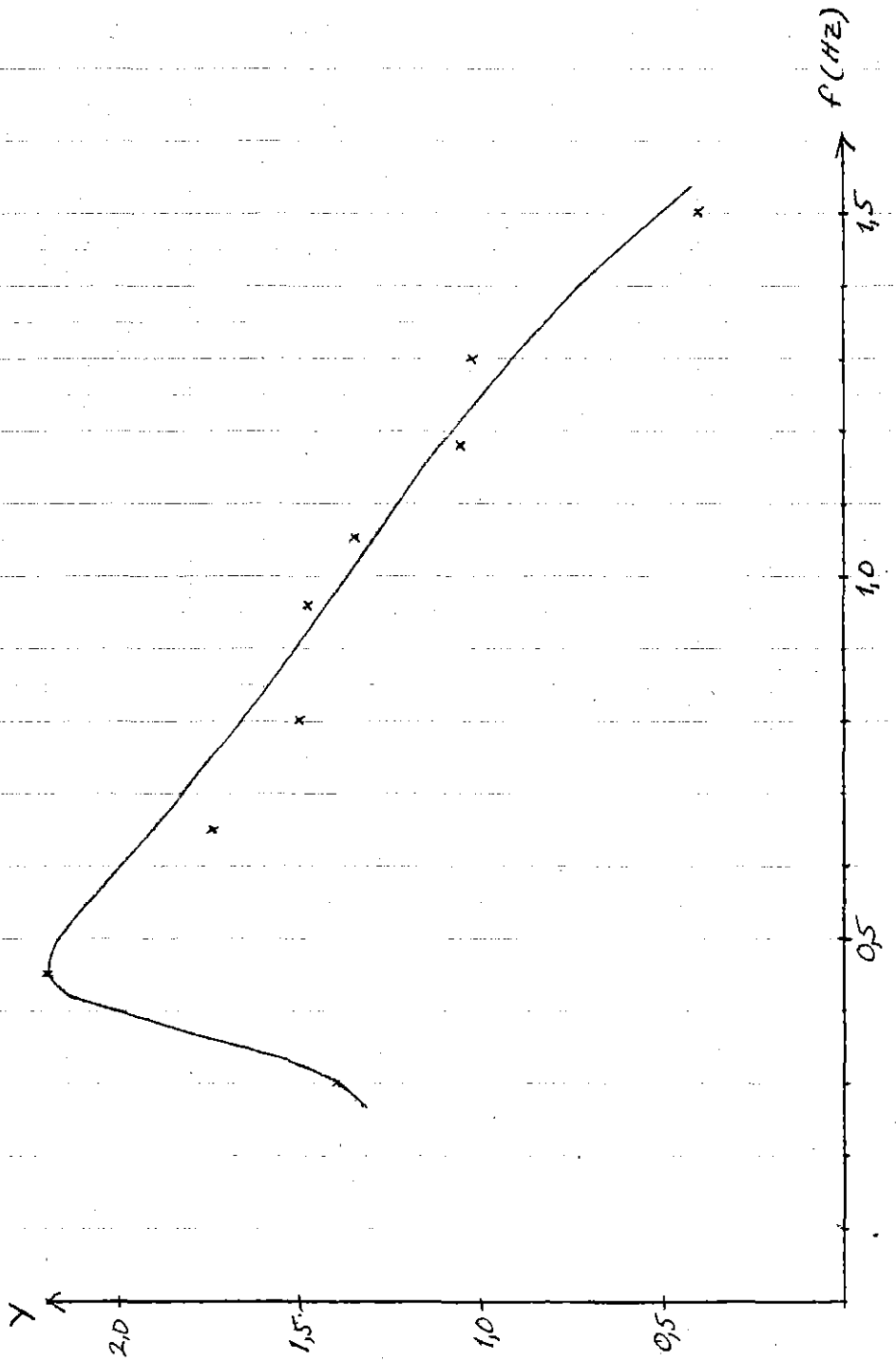
Bilaga 1:8



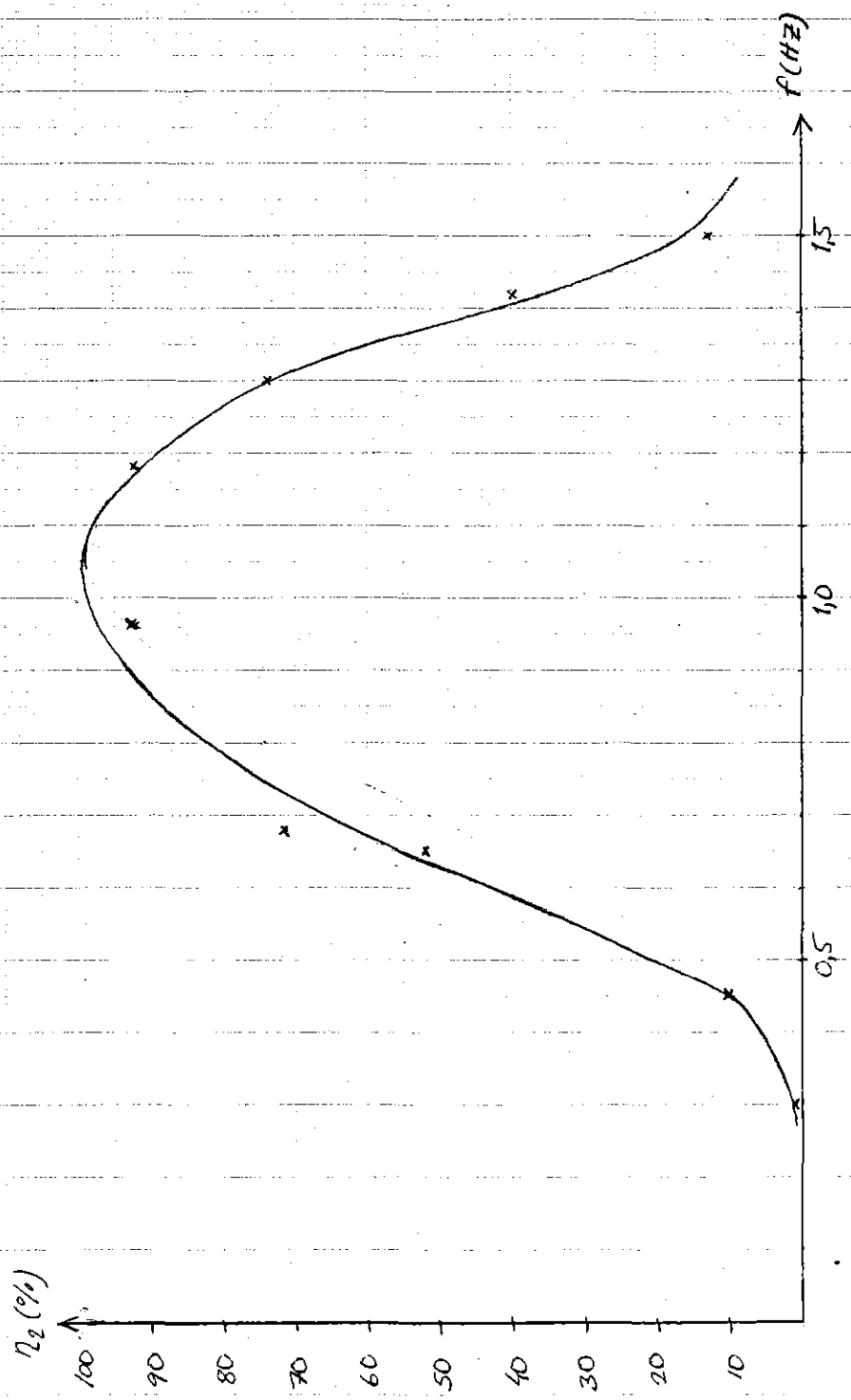
5

Amplitudresponsen Y som funktion av frekvensen f
Spalthöjd: 20 cm
Dämpning: öppning 5 x 5 cm

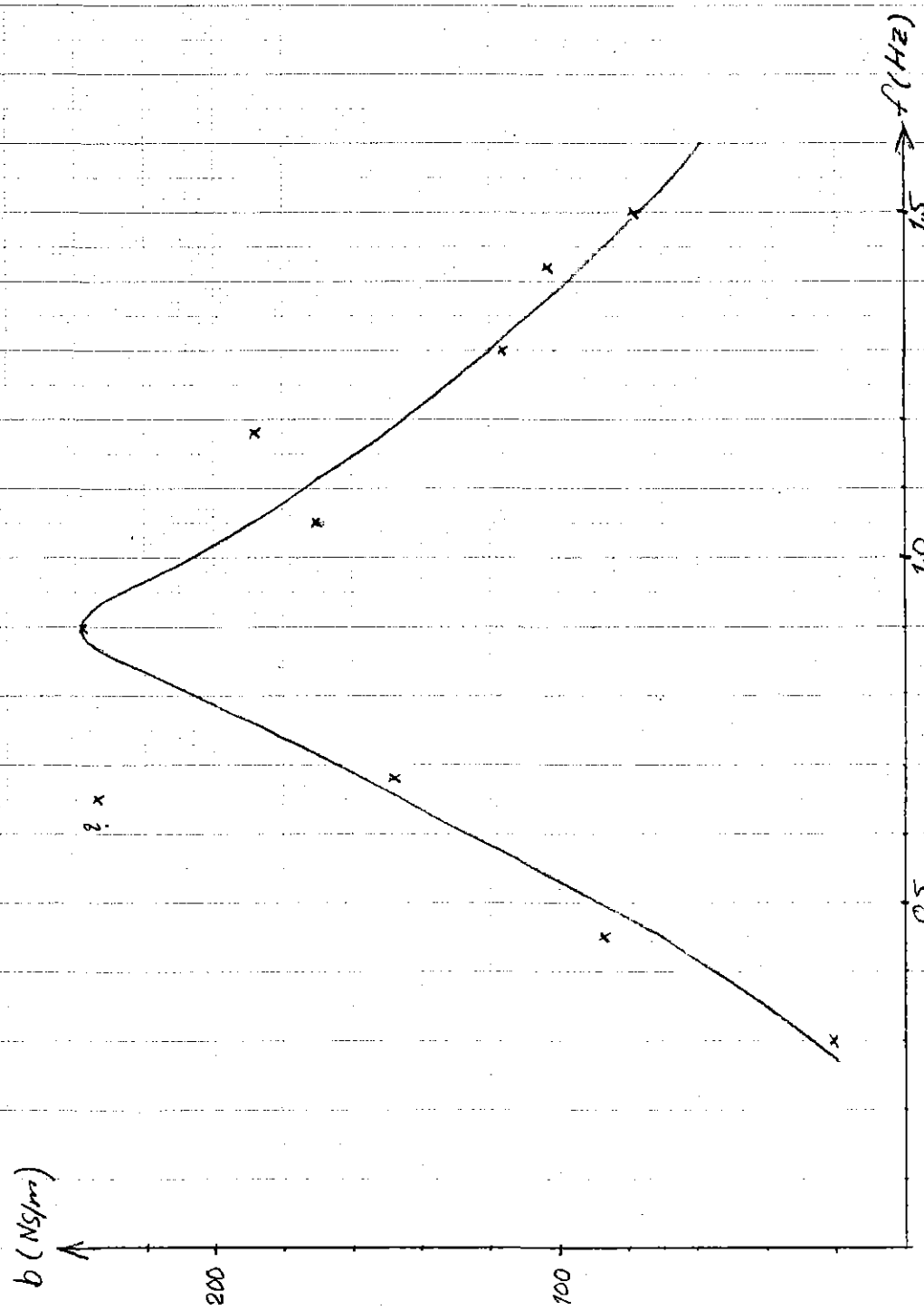
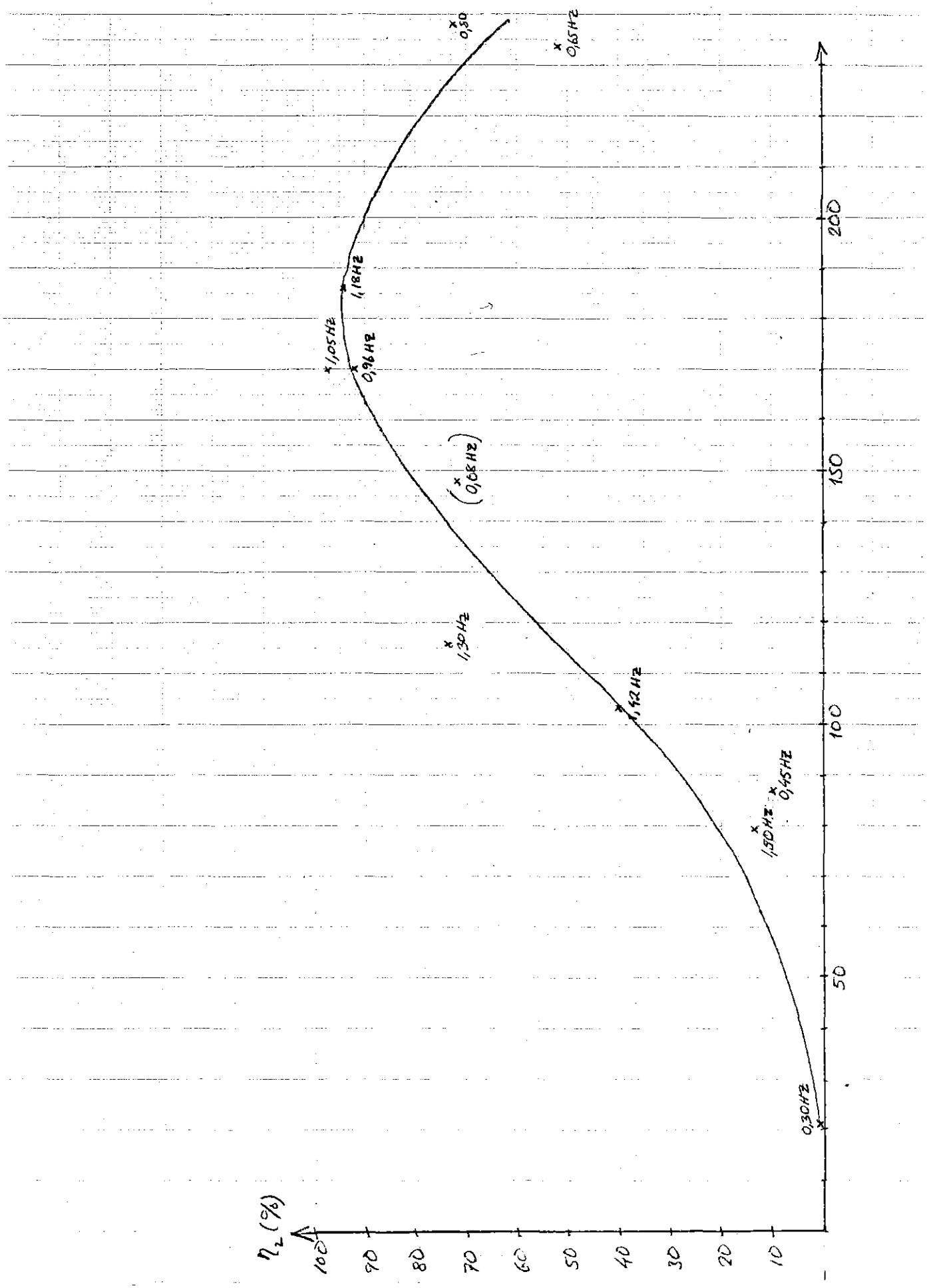
Bilaga 1:9



Verkningsgraden η som funktion av vågfrekvensen f
Spalthöjd: 20 cm
Dämpning: öppning 5 x 5 cm



Dämpningen b som funktion av vågfrekvensen f
Spalthöjd: 20 cm
Dämpning: öppning 5 x 5 cm



Verkningsgraden η som funktion av dämpningen b vid olika vågfrekvenser
Spalthöjd: 20 cm
Dämpning: öppning 5 x 5 cm