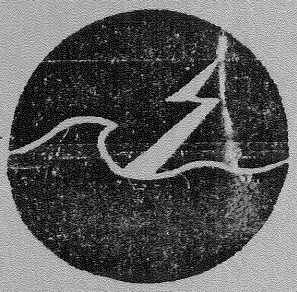
GRUPPEN FÖR VÄGENERGIFORSKNING



VÄGENERGIFORSKNING I SVERIGE

Slutrapport etapp 4.

Del V

Modellförsök

Rapport GR:44
Göteborg
December 1981

GRUPPEN FÖR VÅGENERGIFORSKNING

VÅGENERGIFORSKNING I SVERIGE

Slutrapport etapp 4.

Del V

Modellförsök

Rapport GR:44
Göteborg
December 1981

Förord

Denna rapport sammanfattar det forskningsarbete som utförts under etapp 4 av NE-projektet 5563 954. I vissa avsnitt berörs dock även arbete och resultat från såväl tidigare etapper som etapp 5. I kapitel 7 beskrivs försöken med en vågkraftboj till havs. Detta projekt har bekostats huvudsakligen av STU och Interproject Service AB.

På grund av rapportens omfång - närmare 500 sidor - har den uppdelats i fem delar, varje del motsvarande ett kapitel. Varje del innehåller även innehållsförteckning och, rapportsammanfattning och inledning. I slutet på varje kapitel redovisas till kapitlet hörande referenser.

Rapporten har utarbetats av Gruppen för vågenergiforskning som under etapp 4 har utgjorts av följande personer (aktuell institutionstillhörighet anges).

Jan Forsberg	Inst för elektromaskinlära, CTH
Jonny Hylander	" " " "
Svante von Zweygbergk	" " " "
Curt Falkemo	Inst för skeppshydromekanik, CTH
Birgit Jacobsson	" " " "
Johannes K Lunde	" " " "
Bengt-Olov Sjöström	" " " "
Lars Bergdahl	Inst för vattenbyggnad , CTH
Nils Mårtensson	" " " "
Lars-Ove Sörman	" " " "
Filip Alm	Technocean i Göteborg AB
Anders Byström	" " " "
Lennart Claeson	" " " "
Åke Kinnander	" " " "
Thomas Rindby	" " " "
Anders Rylander	" " " "
Pontus Clason	Arendalsvarvet fd Skeppshydromekanik, CTH

Dessutom har personal vid institutionerna och Technocean medverkat vid utskrift av rapporten, verkstadsarbete mm.

Information om forskningsgruppens verksamhet kan lämnas av Lennart Claeson (031-81 33 25) som är samordnare i gruppen.

Göteborg den 20 december 1981

Curt Falkemo
Projektledare

VÅGENERGIFORSKNING I SVERIGE

Slutrapport etapp 4.

Innehållsförteckning i:iii

Förord i:i

1. SAMMANFATTNING 1:1
1.1 Allmänt 1:1
1.2 Internationell utblick (Del I) 1:1
1.2.1 Uppföljning av internationell utveckling 1:1
1.2.2 Litteraturuppföljning bibliotek 1:3
1.2.3 Kontakter med utländska forskare 1:3
1.3 Energipotential (Del II) 1:3
1.3.1 Vågmätningar, bruttoenergipotential 1:3
1.3.2 Tillgängliga vattenområden 1:4
1.4 Teknikövesikt och tillämpningar (Del III) 1:4
1.4.1 Vågkraftverk 1:4
1.4.2 Energiupptagning 1:5
1.4.3 Elektriska system 1:5
1.4.4 Förankringssystem 1:6
1.4.5 Material 1:6
1.4.6 Realisering av vågkraftverk 1:6
1.4.7 Kostnader 1:7
1.5 Teoriutveckling (Del IV) 1:7
1.5.1 Grundläggande teoriutveckling 1:7
1.5.2 Tillämpad teori 1:8
1.5.3 Teoretisk analys av petropumpslang 1:8
1.5.4 Optimering av boj 1:8
1.5.5 Energiproduktionsberäkning 1:9
1.5.6 Frekvensanalys inom vågteorin 1:9
1.6 Modellförsök (Del V) 1:10
1.6.1 Laboratorieförsök 1:10
1.6.2 Försök i Lygern med kopplade bojen 1979. 1:10
1.6.3 Försök i Lygern med kopplade bojen 1981. 1:10

1.6.4 Försök i Lygnern med petropumpskraftverk 1:11
1.6.5 Försök med IPS-bojen vid Trubaduren 1:11
2. INLEDNING 2:1
2.1 Allmänt 2:1
2.2 Rapporten 2:2
2.3 Rapportförteckning 2:3

3. INTERNATIONELL UTBLICK 3:1
3.1 Uppföljning av internationell utveckling 3:1
3.1.1 Norge 3:1
3.1.2 Storbritannien 3:5
3.1.3 Japan 3:20
3.1.4 Övriga länder 3:24
3.2 Litteraturuppföljning 3:25
3.3 Kontakter med utländska forskare 3:28
3.3.1 Allmänt 3:28
3.3.2 Kontakter refererade i reserapporter 3:28
3.3.3 Övriga kontakter 3:44
3.4 Referenser 3:48

4. ENERGIPOTENTIAL 4:1
4.1 Vågmätningar 4:1
4.1.1 Använda metoder för insamling av vågdata 4:1
4.1.2 Redovisning av vågdata 4:13
4.1.3 Bedömning av årsmedeleffekter 4:20
4.2 Tillgängliga vattenområden 4:26
4.2.1 Allmänt 4:26
4.2.2 Isförhållanden 4:26
4.2.3 Miljöförhållanden 4:29
4.2.4 Fiske 4:30
4.2.5 Sjöfart 4:33
4.2.6 Militära intressen 4:33
4.2.7 Fritidsintressen 4:33
4.2.8 Anslutning till kraftnätet 4:33
4.3 Lokalisering till havs 4:35
4.4 Referenser 4:35

5. TEKNIKÖVERSIKT OCH TILLÄMPNINGAR 5:1

5.1 Vågkraftverk 5:1

5.1.1 Allmänt om vågkraftverk 5:1

5.1.2 Struktur hos vågkraftverk 5:1

5.1.3 Samlokaliserade vind- och vågkraftverk 5:6

5.2 Energiupptagning 5:15

5.2.1 Några hydrodynamiska principer 5:15

5.2.2 Omvandlare - översikt 5:19

5.2.3 Mellanled 5:62

5.2.4 Generatorer 5:69

5.3 Elektriska system 5:85

5.3.1 Frekvensomriktarsystem 5:85

5.3.2 Exempel på system för simulering av vågkraftverk map elektriska systemet 5:90

5.4 Förankringssystem 5:100

5.4.1 Struktur och funktionssätt 5:100

5.4.2 Komponenter 5:105

5.5 Material 5:112

5.5.1 Allmänt 5:112

5.5.2 Stål 5:112

5.5.3 Betong 5:118

5.5.4 Plaster 5:121

5.5.5 Gummi 5:123

5.6 Realisering av vågkraftverk 5:125

5.6.1 Tillverkning 5:125

5.6.2 Installation 5:126

5.6.3 Underhåll och drift 5:126

5.6.4 Utförda studier 5:127

5.7 Kostnader 5:135

5.7.1 Principer för kostnadsberäkning 5:135

5.7.2 Utförda kostnadskalkyler 5:142

5.7.3 Exempel på kostnadskalkyler 5:147

5.8 Referenser 5:151

6. TEORIUTVECKLING 1/6.1

6.1 Grundläggande teoriutveckling 1/6.1

6.1.1 Allmänt om den hydrodynamiska teorin 1/6.1

6.1.2 Rörelseekvationerna 1/6.2

6.1.3 Hastighetspotentialer 1/6.3
6.1.4 Den hydrodynamiska reaktionskraften och dess moment 1/6.4
6.1.5 Kochinfunktionen 1/6.5
6.1.6 Den hydrodynamiska exitationskraften och dess moment Haskinds formel 1/6.6
6.1.7 Effektupptagning hos en svängande kropp i vågor 1/6.7
6.1.8 Exitationskraftens amplitudfaktor 1/6.8
6.1.9 Direktivitet och absorptionslängd 1/6.9
6.2 Tillämpad teori 6:82
6.2.1 Använda begrepp 6:82
6.2.2 Energi- och effektspektrum 6:84
6.2.3 Standardspektrum 6:87
6.2.4 Linjär teori för NE-bojen 6:88
6.2.5 Teori för den kopplade bojen 6:93
6.2.6 Energiupptagning i oregelbunden sjö 6:99
6.3 Teoretisk analys av petropumpslang 6:101
6.4 Optimering av boj 6:102
6.5 Energiproduktionsberäkning 6:120
6.5.1 Inledning 6:120
6.5.2 Den statistiska modellen 6:121
6.6 Frekvensanalys inom vågteorin 6:127
6.6.1 Bakgrund 6:127
6.6.2 Den diskreta Fouriertransformen 6:127
6.6.3 Autokorrelationsfunktionen och effektspektrum 6:128
6.6.4 Fast Fourier Transform (FFT) 6:128
6.6.5 Överföringsfunktion 6:130
6.6.6 Reducering av felet i spektralskattningen 6:132
6.6.7 Spektralupplösning 6:133
6.7 Referenser 6:134

7. MODELLFÖRSÖK 7:1
7.1 Laboratorieförsök 7:1
7.1.1 Målsättning 7:1
7.1.2 Utförda modellförsök 7:1
7.1.3 Försöksanordningar 7:10
7.1.4 Resultat 7:13
7.1.5 Slutsatser av modellförsöken 7:26

7.2 Försök i Lygnern med kopplade bojen 1979 7:28
7.2.1 Målsättning 7:28
7.2.2 Utförda försök 7:28
7.2.3 Försöksanordningar 7:32
7.2.4 Utvärdering 7:40
7.2.5 Resultat med kommentar 7:43
7.2.6 Slutsatser och sammanfattning 7:47
7.3 Försök i Lygnern med kopplade bojen 1981 7:48
7.3.1 Målsättning 7:48
7.3.2 Utförda modellförsök 7:48
7.3.3 Försöksanordningar 7:48
7.3.4 Resultat 7:55
7.3.5 Slutsatser och erfarenheter 7:70
7.4 Försök i Lygnern med petropumpskraftverk 7:79
7.4.1 Försök 1979 7:79
7.4.2 Försök 1980 7:81
7.5 Försök med IPS-bojen vid Trubaduren 7:84
7.5.1 Målsättning 7:84
7.5.2 Konstruktion och funktion 7:84
7.5.3 Utförda försök 1980 7:89
7.5.4 Resultat 1980 7:96
7.5.5 Utförda försök 1981 7:113
7.5.6 Resultat 1981 7:116
7.6 Referenser 7:123

1 SAMMANFATTNING

1.1 Allmänt

I detta kapitel redovisas kortfattat för innehållet i kapitel 3-7 i rapporten. Sammanfattningarna står inte i proportion till omfånget hos respektive kapitel utan tonvikten har lagts vid att ge upplysning om väsentliga resultat.

1.2 Internationell utblick

1.2.1 Uppföljning av internationell utveckling

I detta avsnitt lämnas en redogörelse över utvecklingen inom vågenergiforskningen i flera länder. Informationens aktualitet och insiktsfullhet varierar betydligt.

Norge har hittills satsat ca 60 milj kr, vilket motiverats av de goda förutsättningarna landet har med ett årsmedelvärde på ca 20 kW/m i vågeffekt. I huvudsak har tre olika koncept utvecklats - fasstyrd boj, svängande vattenpelare och koncept med fokuserande kraftverk. Dessutom har betydande insatser gjorts beträffande studium av vågor och vågklimat. I slutet av 1981 presenterades en evaluering av den norska vågenergiforskningen. I denna jämfördes de tre olika koncepten för tre olika platser på den norska kusten. För den bästa av dessa platser undersöktes även ett brittiskt projekt som jämförelse. Evalueringen tog sikte på att jämte energipotentialen uppskatta energikostnaderna. I del II av evalueringen presenteras energikostnader på mellan 100 och 150 öre/kWh, för de norska koncepten och över 200 öre/kWh för det brittiska. Forskningsteamen är starkt kritiska mot det sätt varpå kostnadsberäkningarna har gjorts och menar att kostnaderna bör kunna bli lägre än 50 öre/kWh.

Storbritannien har det tyngsta programmet med en satsning på hittills 120 milj kr. Satsningen har dels gjorts på olika koncept dels på stödforskning av allmän karaktär t ex map nya omvandlingssystem, insamling och analys av vågdata, hållfasthet, förankring, energigenerering och energiöverföring samt miljöpåverkan.

Storbritannien räknar med att ca 20% av elenergibehovet skulle kunna täckas med vågenergi. Pga att vågenergin skulle produceras långt från konsumenterna blir nätets kapacitet begränsande. Av de många koncept som studerats kan nämnas Salter's ducks, Cockerells Contouring rafts, Russel's rectifier, NEL's OWC (Oscillating Water Column), Bristol Cylinder, Lancaster flexible bags och Vickers Chambers.

Försök har utförts i olika skalor - 1/100 i laboratorier och 1/10 till sjöss, teoretiska modeller har utvecklats och kostnadsberäkningar har genomförts. Efter hand har på grundval av detta omfattande arbete ett antal omvandlare befunnits orealistiska av ekonomiska eller tekniska skäl (i första hand överlevnad). För närvarande är de fyra sistnämnda omvandlarna ovan föremål för fortsatt satsning.

De beräknade kostnaderna för vågenergin varierar kraftigt och beror i hög grad på vem som räknat. Det beräkningar som gjorts av oberoende konsulter pekar på kostnader mellan 60-150 öre/kWh medan forskningsteamens egna uppskattningar hävdar kostnader mellan 35 och 100 öre/kWh.

Under 1982 skall Storbritannien besluta om nästa steg skall bli en fullskaleprototyp till havs och i så fall även hur den skall se ut.

Japan är det land som sysslat längst med vågenergi genom sina vågdrivna ljud- och lysbojar. I mitten av 1970-talet byggde man efter omfattande laboratorieförsök en fullskaleprototyp med samma omvandlingsprincip som bojarna. Prototypen, med namnet KAIMEI utnyttjas nu i ett internationellt samarbetsprojekt inom IEA. De deltagande länderna ges möjlighet att utprova olika turbiner mm.

Japan studerar även ett antal andra koncept samt har ett pågående vågmätningsprogram.

USA har gjort vissa undersökningar av ljud- och lysbojar samt av en vågpump. Mest aktuell är idén med "dam-atoll" som bygger på vågornas refraktion. USA deltar även i Kaimeiprojektet.

Övriga länder som visat intresse för vågenergi är Canada, Eire, Frankrike, Finland, Danmark, Italien m fl.

1.2.2 Litteraturuppföljning, bibliotek

Sedan oktober 1979 bevakas ett flertal relevanta tidsskrifter. Ett bibliotek har byggts upp som nu omfattar ca 3000 artiklar, rapporter och proceedings med särskild inriktning på kroppars rörelser i vågor, krafter från vågor, vågspektra och förankring.

1.2.3 Kontakter med utländska forskare

Ett viktigt led i kunskapsuppbyggnaden utgör kontakterna med utländska forskare. Dessa kontakter har bestått både i korrespondens och personliga sammanträffanden. Oftast har ramen varit en konferens eller liknande. Av naturliga skäl har umgänget med norrmännen varit särskilt livligt. I rapporten ges en förteckning över deltagande i olika konferenser mm samt en uppräkning av andra former av kontakter. Särskilt givande har seminariesamarbetet med Norge varit. Vidare har vi haft stor nytta av deltagandet i de stora brittiska konferenserna och av ett flertal studiebesök i både Storbritannien och Norge. I och med symposiet i Göteborg 1979 blev den svenska forskningsinsatsen internationellt känd och erkänd.

1.3 Energipotential

1.3.1 Vågmätningar

I detta avsnitt redovisas alla kända bestämningar för minst ett helt år av vågeffekter runt den svenska kusten. Bestämningarna utgörs av observationer, mätningar och olika hindcastberäkningar. Metoderna beskrivs och bedöms. Sammanlagt föreligger 10 olika källor. Värden finns för 33 olika platser längs svenska kusten och gäller för tidsperioder från 20 år till 1 år. Slutligen görs en sammanfattande bedömning av årsmedeleffekten på de nämnda platserna

där även tillförlitligheten av bestämningsmetoden anges och hänsyn till isförekomst tas.

De mest intressanta områdena på västkusten och utanför Gotland bedöms ha en årsmedeleffekt på 5 ± 1 kW/m.

1.3.2 Tillgängliga vattenområden

Kapitlet behandlar de hinder som kan tänkas för placering av vågkraftverk utmed den svenska kusten. Sålunda beskrivs isförhållandena under normal respektive sträng vinter samt diskuteras vilka problem isen kan medföra och hur de skulle kunna bemötas. Vidare berörs eventuella miljöproblem men framför allt riskerna för konflikt med fiskerinäringen. Metoder för fiske beskrivs kortfattat och en översikt över var fisket bedrivs ges. Konfliktrisker med sjöfart, militära intressen, fritidsintressen och marin kulturminnesvård berörs, liksom anslutningsmöjligheterna till kraftnätet.

Möjligheten att lokalisera vågkraftverk till havs diskuteras.

Utanför bohuskusten kan fiske och is utgöra betydande hinder för introduktion av vågkraftverk. Öster om Gotland bedöms problemen vara betydligt mindre.

1.4 Tekniköversikt och tillämpningar

1.4.1 Vågkraftverk

Detta omfattande kapitel berör först olika strukturlösningar hos vågkraftverk. Bl a tas möjligheten upp att samlokalisera havsförlagda vindkraftverk och vågkraftverk. En studie av detta har gjorts för Gotland.

Därefter berörs kortfattat några olika hydrodynamiska principer samt olika sätt att dela in vågenergiomvandlare. Därefter beskrivs utformning och funktion mm hos de flesta omvandlare som på allvar studerats. Antalet koncept fördelar sig på olika länder enligt följande:

Japan	7
Storbritannien	12
Norge	3
USA	4
Finland	2
Västtyskland	1
Danmark	1
Frankrike	1
Mauritius	1
Summa	32

De svenska koncepten berörs i kapitel 7 och tas ej upp här.

Ett stort antal patent finns på området och ett par exempel lämnas.

1.4.2 Energiupptagning

Fortsättningsvis beskrivs olika omvandlingsled mellan det hydrodynamiska och det elektriska ledet, såsom mekanisk, hydraulisk och pneumatisk omvandling.

En omfattande undersökning av rotorlindningsfria generatorer för vågenergiomvandlare sammanfattas ganska kortfattat. Särskilt berörs de högst speciella krav som ställs på en sådan generator: den skall uppfylla extremt höga miljökrav med starkt salthaltig och fuktig atmosfär och den bör vara praktiskt taget service- och underhållsfri. Dessa krav medför att endast vissa typer av generatorer kommer ifråga nämligen borstlösa synkrongeneratorer, asynkrongeneratorer med burlindad rotor samt reluktansgeneratorer. Särskilt reluktansgeneratorer diskuteras.

I ett följande avsnitt följs tidigare gjorda utredningar avseende den linjära generatorn upp. Ett konkret exempel på en dimensionering av en 50 W modellgenerator visas.

1.4.3 Elektriska system

I avsnittet ges en översikt över sådana frekvensomriktarsystem som är lämpliga för överföring av effekt från vågenergiomvandlare till

ett kraftnät. En förutsättning är att den elektriska energin levereras med en likspänning överlagrad med ett spektrum av växelströmskomponenter. Den elektriska effektens kvalitet förbättras genom olika åtgärder avseende reaktiv effektförbrukning, övertonshalt i växelspänningen, modulation av den aktiva och reaktiva effekten samt variation hos den avgivna effekten.

Kapitalet exemplifierar fortsättningsvis hur man kan simulera det elektriska systemet hos ett helt vågkraftverk. Som indata används verkliga spänningstidsserier från fältmätningar. Med en uppkoppling av en mätdator och två strömriktare kan sedan ett kraftverk simuleras och inverkan studeras när olika villkor för sammanlagring av effekten från många bojar ställs.

1.4.4 Förankringssystem

Kapitlet lämnar en översiktlig beskrivning av olika föreslagna förankringssystem och dessas egenskaper. Vissa exempel på tillämpningar beskrivs. En översikt ges över olika komponenter i förankrningssystemet.

1.4.5 Material

Havet utgör från beständighetssynpunkt en besvärlig miljö och valet av material har därför en avgörande betydelse. Vågornas karaktär orsakar även problem med nötning och utmattning. I kapitlet görs en genomgång av olika material. I avsnittet om stål beskrivs korrosionsmekanismen ingående liksom olika sätt att skydda sig mot korrosion. Betong diskuteras map armeringskorrosion, kemisk nedbrytning och frostskador. Vidare berörs plast och gummi.

1.4.6 Realisering av vågkraftverk

I detta kapitel diskuteras hur det skulle gå till att tillverka och installera samt driva och underhålla ett kraftverk. I litteraturen redovisade studier refereras.

1.4.7 Kostnader

Avsnittet tar först upp olika principer för kostnadsberäkningar dels den vanliga annuitetsmetoden och dels metoden med diskonterat kapitalflöde. Olika principer för bestämning av underhållskostnader berörs liksom inverkan av tillverkning i långa serier.

Därefter följer en översikt över hittills publicerade kostnadskalkyler för vågkraftgenererad elenergi. 62 sådana uppgifter redovisas. Variationen av energikostnaderna är mycket kraftig vilket i första hand beror på att kalkylerna ofta haft helt olika syften.

Slutligen visas exempel på kostnadskalkyler enligt de två ovan nämnda metoderna.

1.5 Teoriutveckling

1.5.1 Grundläggande teoriutveckling

I detta kapitel rapporteras forskningsarbete avseende utveckling av en matematisk-hydrodynamisk teori för beräkning av på en flytande kropp verkande reaktionskrafter och deras moment, excitationskrafter och deras moment, samt kroppens effektupptagning och absorptionslängd.

Problemet betraktas som ett hydrodynamiskt potentialproblem. Därmed måste det existera en hastighetspotential vars gradient ger vätskerörelsen och därför också trycket i varje punkt i vätskan.

Det första steget mot en lösning av det skisserade problemet är att identifiera de randvillkor på kroppen, på den fria havsytan, på havsbotten och strålningsvillkoren oändligt långt från kroppen, som hastighetspotentialen måste tillfredsställa när problemet är linjäriserat.

Det andra steget är att bygga upp en hastighetspotential som tillfredställer alla dessa linjära randvillkor. För detta utvecklas hastighetspotentialen för en pulserande källa under havsytan. Denna integreras därefter över kroppens yta. Genom att addera hastighetspotentialen för den infallande vågen blir den resulterande

hastighetspotentialen för vätskerörelsen fastställd.

Det tredje steget är att använda den resulterande hastighetspotentialen för att utveckla generella formler för de olika hydrodynamiska krafter som påverkar kroppen.

Det fjärde steget är att utveckla en generell formel för kroppens effektupptagning och att optimera denna under globala bivillkor eller dämpningsvillkor.

Det femte steget är att diskutera kroppens absorptionslängd och påvisa att de tidigare generellt accepterade resultaten måste modifieras när hänsyn tagits till dämpningsvillkoren.

1.5.2 Tillämpad teori

Inledningsvis ges en översikt över allmänna vågsamband och vågspektrum. Sedan redovisas den linjära teorin för NE-bojen med bl a beräkning av verkningsgrad. Därefter beskrivs teorin för oregelbunden sjö som diskuteras utifrån den linjära teorin för NE-bojen.

1.5.3 Teoretisk analys av petropumpslang

En utförd teoretisk analys av petropumpslangen berörs i korthet.

1.5.4 Optimering av boj

En teoretisk optimering av bojar har gjorts utifrån den enkla matematiska modellen för NE-bojen. Beräknade vågförhållanden vid Hoburg har använts. Vid optimeringen har bojens diameter, massa och dämpning varierats så att bästa medelverkningsgrad erhållits. Samtidig ändring av massa och dämpning har inte gjorts.

Optimeringen resulterar i en boj på ca 190 ton med en diameter på 9.7 m och en konstant dämpning på 300 kNs/m. Bojen skulle därvid få en total medelverkningsgrad på 20% och leverera 142 MWh/år.

1.5.5 Energiproduktionsberäkning

Här redovisas en nyutvecklad metod att på statistiska grunder beräkna energiproduktionen från en NE-boj. Metoden tillåter att effektbegränsningar beaktas liksom återkopplingen på bojrörelsen av dessa begränsningar.

Metoden medför i ett konkret fall att energin från en viss boj beräkningsmässigt ökar från 18 till 23 MWh när hänsyn tas till återkopplingen av effektbegränsning.

1.5.6 Frekvensanalys inom vågteorin

Med frekvensanalys kan ett kraftfullt hjälpmedel erhållas för att beskriva energiupptagningen i en vågkraftboj, med hjälp av Fast Fourier Transform (FFT) tar analysen rimlig tid.

Överföringsfunktioner och effektspektrum kan uppskattas för de undersökta vågenergiomvandlarna. Emellertid bör det betonas att det är skattningar av spektrum och överföringsfunktionerna som erhalles. Beroende på hur dataserien som uppmättes ser ut, om den använda mättiden är tillräcklig, erhålles mer eller mindre bra skattningar. Vid analysen av effektspektrum bör variansen reduceras eftersom den är alltför stor hos ett råspektrum. Härvid kan emellertid medelvärdesfel uppkomma. Vid bestämningar av överföringsfunktioner är det viktigt att de ingående spektra varians-reduceras innan kvotbildningen sker.

Ett flertal FFT-algoritmer förekommer, innan de användes bör noga undersökas hur de är definierade, då ett flertal definitioner av Fouriertransformen förekommer. Likaså bör de provas mot en känd korrekt FFT-algoritm eller kontrolleras genom av variansen för tidsserien jämföres med ytan under effektspektrum ("medeleffekten"). Dessa bör vara lika om FFT-algoritmen är korrekt.

1.6 Modellförsök

1.6.1 Laboratorieförsök

Rapporten redovisar experiment med modellbojar i vågränna och vågbassäng. Försöken har utförts i regelbundna och oregelbundna vågor med eller utan energiupptagning. Olika bojar har undersökts map form, diameter och massa. Vid energiupptagning har den simulerade generatordämpningen varierats. Resultaten har använts för dimensionering av bojar i större skala och för verifiering av uppställda matematiska teorier. Speciellt har hydrodynamisk massa och dämpning för bojar undersökts. Verkningsgraden hos energiupptagande bojar har studerats. Maximalvärden på över 50% och medelvärden på ca 35% uppnåddes i regelbundna respektive oregelbundna vågor.

1.6.2 Försök i Lygnern med kopplade bojen 1979

På grundval av tidigare erfarenheter från olika förankringsarrangemang byggdes en ny boj med ett kopplat system (via en generator) bestående av dels en boj och dels en friflytande stång med en dämpskiva nere i vattnet.

Mätningar utfördes i naturliga vågor på sjön Lygnern. Vågor och bojeffekt mm mättes samtidigt. Resultaten signalbehandlades och lagrades mha en mätdator och bearbetades senare. Rapporten redovisar 40 försöksserier. Den mekaniska verkningsgraden bestämdes på laboratorium varefter den hydrodynamiska verkningsgraden kunde bestämmas ur den totala. Den hydrodynamiska medelverkningsgraden bestämdes genom tidsserieanalys. Som mest erhölls nära 100%.

Försöksserien gav värdefulla erfarenheter av mätgivarsystem, digital signalbehandling samt försöksmetodik.

1.6.3 Försök i Lygnern med kopplade bojen 1981

1981 gjordes mätningar med den kopplade bojen sedan den modifierats något. 35 användbara mätserier har registrerats. Mätningar med olika generatordämpning har utförts i ett antal vågsituationer.

Resultaten har bearbetats både med tidsserieanalys och frekvensanalys. Den senare har medfört en utvidgning av frekvensanalysen för oregelbundna vågor.

Bojens hydrodynamiska medelverkningsgrad ligger i området 15-20% i naturliga vågor. Bojen har visat sig vara något för liten för Lygnerns vågor.

1.6.4 Försök i Lygnern med petropumpskraftverk

Under 1978 byggdes ett kraftverk med en petropump som lades ut i Lygnern. Några mätningar utfördes ej men olika förankringsarrangemang testades. Kraftverket visade sig mycket tillförlitligt även i hårt väder.

Kraftverket byggdes om och mätningar kunde genomföras under 1980. Sammanlagt 13 mätserier redovisas. Maximala medelverkningsgraden uppgick till 16% vilket är bra mht att systemet på intet sätt var optimerat.

Försöken kommer att fortsätta på uppdrag av Svenska Varv AB.

1.6.5 Försök med IPS-bojen vid Trubaduren

1980 sjösattes ett vågkraftverk i form av en större bojmodell i havet utanför Göteborg. Bojen är sammansatt av dels själva bojskrovet och ett därunder hängande långt rör. Vattnet i röret driver en kolv som rör sig relativt bojen och genom dämpning av denna relativa rörelse tas energi ut. Försöken föregicks av modellprov i Lygnern varvid preliminära dimensioner bestämdes vilka sedan skalades upp.

Försöken innebar framför allt en erfarenhetsmässig framgång eftersom alla viktiga moment fanns med såsom

- projketering och konstruktion
- upphandling och byggande
- mekaniska och elektriska installationer
- utformning av mätutrustning och upprättande av mätstation
- utmärkning och utläggning av förankringar

- sjösättning och intrimning av kraftverk
- reparation till sjöss
- mätning och signalöverföring med upp till 6 kanaler
- upptagning av boj
- utvärdering och rapportering

Eftersom försöken kom att äga rum under hösten utsattes kraftverket flera gånger för kraftiga stormar med våghöjder på över 6 m. Detta medförde att kraftverket skadades och under 1980 mättes därför endast förankringskraften. Sedan kraftverket reparerats och modifierats kunde under 1981 ett antal mätserier erhållas avseende energiproduktion, bojrörelser mm.

Förankringskraftmätningarna visade att det valda trepunktssystemet med blåsa och wire-kätting gav mycket små förankringskrafter. Som mest reigstrerades 16 kN i en lina. Totalt registrerades 19 mätserier. Mätserierna har analyserats med tidsserieanalys och frekvensanalys. Kraftspektrum och överföringsfunktioner har framtagits.

Vid mätningarna 1981 registrerades följande signaler: våghöjd, bojacceleration, stångkraft, generatorns varvtal, ström och spänning. Generatorns dämpning varierades automatiskt i fyra steg.

Totalt har 23 mer eller mindre fullständiga mätserier registrerats.

Kraftverkets hydrodynamiska medelverkningsgrad har uppgått till nära 50% och den totala medelverkningsgraden till nära 30%. Vid en optimering av kraftverket bör man kunna få ut mycket mer energi.

I kapitlet anges slutligen hur mycket energi IPS-kraftverk i olika skalor skulle producera för förhållandena vid Ölands södra grund.

2 INLEDNING

2.1 Allmänt

Sedan vågenergiforskningen i världen kom i gång på allvar i mitten av 1970-talet har kunskaperna inom området ökat enormt. Tron på vågenergins möjligheter har präglats av omväxlande optimism och pessimism. I dagsläget synes många av de tekniska problemen vara lösta. Det återstår att göra försök med prototyper i fullskala. Det stora problemet är nu att få godtagbar ekonomi vid utnyttjandet av vågenergi. Visserligen anges relativt höga kostnader i dag, men det finns stora möjligheter att sänka dessa genom bättre konstruktioner.

De största satsningarna görs i Storbritannien (hittills 120 Mkr), Norge (60 Mkr) och Japan (60 Mkr). I mindre omfattning forskas i flera länder bl a USA och Sverige. Jämte de officiella statliga forskningsprogrammen växer intresset från industrin.

Trots begränsad tillgång på vågenergi i svenska vatten finns det all anledning för oss att delta i utvecklingen av följande skäl:

- vågenergi har bättre möjligheter att utnyttjas ekonomiskt här än t ex vid Atlantens kuster. Detta beror framför allt på mindre svåra stormförhållanden.

- energipotentialen är av tillräcklig storlek för att vara intressant, särskilt för lokala behov såsom exempelvis för Gotland.

- provningsförhållandena är gynnsamma i svenska farvatten (risken för att en hel försöksprototypanläggning spolas bort vid en storm är mindre än t ex i Nordsjön). Därigenom har svensk industri möjlighet till en snabb utveckling och kan vinna försteg vid provning av anläggningar. Detta har stor betydelse vid en satsning på export av produkter och know-how.

- vågenergi utgör ett tillämpat forskningsområde vilket motiverar en förhållandevis stor satsning för upprätthållande av kunskapsnivån.

- många utvecklingsländer har potentiella möjligheter att utnyttja vågenergi. Ofta är kostnaderna för den importerade energin mycket hög. Dessa länder saknar emellertid möjligheter att själva utveckla den komplicerade teknik som ett utnyttjande av vågenergi medför. Enkla vågkraftverk skulle därför kunna utgöra en lämplig form av u-landsstöd.

Inom den närmaste femårsperioden kommer fullskaleanläggningar att byggas och utprovas. Det är troligt att detta arbete kommer att ske i internationell samverkan. Det är mycket önskvärt att Sverige då deltar.

2.2 Rapporten

I denna rapport presenteras resultaten av de senaste insatserna inom vågenergiforskningen i Sverige. Bland dessa insatser märks bl.a.

- inhämtande av kunskap från forskning i utlandet
- etablering av kontakter med utländska forskare
- grundläggande och tillämpad teoriutveckling
- utveckling av mät- och analysmetoder
- kartläggning av vågförhållanden och lokaliseringsförutsättningar omkring den svenska kusten
- studium av kostnadskalkyler och teknik för omvandling
- undersökningar av generatorer och elektriska system
- modellförsök med bojar i laboratorium
- försök med skalmodeller i Lygnern
- försök med en modell i stor skala

Rapporten består av ett antal kapitel som är relativt oberoende av varandra. De olika avsnitten skiljer sig ifråga om språklig stil, teknisk nivå och omfång eftersom många olika författare medverkat.

I rapporten presenteras för första gången resultaten från de fältmätningar som hittills utförts. Vidare redovisas den omfattande och grundläggande hydrodynamiska teorin. Dessutom görs en genomgång av olika möjliga typer av elgeneratorer.

Överskådliga sammanfattningar återfinns avseende internationella kontakter, uppskattningar av vågenergin runt svenska kusten och hittills tillkännagivna uppgifter om kostnader för vågenergi producerad elenergi.

2.3 Rapportförteckningar

Förteckning över reserapporter

RR: 1 Redogörelse för resa i Storbritannien för Planeringsgruppen för vågenergi. Edinburgh 760714. Lars Bergdahl.

RR: 2 Besök vid Vassdrags- och Havnelaboratoriet (VHL), Trondheim 770118. Curt Falkemo.

RR: 3 Redogörelse för besök i Danmark för Planeringsgruppen för Vågenergi. Köpenhamn 770118. Anders Rylander.

RR:4 Redogörelse för besök i Trondheim för Planeringsgruppen för Vågenergi. Trondheim 770322. Anders Rylander m fl.

RR: 5 Redogörelse för besök i Köpenhamn i samband med ett havsenergimöte. Köpenhamn 770414. Lennart Claeson m fl.

RR:6 Besök vid hydrografisk- meteorologisk bojstation i Örlogsberga, Stockholm 77615. Lennart Claeson.

RR: 7 Rapport från möte med IEA Wave Power Expert Group. Oxford 780902. Anders Rylander, Gösta Wahl.

RR: 8 Rapport från besök i Skottland, Edinburgh 771205, Lennart Claeson m fl.

RR: 9 Rapport från besök i Storbritannien. 780129 - 780205. Anders Rylander och Thomas Rindby.

RR: 10 Rapport från besök i Norge 780524 - 780525. Curt Falkemo och Lennart Claeson.

RR: 11 Rapport från besök vid två centra för vågenergiforskning i USA i juni 1978. Svante von Zweygbergk.

RR: 12 Rapport från deltagande i ett symposium on "Wave and Tidal Energy" i Canterbury, Storbritannien, 27-29 september 1978. Lennart Claeson och Curt Falkemo.

RR: 13 Rapport från besök i Hamburg 780926 - 780927. Thomas Rindby.

RR: 14 Rapport från deltagande i vågenergikonferens i London 22-23 november 1978 samt från besök hos Vickers Ltd den 24 november. Per Andersson m fl.

RR: 15 Rapport från besök i Trondheim. 790326 - 790327. Lennart Claeson.

RR: 16 Besök vid Marintekniskt Senter vid NTH. Trondheim. 79613 - 79615. Lars Bergdahl.

RR: 17 Kätting, stål och fiberlinor, kurs i Fagernes, Norge. 790425 - 790427. Thomas Rindby.

RR: 18 Reserapport från Vågenergikonferensen i Edinburgh 26-28 juni 1979. Åke Kinnander m fl.

RR: 19 Rapport från deltagande i konferensen BOSS 1979 i London. 14 dec 1979. Lars Bergdahl.

RR: 20 Rapport med fotobilaga från besök hos Even Mehlum, Oslo. 1979-09-27. Lars-Ove Sörman m fl.

RR: 21 Rapport från möte på SMHI. 1979-09-31. Anders Rylander.

RR: 22 Rapport från deltagande i konferensen Sea Climatology i Paris 1979. Januari 1980. Anders Rylander.

RR: 23 Rapport beträffande besök vid två laboratorier för studium av vågenergi i USA i januari 1980. Svante von Zweygbergk.

RR: 24 Resa till Stockholm 18-22 okt 1979. Föredrag SMR-IVA, besök hos VBB och Vattenbyggnad KTH, 1979-12-14, Lars Bergdahl.

RR: 25 Rapport från resa till Storbritannien 1980-03-26 - 1980-04-03. Göran Olsson. 8 okt 1980.

RR: 26 Rapport från besök i Trondheim den 1-3 dec 1981 i samband med seminarium om vågmätningar. Lennart Claeson jan 1981.

RR: 27 Rapport från besök i Visby 80 05 06. Lennart Claeson 30 maj 1980.

RR: 28 Rapport om deltagande i seminariet BETON TILL ENERGI-ANLÆG i Köpenhamn 810325.
Anders Byström April 1981.

RR: 29 Rapport från IEA-möte i Paris den 29 september 1981, oktober 1981, Lennart Claeson.

RR: 30 Rapport från deltagande i symposiet Wave and wind directionality with applications to the design of structures. Paris 810930 - 811001. Oktober 1981, Anders Byström.

** RR: 31 Rapport från deltagande i ett symposium on "Wave and Tidal Energy" i Cambridge, Storbritannien, 23-25 september 1978.
Anders Byström, Lennart Claeson och Pontus Clason.

* RR: 32 Rapport från deltagande i hydraulikdagar i Linköping den 27 och 28 oktober 1981.

** RR: 33 Rapport från besök i Trondheim den 23-25 november 1981 i samband med seminarium om material och korrosion.

Förteckning av grupprapporter (GR) från Gruppen för Vågenergi-forskning

GR: 1 Sea Waves at the Swedish Coastal Waters as a Source of Energy. September 1976. Anders Rylander CTH-SH Rapport nr 74-76.

GR: 2 Vågenergi i Sverige. Rapport från planeringsgruppen för Vågenergi. - NEPÖ/V. 29 december 1976.

GR: 3 Analys av ett förslag till vågkraftverk. Rapport från planeringsgruppen för Vågenergi - NEPÖ/V. 15 mars 1976.

GR: 4 Komplettering av kostnadskalkyl för vågkraftverk med bojar. 77-10-20. Thomas Rindby.

GR: 5 Effektupptagning i oregelbundna vågor hos en vågboj med linjär dämpning. Lars Bergdahl 79-08-28.

GR: 6 Energi ur havsströmmar. 1977. Björn Ringesten. Inst. för Vattenbyggnad CTH. Report Series B:4.

GR: 7 Posssibility of large electirc output by floating type Sea Wave Electric Generator av Yoshio Masuda, Takeaki Miyazaki och Tomio Emura, JAMSTEC. Översättning till svenska. 1977. Thomas Rindby och Lennart Claeson.

GR: 8 Vattentanksprov med stor elektrisk våggenerator under åren 1974-1975 utförda av JAMSTEC, (Originalets titel: Water Tank Test of Large Sea Wave Electric Generator from 1974 to 1975 by JAMSTEC, Reporter Y Masuda, T Miyazaki.) Sammanfattning på svenska. 1977. Lennart Claeson och Thomas Rindby.

GR: 9 Progressive study of Sea wave electric Generator in 1976 by JAMSTEC, Youshio Masuda & Takeaki Miyazaki. Sammanfattning på svenska. 1977. Lennart Claeson.

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

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

GR: 12 Ocean Wave ENergy Research in Sweden. 1977. Revised 1978-12-09.

GR: 13 Vågkraftbojar - modellförsök i regelbundna vågor i bred bassäng. 1979-03-20. Lars Bergdahl, Lars-Ove Sörman, Lars Wernersson.

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

GR: 15 Havets vågor - en energikälla för framtiden. Rev 1980-01-22. Lennart Claeson.

GR: 16 Vågenergi i Sverige. 79-05-14. 2:a upplagan februari 1980.

** GR: 17 Modellförsök med energiupptagande bojar i sjön Lygnern (1978-79).

** GR: 18 Program för beräkning av vågor ur vinddata.

GR: 19 Vågkraftverk i svenska farvatten. Tillgängliga vattenområden - Inledande studie. 5 aug 1980. Lennart Claeson.

GR: 20 Hydrodynamic theory of ocean surface waves and energy conversion. Johannes K Lunde. 1 februari 1980.

** GR: 21 Likströmsmodell för linjär generator.

GR: 22 Dimensionering av linjär synkrongenerator. Jan Forsberg, Per Bergström, Åke Kinnander, 800721.

GR: 23 Linear Analysis of a Wave Energy Converter Consisting of two Coupled Heaving Bodies. Lennart Claeson. March 1980.

GR: 24 Vågkraftbojar - modellförsök med energiupptagning i regelbundna vågor i bred bassäng. Lars Bergdahl, Göran Olsson, Lars-Ove Sörman, Mars 1980.

GR: 25 Vectors, Second Order Cartesian Theorems and Integral Theorems. Johannes K Lunde.

GR: 26 Inledande försök med petropump. Karl-Gustav Wahlstrand. Dec 80.

** GR: 27 Pendlande synkrongenerator.

GR: 28 The Swedish Wave Energy Programme. Paper from First Symposium on Wave Energy Utilization, Gothenburg 1979. Bergdahl, Claeson, Falkemo, Forsberg, Rylander. December 1981.

GR: 29 Vågenergi för Gotland - ett förslag till energiförsörjning med vågkraftverk. Februari 1980, Anders Byström.

GR: 30 Vågenergi för Gotland, Mars 1980, Anders Byström.

* GR: 31 Energiproduktionen från en vågkraftboj.

GR: 32 Vågkraftbojar - modellförsök med energiupptagning i oregelbundna vågor i bred bassäng. Lars Bergdahl, Göran Olsson, Lars-Ove Sörman. 30 mars 1981.

GR: 33 Förankringsseminarium i Göteborg 12-14 maj 1980. Föredrag sammanställda av Lennart Claeson. Oktober 1980.

GR: 34 Inledande försök med Interprojektbojen, dec 1980.

* GR: 35 Fortsatta försök med petropump. Karl-Gustav Wahlstrand. Dec 81.

GR: 36 Seminarium om vågdata för vågenergi. Trondheim 1-3 december 1980. Föredrag sammanställda av Knut Torsethaugen och Lennart Claeson. Trondheim/Göteborg, oktober 1981.

** GR: 37 Modellförsök med energiupptagande boj i Lygnern (1980-81).

** GR: 38 Förankringskraftmätningar på Interprojectbojen.

GR: 39 Undersökning av nya typer av rotorlindningsfria generatorer för användning i vågenergiomvandlare. Svante von Zweygbergk. Göteborg november 1981.

* GR: 40 Samlokalisering av vågkraftverk och havsbaserade vindkraftverk vid Gotland. Lennart Claeson, Pontus Clason, Hans Ganander, Nils Mårtensson.

* GR: 41 Seminarium om Elektriska system för vågenergiomvandlare. Göteborg 11-13 maj 1981. Föredrag sammanställda av Lennart Claeson. Dec 1981.

** GR: 42 Seminarium om Materialteknikk, korrosjon og aldring i bølgekraftverk. Trondheim 23-25 nov 1981. Föredrag sammanställda av Lennart Claeson.

** GR: 43 Fortsatta försök med Interprojectbojen.

NE-rapporter

NE 1977:4 Vågenergi i Sverige

NE 1981:16 Akvatisk energi, resultat, utvecklingsläge och förutsättningar

NE 1981:23 Utvärdering av vågenergi. Förslag till fortsatta insatser.

Proceedings från vågenergisymposiet i Göteborg 1979

First Symposium on Wave Energy Utilization, CTH, Gothenburg 30 Oct-1 Nov 1979.

** Rapporter som ännu ej är färdigställda

* Rapporter som är praktiskt taget klara

7.1 Laboratorieförsök

7.1.1 Målsättning

Försök med en vågkraftboj har gjorts i modellskala i laboratorium. Syftet med försöken var att bestämma bojens energiupptagande förmåga för varierande deplacement, utformning och vågförhållanden. Närmast har den uppställda teoriens giltighet kontrollerats och resultaten har använts dels för dimensionering av en större modellboj för försök i en insjö, dels för dimensionering av fullskalebojar.

7.1.2 Utförda modellförsök

Modellbojarna har främst provats i frihetsgraden hävning dvs rörelse i vertikalled. Egensvängningsförsök i lugnt vatten och försök i regelbundna vågor har utförts i såväl ränna som bassäng. Slutligen har försök i oregelbundna vågor utförts i bassäng. Tre olika utformningar av bojen och tre olika deplacement har prövats. Skaleffekten har undersökts. Bojens energiupptagning har simulerats med hjälp av en reglerbar elektrisk bromsanordning. En sammanställning över utförda försök finns i tabell 7.3.

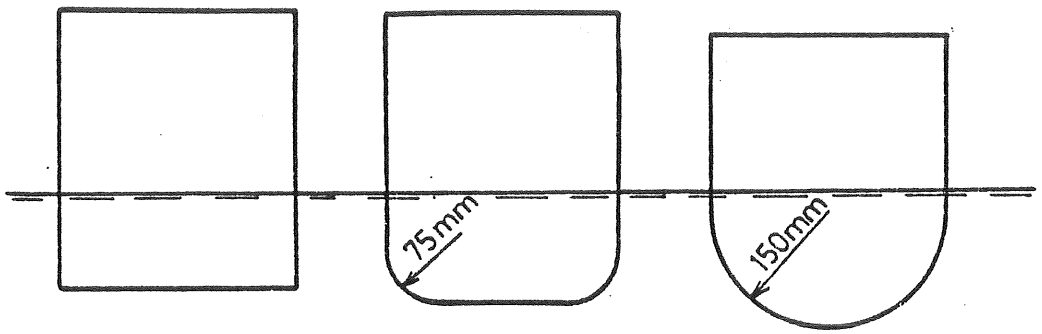
Försöken har tidigare redovisats utförligt i följande rapporter med huvudrubriken Vågkraftbojar.

GR:11	Modellförsök i regelbundna vågor (i ränna).	1978-08-30
GR:13	Modellförsök i regelbundna vågor i bred bassäng.	1979-03-20
GR:14	Modellförsök med energiupptagning i regelbundna vågor (i ränna).	1979-03-21
GR:24	Modellförsök med energiupptagning i regelbundna vågor i bred bassäng	1980-03-30
GR:32	Modellförsök med energiupptagning i oregelbundna vågor i bred bassäng.	1981-03-30

En sammanfattning av GR:11, 13 och 14 samt en viss bearbetning av dessa tidiga försök är redovisad i GR:16 Vågenergi i Sverige. 1979-05-14

Modeller

De provade vågbojarna har cirkulärt tvärsnitt i planet. I figur 7.1 visas bojarnas vertikalsnitt. Bojarna har dels utformats med diametern 300 mm och deplacementsvikterna 5.5, 8.5 och 11.5 kg, dels med diametern 165 mm och deplacementsvikten 1.46 kg.



Figur 7.1 Vertikaltvärsnitt hos de provade cirkulära bojarna med diametern 300 mm. De mindre bojarna var geometriskt likformiga.

Tabell 7.1 Djupgåenden (mm) för modellbojarna vid olika deplacement.

Diameter (mm)	300	300	300	165
Massa m (kg)	5.50	8.50	11.50	1.46
Normerat deplacement $\hat{V}=V/(2\pi r^3/3)$	0.78	1.20	1.63	1.24
Bojtyp I	78	120	163	67
II	96	138	181	77
III	128	170	213	94

Skalor

Försöken med odämpad boj i vågränna har genomförts i två skalor. Huvuddelen av försöken har utförts med en boj Ø 300 mm i en 1.82 m bred ränna. Tre av dessa försök har sedan upprepats med en nedskalad boj Ø 165 mm i en 1.0 m bred ränna. Den mindre bojen är således byggd i skala 1:1.82 av den större bojen. Vattendjupet i respektive ränna hölls till ca 0.77 och 0.42 m. Se tabell 7.1.

Normerat deplacement

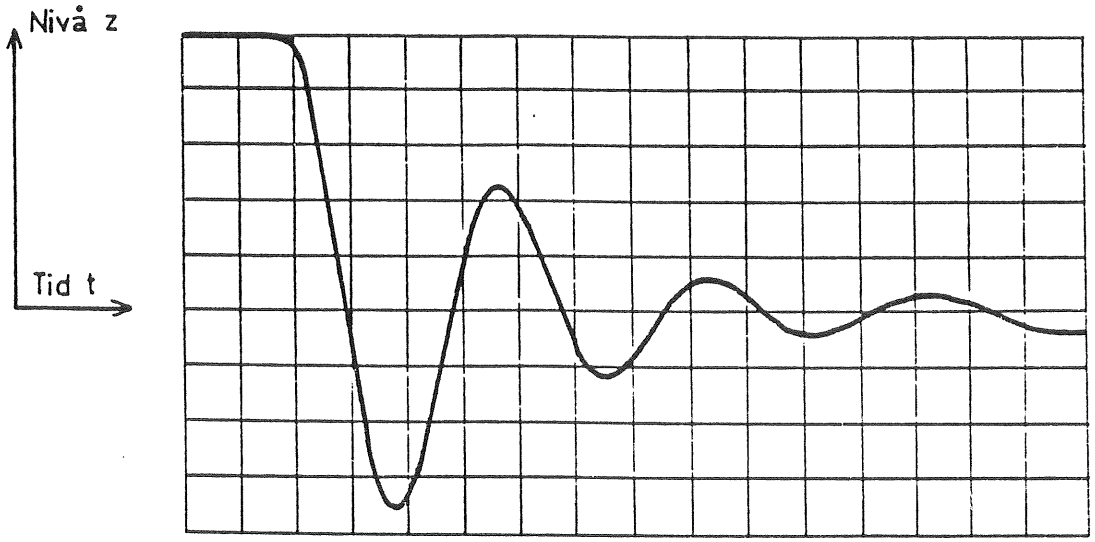
För uppskalnings- och jämförelseändamål uttryckes deplacementet V i våra försök med ett normerat deplacement $\hat{V}$ på så sätt, att aktuell deplacementsvolym divideras med volymen av en halvsfär med samma radie som bojen.

$$\hat{V} = V/(2\pi r^3/3) \qquad \ldots(7.1.1)$$

Jämförelser kan då direkt göras mellan bojar av olika skalor. För samma värde på V skall t.ex. den vid resonans erhållna masskoefficienten μ och dämpkoefficienten ε vara lika och oberoende av absoluta storleken. För en halvsfär flytande i vattenytan blir $\hat{V}$ definitionsmässigt $\hat{V} = 1.00$.

Egensvängningsförsök

Vid egensvängningsförsöken har modellbojen lyfts en bestämd sträcka och sedan släppts momentant. Egensvängningsrörelsen har därvid registrerats på skrivare. Motsvarande försök har utförts med bojen i nedtryckt läge, och försöken har upprepats för olika utgångslägen. Ett av skrivaren registrerat förlopp visas i figur 7.2. Ur egensvängningsförsöken har bojarnas resonansfrekvens samt deras hydrodynamiska massa och dämpning bestämts.

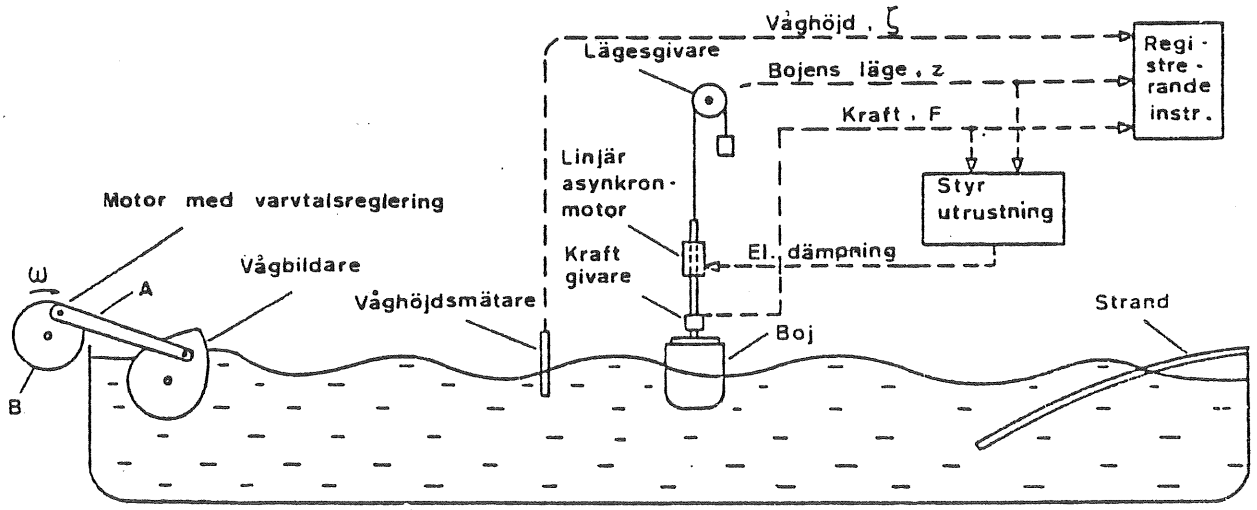


Figur 7.2 Exempel på registrering från egensvängningsförsök. Modellen har släppts från ett upplyft läge.

Försök i vågor

Försök i vågor har utförts med en försöksuppställning enligt den schematiska bilden figur 7.3. Vid de första försöksserierna var den visade dämpningsutrustningen inte byggd.

Vid försöken har den infallande vågen och bojens rörelse registrerats. (Vid försök med simulerad energiupptagning har även kraften i upphängningen registrerats). Försöken har utförts för en serie vågfrekvenser samt i oregelbundna vågor och inledningsvis studerades inverkan av olika branthet. Amplitudresponsen dvs förhållandet mellan bojens lägesamplitud och vågamplituden har sedan beräknats för respektive frekvens.

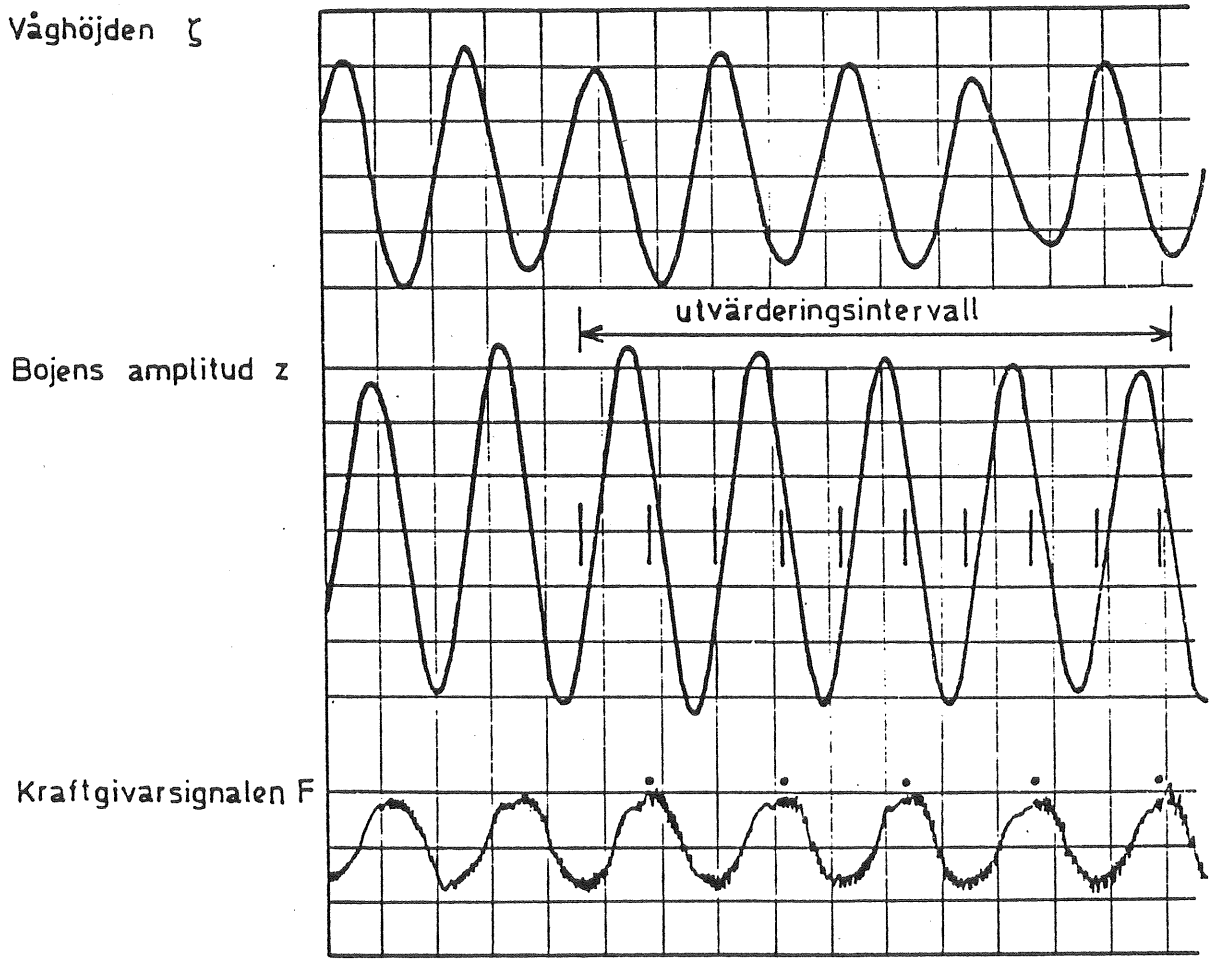


Figur 7.3 Schematisk bild av försöksuppställningen.

Försök med energiupptagning

Försök med energiupptagning i vågor har också utförts. Energiupptagningen från vågbojen har då simulerats med hjälp av en linjär asynkronmotor. Den linjära motorn har styrts med hjälp av ett reglersystem så att den bromsat bojens rörelse med en kraft proportionell mot bojens hastighet. Ur registreringen av kraften och läget har sedan bojens energiupptagning beräknats.

I de senare försöken i bassäng (GR:24 och 32) har detta skett automatiskt i mätdatorn genom att multiplicera bojhastigheten med kraften och integrera över tiden. Den infallande vågenergin har beräknats ur vågregistrerigen. Ett exempel på registrering i regelbundna vågor visas i figur 7.4.



Figur 7.4 Exempel på en körning som utvärderats (GR:14).

I tabell 7.2 visas ett exempel på automatiskt utvärderade försök med energiupptagning i regelbundna vågor (GR:24).

Tabell 7.2 Automatiskt utvärderade försök med energiupptagning i regelbunda vågor. Körningen svarar mot figur 7.11.

FREQUENCY (HZ)		AMPL RESP.		WAVE HEIGHT		BODY AMPL (M)		POWER (W)	EFFICIENCY
MEAN	STD DEV	MEAN	STD DEV	MEAN	STD DEV	MEAN	STD DEV		
6.35E-01	1.48E-01	1.21E+00	8.06E-02	3.45E-02	3.37E-03	4.17E-02	4.28E-03	5.51E-02	1.02E-01
7.10E-01	4.43E-02	1.44E+00	7.27E-02	3.27E-02	2.39E-03	4.73E-02	4.71E-03	7.81E-02	1.81E-01
8.05E-01	4.16E-02	1.80E+00	1.84E-01	4.16E-02	3.21E-03	7.53E-02	1.17E-02	1.78E-01	2.89E-01
8.65E-01	7.81E-02	1.96E+00	1.20E-01	4.15E-02	3.47E-03	8.17E-02	1.08E-02	2.36E-01	4.13E-01
8.89E-01	7.72E-02	2.00E+00	2.58E-01	3.94E-02	3.51E-03	7.83E-02	9.74E-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	2.21E-01	3.97E-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
9.63E-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	8.18E-02	1.89E+00	9.84E-02	3.29E-02	2.29E-03	6.22E-02	7.20E-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
1.06E+00	5.20E-02	1.07E+00	5.22E-02	5.05E-02	1.84E-03	5.41E-02	3.34E-03	1.64E-01	2.37E-01
? 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	2.42E-01
? 2.63E+00	7.54E+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	3.57E-01
1.01E+00	4.23E-02	1.72E+00	9.56E-02	3.39E-02	2.50E-03	6.00E-02	4.27E-03	1.87E-01	5.70E-01
9.89E-01	5.36E-02	2.22E+00	1.41E-01	3.15E-02	1.64E-03	6.98E-02	4.38E-03	2.56E-01	8.85E-01
9.83E-01	8.22E-02	2.20E+00	1.08E-01	3.17E-02	2.19E-03	6.97E-02	6.63E-03	2.23E-01	7.50E-01
9.73E-01	5.91E-02	2.20E+00	1.34E-01	3.10E-02	3.61E-03	7.03E-02	6.33E-03	2.22E-01	7.84E-01
9.77E-01	5.60E-02	2.25E+00	9.58E-02	3.20E-02	3.61E-03	7.16E-02	7.75E-03	2.35E-01	7.79E-01
9.56E-01	4.67E-02	2.17E+00	1.75E-01	2.95E-02	1.54E-03	6.38E-02	3.89E-03	1.83E-01	6.99E-01
9.33E-01	4.16E-02	1.09E+00	1.77E-01	2.88E-02	3.96E-03	5.41E-02	6.88E-03	1.34E-01	5.25E-01
9.99E-01	3.13E-02	1.88E+00	1.02E-01	3.22E-02	3.26E-03	6.03E-02	6.00E-03	1.78E-01	5.98E-01
9.92E-01	3.59E-02	1.89E+00	1.87E-01	3.37E-02	2.27E-03	6.32E-02	4.74E-03	1.90E-01	5.80E-01

Körning 79-07-19 i regelbundna vågor med dämpinställning 4.5 som innebär en dämpning på ca 10 Ns/m
Lastlopp 11
Vikter
Vikt 1 = 11.5 kg

De med ? markerade körningarna är osäkra.

Försök i oregelbundna vågor

Vid försöken i oregelbundna vågor har två olika vågspektra använts, det ena med spektrumvidden 0,5 det andra med vidden 0,3. Det senare syntetiska spektrumet var mest likt ett PM-spektrum. Exempel på dessa spektra ges i figur 7.6.

Vid försöken fourieranalyserades vågformen och bojens rörelse i mätdatorn och deras spektrum presenterades tillsammans med amplitudresponskurva och verkningsgradskurva på mätdatorns printer. Se figur 7.7.

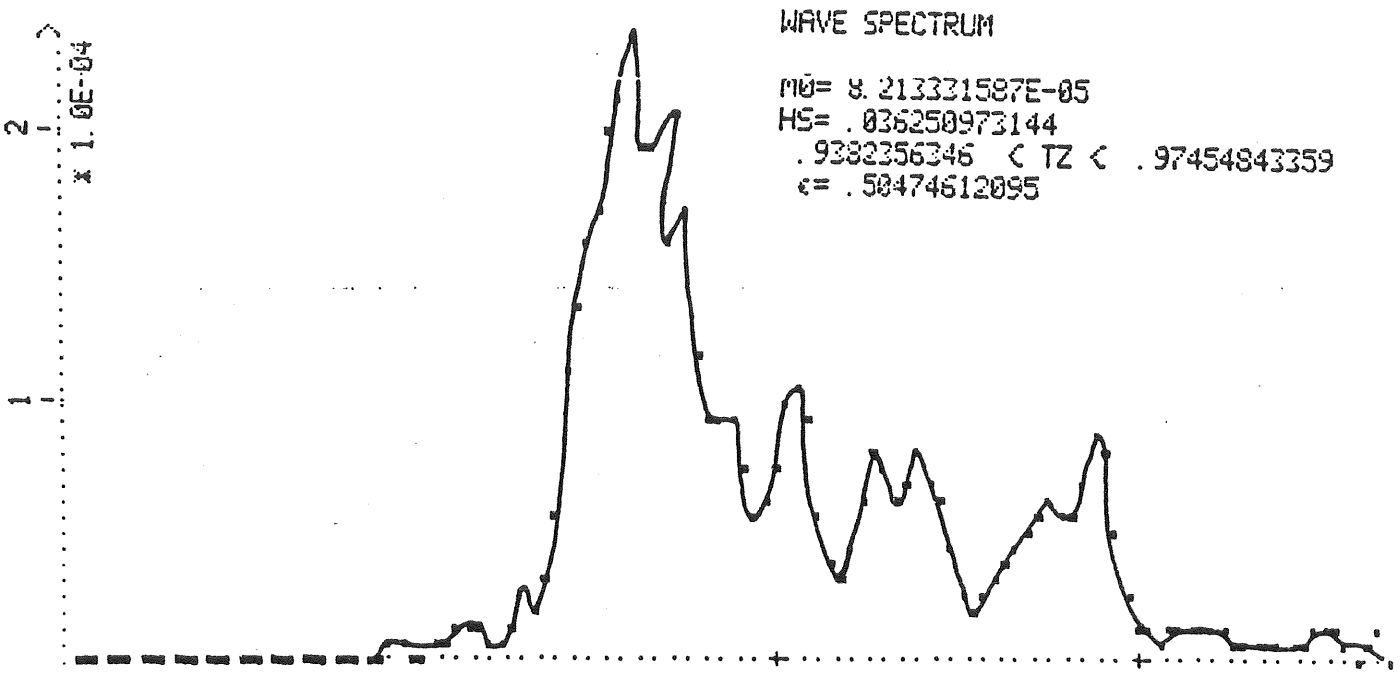
Försöksserier

I tabell 7.3 ges en sammanställning av utförda modellförsök. I resultatdelen nedan återges främst resultat från modellförsöken med energiupptagning i bassängen. Dessa är utförligare beskrivna i rapporterna GR:14 för regelbundna vågor och GR:24 för oregelbundna vågor. I samtliga försök med energiupptagning har dämpningen och frekvensen varierats inom ett brett intervall.

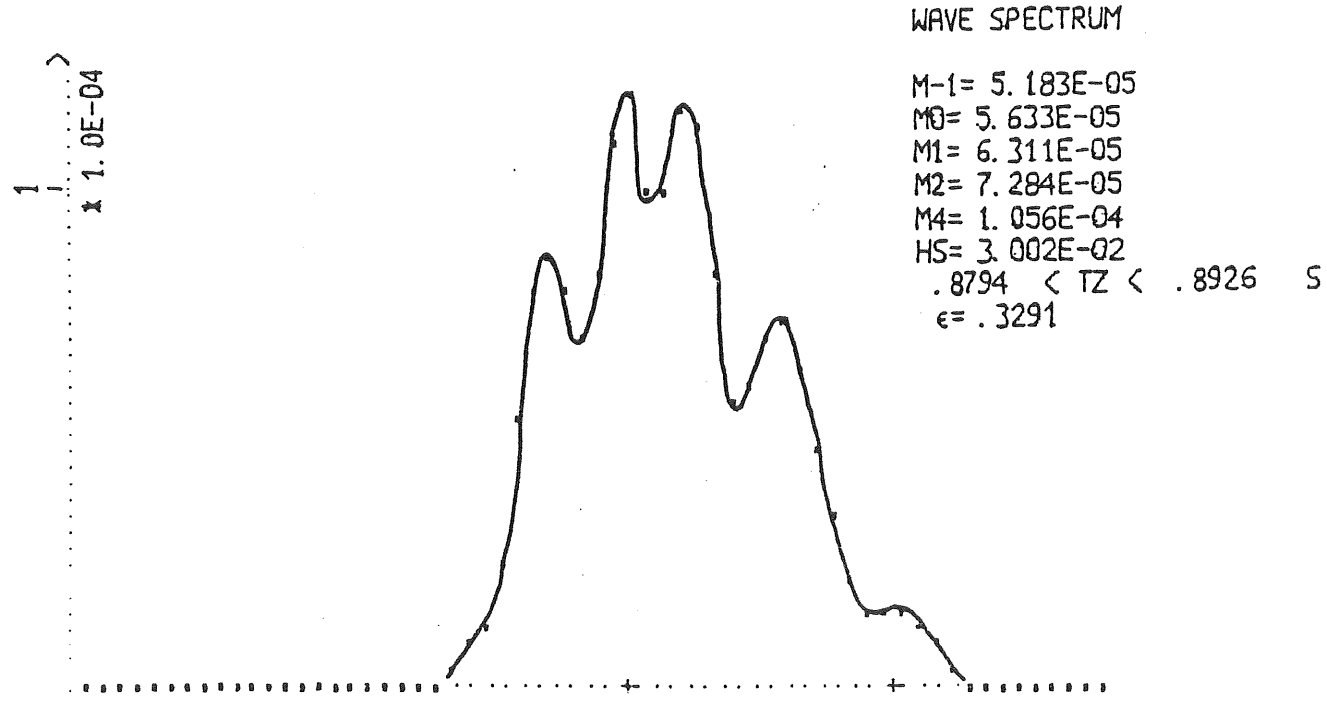
Tabell 7.3 Sammanställning över utförda modellförsök.
r betecknar att försöken utförts i ränna.
b betecknar försök i bassäng.
p betecknar försök i bassäng med balansarm (se figur 7.9b)

Bojtyp (se figur 3.4)	I			II			III		
Normerat deplacement $\hat{V}$ =	0.78	1.20	1.63	0.78	1.20	1.63	0.78	1.20	1.63
Egensvängningsförsök GR:11,13 ø 300 mm	rb	rb	rb	rb	rb	rb	rb	rb	rb
ø 165 mm		r			r			r	
Regelbundna vågor a) utan energiupptagning ø 300 mm	rb	rb	rb	rb	rb	rb	rb	rb	rb
GR:11,13 ø 165 mm		r			r			r	
b) med energiupptagning ø 300 mm GR:14,24						rbp			
Oregelbundna vågor med energiupptagning GR:32 ø 300 mm				$0.57<\hat{V}<2.26$ b					

a) Spektrum G0



b) Spektrum G4



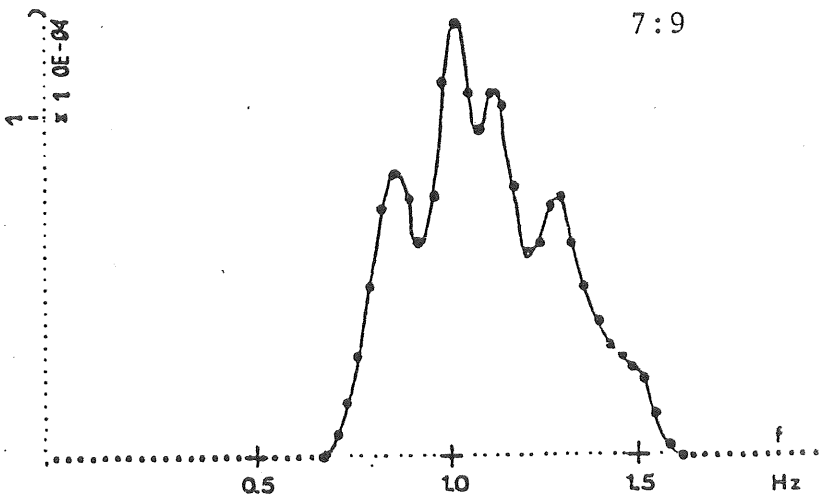
Figur 7.5 Exempel på uppmätta vågspektra.

ANALYS AV ENERGIUPPTAGNING HOS BOJ 1
CREDELBUNDNA VAAGOR DAT 801029-2

KORNING REMSA 04 MASSA 10 KG
BOJBREDDEN= .3
EXT.DAEMP = 16

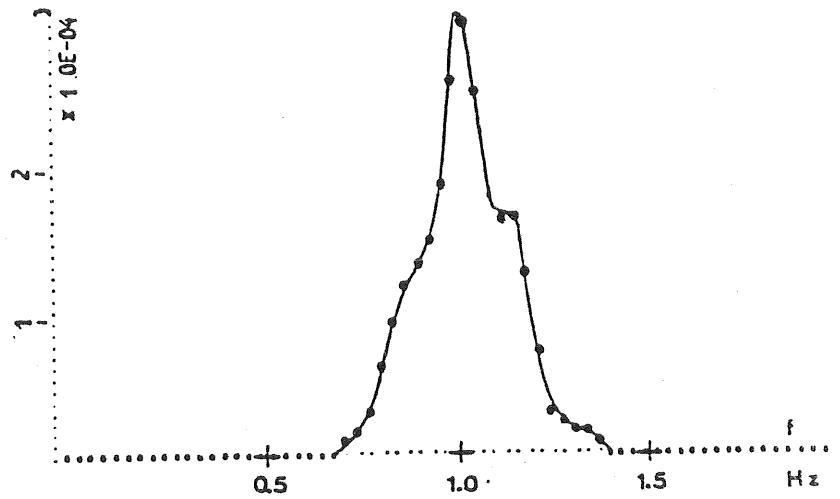
WAVE SPECTRUM

M-1= 5.160E-05
M0= 5.650E-05
M1= 6.405E-05
M2= 7.469E-05
M4= 1.106E-04
HS= 3.009E-02
.8705 < TZ < .8838 S
ε= .3296

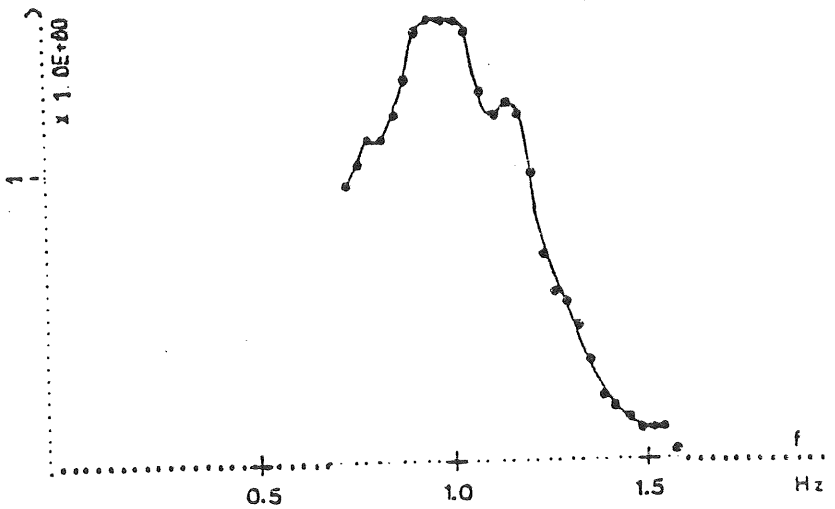


BUOY SPECTRUM

M-1= 7.476E-05
M0= 7.723E-05
M1= 8.096E-05
M2= 8.609E-05
M4= 1.015E-04
HS= 3.515E-02
.9472 < TZ < .954 S
ε= .2329

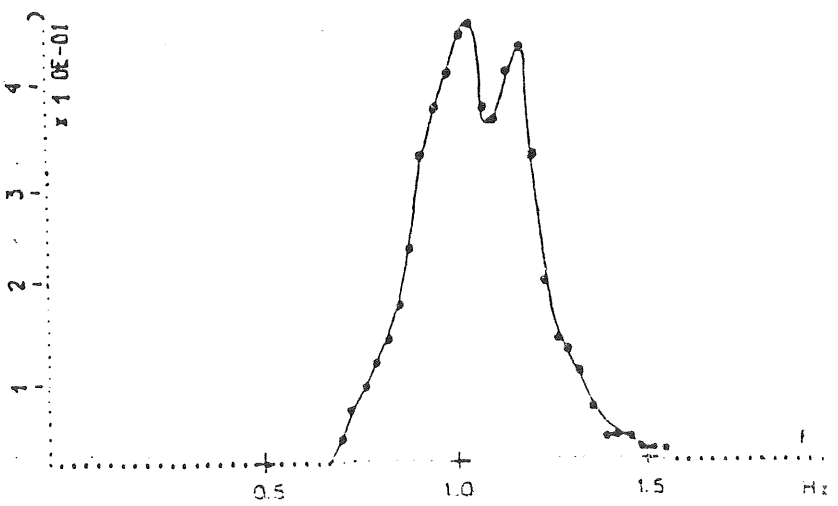


AMPLITUDE RESPONSE



EFFICIENCY

TOTAL VERKNINGSGRAD = .2708
UPPTAGEN EFFEKT = 3.210E-02



Figur 7.6 Exempel på genomfört och automatiskt utvärderat försök.

7.1.3 Försöksanordningar

Försöksuppställning

Försöken har utförts med en försöksuppställning enligt den schematiska bildens figur 7.3. Vågmätning har dock i de försök som utförts i den breda bassängen gjorts i bredd med bojen i skydd av en skärm för att förhindra störning av de av bojen utsända vågorna.

Vid försöken har den infallande vågen och bojens hävning registrerats och bojens massa och dämpning har varierats mellan olika försök. Amplitudresponsen och energiupptagningen har beräknats automatiskt i mätdatorn efter varje försök.

Rännor och bassäng med våggeneratorer

Försöken har utförts i Skeppshydromekaniks (CTH) laboratorium i en ränna med bredden 1,8 m, i Vattenbyggnads laboratorium i en ränna med bredden 1,0 m och i en specialbyggd bassäng med bredden 9,3 m. I rännorna kunde endast regelbundna vågor simuleras, medan man i bassängen kunde simulera oregelbundna långkammiga vågor såväl som regelbundna vågor. Se tabell 7.4

Tabell 7.4 Översikt över använda rännor

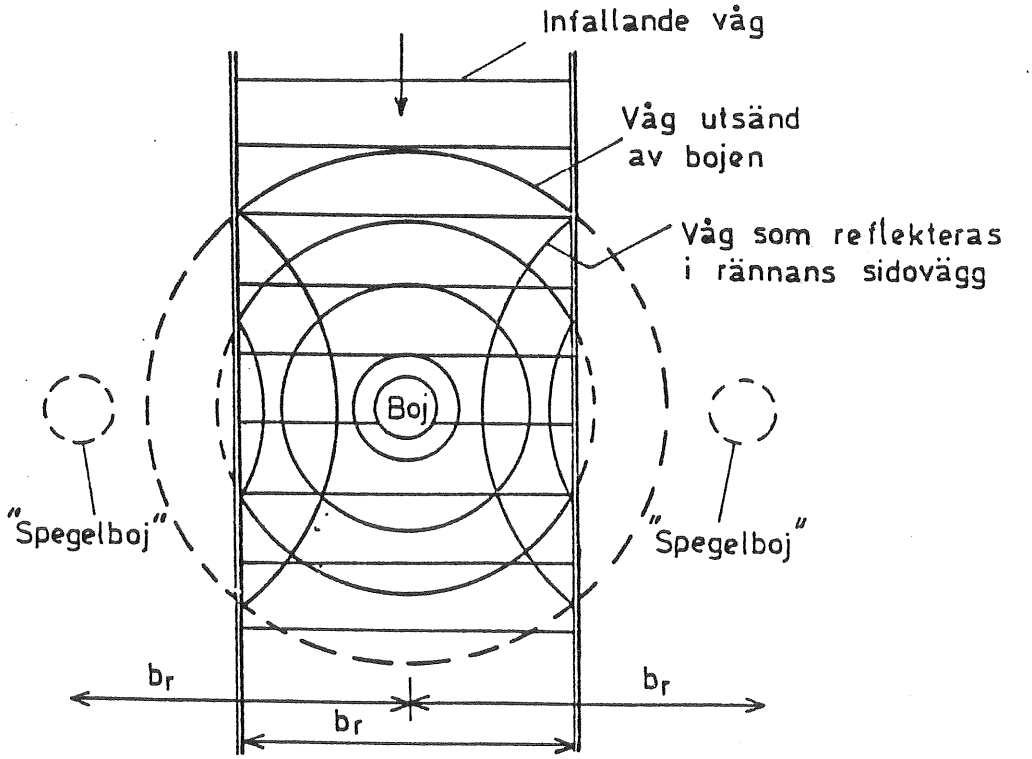
	Längd	Bredd	Djup	Våggenerator	Vågor
Ränna Skeppshydromekanik	27	1,8	1,0	"Salter"	regelb.
Ränna Vattenbyggnad	31	1,0	1,0	flap	regelb.
Bassäng Vattenbyggnad	18,3	9,3	0,8	kil	regelb.+oregelb

När bojen svänger sänder den ut cirkulära vågor som överlagrar den infallande plana vågen. Dessa vågor reflekteras mot rännans väggar och återkommer sedan till bojen där de alltså påverkar vågsituationen (se figur 7.7).

Mätningarna i rännorna och bassängen har utförts på ett sådant sätt att reflexionen i rännans längsled inte hinner tillbaka till bojen innan varje mätning är slutförd. Däremot är rännornas bredd för liten för

att man skall kunna undvika inverkan av reflexion i sidled vid försöken i regelbundna vågor. Genom att mäta tidigt i vågtågen har inverkan av reflexionerna undertryckts, dock utan att inverkan kunnat undvikas helt. I bassängen har mätningarna kunnat utföras utan någon inverkan av reflexion. På grund av dessa problem måste resultaten från försöken i rännorna bedömas med viss försiktighet. Den höga verkningsgrad som redovisats i GR:14 torde t.ex. bero på reflexioner i rännans väggar. Se figur 7.7.

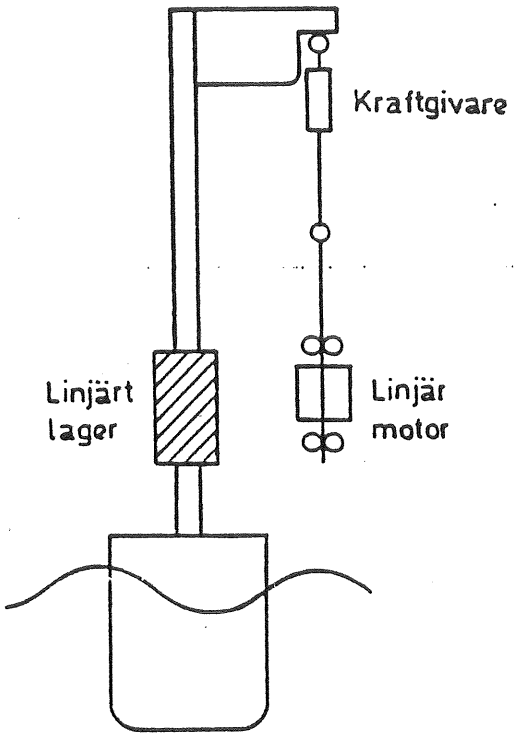
Om man betraktar figuren inser man att reflexionerna i rännans sidled får samma inverkan som ett antal bojar i rad på öppet vatten om vågorna är tillräckligt långkammiga. Dessa "spegelbojar" ligger på en rännbredds avstånd från varandra.



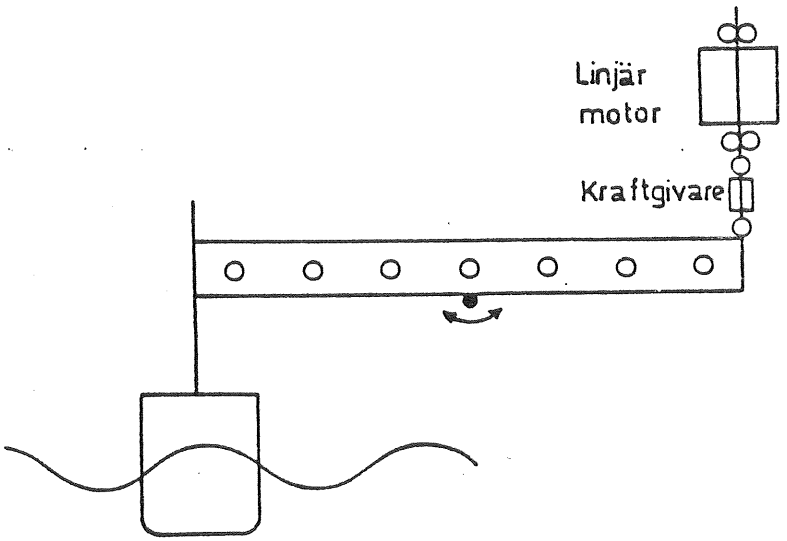
Figur 7.7 Schematisk bild som illustrerar de utsända vågornas reflexion i rännans sidor.

Upphängningsanordningar

De flesta försök har utförts med bojarna upphängda i en anordning som endast tillät vertikala rörelser (hävning). Vid de senare försöken (GR:24 o. 32) användes en rigg där de horisontella krafterna upptogs av ett linjärt kullager och de vertikala krafterna via kulleder av den linjära motorn. Se figur 7.8 a.



Figur 7.8 a Upphängningsanordning med linjärt lager



Figur 7.8 b Upphängningsanordning med balansarm

Vid vissa försök användes en rigg enligt figur 7.8 b där bojen utförde en pendelrörelse (GR:24). Denna upphängning ger resultat som ej direkt kan jämföras med försök där rörelsen varit rent vertikal.

Den elektriska dämputrustningen

Dämputrustningen bestod vid försöken av dels en linjär asynkronmotor, dels en styrenhet som hade till uppgift att leverera spänning till asynkronmotorn, så att motorn bromsade bojen med en kraft F, proportionell mot bojens vertikala hastighet $\dot{z}$, dvs

$$\frac{F}{\dot{z}} = b_1 \qquad \ldots(7.1.2)$$

Den elektriska dämpkonstanten b_1 kunde steglöst varieras med en potentiometer i styrenheten. Utrustningen finns närmare beskriven i GR:14.

Mätutrustning

Mätutrustningen vid försöken i bassängen (GR:24, 32) kan indelas i fyra olika kategorier av instrument, nämligen:

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

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 dämpades

För detta ändamål fanns tre givare, eftersom hastigheten erhölls genom en analog derivering av bojavvikelsesignalen.

Beskrivning av givare, drivenheter till givarna, filterenhet och bordsdator finns i GR:24.

Av de registrerade signalerna användes bojens hastighet och kraften varmed bojen dämpades till att styra dämputrustningen, medan vattenytans avvikelse och bojens avvikelse användes till att beräkna energiupptagningen hos bojen.

7.1.4 Resultat

Modellförsöken har bekräftat att den teori för vågkraftbojen, som beskrivs i kapitel 6.2.1, kan användas för uppskattningen av bojens rörelser och energiupptagning i regelbundna såväl som oregelbundna vågor med tillfredsställande precision. Detta förutsätter att de vid försöken erhållna koefficienterna för hydrodynamisk massa och dämpning används. Skall en boj användas som har en form eller ett normerat deplacement avsevärt avvikande från de vid modellförsöken provade bojarnas,bör nya modellförsök genomföras.

Hydrodynamisk massa och dämpning

Den hydrodynamiska massan och dämpningen har bestämts dels ur egensvängningsförsöken i ränna och bassäng, dels genom att välja värden på μ och ε så att de beräknade amplitudresponskurvorna ansluter sig väl till de uppmätta.

En sådan anpassning har gjorts okulärt genom att ändra värdena på μ och ε och låta en bordsdator plotta den teoretiska amplitudreponskurvan och de uppmätta punkterna i samma diagram. Se figur 7.9. Anpassningen är ganska lätt att utföra, eftersom μ främst påverkar resonanstoppens läge i sidled (resonansfrekvensen) och ε främst påverkar höjden av resonanstoppen.

I de senare försöken har en matematisk anpassning gjorts för varje försöksserie med viss yttre dämpning (b_1) och massa (m). Anpassningen fås genom ett variationsförfarande, där μ och ε varieras tills bästa anpassning erhållits i minsta kvadratmetodens mening, dvs följande funktion minimeras

$$\varphi = \sum_i \left(Y^2(\omega_i, \mu, \varepsilon) - \tilde{Y}_i^2\right) \qquad \ldots(7.1.3)$$

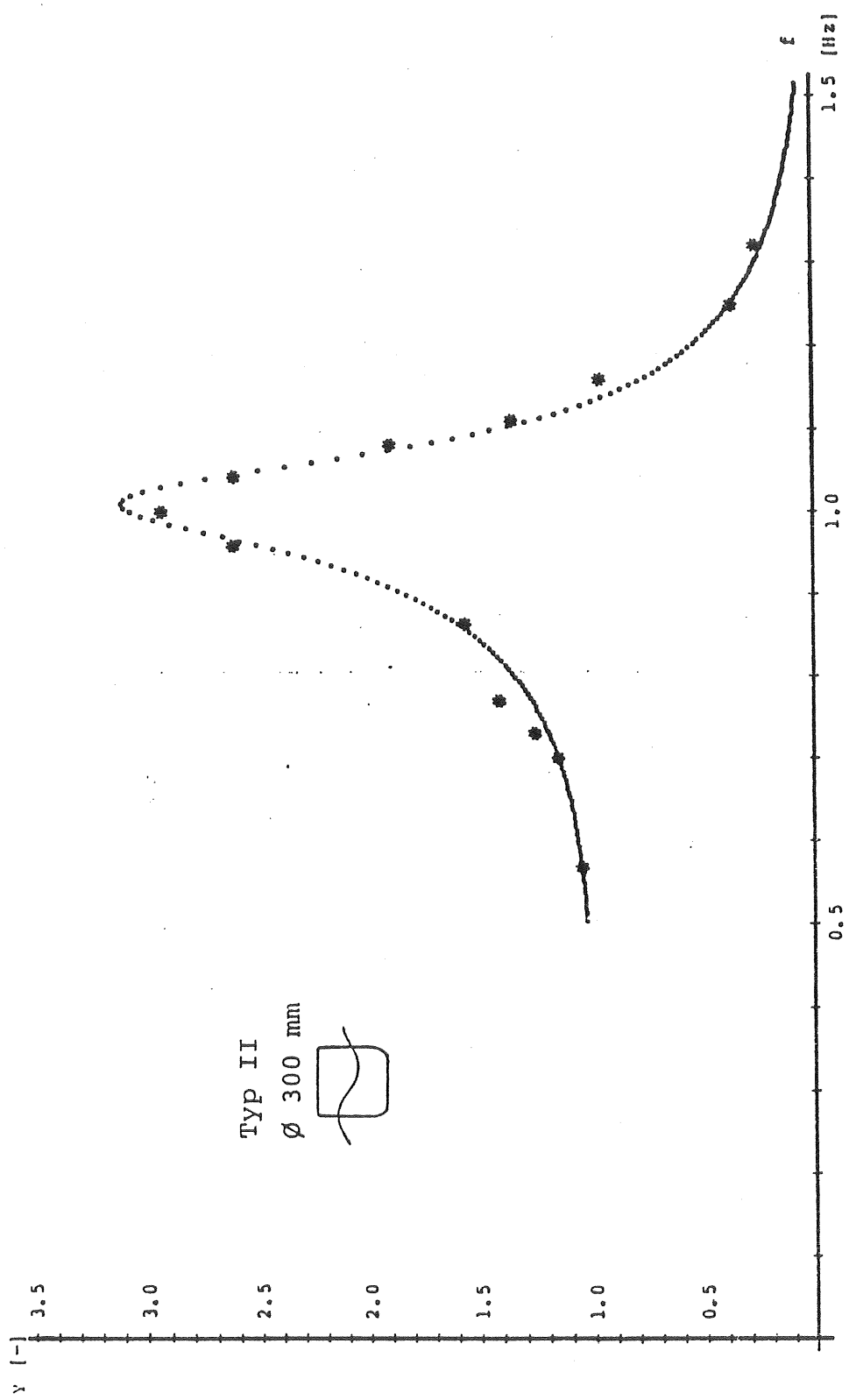
där Y är den teoretiska amplitudresponsen

$$Y = \sqrt{\frac{(c - V\mu\omega^2)^2 + \rho V\varepsilon^2\omega^2}{(c-(m+\rho V\mu)\omega^2)^2 + (\rho V\varepsilon\omega + b_1)^2\omega^2}} \; \frac{\cosh(k(h-d))}{\cosh(kh)} \qquad \ldots(7.1.4)$$

och $\tilde{Y}_i$ är den för respektive frekvens f_i uppmätta amplitudresponsen ($\omega_i = 2\pi f_i$). För övriga beteckningar se kapitel 7.2.1.

Anpassningen har utförts på Göteborgs Datacentrals dator och för detta har ett fortranprogram skrivits i vilket minimeringen utförts med Davidon-Fletcher-Powells metod. I figur 7.9 redovisas en kurvanpassning för ett försök i bassäng utfört med en boj ø 300 mm med avrundade hörn och massan 11.5 kg (boj typ II $\hat{V}$= 1,63).

I tabell 7.4 och 7.5 nedan redovisade medelvärden på μ och ε som erhållits vid de olika försöken. Resultaten från pendelriggen avviker kraftigt från resultaten för de övriga försöken.



Figur 7.9 Amplitudförhållande vid försök utan energiupptagning i bassäng

μ = 0.47 c = 692 N/m D = 0.181 m

ε = 0.17 m = 11.5 kg b_1 = 0 Ns/m

Tabell 7.4 Masskoefficienten μ och dämpkoefficienten ε för försök utan dämpning

Bojtyp		I			II			III		
Normerat deplacement $\hat{V}$		0.78	1.20	1.63	0.78	1.20	1.63	0.78	1.20	1.63
Egensvängnings-försök	μ	1.12	0.73	0.59	0.78	0.54	0.42	0.65	0.42	0.36
ränna, bassäng ø 300 mm	ε	0.67	0.34	0.25	0.51	0.26	0.19	0.54	0.27	0.20
Egensvängnings-försök	μ		0.55			0.34			0.26	
ränna ø 165 mm	ε		0.38			0.26			0.27	
Okulär anpassning till amplitudrespons-kurva	μ	1.10	0.68	0.52	0.80	0.65	0.47	0.65	0.39	0.42
bassängförsök ø 300 mm	ε	0.43	0.32	0.23	0.42	0.22	0.17	0.52	0.24	0.16

Tabell 7.5 Masskoefficienten μ och dämpkoefficienten ε för försök med och utan yttre dämpning ø 300 mm, bojtyp II, massan 11,5 kg (V= 1.20)

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 försök med yttre dämpning i bassäng, linjärt lager (GR:24)	0.23	0.17

En jämförelse mellan värdena på μ och ε enligt tabell 7.4 och värdena enligt Havelock (1955) ger vid handen att överensstämmelsen är dålig. En närmare diskussion över detta finns i GR:11.

Det framgår av tabellen att den hydrodynamiska dämpkonstanten ε stämmer bra överens för alla försök utom för energiupptagning i en ränna. ε 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 ε 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 de regressionsanpassade försöken med energiupptagning i bassäng bara är hälften av de vid de andra försöken är svårt att förklara. Tills vidare får vi lov att konstatera detta, eftersom resultatet är entydigt från de utförda serierna.

Skaleffekt

Som synes i tabell 7.4 kan man notera en viss inverkan av skalan för masskoefficienten μ. För dämpkoefficienten ε har däremot ingen skaleffekt uppmätts. Trots olikheten i masskoefficienten har en god överensstämmelse för egenfrekvensen erhållits för de skalade frekvensvärdena enligt tabell 7.6.

Tabell 7.6 Uppmätt resonansfrekvens $f_o = \omega_o/2\pi$ (Hz) för de provade bojarna.

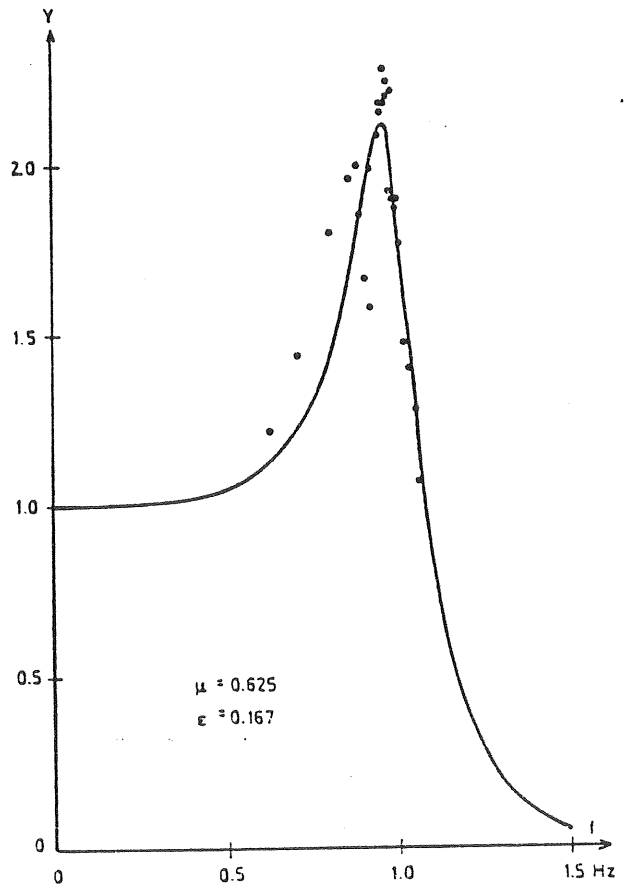
Bojtyp	I			II			III		
Normerat deplacement $\hat{V}$	0.78	1.20	1.63	0.78	1.20	1.63	0.78	1.20	1.63
ø 300 mm mätt ränna och bassäng	1.22	1.08	0.98	1.34	1.15	1.04	1.40	1.21	1.06
ø 165 mm mätt ränna uppskalad till ø 300 mm		1.48 1.10			1.59 1.18			1.64 1.22	

Amplitudrespons

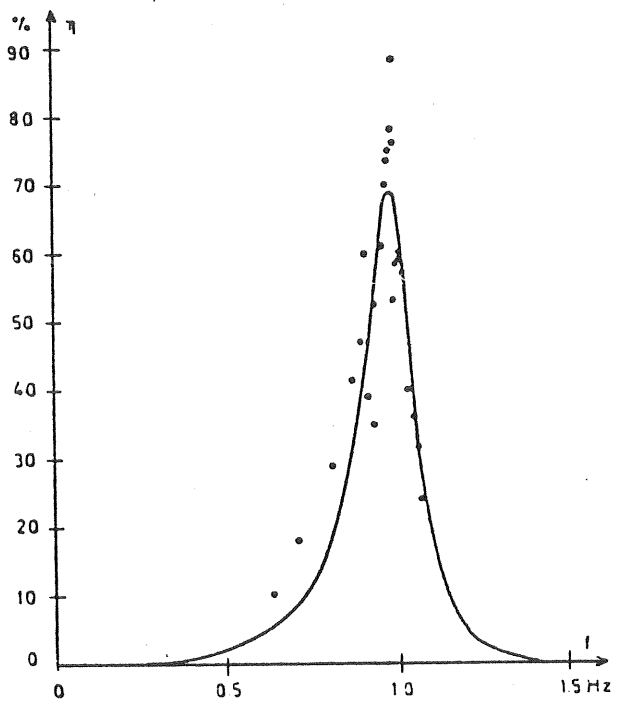
De försök som har utförts i den breda bassängen uppvisar fortfarande ett lokalt minimum mellan 0.90 och 0.95 Hz, se figur 7.10a,b. Det torde vara svårt att förklara detta minimum eftersom det finns många andra "övertoner" i bassängen som borde slå igenom på samma sätt. Vid frekvensanalys av vågorna i bassängen utan boj kan frekvensen inte spåras. En motsvarande minimum har registrerats för bojens responskurva vid fältförsöken i Lygnern. Kap. 7.2.

Verkningsgrad som funktion av yttre dämpning

Några försöksserier har körts med konstant frekvens och varierad dämpning. Målsättningen för dessa försök var att experimentellt bestämma en optimal dämpfaktor b_1. För upphängningen med det lin-



Figur 7.10 a Anpassning av amplitudresponskurva enligt teorin till försökspunkter vid dämpinställningen b_1 = 9.9 Ns/m. Upphängning: pendelrigg mot vågorna. Boj ø 300 mm. Massa 11.5 kg. Deplacement 10.2 kg.



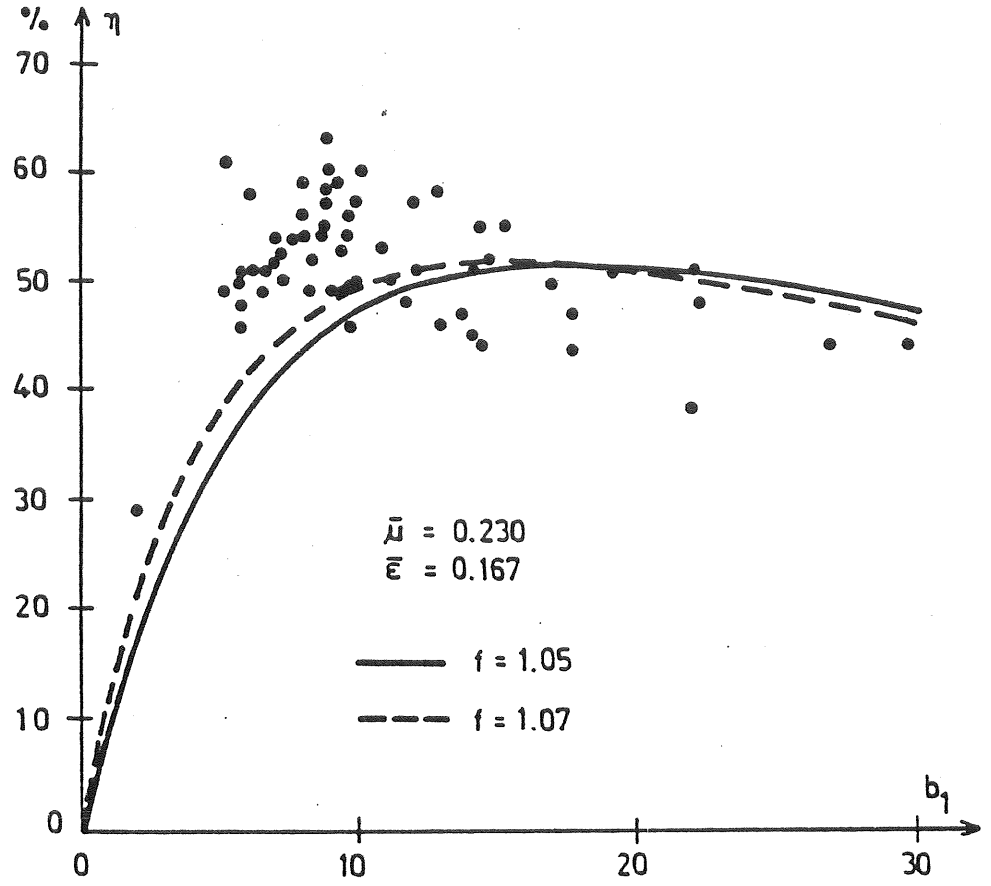
Figur 7.10 b Verkningsgrad som funktion av frekvensen för samma försök som ovan. För den teoretiska kurvan har använts de värden på μ och ε som erhölls vid anpassningen av amplitudresponskurvan ovan.

jära 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.

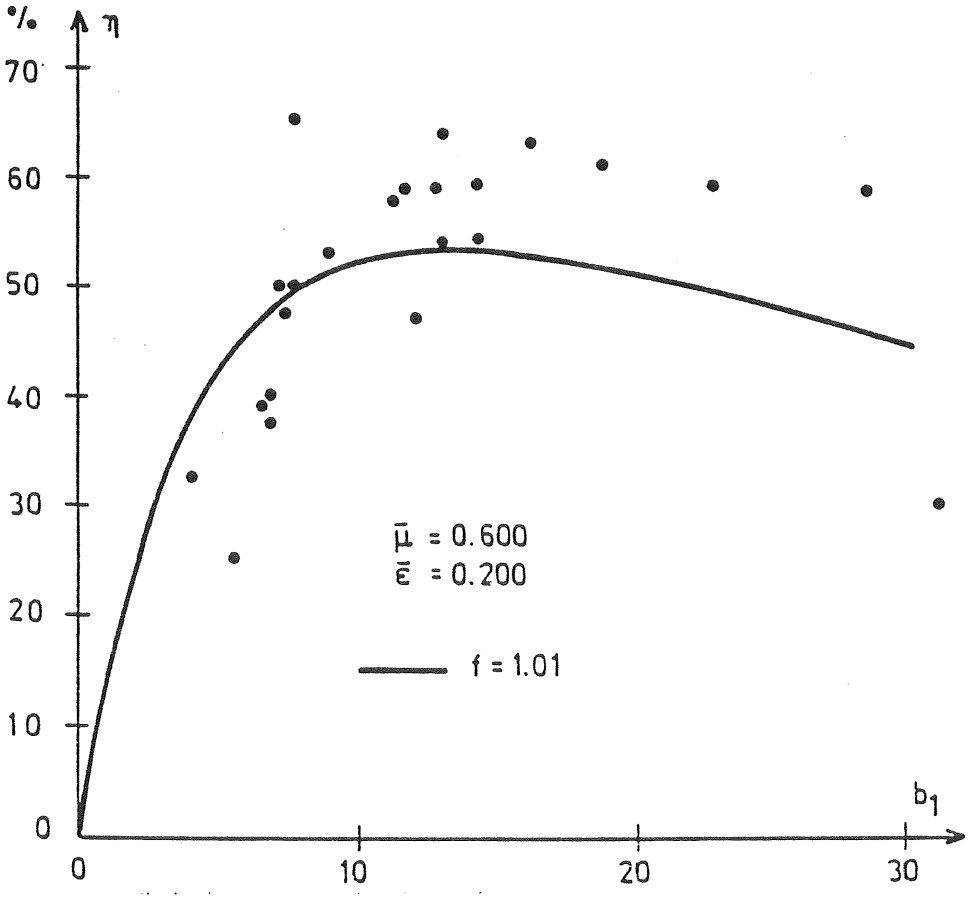
För det linjära lagret, det vill säga ren hävning, verkar optimum ligga mellan 6 och 10 Ns/m (Fig. 7.11). För pendelriggen vänd mot vågorna tycks optimum ligga mellan 8 och 13 Ns/m (Fig. 7.12).

De i figurerna inlagda kurvorna η som funktion av b_1 är den teoretiska verkningsgraden med de värden på masskoefficienten μ och dämpkoefficienten ε som erhållits i medeltal vid anpassning av amplitudresponskurvan till försöksvärdena.

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 7.11 Verkningsgraden, η, som funktion av dämpningen, b_1, för en boj Ø 300 mm och massan 11.5 kg. Linjärt lager. f = 1.05 - 1.07 Hz



Figur 7.12 Verkningsgraden, η, som funktion av dämpningen, b_1, för en boj Ø 300 mm och massan 11.5 kg. Pendelrigg vänd mot vågorna. f = 1.01 - 1.03 Hz.

Verkningsgrad som funktion av bojens form

Av tabell 7.4 framgår att den uppmätta koefficienten ε för den hydrodynamiska dämpningen är störst för den tvärt avskurna bojen (Typ I). För den rundade (Typ II) och sfäriska (Typ III) bojen är koefficienten mindre än hälften så stor. Typ III är ur energiupptagningssynpunkt bäst då dess koefficient är lägst. Många skäl talar dock för att en realistiskt utformad boj kommer att ha en delvis plan botten med plats för genomföringar m.m. Eftersom skillnaden mellan typ II och typ III var ganska marginell valdes på ett tidigt stadium att köra de flesta försöken med en boj av typ II.

Jämförelse av verkningsgraden hos boj med olika massa och dämpning som funktion av frekvensen. Spektrum G0 (enligt figur 7.5).

Jämförelsen visar som förväntat att verkningsgradskurvorna blir smalare och når högre toppvärde för ökande massa. Se fig. 7.13. Även totalverkningsgraden ökar med massan,men för tyngre bojar än den redovisade 13.5-kilosbojen sjunker åter totalverkningsgraden. Toppvärdet på verkningsgraden för 13.5-kilosbojen nås vid frekvensen ≈ 1.0 Hz för 10-kilosbojen vid frekvensen ≈ 1.1 Hz och för 6.0-kilosbojen vid frekvensen 1.4 Hz.

Någon tydlig förändring av toppens läge i frekvensled kan inte konstateras för olika dämpning vilket framgår av fig. 7.14. Det som sker vid ökande dämpning är att verkningsgradskurvan flackas ut samtidigt som toppvärdet sjunker. Totalverkningsgraden ökar till ett maximum vid ca 20 Ns/m för samtliga massor för att sedan åter minska för ökande dämpning.

Jämförelse av resultaten från de två olika spektrum G0 och G4 samt resultaten från försöken i regelbundna vågor

En jämförelse mellan försök med de två spektrumen G0 och G4 visar god överensstämmelse för verkningsgradskurvans läge i frekvensled. I jämförelse med de motsvarande försöken i regelbundna vågor (Gruppрapport GR:24) verkar frekvenstoppen ha förskjutits något mot lägre frekvenser. Förskjutningen i sidled är dock inte större än att den ryms inom felmarginalen med hänsyn till skillnaden i massa och anpassningen av kurvan till försökspunkterna. Spektrumen G0 och G4 visas i figur 7.5.

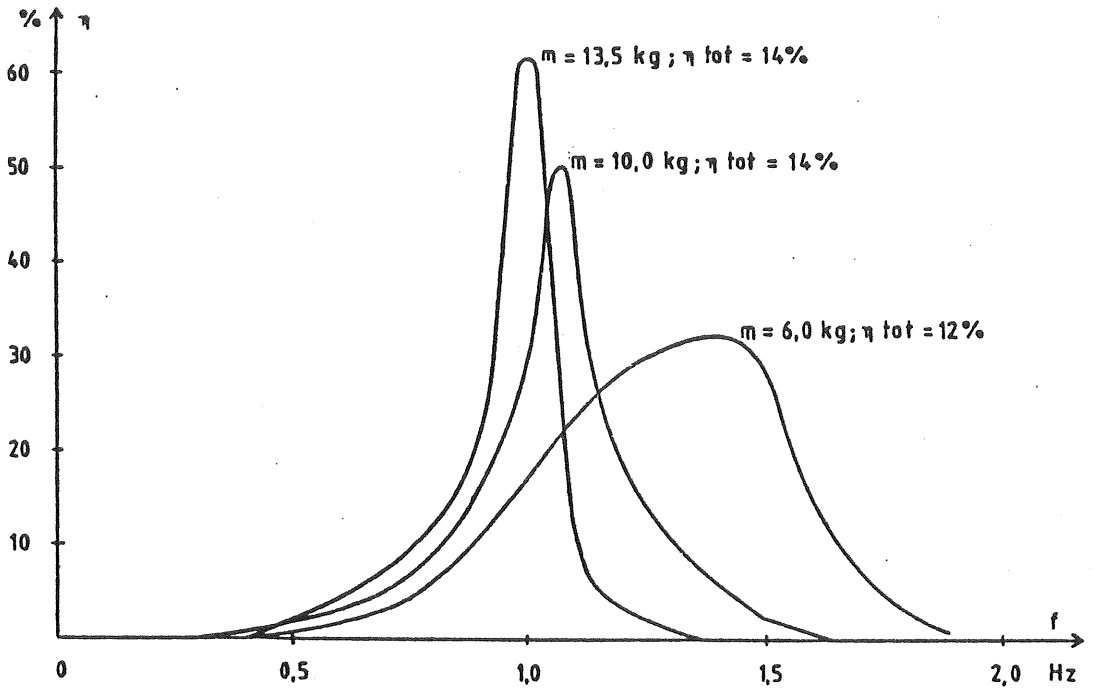
Vid låg dämpning visar verkningsgradskurvorna god överensstämmelse såväl mellan försöken i regelbundna vågor som mellan dessa och försöken med spektrum G0 och G4. Se figur 7.14a. För något hårdare dämpning tenderar skillnaderna att bli större. Se figur 7.14b.

Totalverkningsgrad som funktion av massa och dämpning

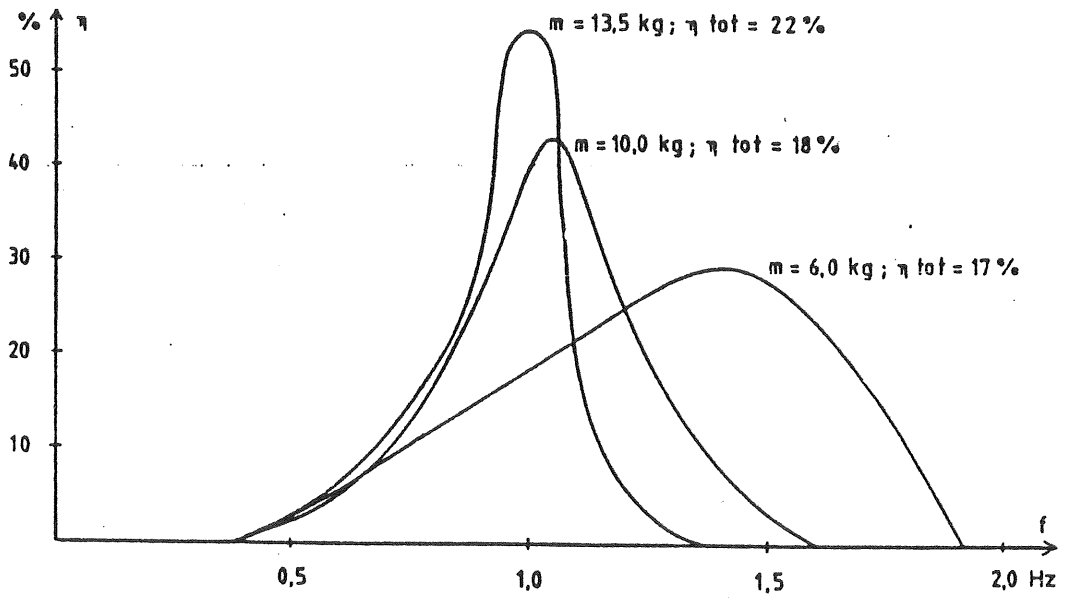
Totalverkningsgraderna för bojar i försök med oregelbundna vågor är åskådliggjorda i figur 7.15 för spektrum G0 och i figur 7.16 för spektrum G4.

De använda försöken är representerade med en punkt som anger en viss kombination av massa och dämpning. I varje sådan punkt har en viss totalverkningsgrad uppmätts. I stället för att ange dessa har nivåkurvor interpolerats approximativt för några totalverkningsgrader.

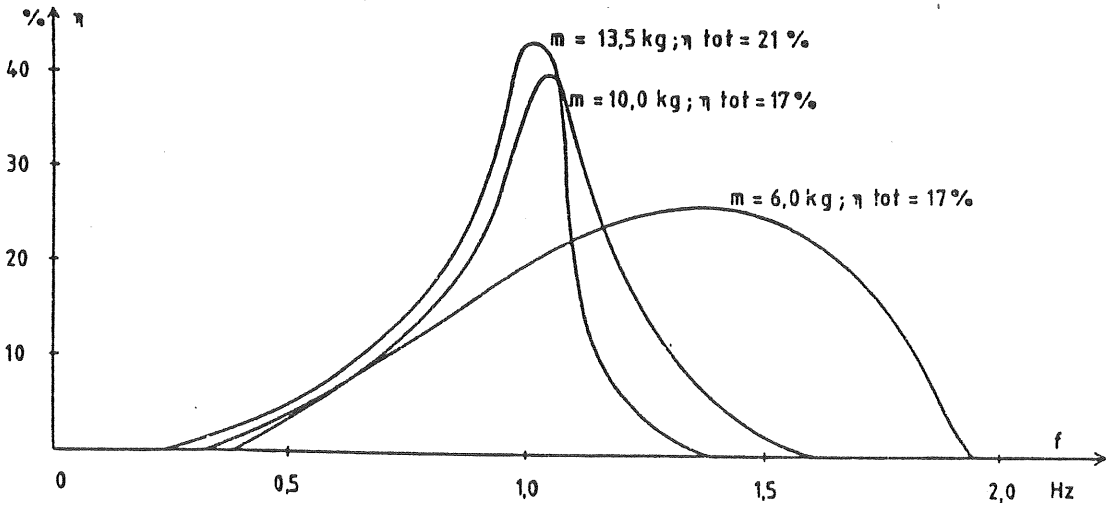
a) Dämpning b_1 = 10 Ns/m



b) Dämpning b_1 = 20 Ns/m

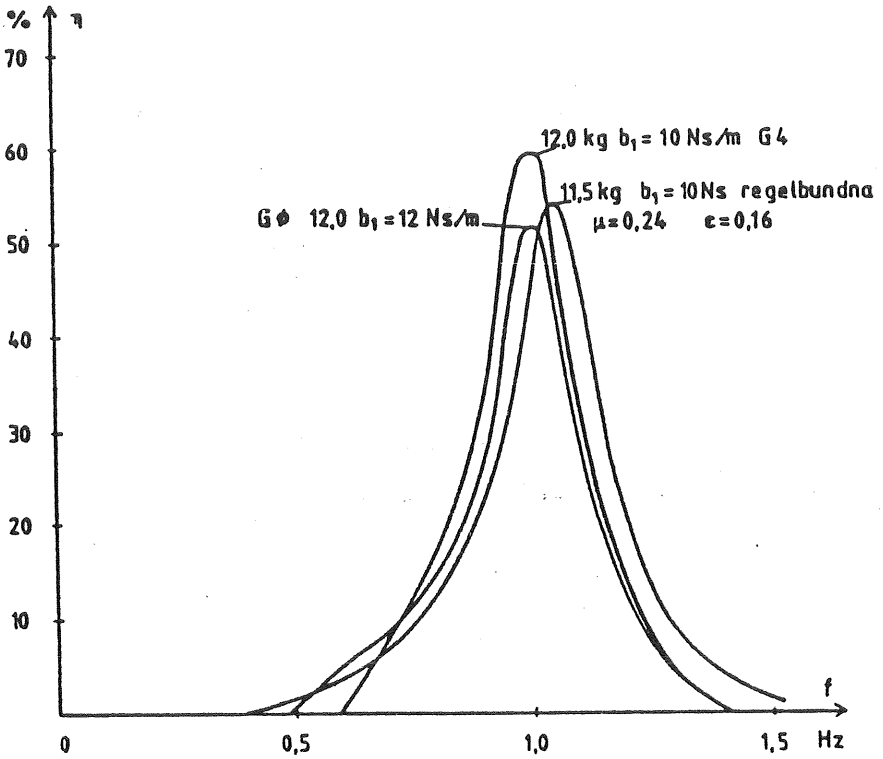


c) Dämpning b_1 = 25 Ns/m

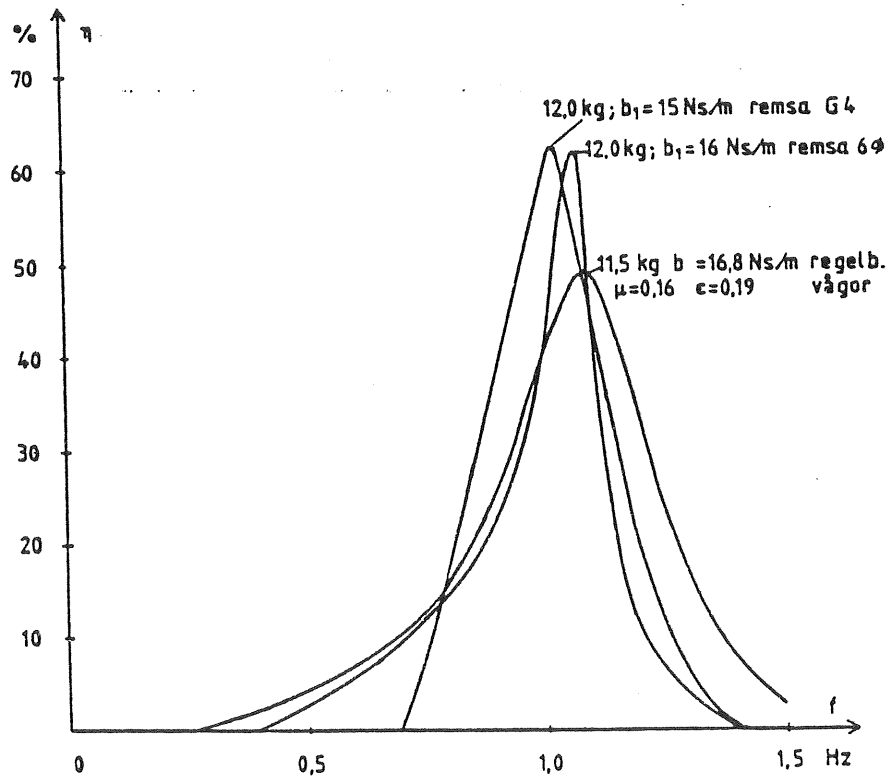


Figur 7.13 Verkningsgrad som funktion av frekvensen för olika massor och dämpning. Uppmätt i oregelbundna vågor.

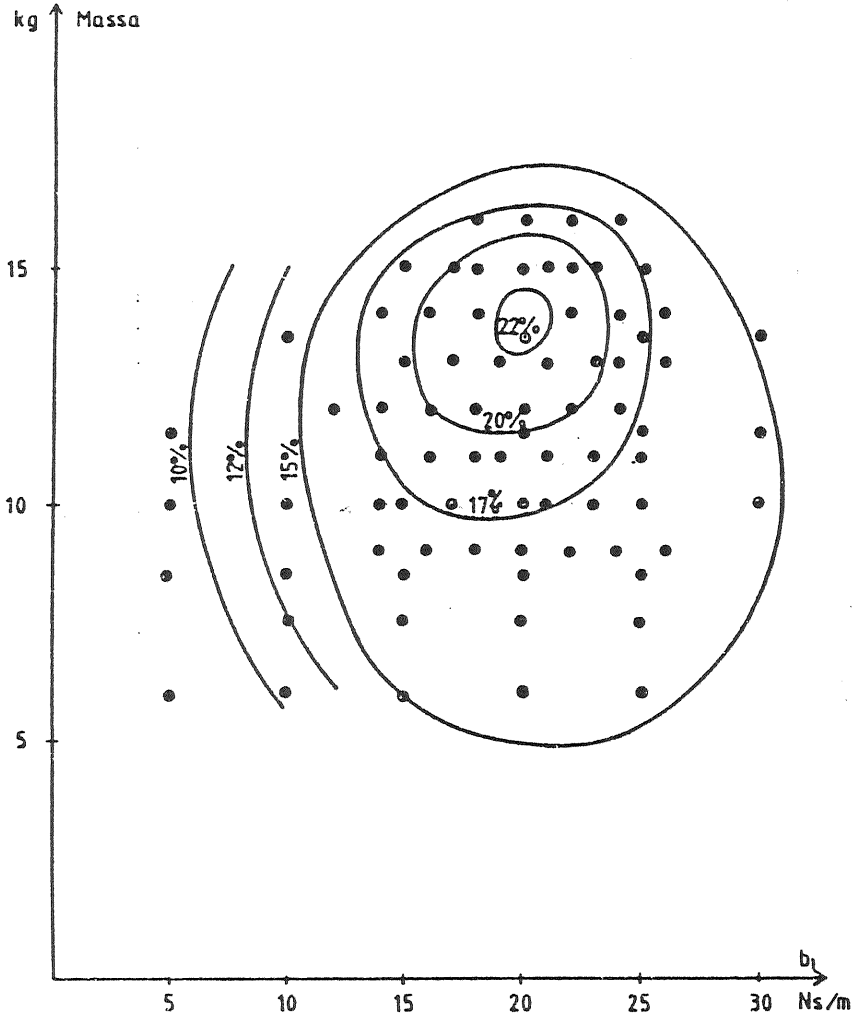
a) Dämpning $b_1 \approx 10$ Ns/m



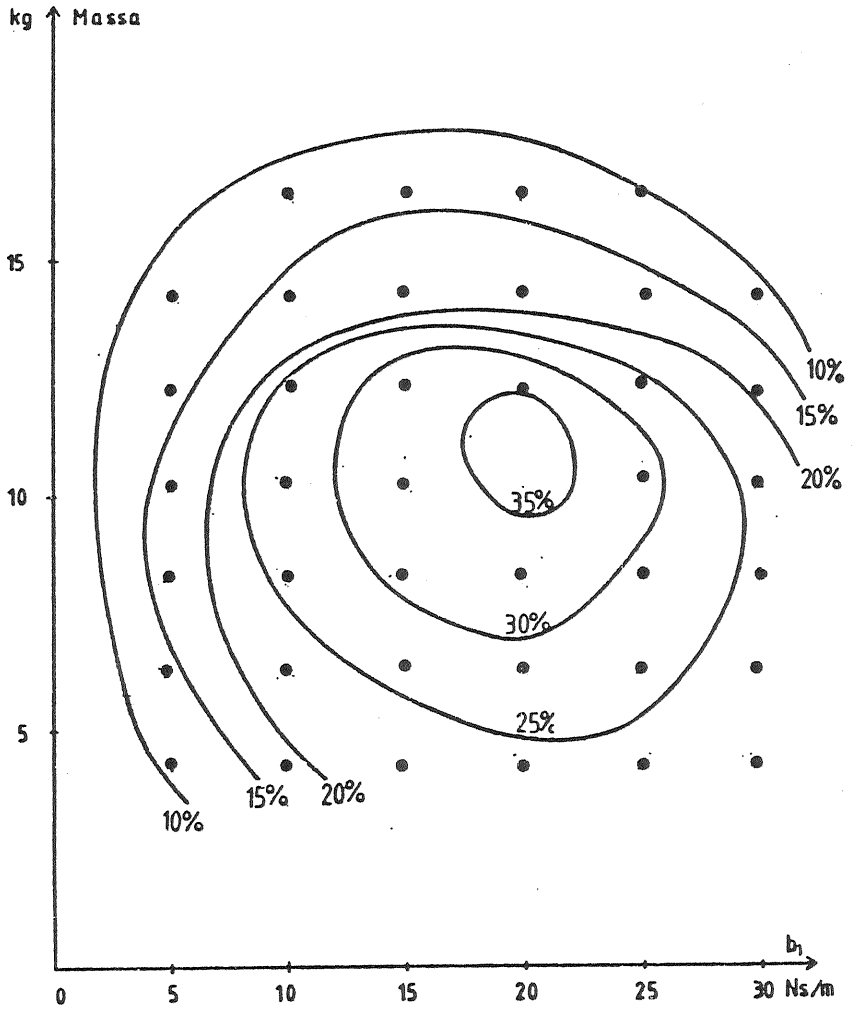
b) Dämpning $b_1 \approx 16$ Ns/m



Figur 7.14 Verkningsgrad som funktion av frekvensen för ungefär samma massa och dämpning i regelbundna vågor och i oregelbundna vågor med spektrumen G0 och G4. Massa ca 12 kg.



Figur 7.15 Nivåkurvor för totalverknings graden som funktion av massa och dämpning vid spektrum G0.



Figur 7.16 Nivåkurvor för totalverknings-graden som funktion av massa och dämpning vid spektrum G4.

Skillnaden i bojens förmåga att ta upp energi ur de två använda spektrumen beror på spektrumens form och placering på frekvensaxeln samt de begränsade möjligheterna att anpassa bojens verkningsgradskurva till de givna spektrumen genom att endast ändra massan och dämpningen. Bojens diameter har ju varit konstant.

Spektrum G0 är bredast av de två använda spektrumen med $\varepsilon = 0.5$ (se figur 7.5) men innehåller ett smalt maximum inom det lägre frekvensområdet, där bojens diameter är dåligt anpassad. För att bättre kunna ta upp energi ur dessa låga frekvenser förskjuts bojens resonansfrekvens dit genom att öka dess massa. Därigenom ökar totalverkningsgraden för att enligt försöken vara bäst vid massan 14 kg och dämpningen 20 Ns/m. När massa växer ökar också bojens djupgående vilket är oförmånligt ur energiupptagningssynpunkt på grund av tryckvariationernas avtagande med djupet. Ett effektivare sätt hade varit att anpassa bojens diameter. Den stora bredden i spektrum G0 innebär att det även i det högfrekventa området finns energi som inte kan tas upp av bojen.

Placeringen av spektrum G4 i frekvensled är bättre anpassad till bojens diameter, varför totalverkningsgraden blir maximal för en lägre massa än för G0. Den bättre placeringen i frekvensled och det faktum att G4 är smalt $\varepsilon = 0.3$, gör att totalverkningsgraden blir högre, eftersom verkningsgraden härigenom är betydande inom hela vågspektrumet.

Eftersom spektrum G4 är smalare än ett PM spektrum borde området för maximal totalverkningsgrad för ett PM-spektrum med samma toppfrekvens förskjutas mot lägre massa. Det är dock inte troligt att totalverkningsgraden skulle öka nämnvärt. Kostnadsmässigt är det dock fördelaktigt med mindre dimensioner hos bojen.

7.1.5 Slutsatser av modellförsöken

Försök med en energiupptagande vågboj har utförts i regelbundna och oregelbundna vågor. De mest aktuella resultaten från dessa försök föreligger från försök i en bassäng med längden 18.3 och bredden 9.3 m. Olika massor hos bojen och dämpning hos det energiupptagande elementet har prövats.

I regelbundna vågor har verkningsgrader på mellan 50 och 60% uppmätts för det mest realistiska upphängningssättet för den ganska tunga boj som körts i försöken (ø 300 mm, m = 11,5 kg).

Verkningsgradskurvan från försöken innehåller dock ett oförklarat lokalt minimum vid 0.90 à 0.95 Hz, vilket starkt påverkar teorins godhet. Minimet kan inte förklaras med resonanssvängningar hos bassängen eller vågbildaren.

Vad beträffar de oregelbundna vågorna har två olika spektra använts i bassängen, det ena med spektrumvidden 0,5, det andra med vidden 0,3. En maximal hydrodynamisk "totalverkningsgrad" på 22% resp. 36% har härvid uppmätts. För en boj med bättre anpassad diameter skulle en bättre totalverkningsgrad ha erhållits.

Vid försöken har en boj med diametern 0,3 m använts. Bojens massa har varierats mellan 4 och 16 kg dvs med medeldjupgåenden mellan 0,06 och 0,23 m. Dess dämpning har varierats mellan 5 och 30 Ns/m.

Förutom totalverkningsgraden har amplitudresponsfunktionen och verkningsgradsspektrum uppmätts. För jämförbara bojar med vikten 11,5 resp. 12 kg visade sig vid dämpningen 10 Ns/m verkningsgradsspektrum uppmätt för regelbundna vågor vara mycket likt de uppmätta för de två modellspektrumen. För dämpningen 20 Ns/m var överensstämmelsen i verkningsgradsspektrum bra mellan de två modellspektrumen men ej så bra mellan dessa och de regelbundna vågorna. Överensstämmelsen är dock tillräckligt god för att ge bra uppskattningar av energiupptagningen i all naturlig sjö. I dyning med smalt spektrum kan uppskattningarna bli något osäkrare eftersom verkningsgraden varierar kraftigt vid små frekvensändringar i vissa delar av spektrum.

De genomförda optimeringsförsöken visar också att det är viktigt att välja en diameter på bojen som är avpassad till det förväntade vågspektrumet. En olämpligt vald diameter kan endast i begränsad omfattning kompenseras med ökad eller minskad ballast. En boj med stor diameter relativt vikten kommer att svänga för nära vattenytan och dess slaglängd och möjliga fasförskjutning begränsas därigenom. En boj med liten diameter och stor massa får så stort sjunkdjup att den drivande kraften minskar, åtminstone i den använda 0,67 m djupa bassängen.

7.2 Försök i Lygnern hösten -79.

7.2.1 Målsättning

Tidigare, 1978, hade endast funktions- och överlevnadstester gjorts i Lygnernskala.

Utifrån dessa togs ett nytt bojkoncept fram, den kopplade bojen, en boj och genom denna en friflytande stång försedd med dämpskiva i nederänden. Se avsnitt 7.2.3.

Målsättningen med bojförsöken var att jämföra sjöförsök i vindvågor med påbörjade prov med oregelbundna vågor i bassäng och resultat från teoretiska beräkningar med en matematisk modell.

Särskilt intressanta parametrar i den matematiska modellen är hydrodynamisk verkningsgrad och dämpkonstant samt medsvängande vattenmassa.

Nya givare för fältförsök utvecklades liksom datasamlings- och behandlingssystem.

7.2.2 Utförda försök

Under oktober-december 1979 kördes ett antal försöksserier under olika vågförhållanden. Aktuella vindstyrkor vid tillfällena varierade från 2 m/s - 15 m/s. För varje vågsituation utnyttjades fyra olika yttre dämpningar av bojrörelsen. Detta gjordes med olika belastningsmotstånd i den elektriska generatorns ankarkrets.

Samtidiga värden på vågorna, mätta ca 40 m från bojen samt bojens acceleration och generatorvarvtal lästes in på en mätdator. 400 mätpunkter per kanal registrerades under 80 sekunder, vilket tog upp datorns hela minneskapacitet. Med de två sistnämnda storheterna kunde bojens och stångens rörelser i vågorna beräknas.

Mättiden 80 sekunder bedömdes som något kort för Lygnerns vågor. För att erhålla en säkrare skattning av bojens hydrodynamiska

medelverkningsgrad och -effekt togs 4 st 80 s-serier i snabb följd med våghöjds- och spänningsregistrering under sammanlagt 400 s. De användbara mätserierna redovisas i tabellen nedan.

Tabell 7.7 Utförda mätningar.

Mätserie	Tid-punkt	Vind-hastig-het m/s	Vind-rikt-ning 0-360°	belast-nings-spänning	Mätstorhet bojacce-leration	våg-höjd	genera-torvarv-tal	last ohm
791016-1	1216	10	225	x		x		10
"	1225	11-13	225		x	x	x	"
791016-2	1232	11-13	225	x		x		3,0
"	1242	11-13	225		x	x	x	"
791016-3	1248	11-12	240		x	x	x	1,5
"	1256	11-12	240	x		x		"
791016-4	1305	10-12	240	x		x		0,2
"	1316	10-12	240		x	x	x	"
791016-5	1345	10-11	250		x	x	x	10
"	1401	10-11	250	x		x		"
791016-6	1410	8-9	250	x		x		3,0
"	1419	8-9	250		x	x	x	"
791016-7	1422	7-9	250		x	x	x	1,5
"	1426	6-8	250	x		x		"
791016-8	1433	6-8	250	x		x		0,2
"	1441	6-8	250		x	x	x	"
791017-1		5-7	225		x	x	x	10
"		5-7	225	x		x		"
791017-2		5	225		x	x	x	3,0
"		5	225	x		x		"
791017-3		2-4	225	x		x		1,5
"		2-4	225		x	x	x	"
791017-4		2-4	225		x	x	x	0,2
"		2-4	225	x		x		"
791019-1	1259	6-7	190		x	x	x	0,2
"	1304	6-7	200	x		x		"
791019-2	1311	6-7	200	x		x		1,5
"	1319	6-7	200		x	x	x	"
791019-3	1325	4-5	200		x	x	x	3,0
"	1329	4-5	200	x		x		"

Mätserie	Tid-punkt	Vind-hastig-het m/s	Vind-rikt-ning 0-360°	Mätstorhet belast-nings-spänning	bojacce-leration	våg-höjd	genera-torvarv-tal	last ohm
791019-4	1338	4-5	200	x		x		10
"	1345	4-5	200		x	x	x	"
791019-5	1408	5-6	200		x	x	x	10
"	1424	6-8	200	x		x		"
791019-6	1430	6-8	210	x		x		3,0
"	1438	6-8	210		x	x	x	3,0
791019-7	1445	5-6	210	x		x		1,5
"	1456	5-6	210		x	x	x	"
791019-8	1501	4-6	210		x	x	x	0,2
"	1506	4-6	210	x		x		"

I några av försöken var vågmätarens signal oanvändbar på grund av störningar.

Vintern och isen hindrade fortsatta mätningar från mitten av december. Problem med kablar, tätningar och skador i samband med höststormen kortade försökstiden så att endast en bojmassa hann testas.

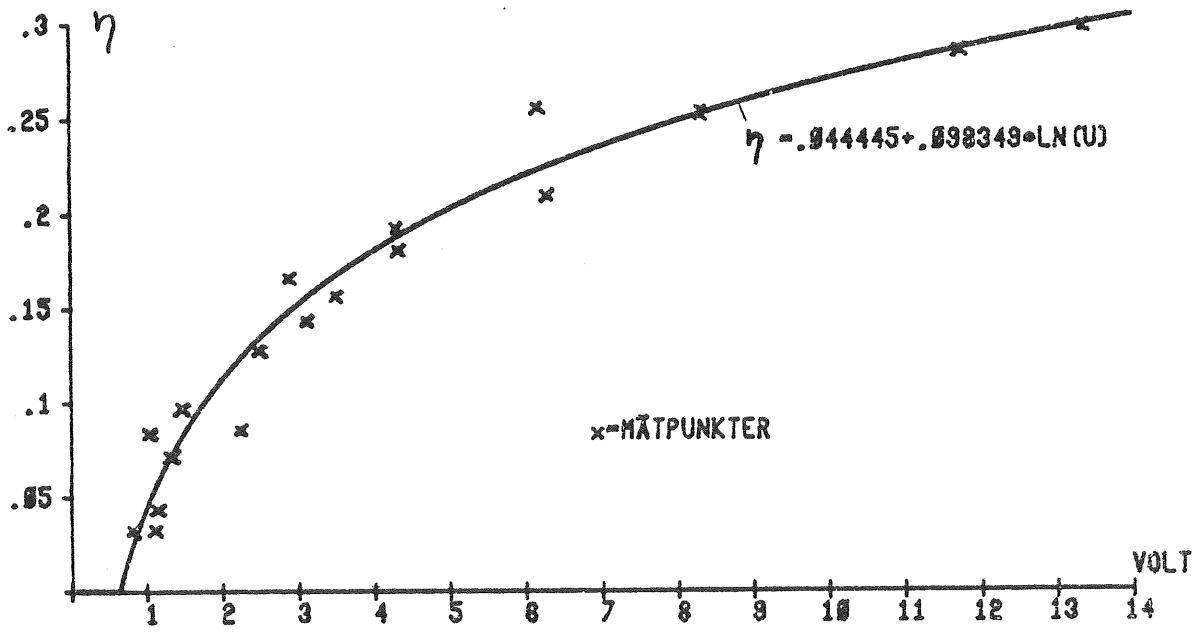
Under framtagningen av försöksutrustningen visade det sig besvärligt att säkert och enkelt mäta stångkraften.

Stångkraften bestämdes indirekt av generatorns uteffekt, varvtal och totalverkningsgraden för kuggrem-generator.

För att bestämma totalverkningsgraden utfördes laboratorieförsök, där stången, med en given tyngdkraft, släpptes genom den hängande bojen. Generatorn bromsade fallet med samma anslutna belastning som i sjöförsöken.

Den elektromekaniska totalverkningsgraden kunde därmed bestämmas ur den pålagda tyngdkraften, generatorvarvtalet och belastningsspänningen.

Verkningsgradskurvan anpassades till en ln-funktion med minsta kvadrat-metoden, se figuren nedan



Figur 7.2.1 Totalverkningsgraden som funktion av belastningsspänningen.

7.2.3 Försöksanordningar

Försöksstationen vid Lygnern

Försöksplatsen i sjön Lygnern, som ligger ca 50 km SSW Göteborg, är beskriven i rapport GR:16. För sammanhangets skull beskrivs den även i denna rapport.

Att Lygnern valdes som sjö för modellförsök i naturliga vågor beror på dess utomordentligt lämpliga form och lokalisering. Sjön är långsmal, 20 x 2 km och sträcker sig i den förhärskande vindriktningen SW. Dessutom visade det sig möjligt att hyra strand och vatten på lämpligt ställe i sjön. Den så valda försöksplatsen ligger på norra sidan. Detta ger en maximal effektiv stryklängd på 3 km, se figur 7.2.2.

Fördelen med att sjön är lång och smal är bl a att de vågor som genereras i sjöns längdriktning blir långkammiga och därmed ger försöksresultat som lättare kan jämföras med resultat från försök i regelbundna vågor i laboratorium. Se figur 7.2.3.

På stranden placerades en byssja som användes som mätcentral, För arbete ute i sjön byggdes en speciell flotte, se bild nedan.

Dessutom fanns en liten öppen snabbgående båt som användes vid kalibreringar mm.

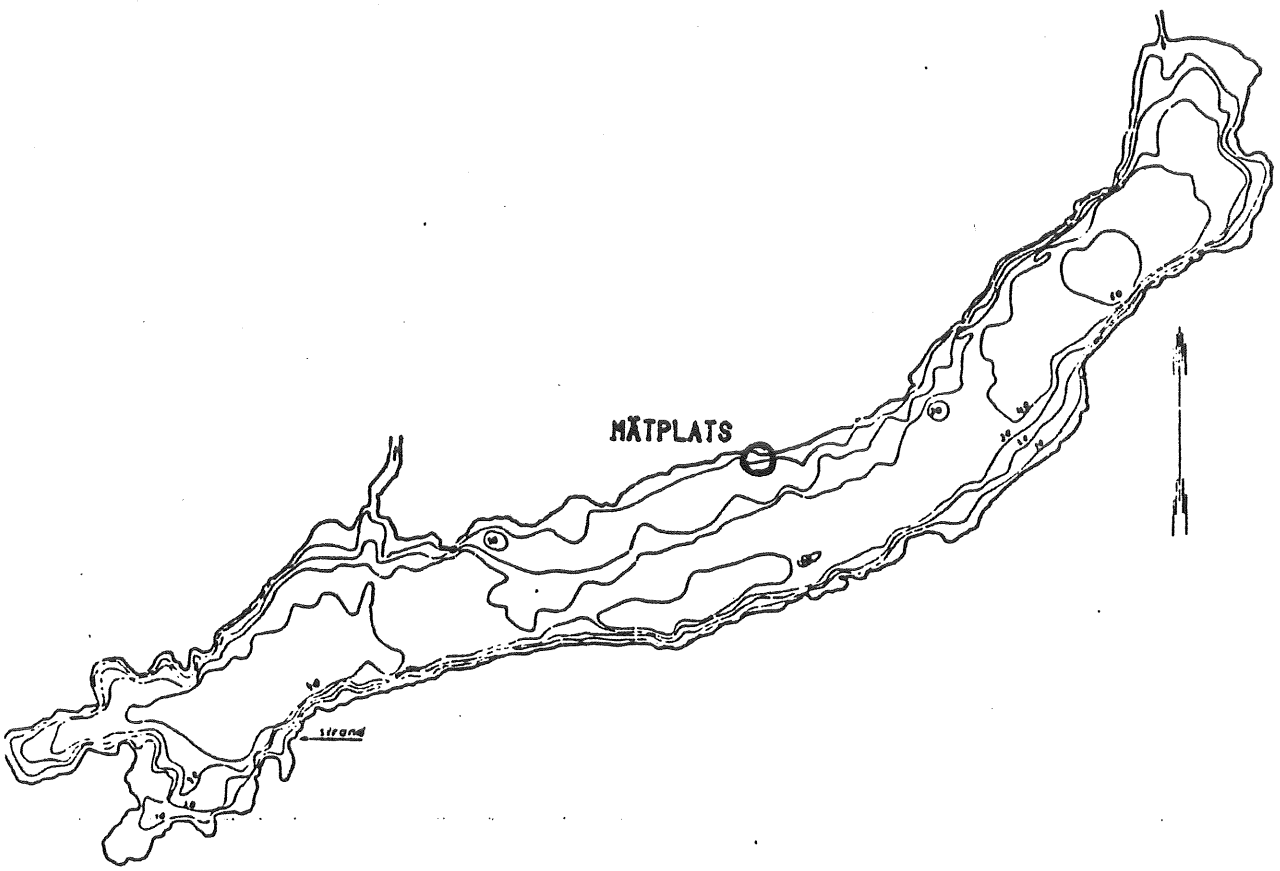
Försöksuppställning

Vågmätaren

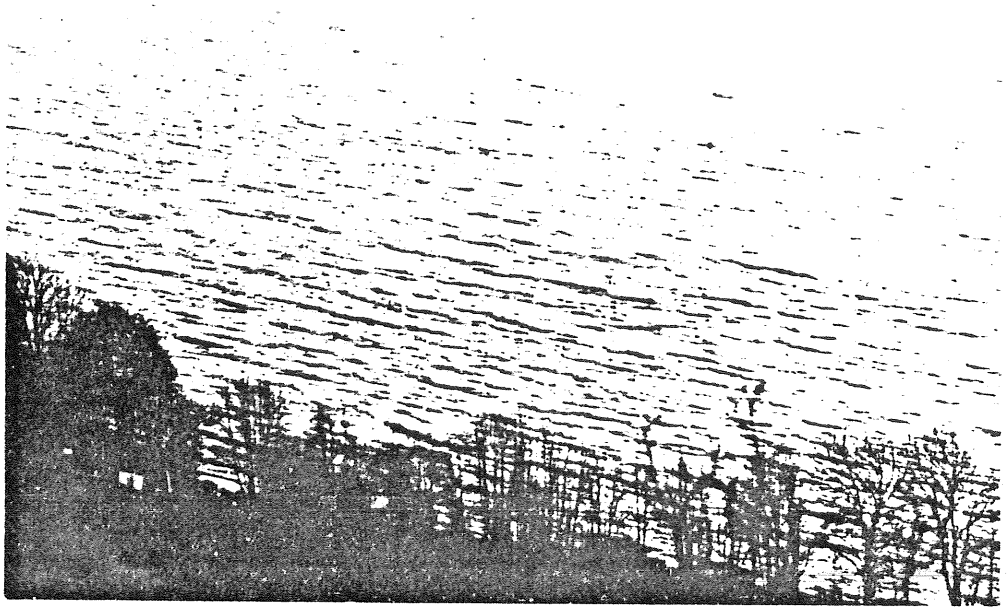
Vågmätaren består av fyrkantrör i aluminium, flottör av Bonocell och glasfiberarmerad plast, inkrementalt vinkelgivare med trissa, snöre, gummiband, justerbar förankring, kabel och elektronik.

Man önskade en vågmätare där mätsignalen var direkt proportionell mot vattnytans läge och som dessutom var oberoende av vattnets beskaffenhet (jämför resistiva och kapacitiva givare).

Vågmätaren är uppbyggd enligt figur nedan.

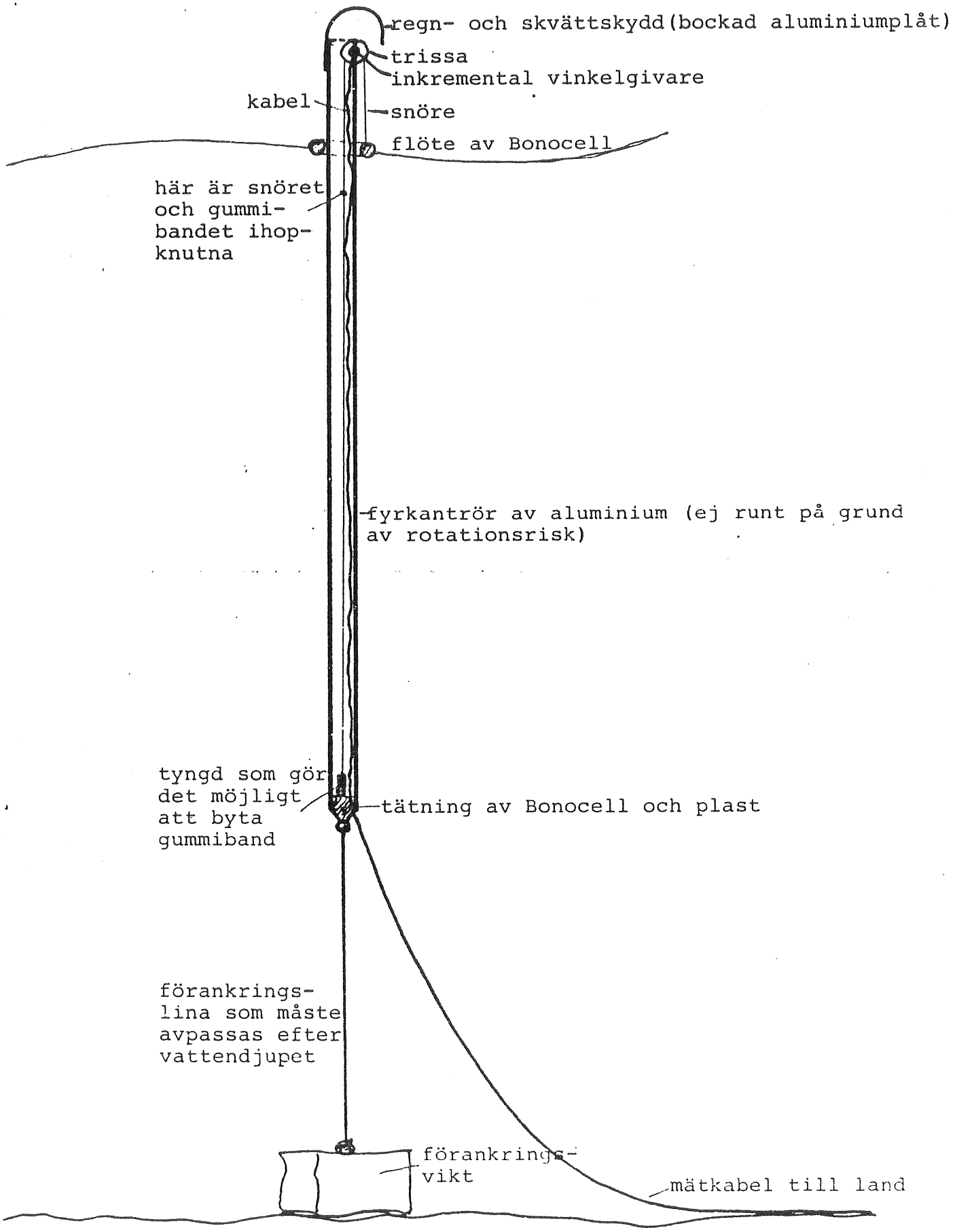


Figur 7.2.2 Karta över sjön Lygnern



Figur 7.2.3 Foto som visar Lygnerns långkammiga vågor.

Figur 7.2.4 Vågmätaren som användes vid försöken



Den justering som måste göras på platsen är att avpassa gummibandets förspänning i förhållande till flötets vikt.

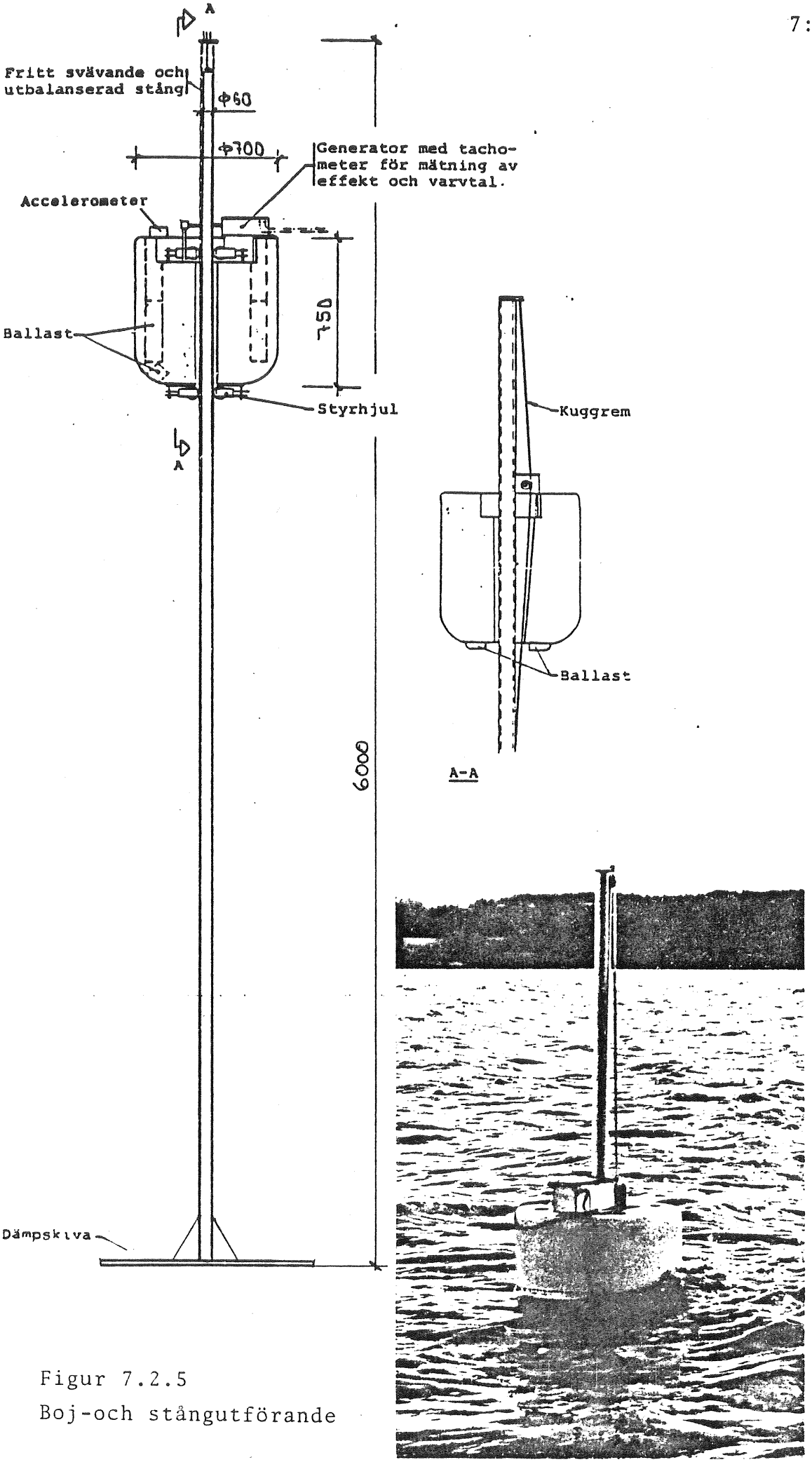
Vågmätaren användes ett par månader under sommaren 1979. Någon jämförelsemätning mot annan typ av vågmätare gjordes ej, utan den enda kontroll som gjordes var att flötets uppträdande i olika vågsituationer studerades. Härvid upptäcktes att flötets form är mycket viktig, och ett antal olika sådana provades också. Möjligtvis är Bonocell (ett Pu-skum) för lätt, man bör prova exempelvis trä.

Det problem som ledde till att vågmätaren togs ur bruk var dess vindkänslighet. Aluminiumröret ställde sig så snett i hård vind att det nästan försvann under vattenytan. Härvid inverkade givetvis även vågkraften. Det är möjligt att man genom att använda annat (lättare) material i röret och dessutom utforma det på anat sätt kan lösa detta problem.

Den inkrementalvinkelgivare som användes var av fabrikat Leine och Linde och hade 200 pulser/varv. Trissans diameter var 40 mm. Trissan var djup, dvs sidorna på den hade nästan dubbelt så stor diameter som spåret. På detta sätt undveks urspårning av snöret.

Boj- och stångutförande

I figur 7.2.5 visas arrangemanget med boj och stång med skiva, den sk kopplade bojen.



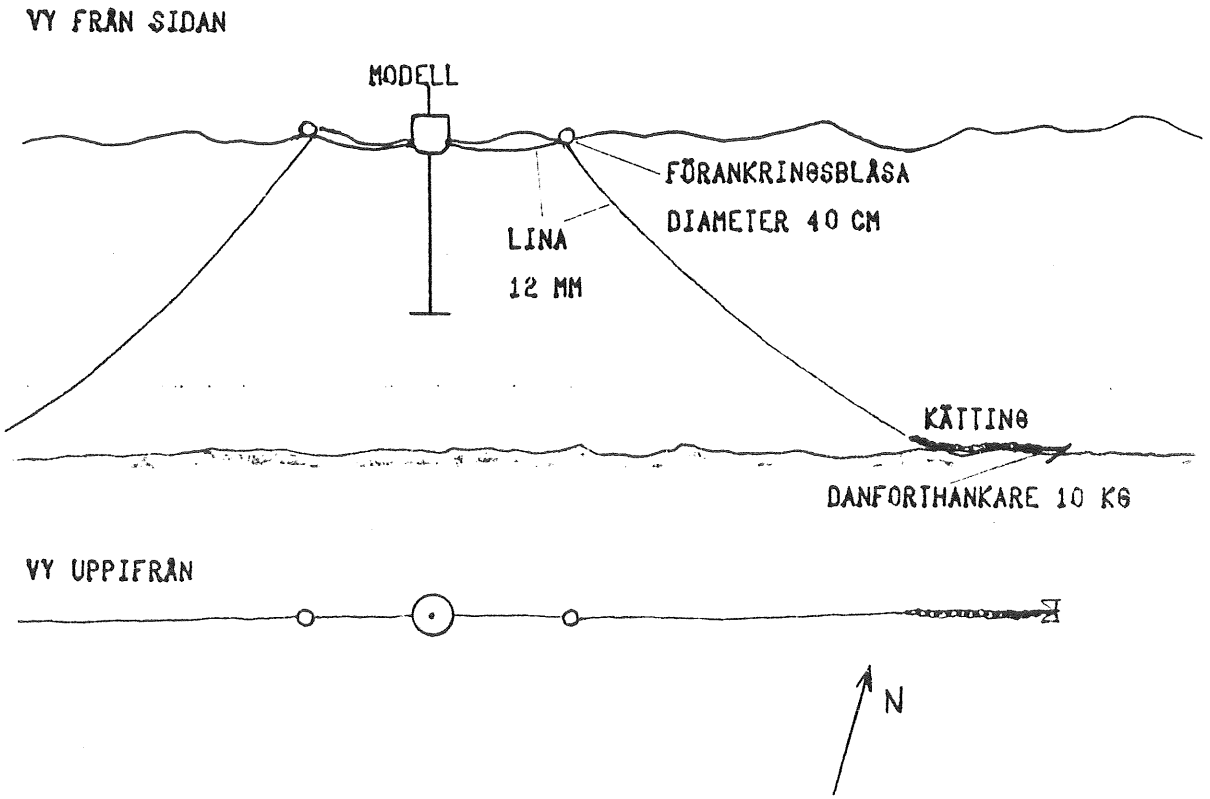
Figur 7.2.5
Boj-och stångutförande

Bojen byggdes homogen i PU-skum. Håltagning för barlast mm gjordes varefter några lager med glasfiberarmerad plast lades på. Stången gjordes av aluminiumrör och plattan av PVC-plast. Stång med dämpskiva dimensionerades så att den flöt något över sitt avsedda flytläge när den flöt fritt från bojen. Exakt rätt flytläge kunde sedan åstadkommas genom barlastning på plats.

Kraftöverföringen - linjär rörelse till roterande rörelse - ombesörjdes av en kuggremsväxel, se figur. Kuggremshjulet var kopplat till en permanentmagnetiserad likströmsgenerator vars belastning (och därmed dämpning på stången) kunde ställas in med hjälp av fasta motstånd i den grönmålade emblemförsedda mätcentralbyssjan.

Förankring

En av målsättningarna med de här beskrivna försöken var att studera funktionen hos hela systemet, alltså även förankringarna. Under höstmätningarna provades en tvåpunktsförankring enligt figur nedan.



Figur 7.2.6 Förankringskonfiguration

Meningen med blåsorna var först och främst att krafterna från förankringslinorna ej skulle påverka bojens hävrörelse och i andra hand att ge ett mjukt förankringssystem.

Att två och ej tre eller flera förankringar användes berodde helt och hållet på att realistiska förhållanden eftersträvades och då blir ju komponentkostnadsbilden av avgörande betydelse. Eller med andra ord; om två förankringar räckte var det bra.

Mätutrustning på bojen

Bojens vertikala rörelse mättes med en accelerometer, se figur över bojarrangemang. Accelerometern var av resistiv typ (trådtöjningsgivare), fabrikat Svema.

Effekten ut från generatorn erhölls som produkten av ström och spänning över ett varierbart belastningsmotstånd (i land). Generatorn hade en inbyggd tachogenerator för mätning av varvtalet.

Mätkablarna tejpades ihop och drogs till en liten, vattentät kontaktboj ca 30 meter ifrån kraftverksmodellen. Kabelknippet mellan modellen och kontaktboj försågs med flöten med 2 meters mellanrum så att detta flöt i vattenytan. Från kontaktbojen och in till land gick signalerna genom en bottenförlagd mångledarkabel.

Den tidigare beskrivna vågmätaren anslöts också i kontaktbojen. Avståndet mellan vågmätare och kraftverksmodell var 40 meter.

Fördelen med att ha en kontaktboj var att inte hela kabeln in till land behövde tas upp vid en eventuell upptagning av kraftverksmodellen. Detta arrangemang visade sig också fungera bra.

Mätutrustning på land

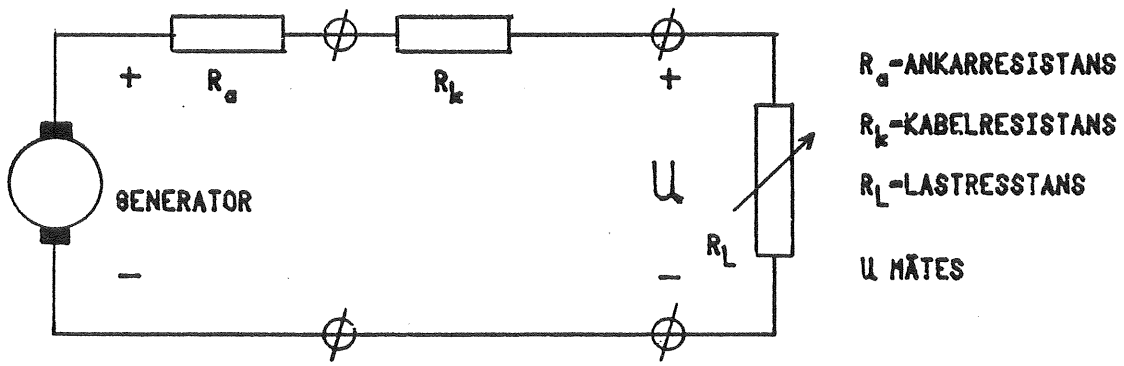
All mätapparatur fanns samlad inne i mätbyssjan. El till byssjan togs via en 200 meter lång kabel från markägarens bondgård. Nedan följer en beskrivning av mätapparaturen.

Vågmätarförstärkaren var av fabrikat Detektor. I denna omvandlades de inkrementala pulserna från vinkelgivaren på vågmätaren till en analog spänning. Förstärkningen kunde inte ändras och mätområdet var ± 1 meter motsvarande 0-10 volt.

Accelerometerförstärkaren var en bryggförstärkare av fabrikat Detektor typ BRI-100. Förstärkningen kunde varieras mellan 0 och 10000 gånger. Max utspänning var ± 1 volt.

Tachometersignalen behövde inte förstärkas eller filtreras på något sätt utan gick direkt in på mätdatorn, se nedan.

Belastningsmotståndet för generatorn hade variabel risistans 0-10Ω och tålde 10 ampere. Effekten från generatorn erhölls genom att mäta spänningen över belastningsmotståndet direkt med mätdatorn, se nedan.



Figur 7.2.7 Generatormätkrets

Sambandet ger sedan effekten.

$$p = \frac{u^2}{R_L^2}(R_a + R_k + R_L) \qquad \ldots(7.2.1)$$

Mätdatorn var av fabrikat HP 9825 (bordsdator).

Mätsignalerna kopplades en och en med en scanner till en digitalvoltmeter, också denna av fabrikat HP, varifrån digitala mätvärden

lästes in på datorn. Datorns lagringskapacitet var inte helt tillfyllest för att man i en mätning skulle få tillräckligt många mätdata per kanal för att uppnå en tillfredställande säkerhet i en statistisk analys, se ovan.

Printer av fabrikat HP var ansluten till mätdatorn och användes för resultatutskrifter och plottningar av tidserier. Se mer om detta i följande avsnitt.

7.2.4 Utvärdering

Signalbehandling

De elektriska mätsignalerna blev efter en del arbete med jordning av apparaterna såpass godartade att någon filtrering inte såg ut att behövas. Detta visade sig dock något felaktigt varför de samplade diskreta värdena i tidsserierna senare fick filtreras digitalt i datorn.

Sampling innebär att man på något sätt läser av en signal i ett visst ögonblick och på så sätt får ett diskret värde. Tiden mellan varje avläsning kallas samplingstid. En löpande samling diskreta värden med samma samplingstid kallas tidsserie.

I Lygnerns vågor ligger de intressanta vågperioderna mellan 1 och 2 sekunder. Samplingstiden 0,2 sekunder valdes som en kompromiss mellan hög upplösning i tidsserierna (kort samplingstid) och lång mättid (begränsad datorlagringskapacitet).

Lågpassfiltret var av första ordningen enligt

$$y(nT_s) = (\tfrac{1}{2})\ (x(nT_s) + x((n+1)\ T_s)) \qquad \ldots(7.2.2)$$

där $x(nT_s)$ är en tidserie med samplingstiden T_s och $y(nT_s)$ är den filtrerade utsignalen. Lågpassfiltreringen var nödvändig för att få bort 50 Hz-brus framför allt på accelerometersignalen.

Högpassfiltret hade den analoga motsvarigheten

$$G_{HP}(s) = \frac{s}{1+s} \qquad ...(7.2.3)$$

och fick med den valda samplingstiden 0,2 sekunder och brytfrekvensen 0,4 · π rad/sek följande algoritm

$$y(n) = 0,7727 \cdot y(n-1) + 0,8879\ (x(n) - x(n-1)) \qquad ...(7.2.4)$$

Filtret kördes två gånger på tidserierna vilket medför att brantheten ökar och brytfrekvensen minskar något.

Lågfrekventa svängningar som behövde filtreras bort var t ex kraftverksmodellens rörelse i pitchled, vågmätarens varierande snedställning beroende på vind och vågor mm.

Tidsserieanalys

Med tidsserieanalys menas att de aktuella parametrarna beräknas direkt på tidsseriern. Det första steget är att man anpassar sina diskreta värden till en noll-nivå som kan vara sann (mätt) eller beräknad (medelvärdet av alla punkter). Nollnivån subtraherades ifrån de diskreta värden i tidsserien. Följande parametrar beräknades sedan

T_z (för vågorna) erhölls som kvoten av dubbla mättiden och antalet nollgenomgångar i båda riktningarna varefter

$H_{1/3}$ (för vågorna) beräknades som medelvärdet av den högsta tredjedelen av vågorna. Observera att våghöjd alltid är dubbelamplitud.

Vågeffekten beräknades enligt $P = 0,55 \cdot H_{1/3}^2 \cdot T_z$ [kW]. ...(7.2.5)

Detta är en empirisk formel som senare visat sig stämma bra för Lygnerns välartade vågor. Inkommande effekt definieras som vågeffekten över en bredd lika med bojens diameter.

Elektrisk effekt från generatorn beräknades enligt

$$p = \frac{u^2}{R_L^2}(R_a + R_k + R_L), \text{ se ovan.} \qquad ...(7.2.6)$$

Denna beräkning gjordes alltså för varje diskret värde på spänningen U. Som resultat erhölls en effekttidsserie och genom att integrera denna över mättiden och dela med densamma fick man fram medeleffekten från generatorn, $\overline{P}_{generator}$.

Hydrodynamisk effekt togs fram på följande sätt. Från kalibrering i laboratorium (fig 7.2.1) finns sambandet mellan $\eta_{mek} \cdot \eta_{mek} \cdot \eta_{el}$ och u.

Eftersom $P_{generator} = P_{hydr} \cdot \eta_{mek} \cdot \eta_{el}$ kunde P_{hydr} beräknas i varje punkt. Integrering och division med mättiden gav sedan $\overline{P}_{hydr}$.

Frekvensanalys

En av avsikterna med dessa försök var att erhålla tillräckliga mätresultat för att kunna göra en frekvensanalys med överförings-funktioner mellan vågorna och väsentliga bojparametrar. I Hylander (1979) redovisas ett datorprogram för FFT-analys (FFT = Fast Fourier Transform). För en del av de erhållna tidsserierna gjordes en sådan FFT-analys och även försök att få fram överförings-funktioner. Den i Hylander (1979) redovisade korseffektmetoden fungerade emellertid inte eftersom avståndet mellan vågmätare och modell var för stort. En förenklad metod med ren spektrum-division provades också, men detta gav inget entydigt resultat på grund av system- och mätstörningar. Möjligen hade man kunnat få fram en tillförlitlig medelvärdesfunktion om antalet mätningar hade varit större.

För presentation av mätresultaten provades därför andra olika typer av diagram och det som visas i nästa avsnitt ger en ganska bra bild av modellens uppförande. I de fall olika parametrar visas som funktion av T_z i vågorna måste man ha klart för sig att entydigheten och riktigheten i ett sådant diagram till stor del beror på hur de vågspektra ser ut för vilka T_z har beräknats. De vågspektra som beräknats för dessa mätningar är mycket godartade ur denna synpunkt, vilket innebär att de har endast en topp och har liten spektrumbredd. För denna kontroll har alltså frekvensanalysen varit av stort värde.

7.2.5 Resultat med kommentar

I figur 7.2.8 visas exempel på en registrering av bojaccelerationen. Tidsserien rymmer 400 punkter med samplingstiden 0,2 sek, alltså en total mättid på 80 sekunder. Denna typ av mätning och plottning gjordes för vågor, acceleration och generatorvarvtal. Dessa utskrifter används huvudsakligen för kontroll av datainsamlingssystemet och mätvärdeskvaliteten. En fullständig resultatredovisning återfinnes i rapport GR:17.
I figur 7.2.9 visas resultatutskrifter från 4x400-serierna (se ovan). Eftersom det av datalagringskapacitetsskäl var tvunget att dela upp tidsserien i fyra delar kan man här se hur de olika parametrarna varierar i tiden.

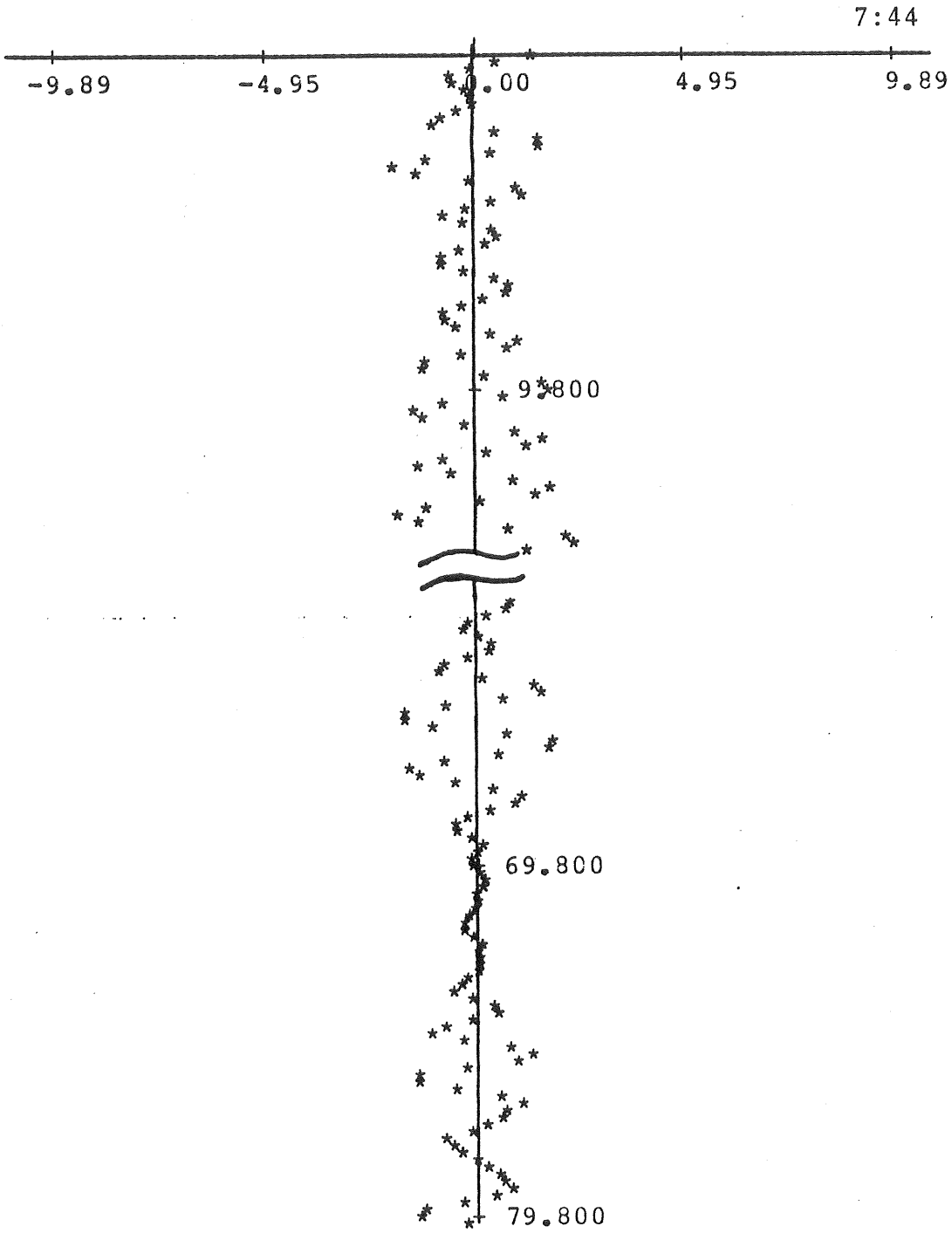
I figur 7.2.10 visas den hydrodynamiska medelverkningsgraden som funktion av T_z och med den elektriska dämpningen som parameter.

I diagrammet finns två verkningsgradstoppar. Detta beror på att systemet består av två kopplade delar med olika resonansfrekvenser. Man kan dessutom misstänka olinjära fenomen i sambandet mellan vågor och boj-stångrörelser.

Det framgår att den högsta elektriska dämpningen också ger den högsta verkningsgraden. Det hade varit önskvärt med mätningar med ännu högre dämpning, men då detta provades fungerade inte belastningsmotståndet tillfredställande.

Slutligen kan man konstatera att den hydrodynamiska medelverkningsgradens maximum ligger högt, nästan på 100%, för den högsta dämpningen. Påpekas bör att det är möjligt att erhålla verkningsgrader över 100% vid resonans vilket då innebär att bojen tar upp effekt ur en vågbredd större än bojdiametern.

Jämför man resultaten från dessa försök med resultaten från laboratorieförsök i regelbundna och oregelbundna vågor med små modeller kan man konstatera att den hydrodynamiska verkningsgraden är av samma storleksordning. Den kopplade bojen har emellertid ingen exakt motsvarighet i laboratorieförsökens bojar då dessa hade bottenfast stång.



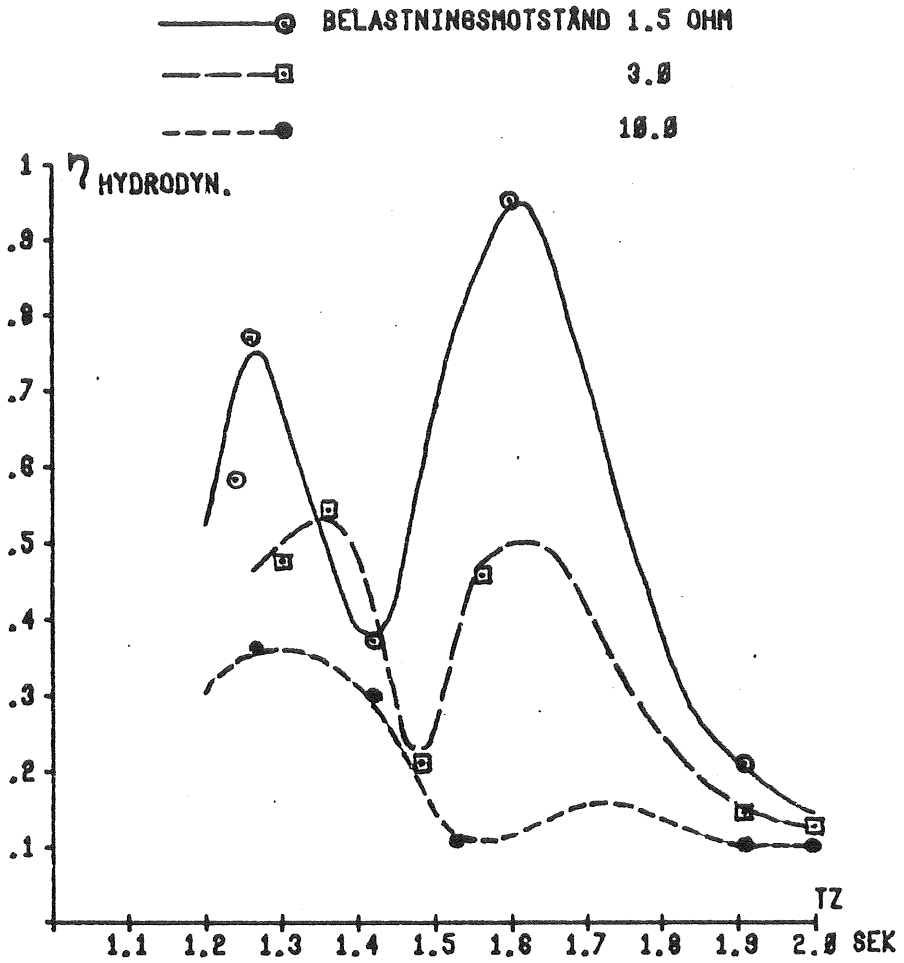
Kurvan visar acc. fraan acc meter, axlarna i m/s2 o. s
Datum 791017 Klockslag 1551
Koerning 1.00
Antal vaerden per kanal 400.00
Medelvaaghoejd 0.04
m
Medelacc.nos acc. meter 0.69
m/s2
Medelnast.tachogenerator 0.12
m/s
Lastresistansen 10.00
Onm
Maxvaerde i kurvan 2.28

Minvaerde i kurvan -2.09

Figur 7.2.8 Exempel på utskrift av tidsserie från accelerationsmätning.

```
Datum  791017  Klockslag
 Lastresistansen                10.000  ohm


Nollgenomgangsperiodtiden=                1.429  sekunder
Vaaghoejden H(1/3)=                0.175  meter
Effekten P=.55*H^2*T*10^3=               24.080  Watt/meter
Uteffekten=                1.043  Watt
Hydrodyn-effekten=                5.292Watt
Generator-eff./(Vaag-eff./m*bojens bredd)=                0.062
Hydrodyn-eff./(Vaag-eff./m*bojens bredd)=                0.314


Nollgenomgangsperiodtiden=                1.379  sekunder
Vaaghoejden H(1/3)=                0.168  meter
Effekten P=.55*H^2*T*10^3=               21.405  Watt/meter
Uteffekten=                0.937  Watt
Hydrodyn-effekten=                5.455Watt
Generator-eff./(Vaag-eff./m*bojens bredd)=                0.063
Hydrodyn-eff./(Vaag-eff./m*bojens bredd)=                0.364


Nollgenomgangsperiodtiden=                1.509  sekunder
Vaaghoejden H(1/3)=                0.183  meter
Effekten P=.55*H^2*T*10^3=               27.895  Watt/meter
Uteffekten=                0.586  Watt
Hydrodyn-effekten=                3.316Watt
Generator-eff./(Vaag-eff./m*bojens bredd)=                0.030
Hydrodyn-eff./(Vaag-eff./m*bojens bredd)=                0.170


Nollgenomgangsperiodtiden=                1.356  sekunder
Vaaghoejden H(1/3)=                0.157  meter
Effekten P=.55*H^2*T*10^3=               18.487  Watt/meter
Uteffekten=                0.537  Watt
Hydrodyn-effekten=                3.874Watt
Generator-eff./(Vaag-eff./m*bojens bredd)=                0.042
Hydrodyn-eff./(Vaag-eff./m*bojens bredd)=                0.299
```

Figur 7.2.9 Exempel på resultatutskrift



Figur 7.2.10 Hydrodynamisk medelverkningsgrad som funktion av vågornas noll-kryssningsperiod och med generator-dämpningen som parameter.

7.2.6 Slutsatser och sammanfattning

Det viktigaste resultatet från mätningarna 1979 var att den kopplade bojen fungerade utmärkt. Tvåpunktsförankringen var dock ej tillfyllest vilket resulterade i att modellen slet sig i en häftig storm.

Det mekaniska systemets utförande visade sig vara av fundamental betydelse, då det till en början uppstod fel på stångens lagring mm. Att överhuvudtaget ha konstruktioner med begränsad slaglängd innebär problem.

Försöken gav värdefulla erfarenheter av mätgivarsystem, digital signalbehandling och övergripande fältförsöksmetodik.

Utvärderingen visade att fler försök hade behövts för att ge entydiga resultat. Vidare var det elektromekaniska systemets verkningsgrad något osäker varför direkt mätning av kraften i stången hade varit ytterligt värdefull.

7.3. Försök i Lygnern med kopplade bojen 1981

7.3.1 Målsättning

Efter försöken sommaren 1979 konstruerades bojen om. Stången gjordes kraftigare och kraftmätningsanordningen förbättrades. Bojkroppen gjordes mindre för att som vi trodde passa bättre i "normalvågor" i Lygnern.

Målsättningen för 1981-års försök var alltså att fortsätta försöken från 1979 med bättre utrustning och förhoppningsvis bättre resultat som följd.

7.3.2 Utförda modellförsök

För att kunna variera bojens dynamiska egenskaper har den yttre dämpningen varierats. Den ändras genom att man ökar eller minskar fältströmmen på generatorn. Vi har varierat fältströmmen i sex olika steg 0,12A, 0,27A, 0,52A, 0,77A, och 1,02A och 1,27A.

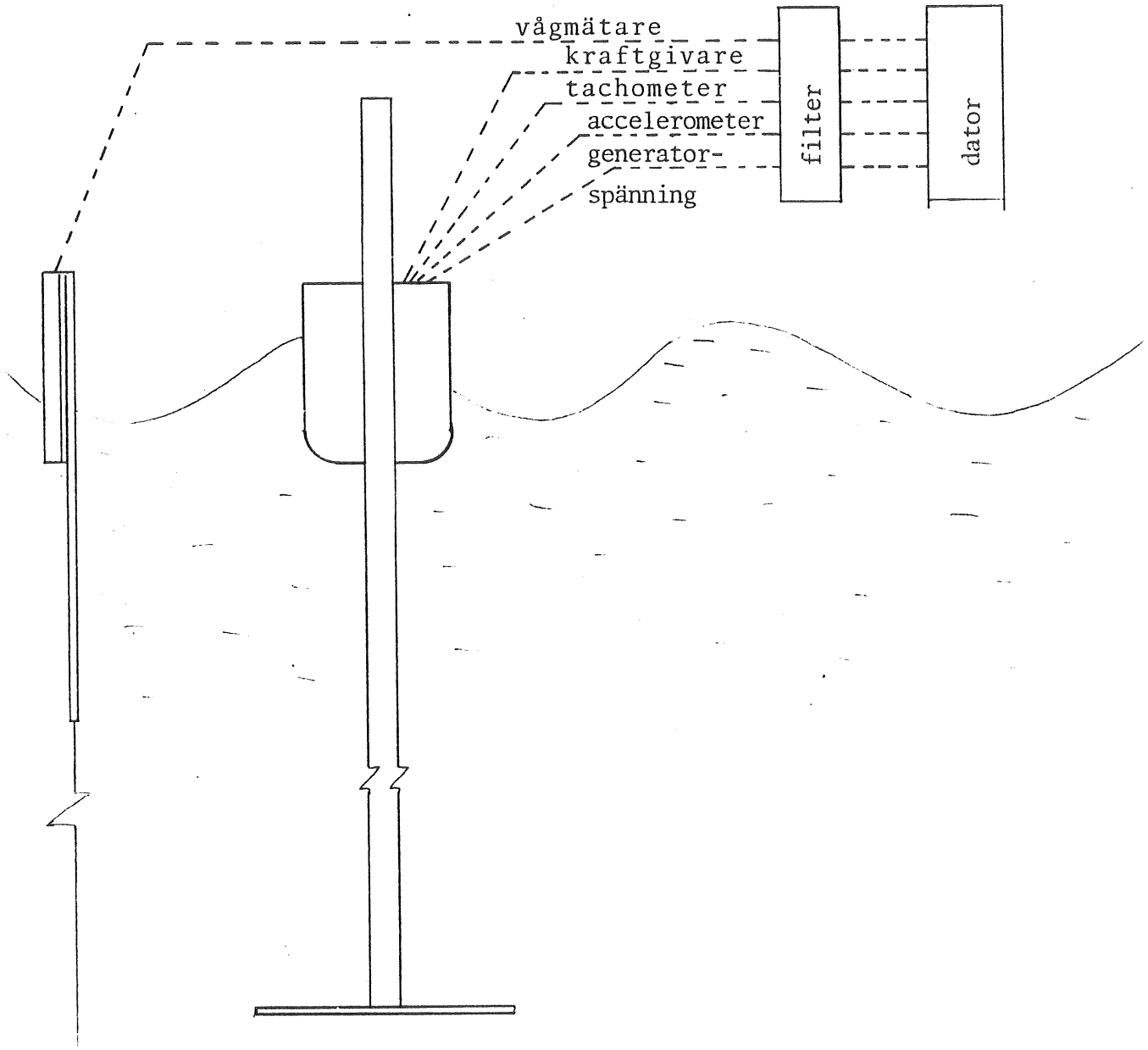
Totalt har 75 mätserier registrerats. Av dessa har 35 visat sig vara användbara. Det största problemet har varit jordningen vilken bl a har medfört att två accelerometrar och en tachometer förstörts. Av de 35 användbara mätserierna är endast sex stycken kompletta med alla signaler.

7.3.3 Försöksanordningar

Försöksuppställning

Försöken har utförts med en försöksupptällning enl figur 7.3.1.

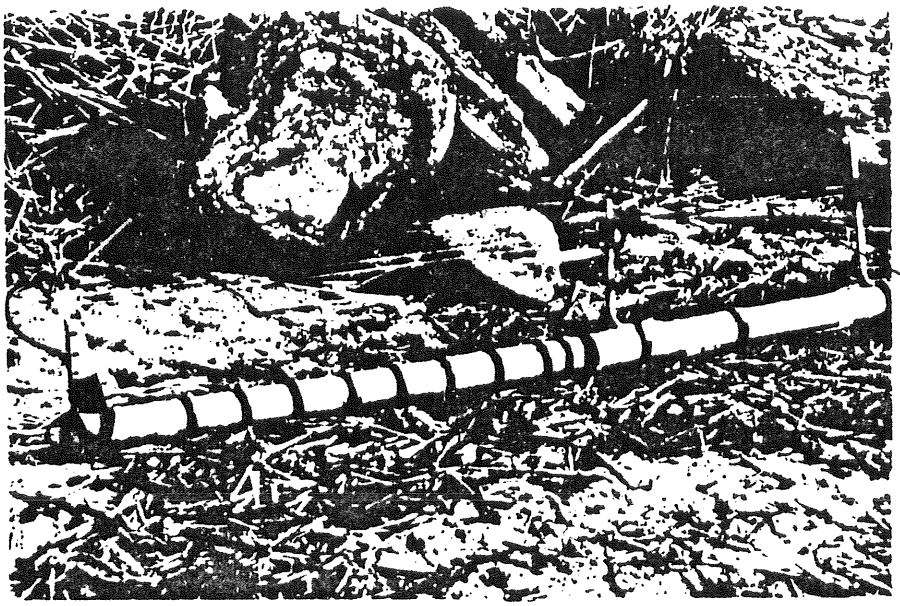
Vid försöken har vågorna mätts ca 50 m från bojen. Stångkraften, relativhastigheten (stång-boj), bojens acceleration och generatorns spänning mättes också.



Figur 7.3.1 Försöksuppställning.

I figur 7.3.2 visas vågmätaren. Den mäter vattenytans nivåförändring genom att konduktansen mellan två elektroder bestäms av vattenytans läge på dessa. Eftersom vi ville ha bort inverkan av temperaturändringar sattes ett kompensationselektrodpar helt under vattenytan. Matningsspänningen har hög frekvens.

3 kHz, för undvikande av elektrolys.



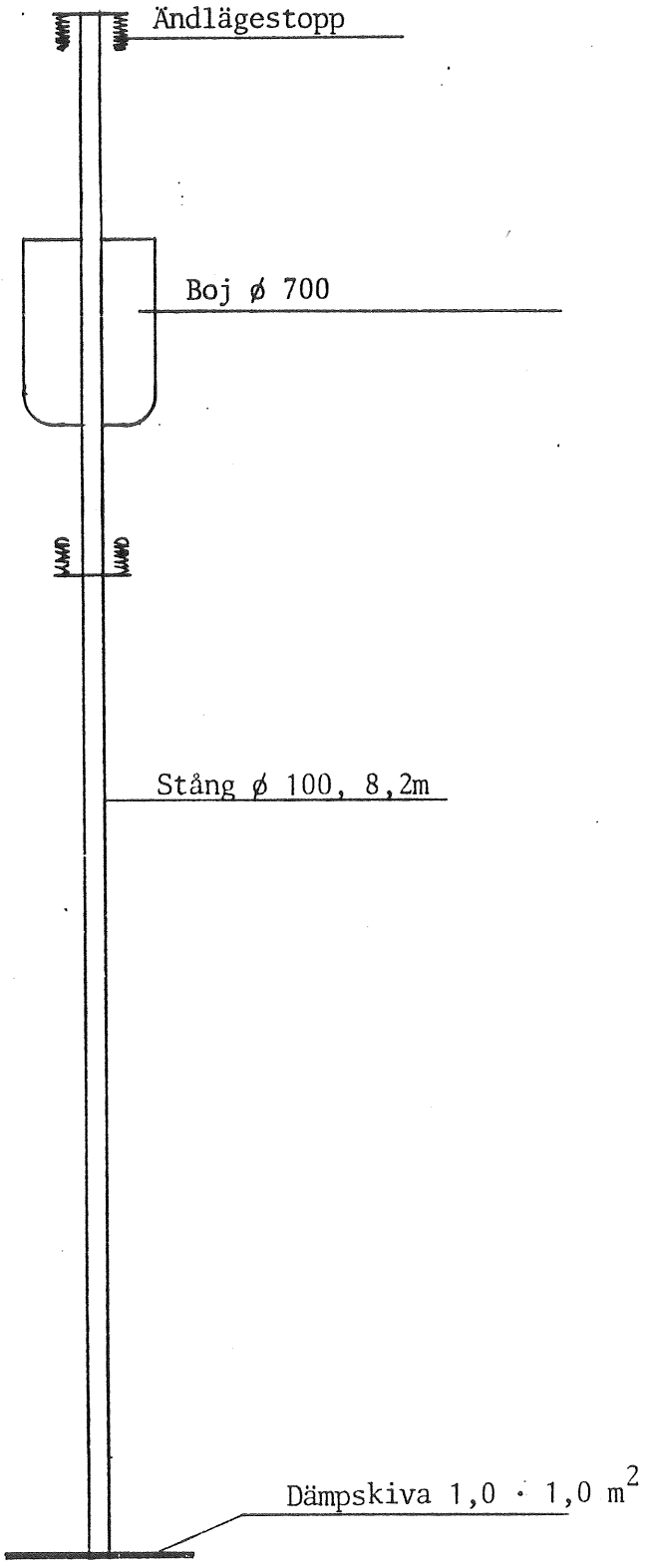
Figur 7.3.2 Fotografi på vågmätare.

Bojen

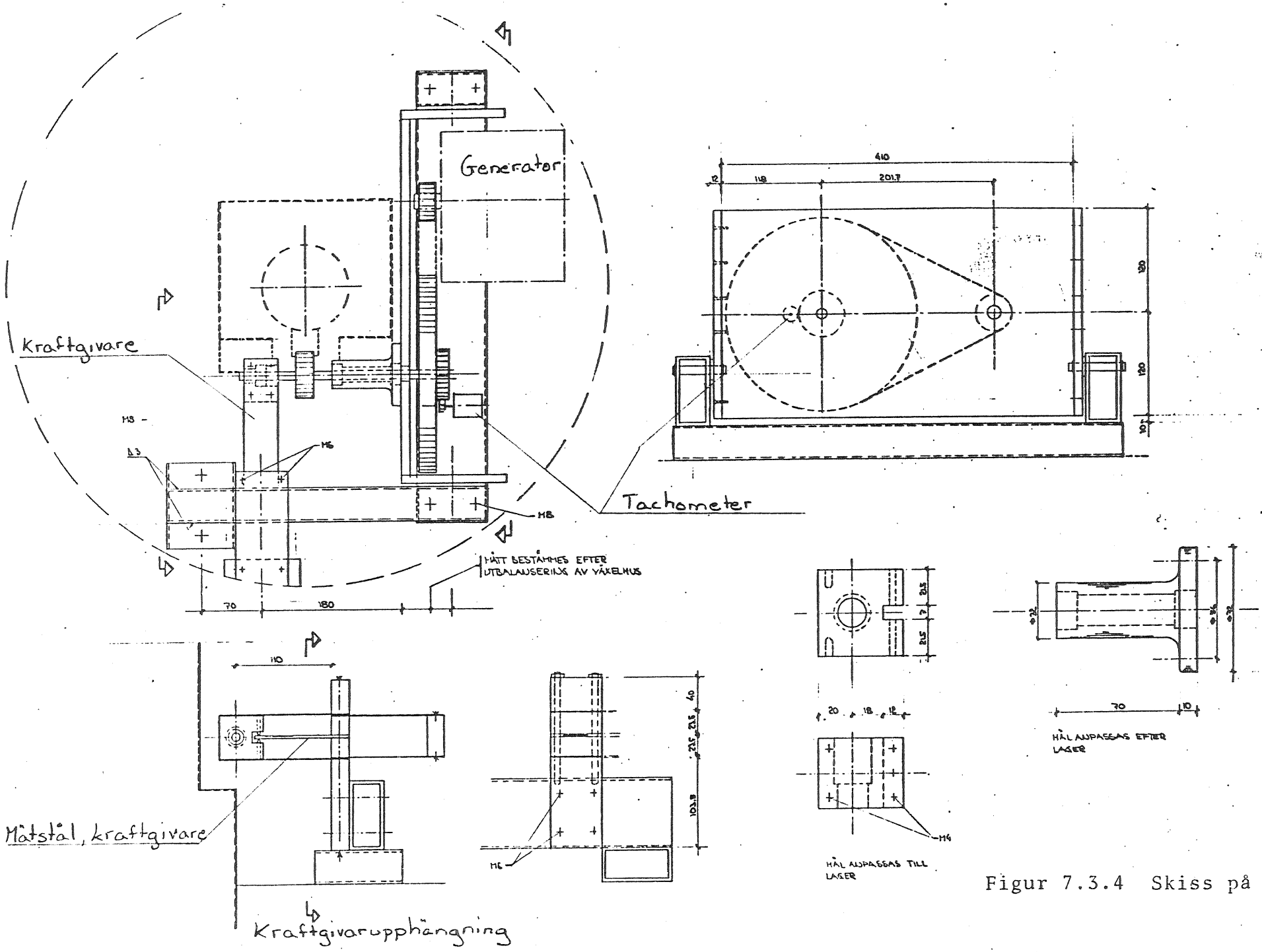
Vid försöken har en cylindrisk boj med diametern 0,7 m och deplacementet 114 kg använts. Bojen är byggd i glasfiberarmerad plast och barlastad med järntackor. Bottnen är rundad i kanten. Genom bojen går ett fyrkantigt aluminiumrör. Den visas i figur 7.3.3 och 7.3.4.

Den boj som användes vid försöken 1979 hade diametern 1 m. Då trodde vi att den var för stor för Lygnern varför den nya gjordes endast 0,7 m bred. Bojen motsvaras av en uppskalad bassängförsöksboj med diameter 0,3 m och vikten 9,0 kg (se GR:11, 13,14 och 24).

Bojdata: massa = 114 kg
diameter = 0,7 m
skalfaktor
α_L = 2,33 (till en 9,0 kg -modellboj)



Figur 7.3.3 Vy av NE-boj.



Figur 7.3.4 Skiss på NE-boj

dämpkoefficient	ε	= 0,20
masskoefficient	μ	= 0,61
resonansfrekvens	f_o	= 0,72 (utan stång)
added mass	a	= 69,6 kg
fjäderkonstant	c	= 3775 N/m
hydrodyn. dämpning	b_o	= 102 Ns/m

Stången

Stången består av ett aluminiumrör, ø 100 och är 8,2 m lång. I bottenänden är ett mothåll i form av en skiva 1000x1000 mm fäst Skivan är försedd med 60 st hål, ø 30. Stången har fjädrande ändlägesstopp så att bojens maximala dubbelamplitud är 3,0 m. Kuggstången är skruvad på stången. Den är gjord i delerin.

Mätsystem på bojen

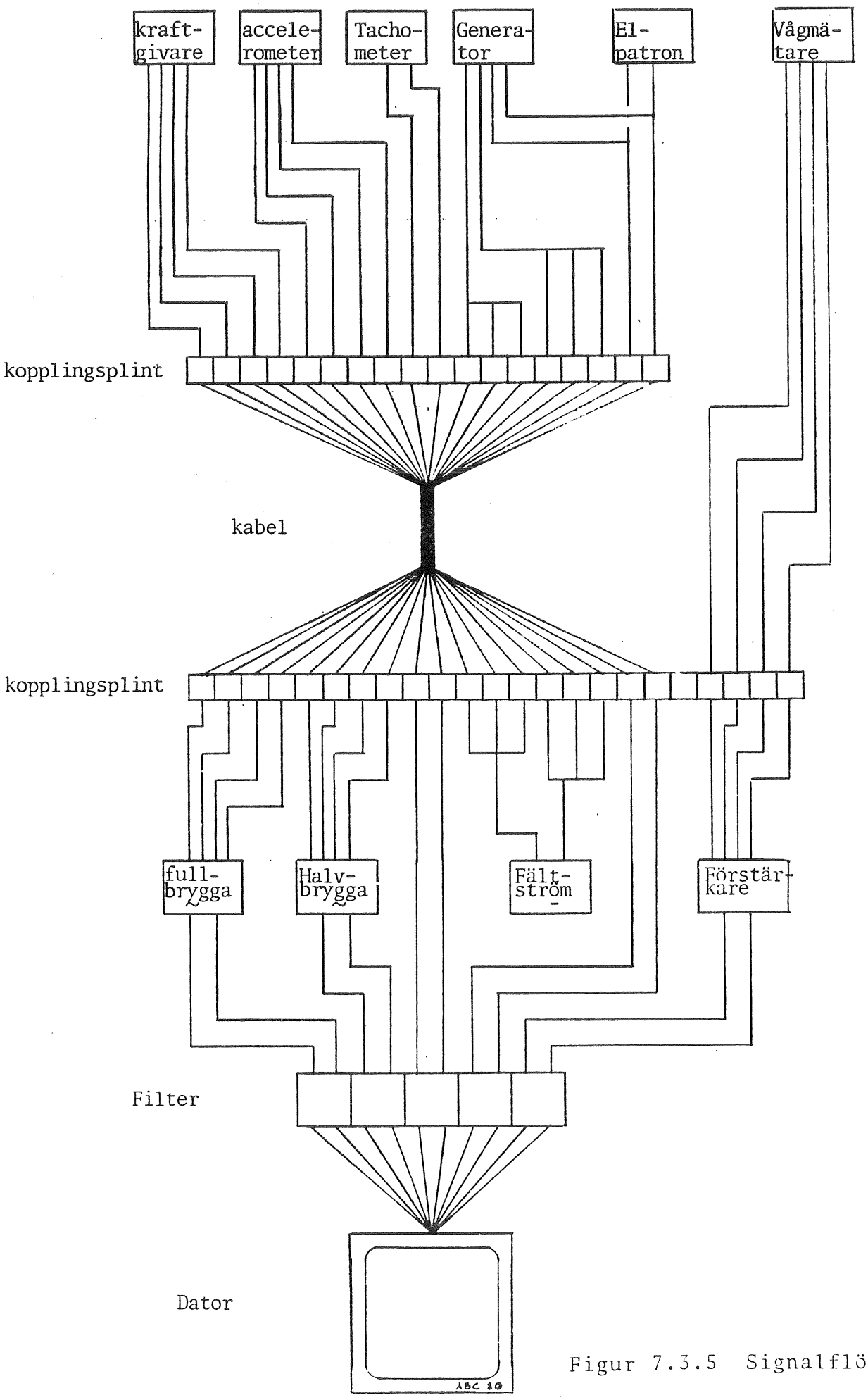
Stångkraften har mätts enligt figur 7.3.4. Kalibrering gjordes genom att kugghjulet låstes och vikter hängdes på stången.

Bojens acceleration mättes av en accelerometer typ SWEMA. Kalibreringen gjordes på land. Relativhastigheten mättes med en tachometer kopplad till kugghjulsaxeln. Utväxlingen är 3:1 (tacho : axel). Generatorspänningen mättes via en spänningsdelare. Delningen var 1:12,6. Samtliga signaler skickades till land mha en signalkabel med 18 ledare. Generatorn är en vanlig 28-volts lastbilsgenerator.

Signalbehandling

Kraftgivarsignalen erhölls via en 10-volts fullbrygga (växelströmsbrygga), accelerometersignalen via en 10-volts halvbrygga (växelströmsbrygga). Vågsignalen omvandlades till en analog signal och förstärktes 10 ggr. Samtliga signaler (kraft, spänning, våg, tacho och acceleration) lågpassfiltrerades innan de digitaliserades.

Mätdatainsamlingen sköttes av en ABC 80. Samtliga signaler samplades 5 ggr per sekund. Varje mätserie består av 1024 punkter per kanal. Signalflödesschema visas i figur 7.3.5.



Figur 7.3.5 Signalflödesschema.

7.3.4 Resultat

Allmänt

Analys av mätdata kan göras dels i tidsplanet dels i frekvensplanet. I tidsplanet får man endast medelvärden över hela tidsserien och behöver således en stor mängd mätserier för att kunna dra tillfredsställande generella slutsatser. I frekvensplanet avslöjas bojens egenskaper snabbare och man kan klara sig med ett mindre antal mätserier. Men analys i frekvensplanet innebär alltid att mätdata extrapoleras och risken för fel i beräkningarna är stor. Frekvensanalys är dessutom teoretiskt betydligt mer komplicerat än tidsserieanalys.

Mätningarna sommaren 1981 har inte gett ett tillräckligt antal mätserier. Det har visat sig vara mycket svårt att åstadkomma tillfredsställande signalöverföring. Accelerometersignalen har endast fungerat vid ett fåtal mätningar. Generatorn har dels varit felaktigt dimensionerad dels orsakat problem med jordning. Kraftgivarsignalen har varit bra, likaså tachometersignalen och vågsignalen. Detta innebär att vi har 35 mätserier med bra kraft-, tacho- och vågsignaler. Accelerometersignalen har fungerat för 6 mätserier.

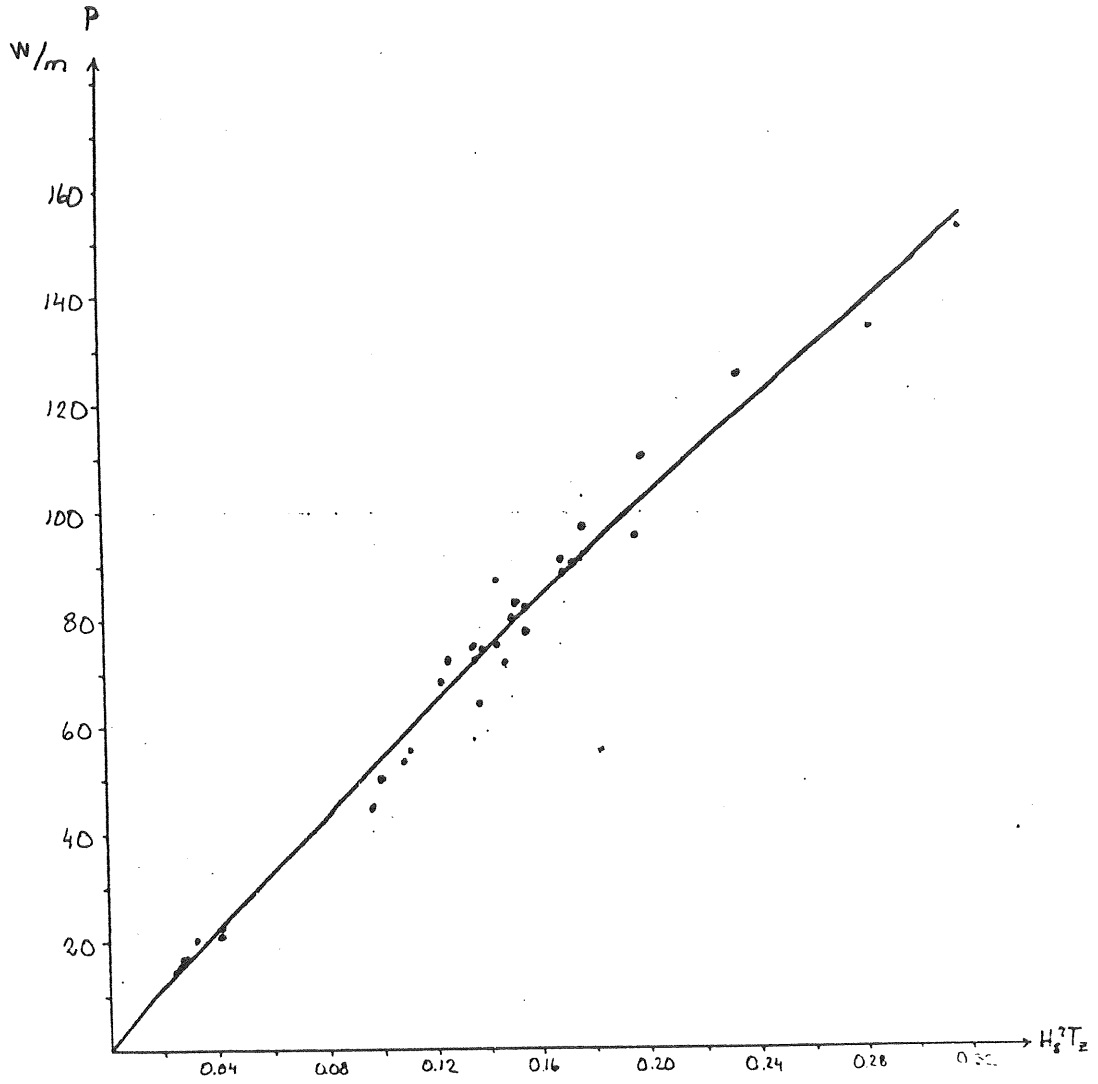
Arbetet med utvärderingen är ännu inte avslutat, framförallt map frekvensanalysen. Utvärderingen kommer att presenteras i en separat rapport.

Vågeffekt

Vågeffekten i Lygnern kan enligt försöken överslagsmässigt beräknas ur:

$$P = 0{,}53 \cdot H_s^2 \cdot T_z \quad W/m \qquad \ldots(7.3.1)$$

I figur 7.3.6 visas vågeffekten som funktion av $H_s^2\ T_z$.



Figur 7.3.6 Vågeffekten i Lygnern som funktion av H_s^2 T_z.

Tidsserieanalys

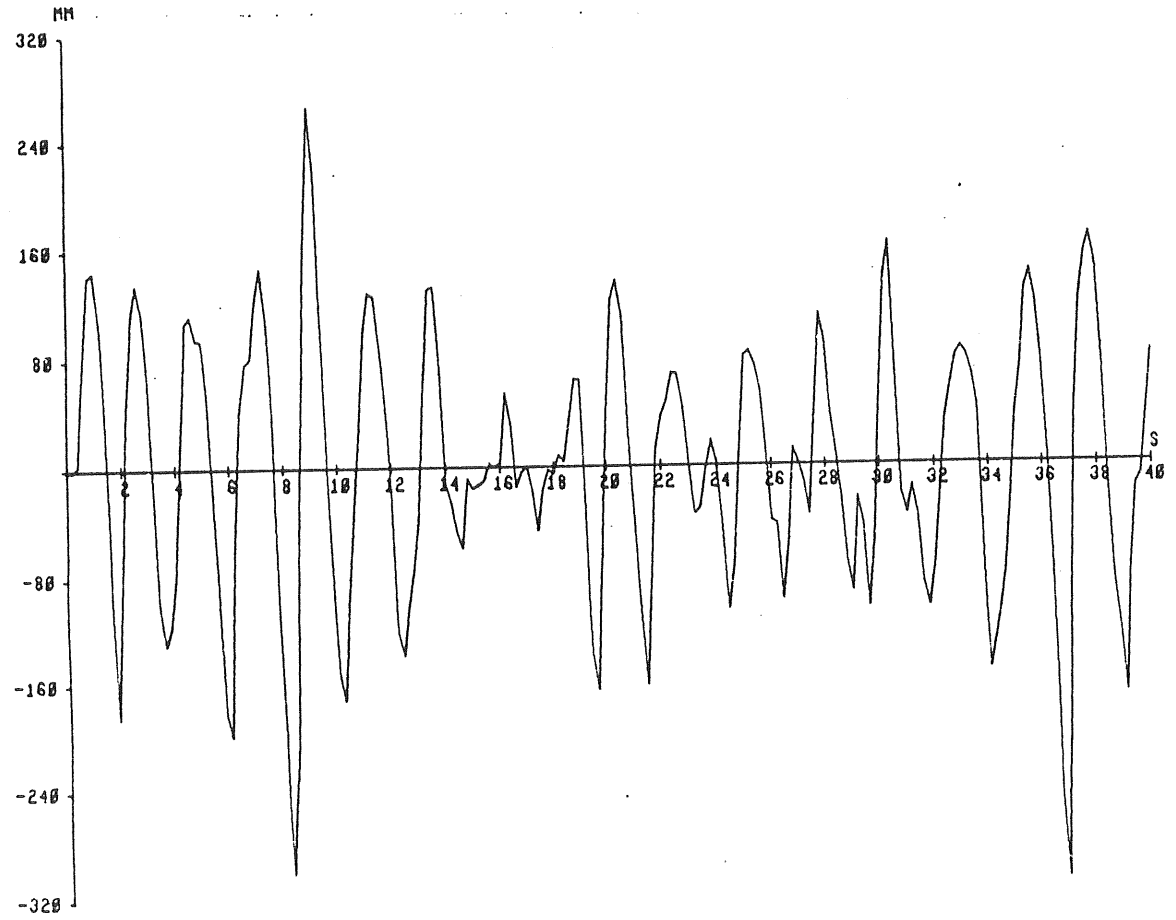
Tidsserieanalys har gjorts på kraft-, relativhastighets- och vågsignalerna.

Den hydrodynamiskt upptagna effekten är lika med kraft · hastighet, en multiplikation som går utmärkt att göra i tidsplanet. Vågeffekten måste tas via FFT av tidsserien, alltså en frekvensanalys. Detta är enda sättet att räkna ut medeleffekten i vågorna på. Verkningsgraden för tidsserien fås sedan som kvoten mellan medel-

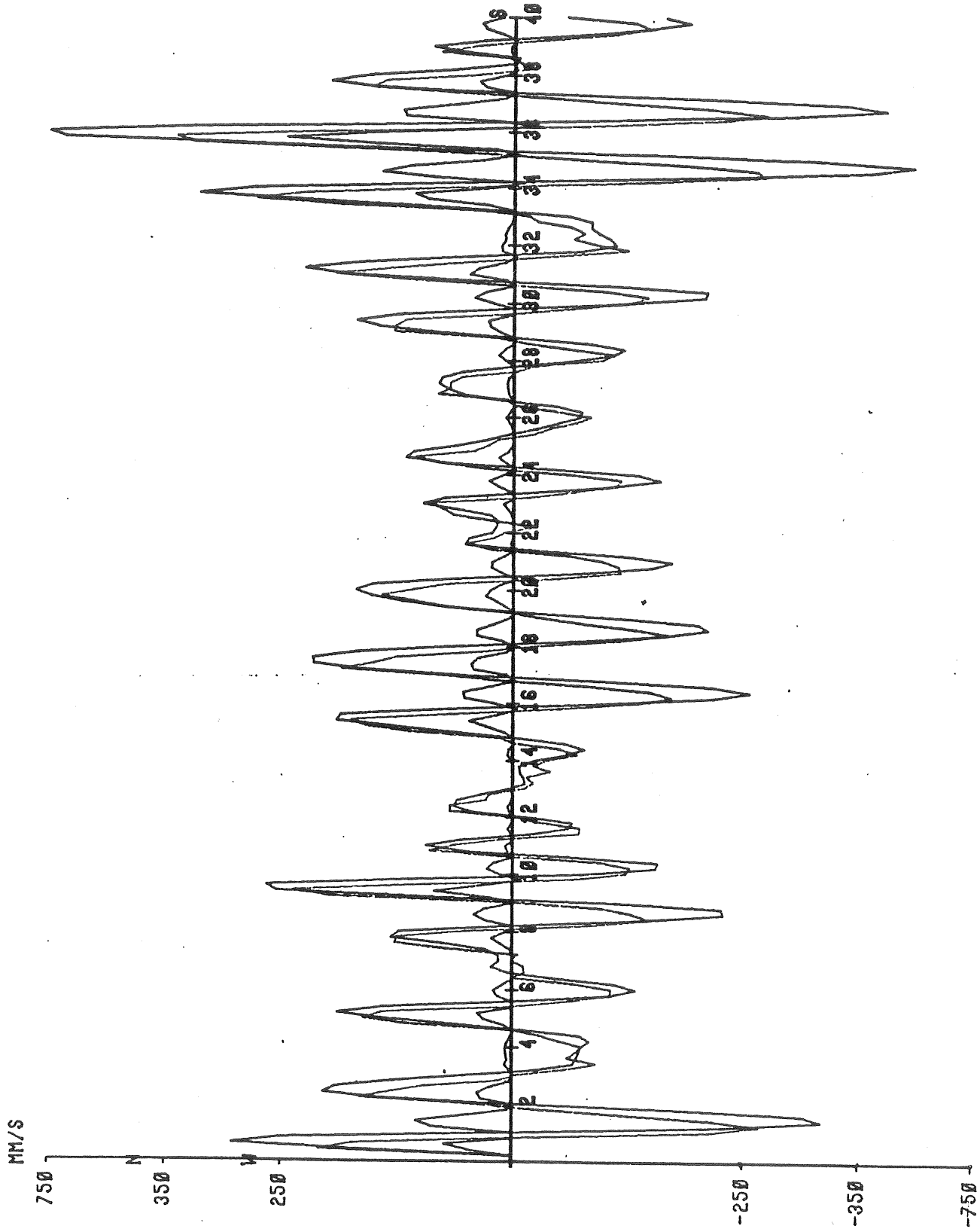
bojeffekt och medelvågeffekt (räknat på bojbredden).

I figur 7.3.7 till 7.3.12 visas exempel på tidsserier. Detta exempel är från en av de mätningar där alla signaler har fungerat. Relativläget fås mha integration av relativhastigheten. Bojhastighet och bojläge integreras ur bojaccelerationen.

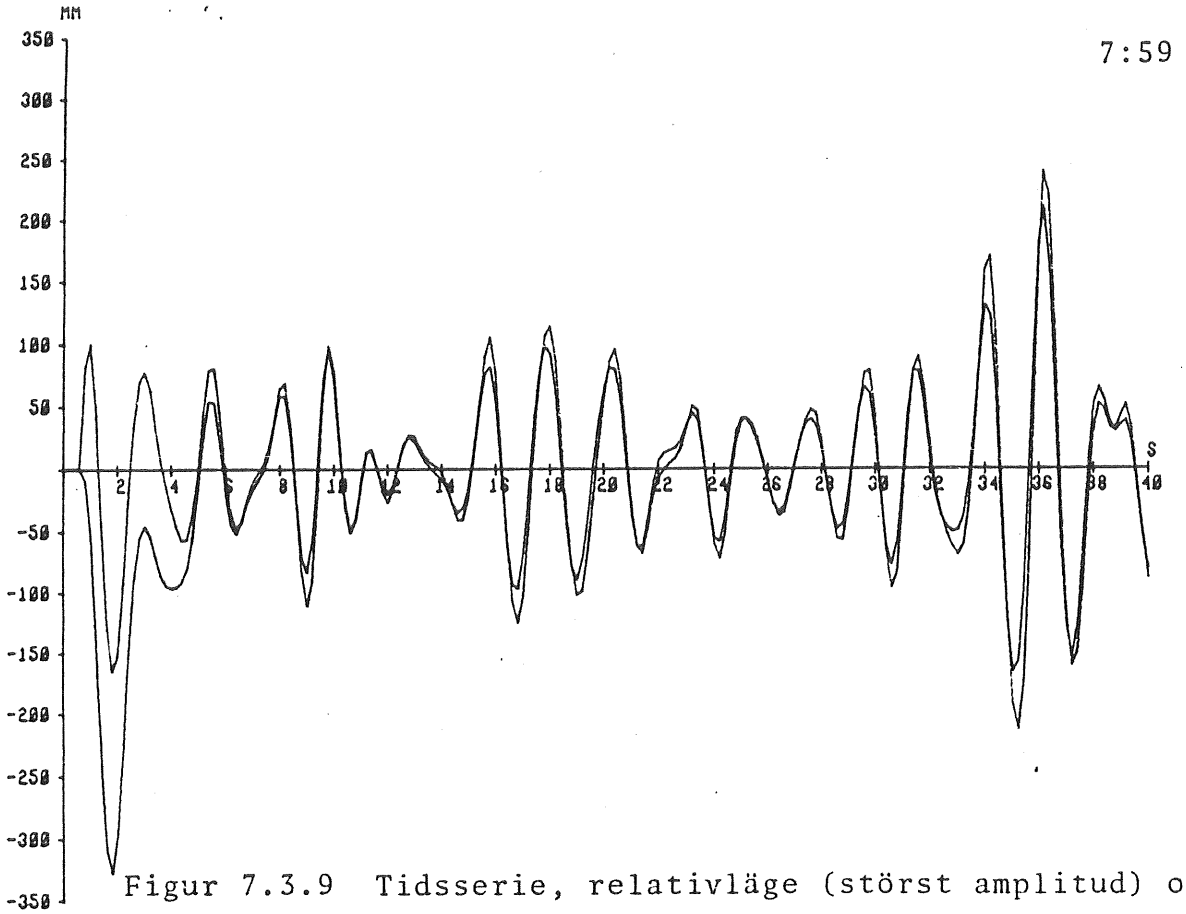
Stångrörelsen fås som skillnaden mellan relativrörelsen (bojstång) och bojrörelsen.



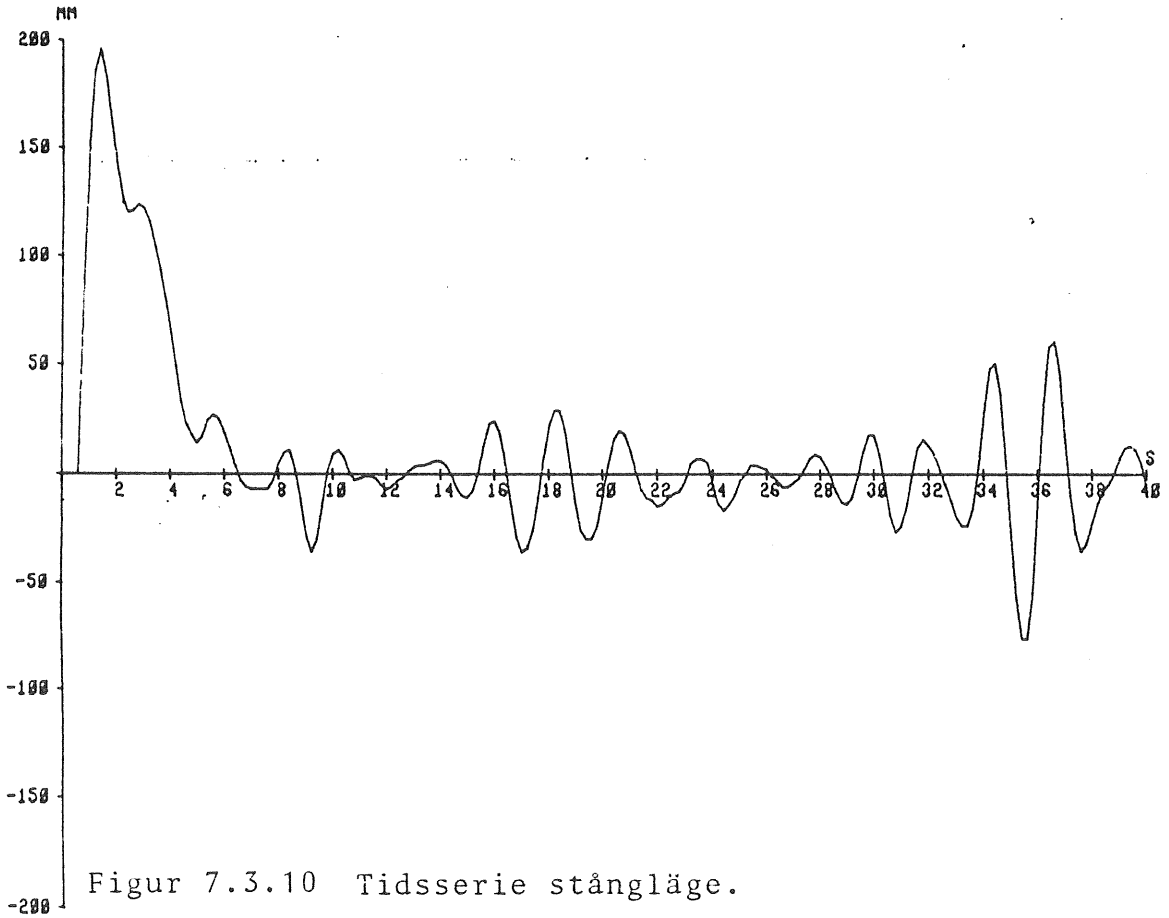
Figur 7.3.7 Tidsserie vågor.



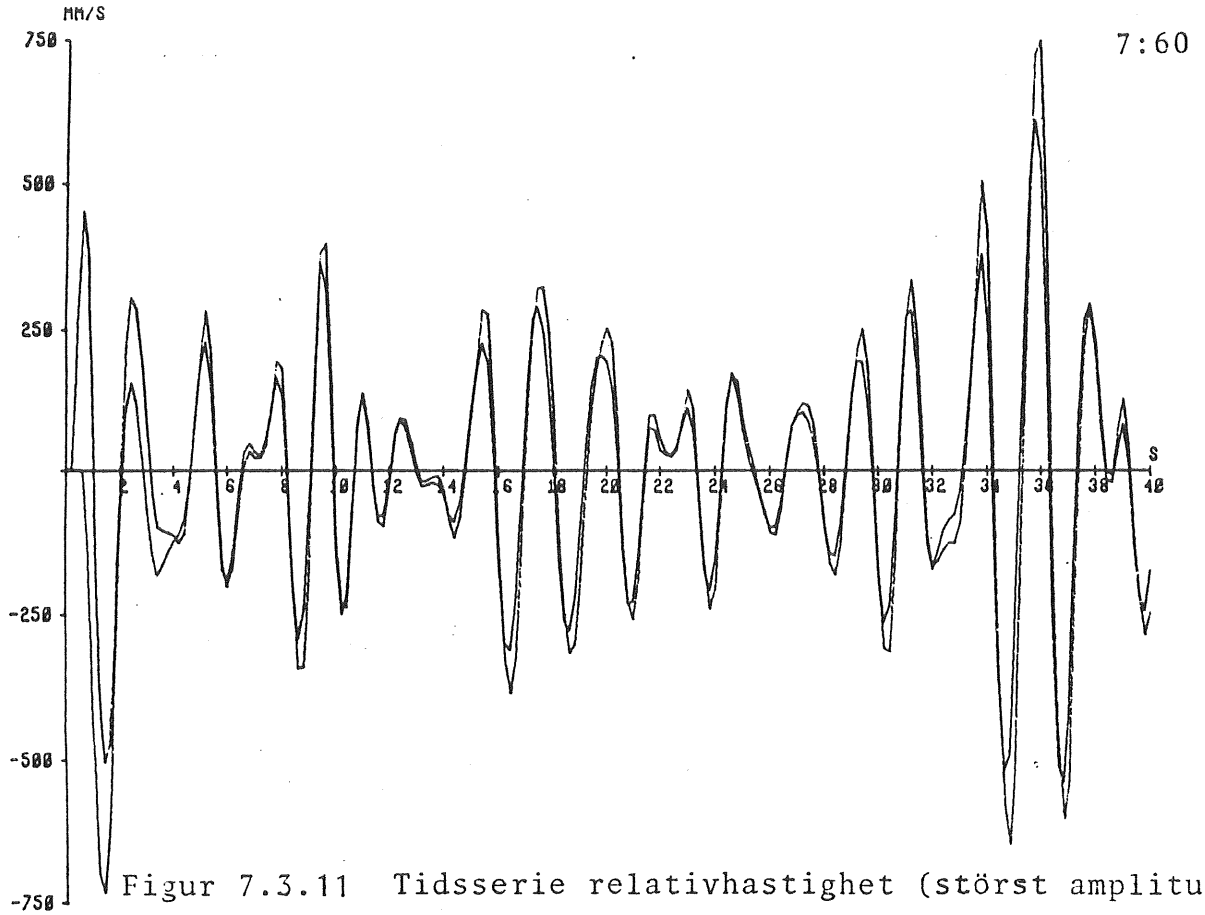
Figur 7.3.8 Tidsserie relativhastighet (största amplituden), kraft (kurvan i mitten) och effekt (lägsta kurvan).



Figur 7.3.9 Tidsserie, relativläge (störst amplitud) och bojläge (minst amplitud).



Figur 7.3.10 Tidsserie stångläge.



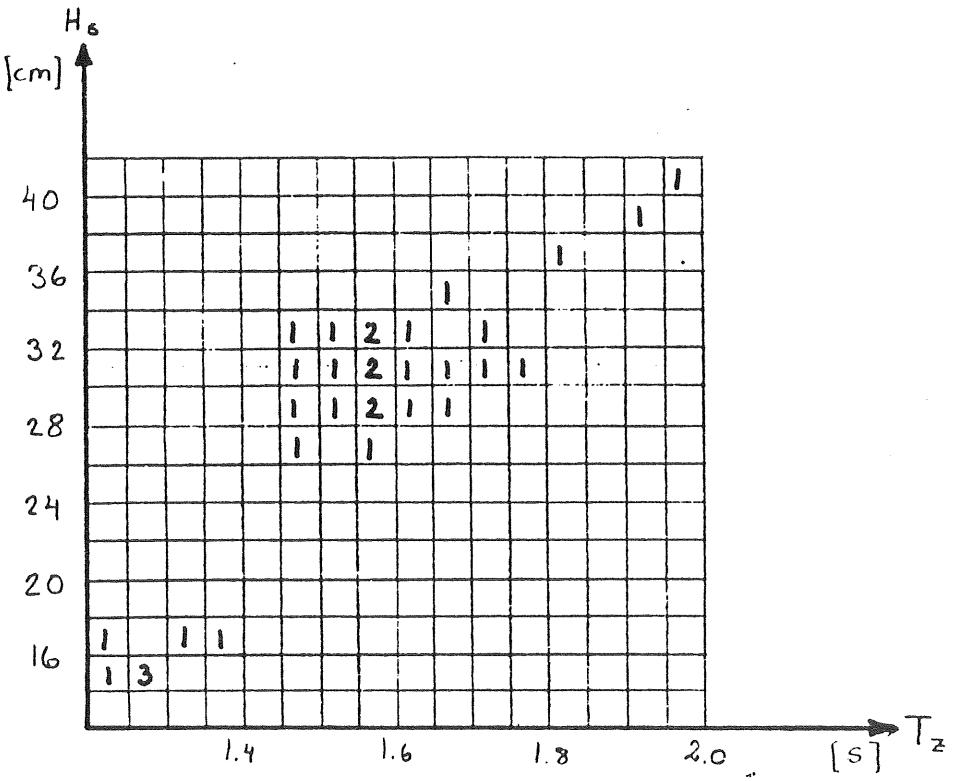
Figur 7.3.11 Tidsserie relativhastighet (störst amplitud) och bojhastighet (minst amplitud)

Figur 7.3.12 Tidsserie stånghastighet.

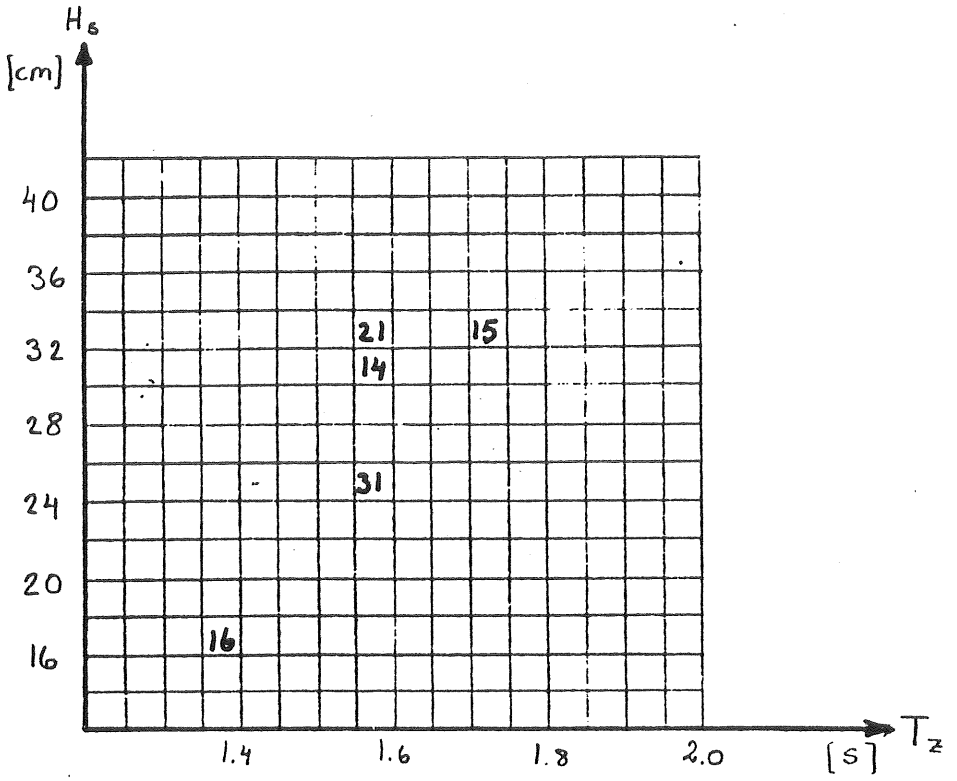
I scatterdiagrammen figur 7.3.13 till 7.3.19 visas antalet observationer och verkningsgraderna vid olika fältström (dämpning). I figur 7.3.20 till 7.3.23 sammanfattas scatterdiagrammen. I figur 7.3.24 slutligen visas verkningsgraden som funktion av fältströmmen. Här har för varje fältström samtliga tidsserier adderats och ett medelvärde på verkningsgraden bildats.

Den enda slutsats som vi för närvarande kan dra av tidsserieanalysen är att eftersom även stången rör sig, relativhastigheten proportionellt sett minskar med ökad dämpning. Detta medför att den hydrodynamiska verkningsgraden är relativt konstant trots att dämpningen varierar.

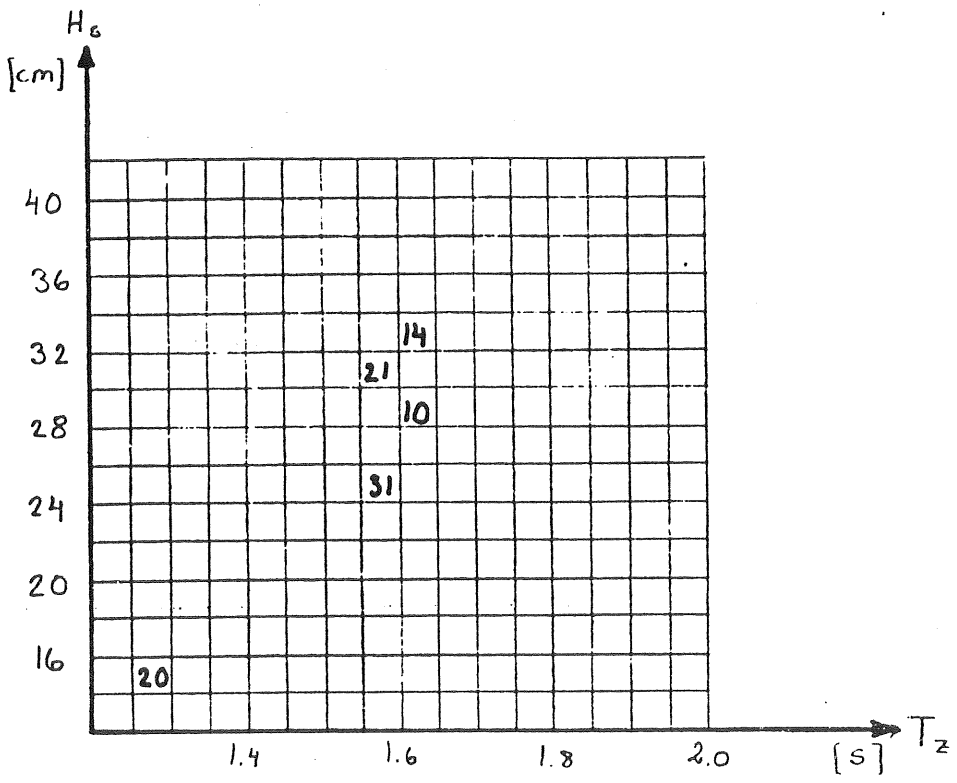
Antagligen har alltså skivan varit för liten för att åstadkomma tillräckligt mothåll mot bojrörelsen.



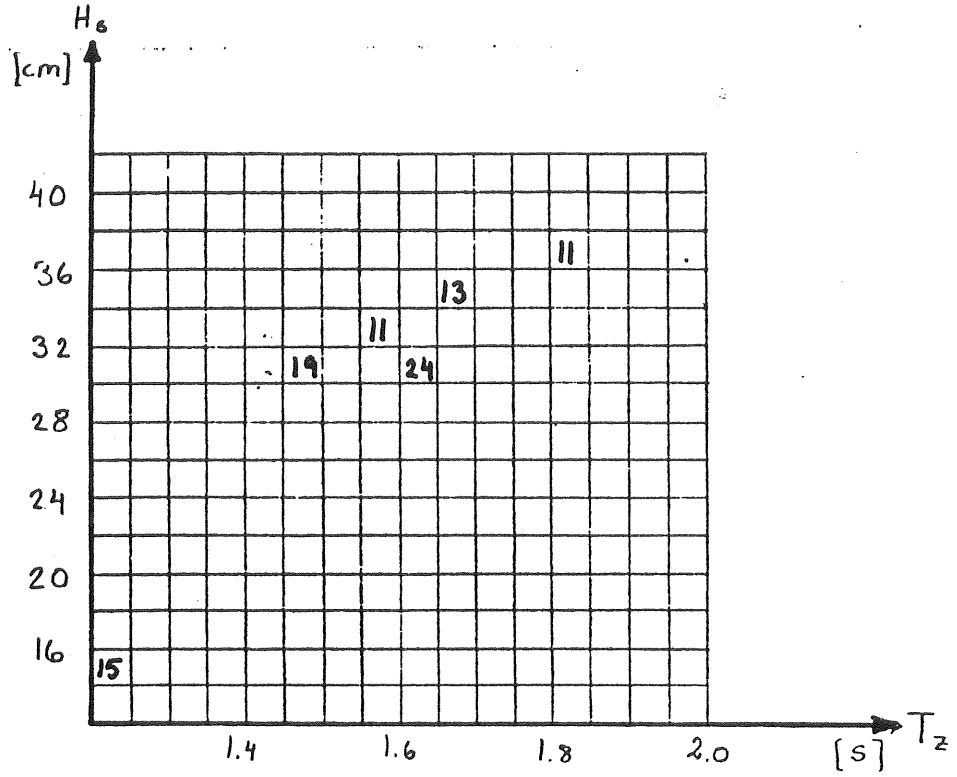
Figur 7.3.13 Antal registreringar.



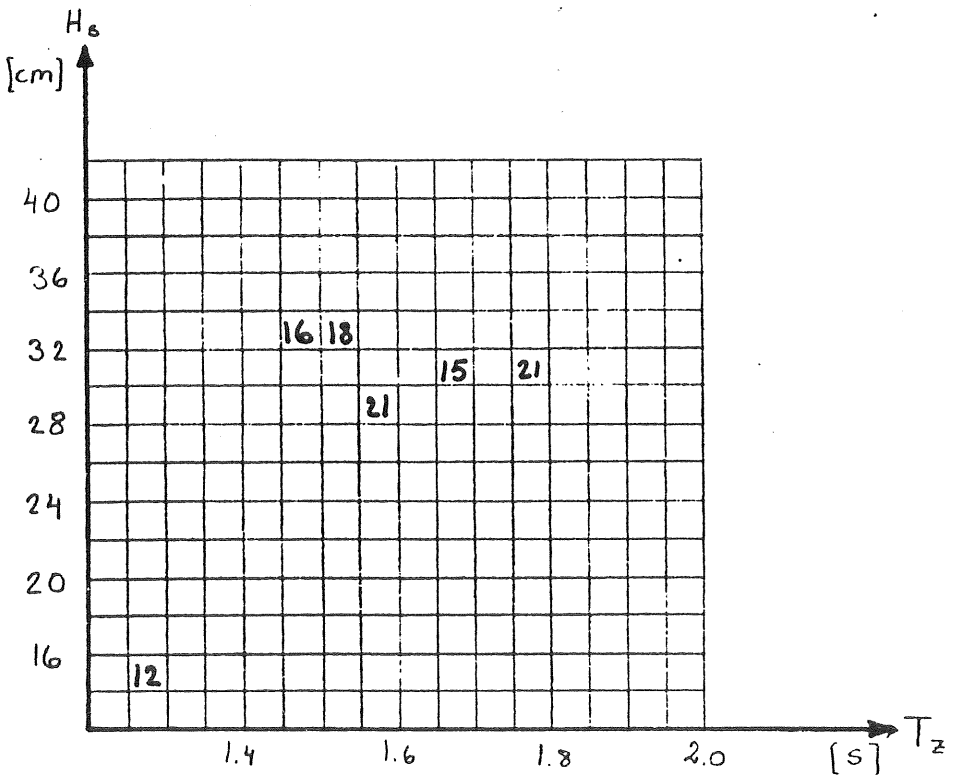
Figur 7.3.14 Verkningsgrad för 0,12 A dämpning.



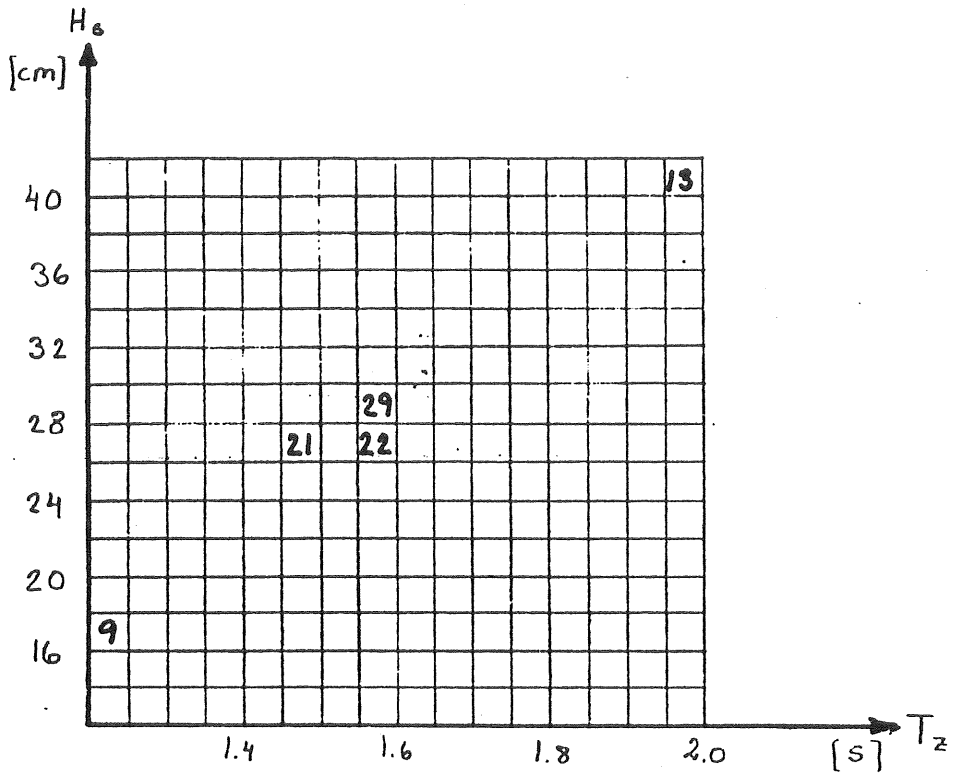
Figur 7.3.15 Verkningsgrad för 0,27 A dämpning.



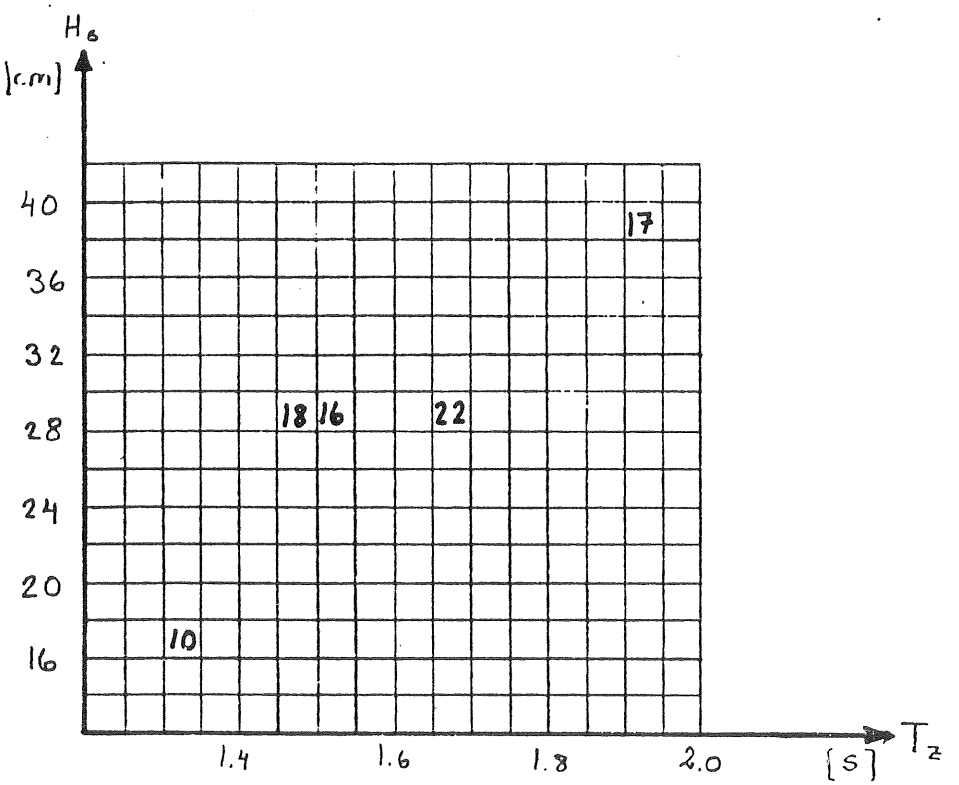
Figur 7.3.16 Verkningsgrad för dämpning 0,52 A.



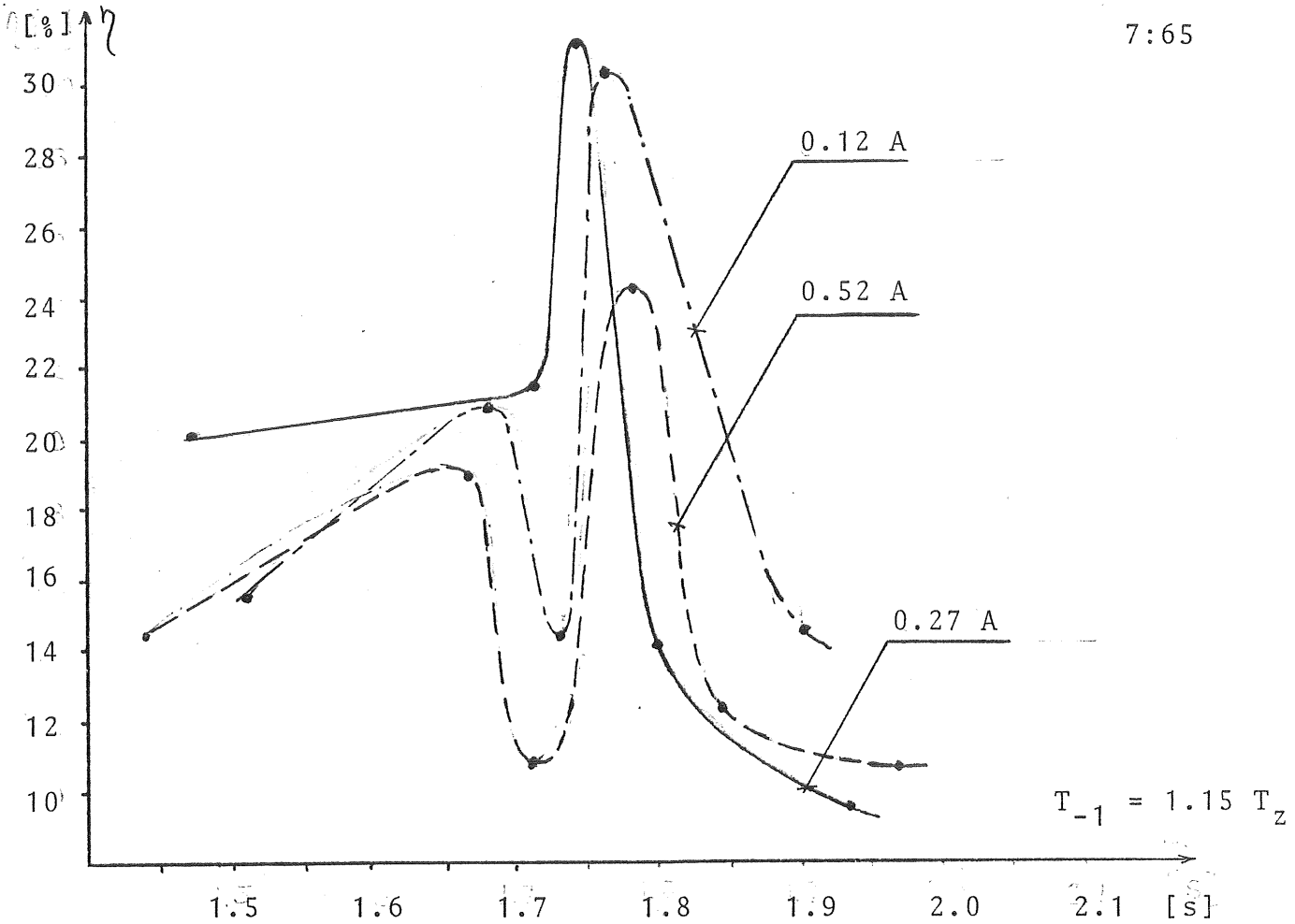
Figur 7.3.17 Verkningsgrad för dämpning 0,77 A.



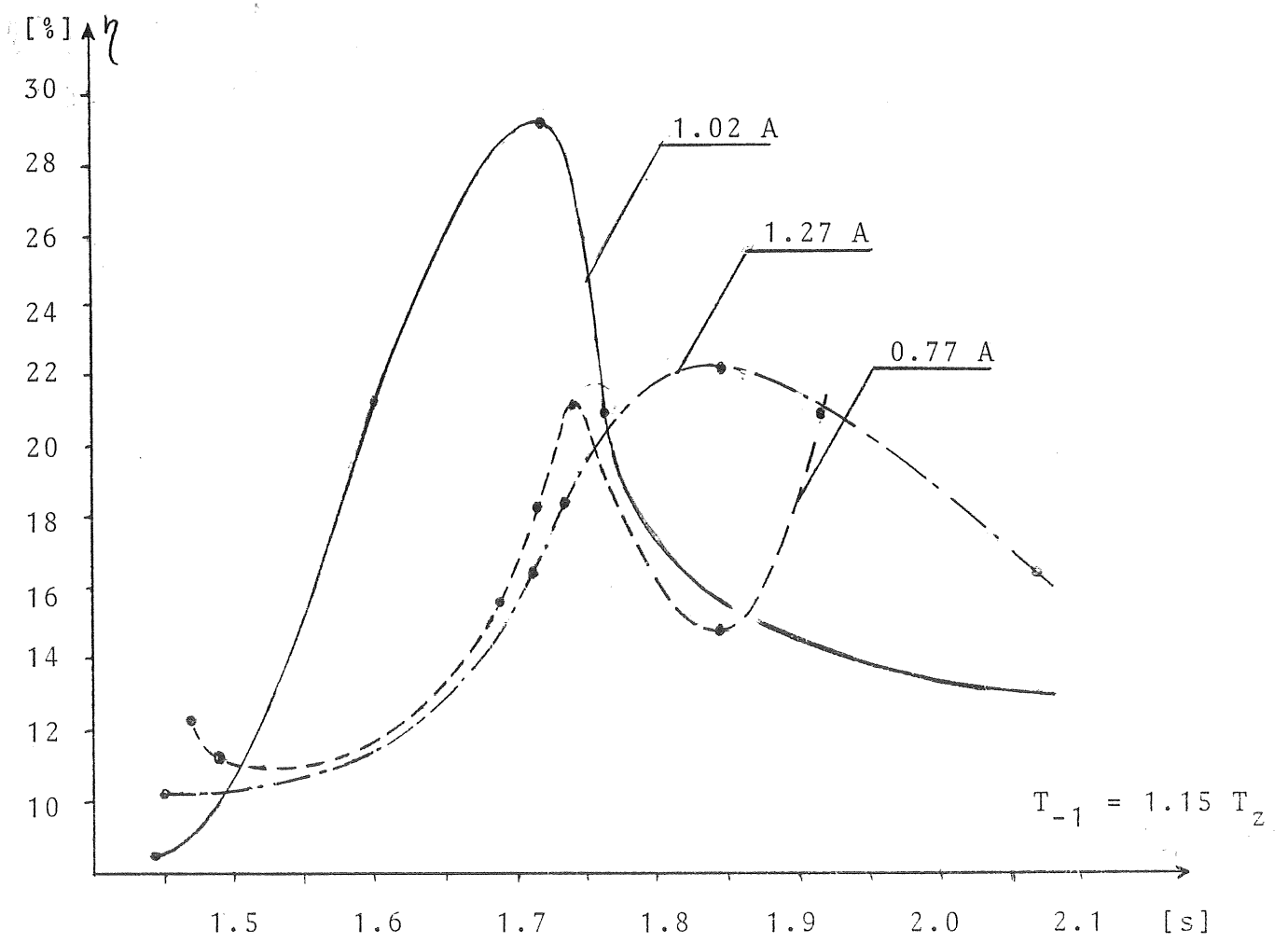
Figur 7.3.18 Verkningsgrad för 1,02 A dämpning.



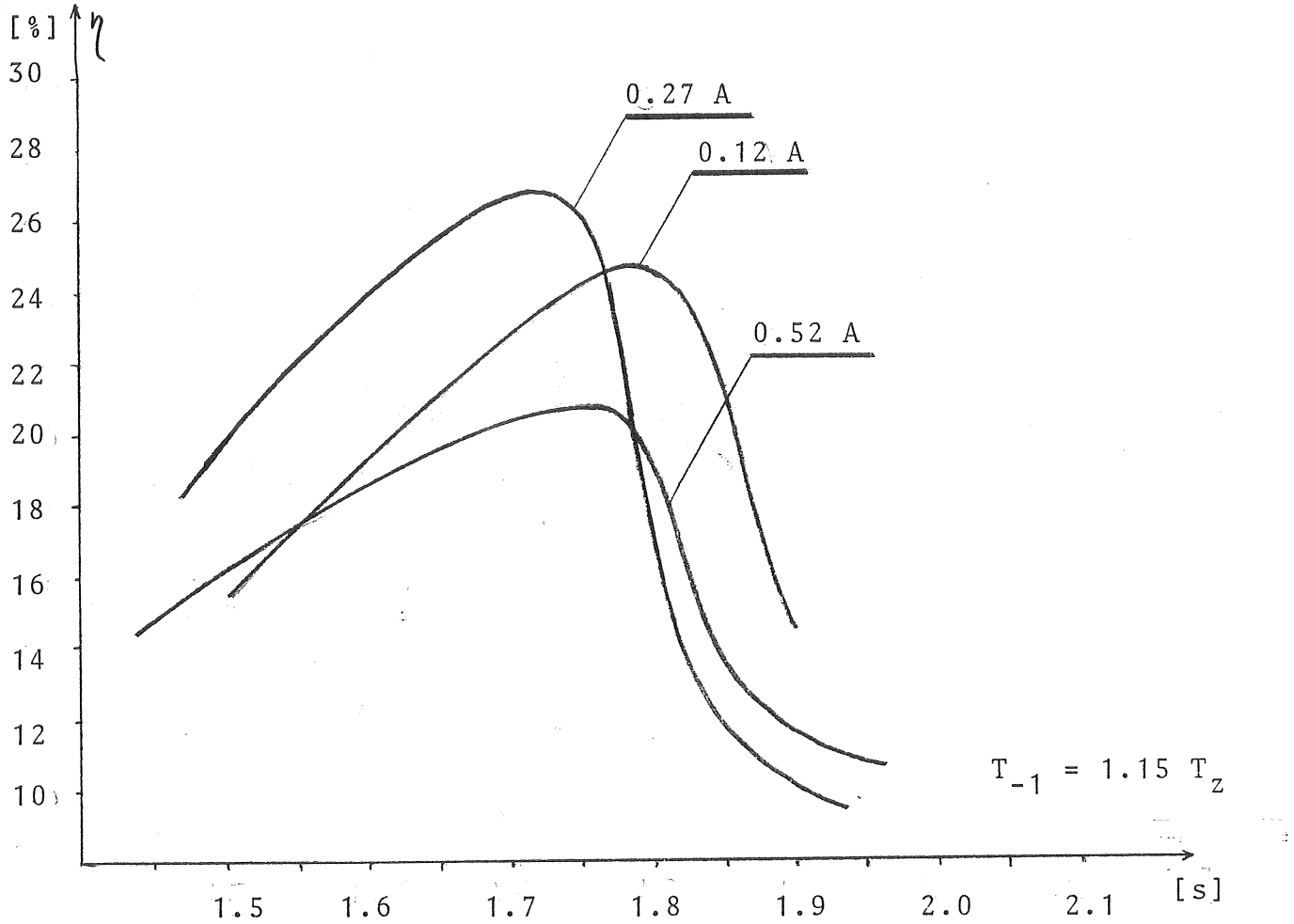
Figur 7.3.19 Verkningsgrad för 1.27 A dämpning.



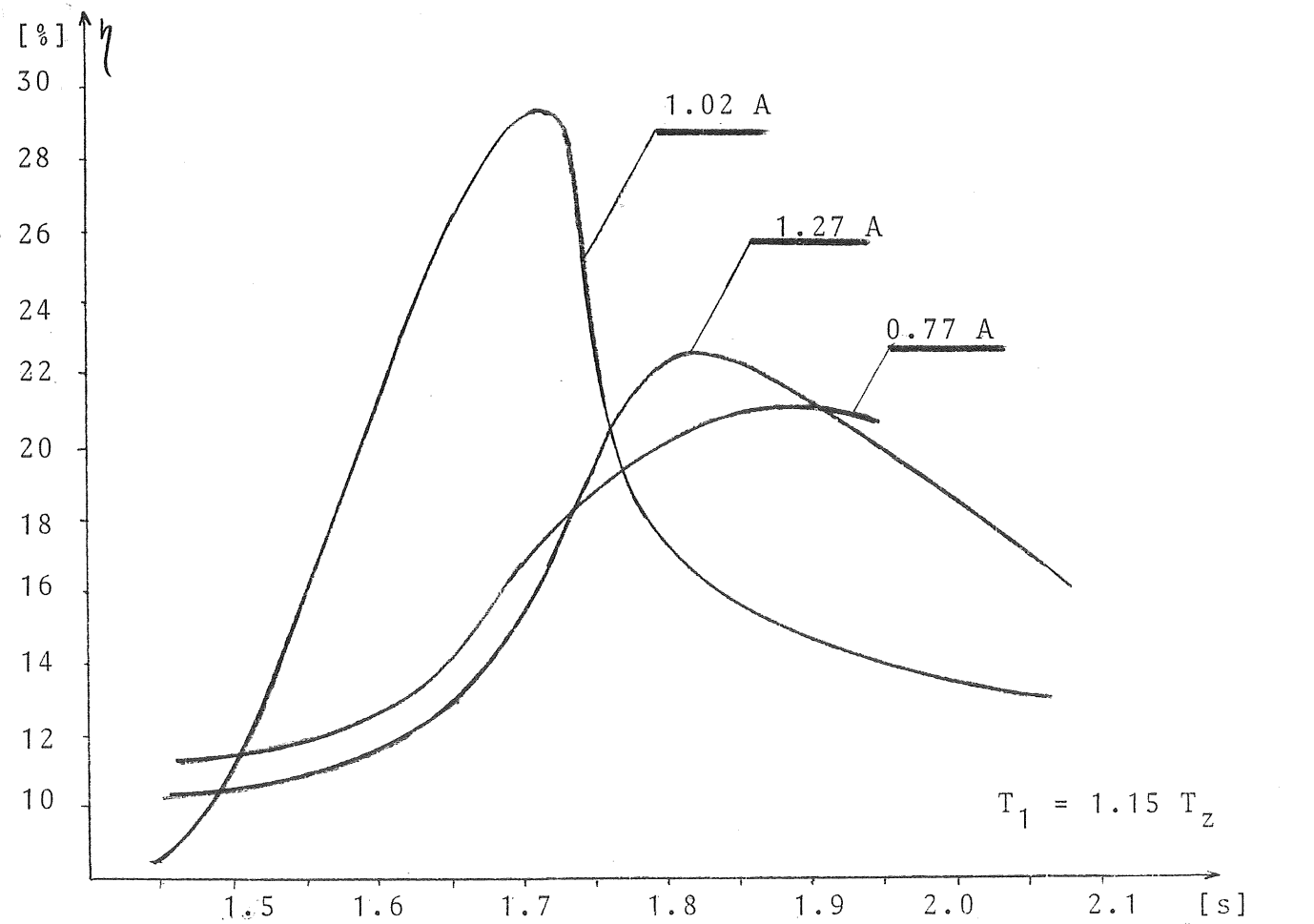
Figur 7.3.20 Verkningsgradskurvor ur tidsserier.



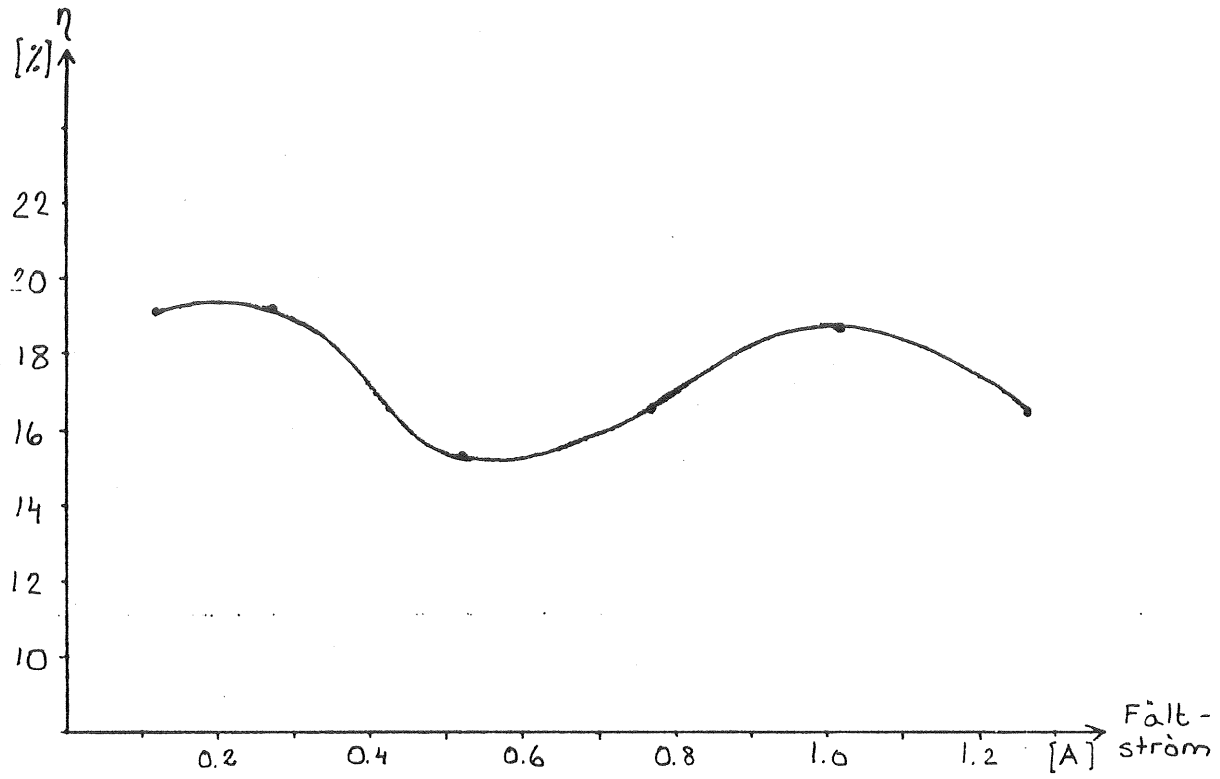
Figur 7.3.21 Verkningsgradskurvor ur tidsserier.



Figur 7.3.22 "Glättade" verkningsgradskurvor.



Figur 7.3.23 "Glättade" verkningsgradskurvor.



Figur 7.3.24 Verkningsgraden som funktion av fältströmmen, för samtliga tidsserier.

Frekvensanalys

Även frekvensanalysen gjordes på kraft-, relativhastighets- och vågsignalerna.

Frekvensanalysen görs genom att tidsseriern analyseras med en Fast Fourier Transform (FFT). Detta innebär kort sagt att tidsserien delas upp i sinusformade frekvenskomponenter.

Som resultat får man ett spektrum med frekvens på x-axeln och insignalens enhet i kvadrat · sekund på y-axeln.

Vågorna har formen

$$y = a \sin \omega t \qquad \ldots(7.3.2)$$

Efter FFT-behandling hamnar en sådan sinusvåg med en "spik" vid frekvensen ω. När bojens hydrodynamiska effekt skall FFT-behandlas kommer dock dess "spik" på dubbla frekvensen 2ω och får $W^2 \cdot s$ som enhet. Det beror på att vi i tidsplanet multiplicerar enligt:

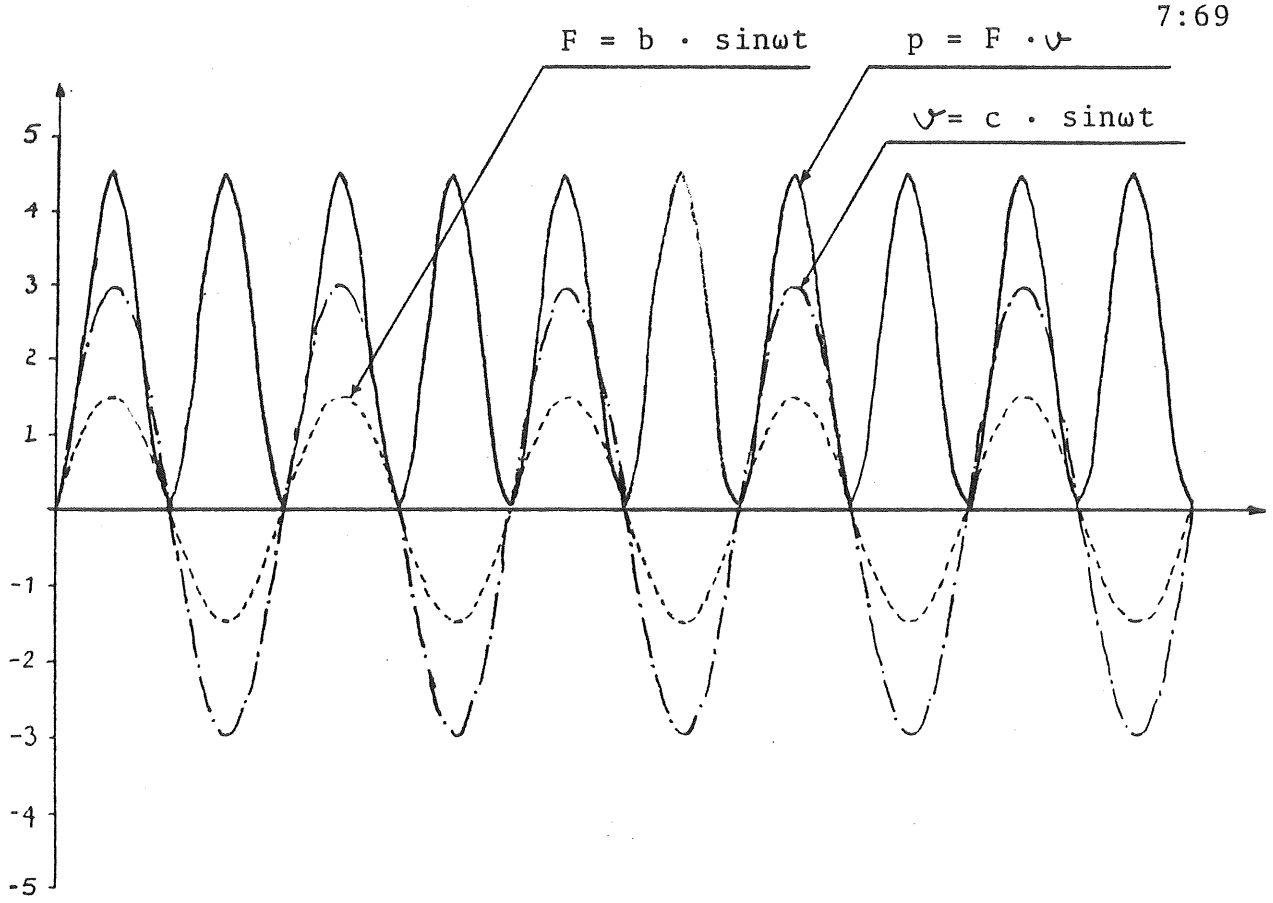
$$P = F \cdot v = b \cdot \sin^2 \omega t = \tfrac{1}{2} bc \, (1 - \cos 2\omega t) \qquad \ldots(7.3.3)$$

När sedan verkningsgradsspektrum skall beräknas uppstår svårigheter eftersom våg- respektive bojspektrum ligger på olika frekvenser.

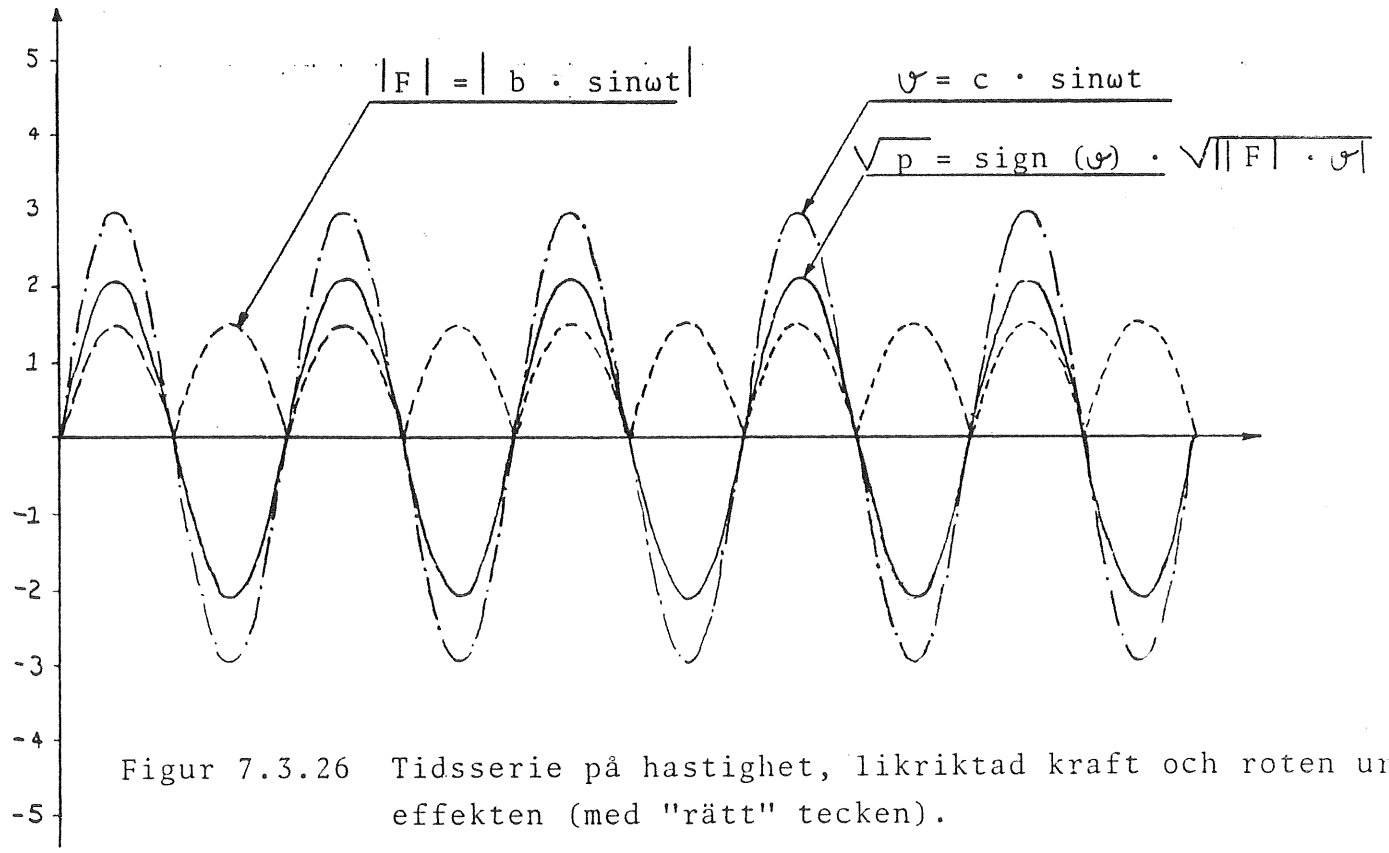
För att komma runt detta problem kan man dra kvadratroten ur effekten i tidsplanet enligt:

$$\text{"}\sqrt{P}\text{"} = \text{SIGN}\,(v) \cdot \sqrt{|F| \cdot |v|} \qquad \ldots(7.3.4)$$

I figur 7.3.25 till 7.3.26 illustreras förfarandet.



Figur 7.3.25 Tidsserie på kraft, hastighet och effekt.



Figur 7.3.26 Tidsserie på hastighet, likriktad kraft och roten ur effekten (med "rätt" tecken).

Detta innebär dels att effektens frekvenser halveras, och "flyttas" till vågornas frekvenser dels att bojeffektspektrum får rätt enhet (W·s). För samtliga tidsserier som bearbetats på detta sätt överensstämmer effektens medelvärde ur spektrum med dess medelvärde ur tidsserien. Detsamma gäller variansen.

Den innebär kortfattat att man bildar kvoten mellan de komplexa spektrumen enligt $\frac{Y^* \cdot X}{X \cdot X^*}$. Vi har ännu inte utarbetat någon korseffektrutin som fungerar tillfredställande. Ett försök att komma från detta utgör de medelspektrum som tagits fram för varje dämpning. De visas i figur 7.3.27 till 7.3.44. I tabell 7.3.1 visas en sammanställning av medelvärden för varje fältström/dämpning.

Även efter en frekvensanalys, som dock inte är klar, kan man alltså dra slutsatsen att bojens energiupptagningsförmåga inte ändras så mycket när fältströmmen varieras, vilket som sagt torde orsakas av att stången/skivan rör sig mer, när dämpningen ökas.

Trots detta har NE-bojen en total hydrodynamisk medelverkningsgrad på 15-20% i naturliga vågor.

7.3.5 Slutsatser och erfarenheter

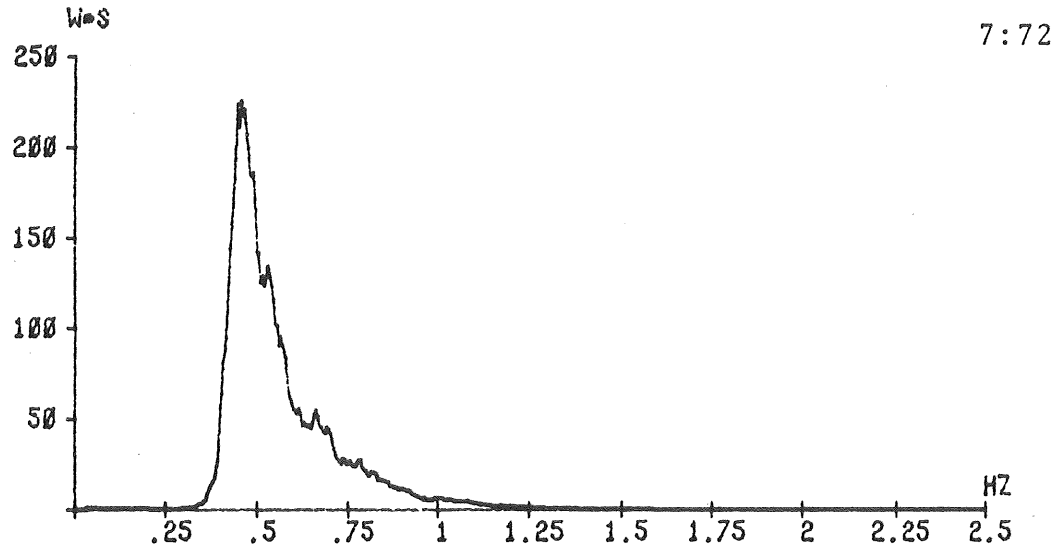
Vi har kunnat konstatera att den kopplade bojen har en hydrodynamisk medelverkningsgrad på 15-20% oberoende av vald yttre dämpning. Detta är överraskande. Vi hade räknat med att verkningsgraden skulle variera mer med dämpningen än den faktiskt gjort. Det beror dock sannolikt på att stången rör sig mer ju större dämpningen är.

Efter dessa försök har vi fått en rad erfarenheter. Vågorna ändras mycket snabbt 20-25%. En förändring av H_s (=ökning av effekten med ≈50%) på 5 minuter är inte ovanligt. Det betyder att det är svårt att få likadana vågsituationer för de olika dämpningarna.

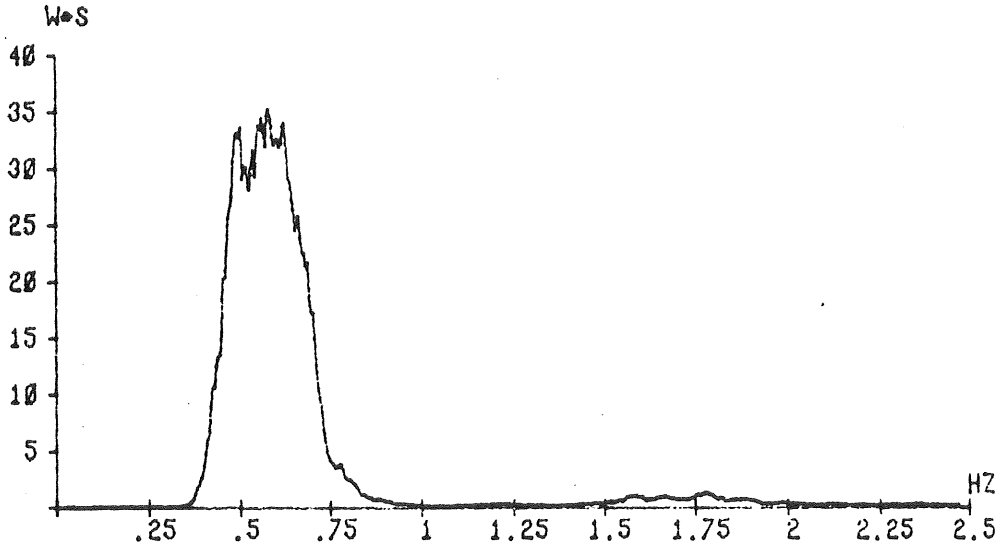
Jordningen har visat sig vara ett stort problem som är svårt att rätta till. En "strömläcka" uppstår lätt varvid en eller flera signaler kan störas. Störst problem med jordning orsakades av generatorn, vars hölje var kopplat till negativ pol. Jordproblemen för accelerometer och kraftgivare löstes genom att vi gjorde om likströmssignalen till en växelströmssignal.

Vi kan vidare konstatera att bojen borde ha varit större för att passa bättre till de vågspektrum vi fått fram. Bojens resonansfrekvens borde ha varit ≈0,5 Hz istället för som nu 0,72 Hz. Det betyder i sin tur att bojen borde ha haft radien ≈1,0 m istället för som nu 0,35 m.

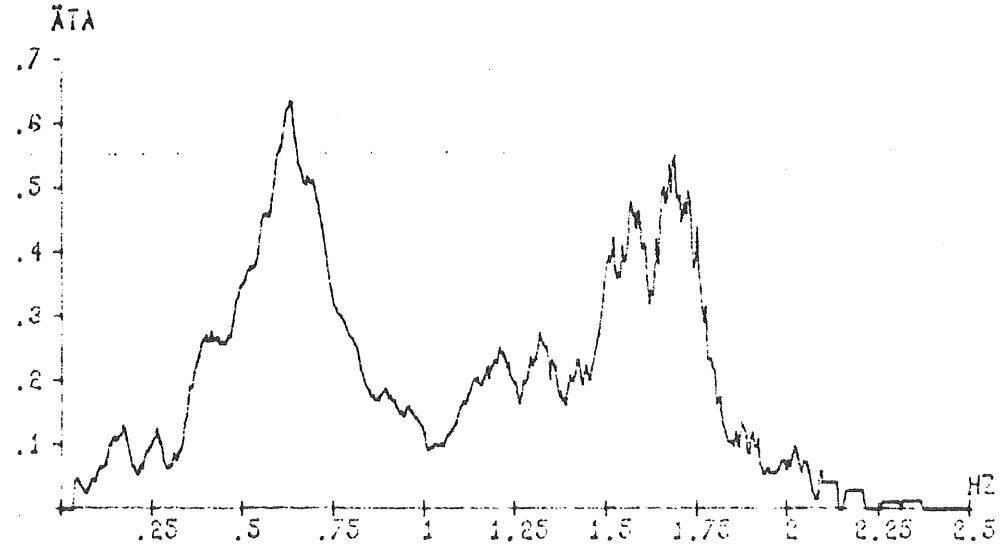
Sammantaget kan vi konstatera att bojen trots att den inte varit dimensionerad för de vågor vi mätt i har haft en bra verkningsgrad.



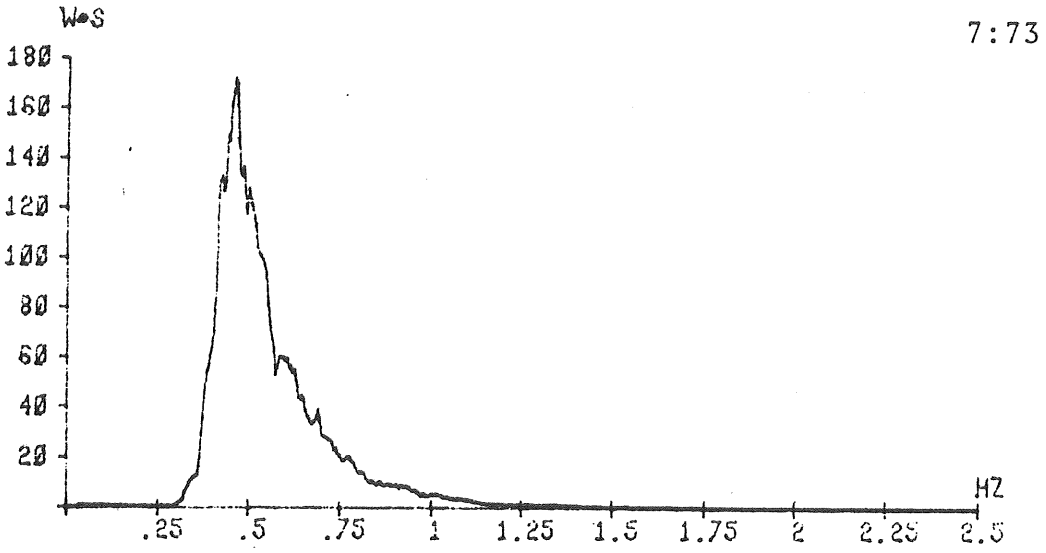
Figur 7.3.27 Vågeffektspektrum.



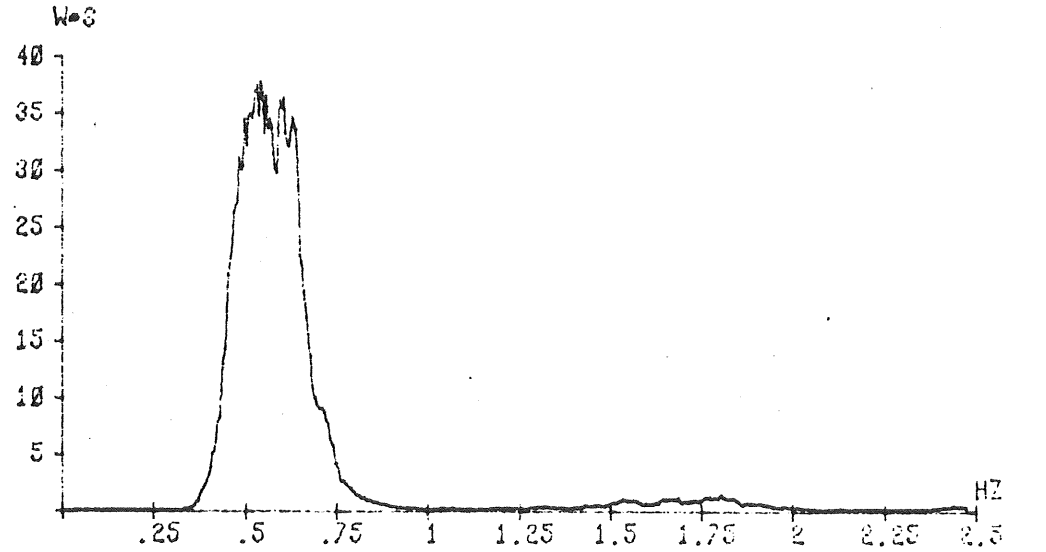
Figur 7.3.28 Bojeffektspektrum, 0.12 fältström.



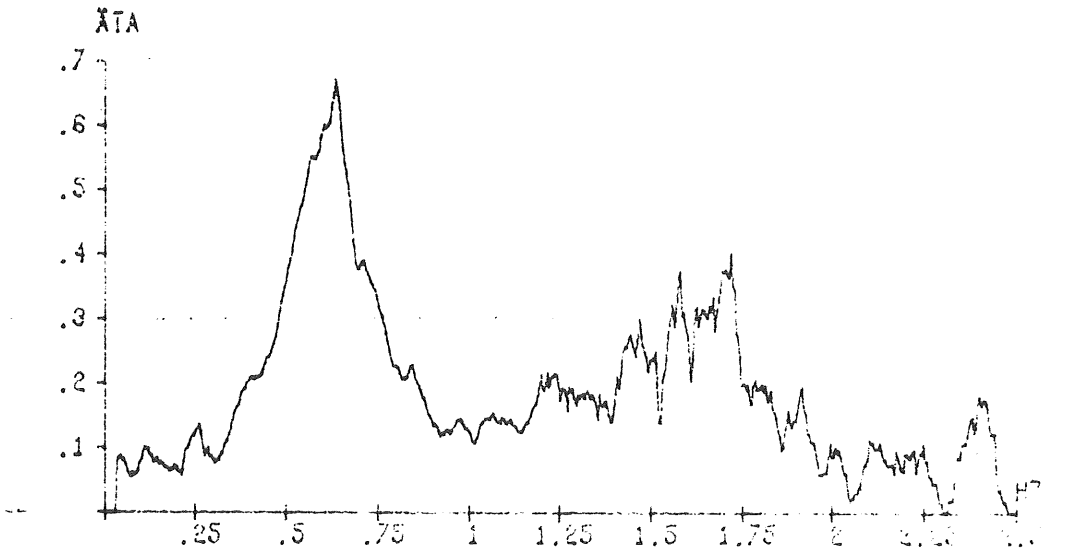
Figur 7.3.29 Verkningsgrad, 0,12 A fältström.



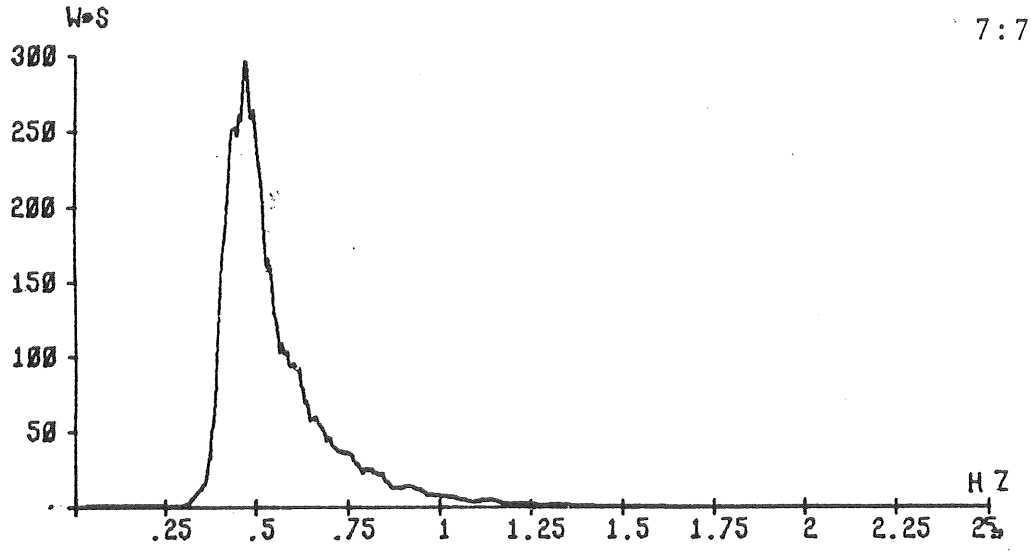
Figur 7.3.30 Vågeffektspektrum.



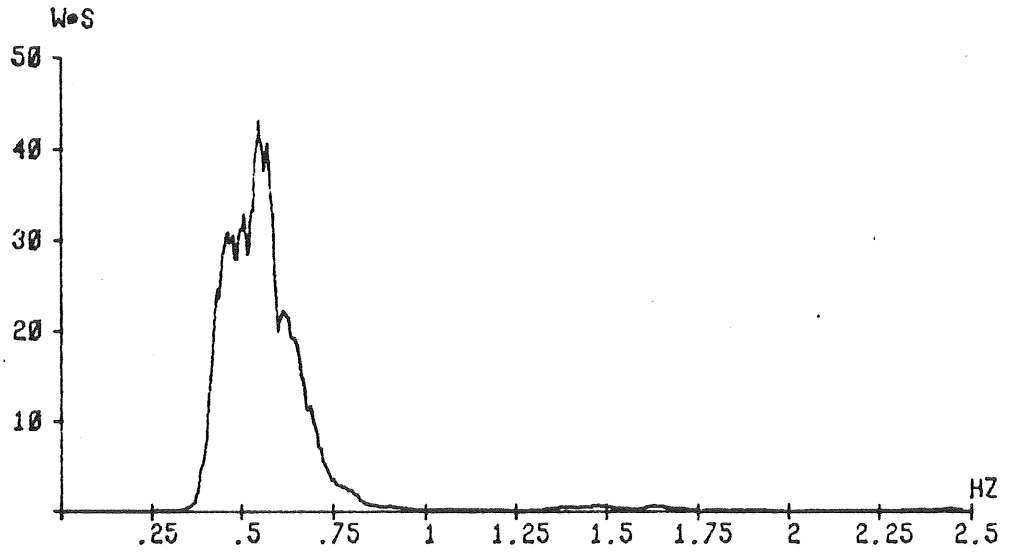
Figur 7.3.31 Bojeffektspektrum, 0,27 A fältström.



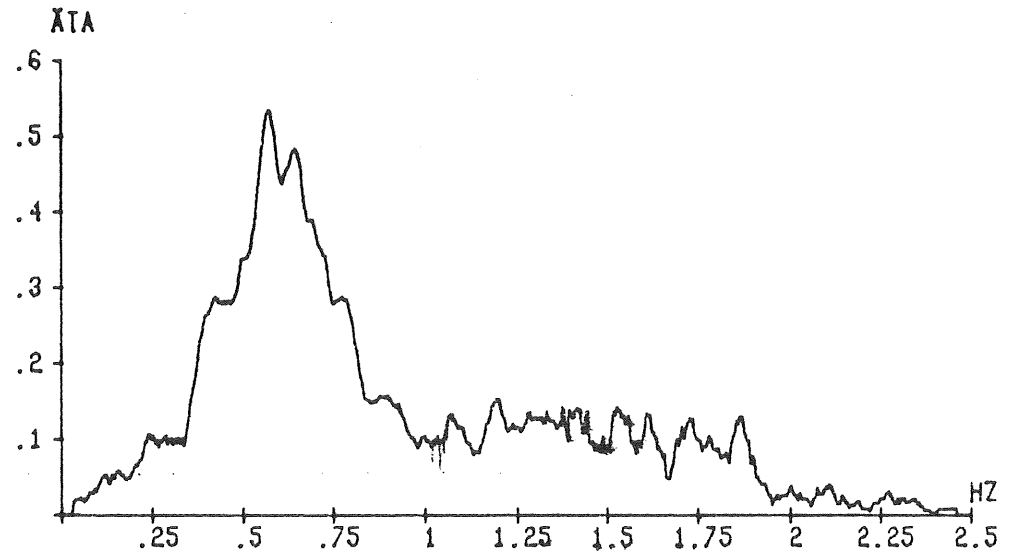
Figur 7.3.32 Verkningsgrad, 0,27 A fältström.



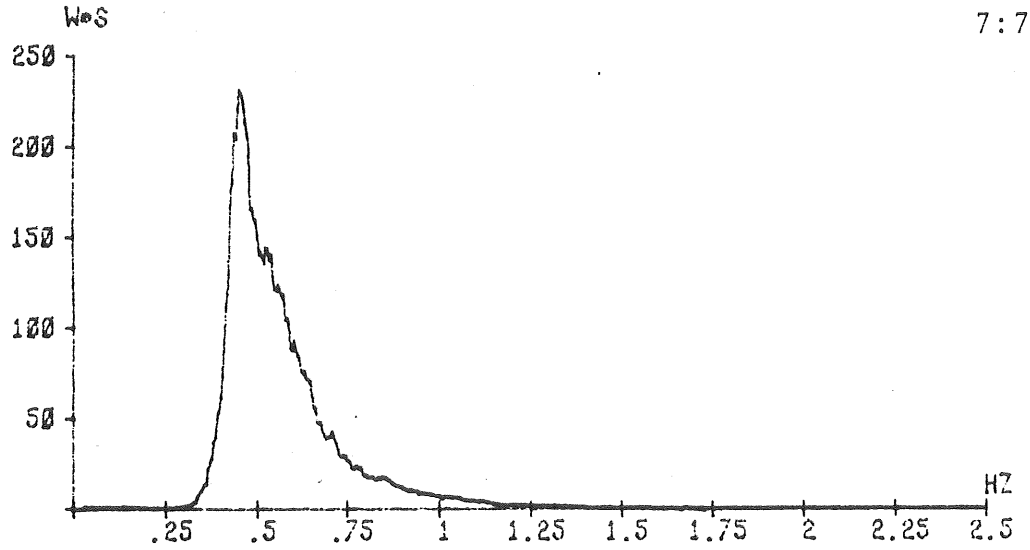
Figur 7.3.33 Vågeffektspektrum.



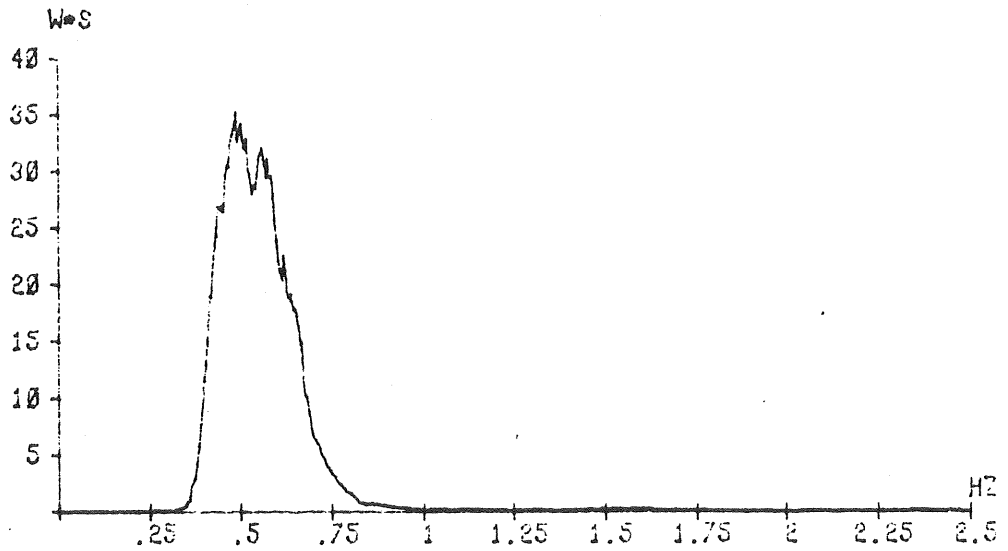
Figur 7.3.34 Bojeffektspektrum, 0,52 A fältström.



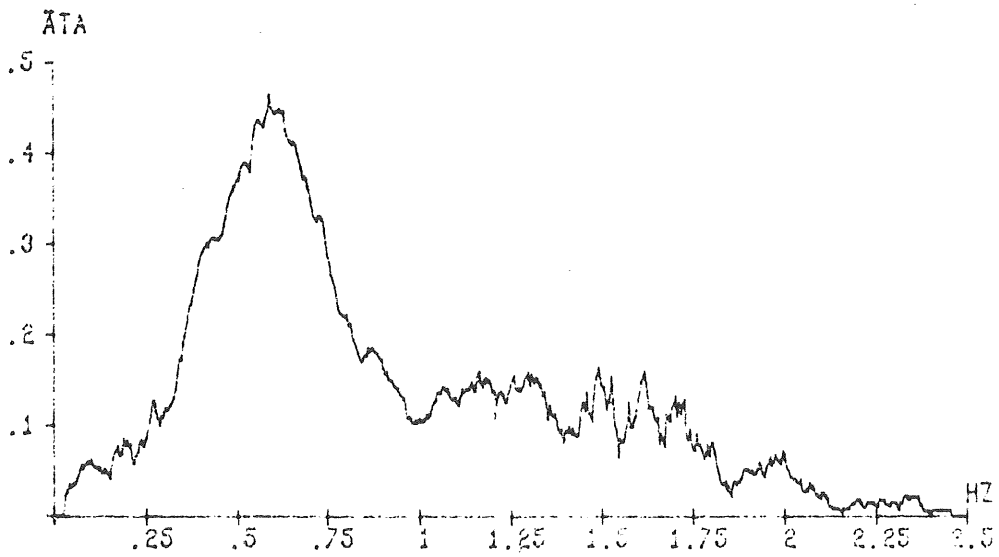
Figur 7.3.35 Verkningsgrad, 0,52 A fältström.



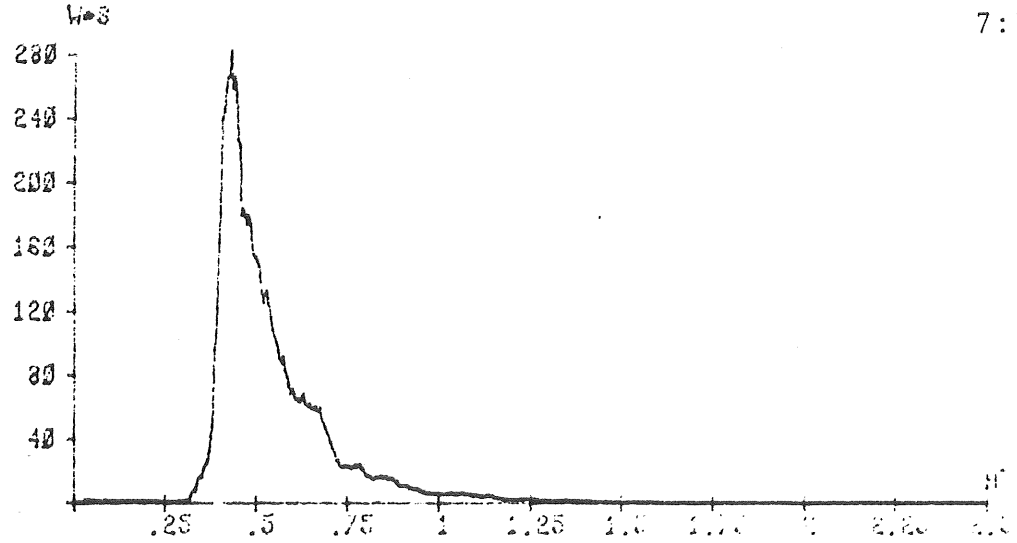
Figur 7.3.36 Vågeffektspektrum



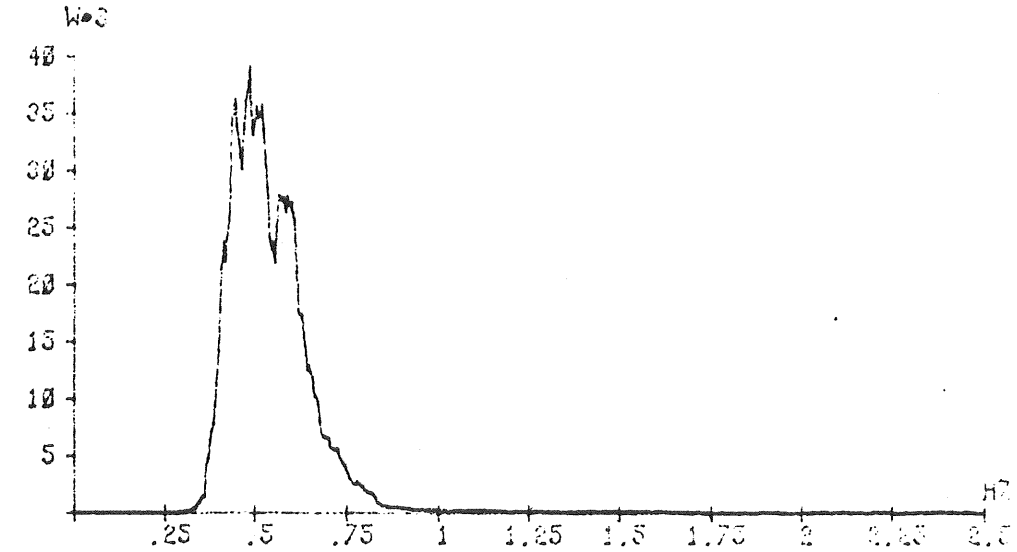
Figur 7.3.37 Bojeffektspektrum, 0.77 A fältström.



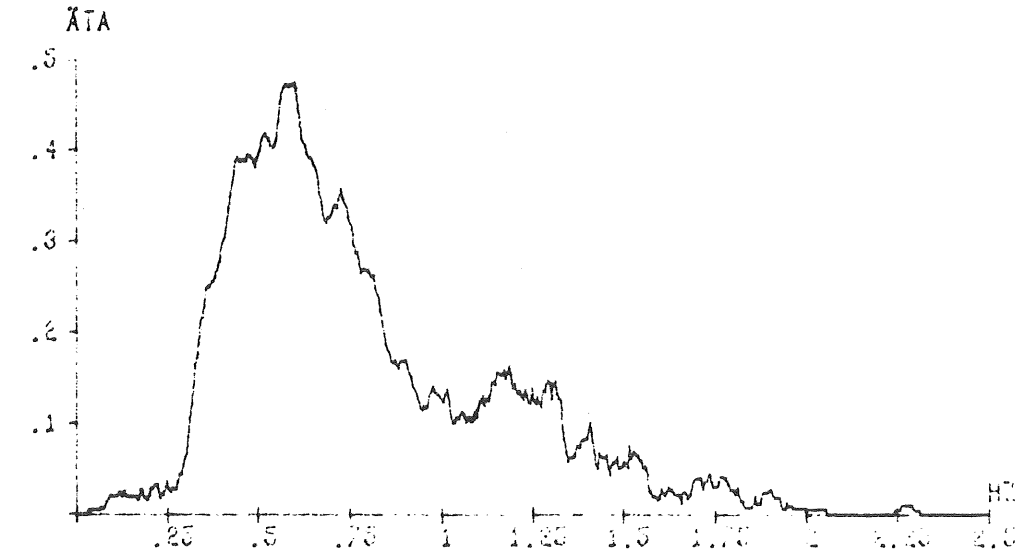
Figur 7.3.38 Verkningsgrad, 0.77 A fältström.



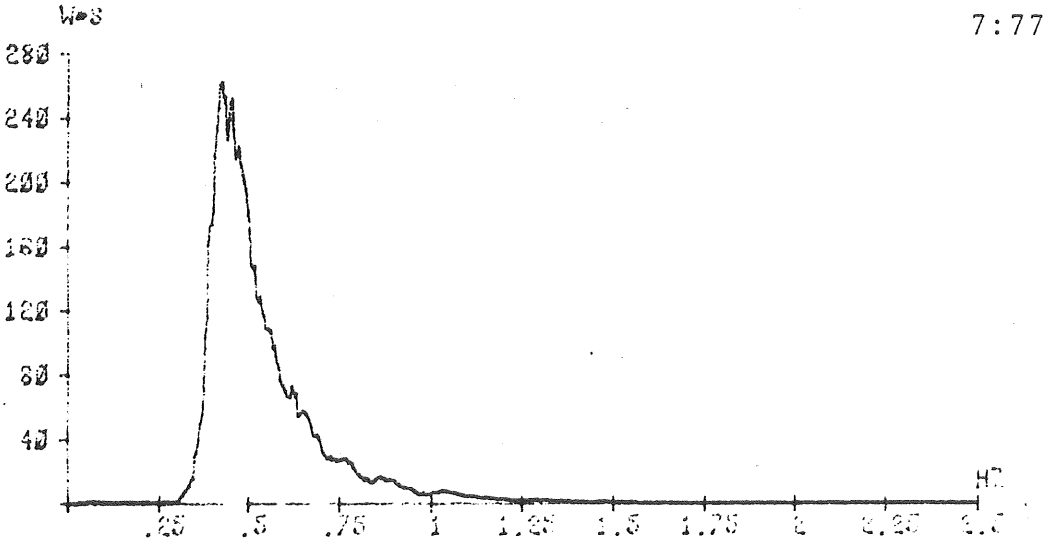
Figur 7.3.39 Vågeffektspektrum.



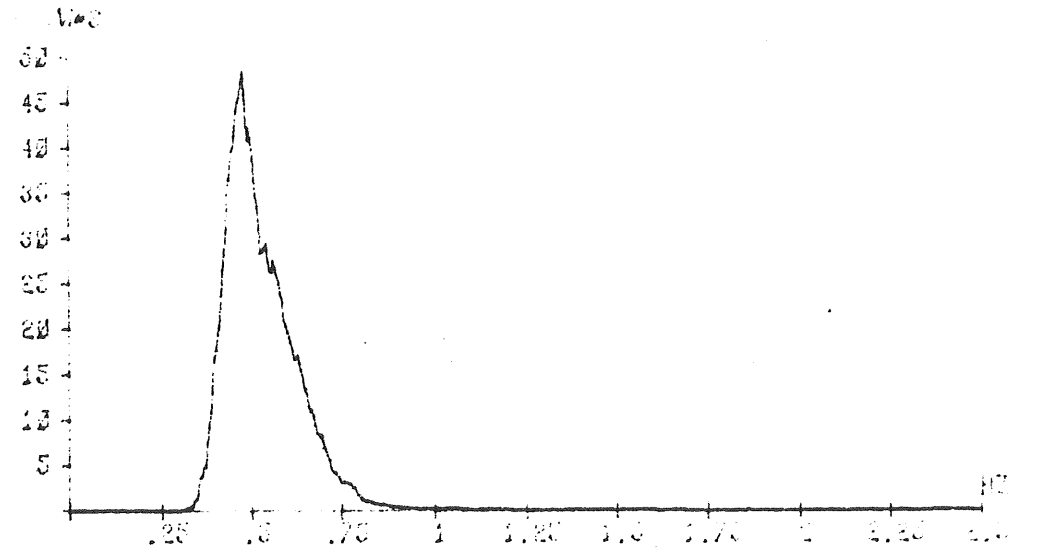
Figur 7.3.40 Bojeffektspektrum, 1.02 A fältström.



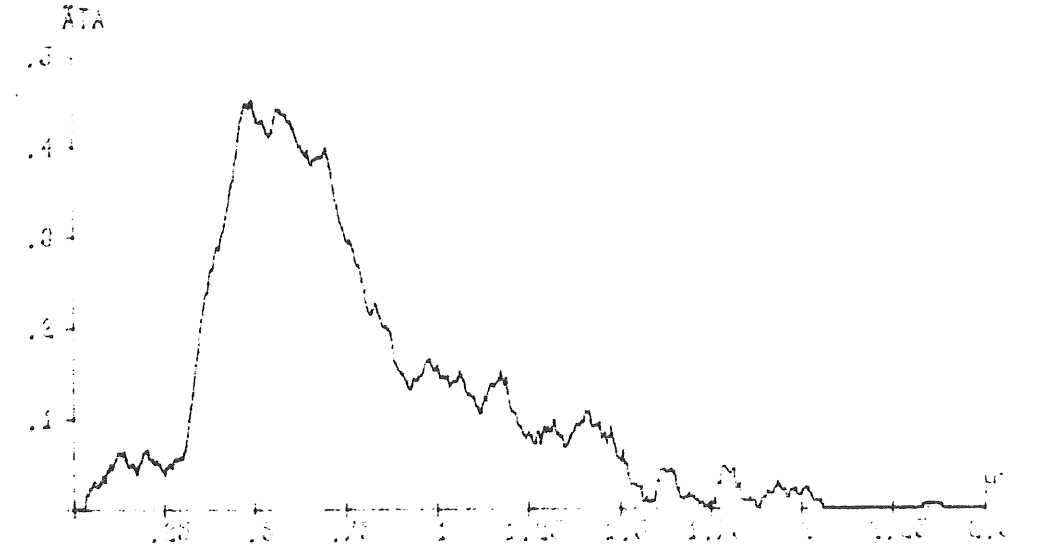
Figur 7.3.41 Verkningsgrad, 1.02 A fältström



Figur 7.3.42 Vågeffektspektrum.



Figur 7.3.43 Bojeffektspektrum, 1.27 A fältström



Figur 7.3.44 Verkningsgrad, 1.27 A fältström.

Fältström A	[A]	0,12	0,27	0,52	0,77	1,02	1,27
Bojeffekt ur summerat spektrum	[w]	9,3	9,1	8,7	8,2	8,6	8,9
P_{boj} medel ur alla tidsserier	[w]	8,9	7,8	8,2	8,5	9,1	9,2
P_{boj} medel av alla delspektrum	[w]	9,3	9,1	8,8	8,2	8,6	8,9
$P_{våg}$ ur slutspektrum	[w]	47,6	44,5	56,5	45,1	48,5	51,9
$P_{våg}$ medel ur alla delspektrum	[w]	47,6	44,5	56,5	45,1	48,5	51,9
H_s ur slut spektrum	[mm]	285	273	307	277	281	290
H_s som medel ur alla tidsserier	[mm]	278	264	298	268	272	288
T_z	[s]	1,52	1,55	1,56	1,52	1,59	1,60
η_{tot} ur $\frac{P^{spektrum}_{boj,medel}}{P^{spektrum}_{våg,\ medel}}$		19,5	20,5	15,5	18,2	1 ,7	17,2
η_{tot} ur alla tidsserier		19,2	19,3	15,4	16,6	18,8	16,6

Tabell 7.3.1 Sammanställning av medelvärden ur summerade spektrum och tidsserier.

7.4 Försök i Lygnern med petropumpkraftverk

I rapport GR:16 finns ett kraftverk med petropumpar beskrivet och kostnadsberäknat.

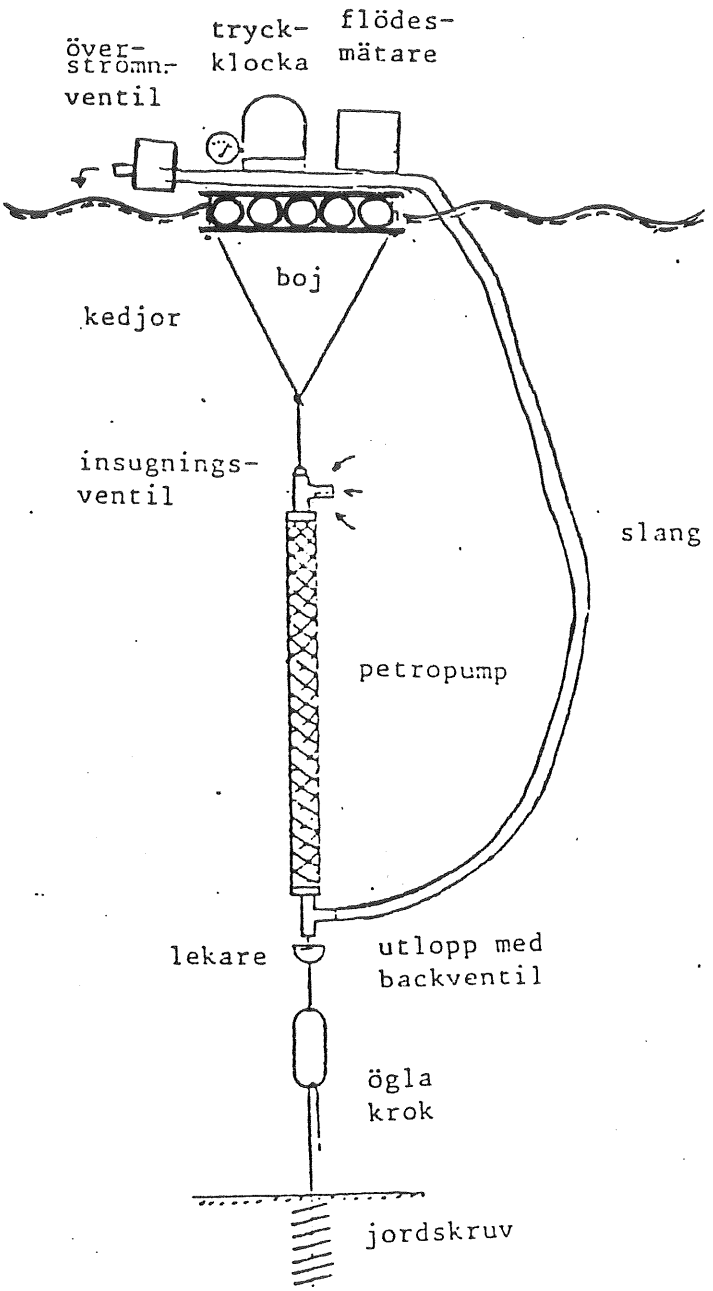
Kostnadsberäkningen ger förhållandevis låga kostnader. Dessutom bestod kraftverket till största delen av även i havsmiljö väl-utprovade komponenter. Arbetet har därför fortsatt med detta koncept.

7.4.1 Försök 1979

Under sommaren byggdes en försöksboj med petropump för placering i Lygnern. Petropumpen försågs med backventiler och dess karakteristika mättes i laboratorium. En teoretisk modell för pumpen utvecklades också. En flotte byggdes av PVC-rör som förslöts i ändarna och hölls ihop av en aluminiumrörsram. Flottens dimensioner gavs genom en kompromiss mellan de krav som pumpen ställde och de krav som vågorna ställde. Pumpens starkt pulserande flöde leddes till en tryckklocka för utjämning och därefter genom en flödesmätare och ut genom en överströmningsventil vars öppningstryck kunde varieras.

Tanken var att tryckklockan skulle simulera resterande delar av ett petropumpskraftverk från pump-bojenhetens synpunkt.

Pumpens nedre ände skulle fästas i botten. Först provades ett arrangemang med en jordskruv.



Figur 7.4.1 Försöksbojens uppbyggnad.

Denna drogs dock loss ur botten efter en kort tid. Därefter gjordes ett ankare som skulle ha tillräcklig tyngd för att hålla fast flotten.

Problemet med detta ankare var att den långsamt sjönk ner i botten. Det återfanns inte nästa vår.
Försöken finns redovisade i rapport GR:26.

Inga mätningar utfördes under 1979.

Försöksanordningen 1979, dimensioner.

Flotte	rör	diameter	150 mm
		längd	5 m
		antal	5 st
	deplacement		440 dm^3
Pumpen	Slangdiameter	ID	64 mm
		YD	73,4 mm
	Armering trådens diameter		68,6 mm
	Stigningsvinkel		42,2 mm
	Fjäderkonstant		4,6 10^3 N/m
	Backventiler		1 1/4"
Armatur	Tryckklockans volym		7 dm^3
	Slang armerad PVC		1 1/4"

7.4.2 Försök 1980

Vissa förändringar gjordes på kraftverket till sommaren 1980 och mätningar utfördes av våghöjd, periodtid, pumpad volym, tryck och slangens töjning.

Dessa mätningar samt kraftverkets nya utformning finns rapporterade i GR:35.

Ur våghöjd och periodtid beräknades infallande vågeffekt enligt

$$P_i = B \cdot 0{,}55 \cdot T_z \cdot H_s^2 \cdot 1000 \qquad \ldots(7.4.1)$$

där

P_i = infallande effekt
B = bojbredd (-5m)
T_z = nollkryssnings perioden
H_s = signifikanta våghöjden

Avgiven effekt beräknades ur

$P_A = Q \cdot p$ . . . .

P_a = avgiven effekt
Q = pumpat flöde
p = tryck

Verkningsgraden fås genom division.

$$\eta = \frac{P_I}{P_A} \qquad \ldots(7.4.2)$$

I nedan visade diagram finns verkningsgraden inritad för olika kombinationer av H_s och T_z.

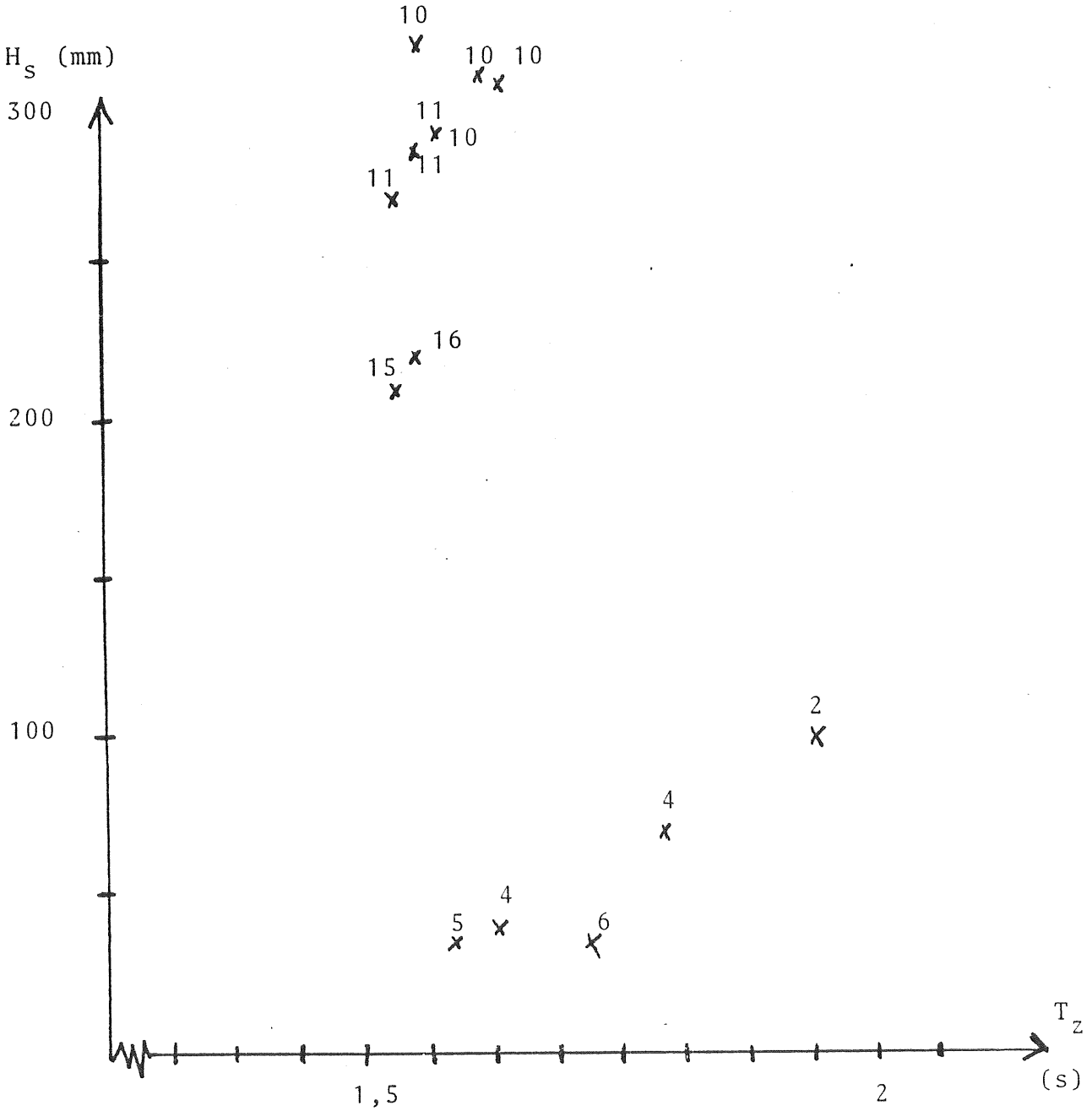


Diagram : Verkningsgraden för olika kombinationer av H_s och T_z. Siffrorna i diagrammet anger verkningsgraden i %.

Ur diagrammet kan man utläsa att vågornas branthet synes ha signifikant inverkan på verkningsgraden.

Med hjälp av data på slangens momentana töjning beräknades pumpad volym teoretiskt. Detta gjordes med den formel för utpumpad volym som funktion av töjningen som togs fram i laboratorieförsöken, se GR:26.

Denna volym blev endast hälften av den mätta volymen. Detta antas bero på att mätgivaren placerades i kanten på bojen varför bojens rullning i vågorna inverkade på resultaten.

Slutsatser av försöken.

Försökskraftverket har fungerat bra och krävde obetydligt med underhåll speciellt sommaren 1980. Verkningsgrader mellan 2 och 16 procent mättes. Detta måste betraktas som bra eftersom konstruktionens dimensioner bedöms ligga långt från optimum.

Tillförlitligheten demonstreras av att pumpen övervintrat i sjön (ingen is) och av att den vid en storm slitit sina förtöjningar och drivit iväg ca 10 km. När pumpen återfanns fungerade den helt normalt!

Kommande försök

Svenska Varv AB driver sedan 1981 ett vågkraftprojekt baserat på petropumpen. Ett program för modellförsök i olika skalor har utformats.

7.5 Försök med IPS-bojen vid Trubaduren

7.5.1 Målsättning

De planerade försöken skulle till väsentliga delar komma att skilja sig från tidigare genomförda försök i sjön Lygnern.

Genom att försöken skulle utföras i en verklig havsmiljö, förelåg möjligheter att direkt kunna göra mätningar och studier av olika parametrar. Vissa observationer såsom krafter och rörelser i förankringssystem, beväxning, beständighet och överlevnad är ej lämpliga att utföra i modellskala. Man fick även möjlighet att utveckla mätmetodik under realistiska förhållanden.

Undersökningen delades upp i tre huvuddelar:

a) Bojens energiupptagningsförmåga av vågenergin (hydrodynamisk verkningsgrad). Jämförelse med modellförsök.

   Elektrisk överföring
   (elektromekanisk verkningsgrad)

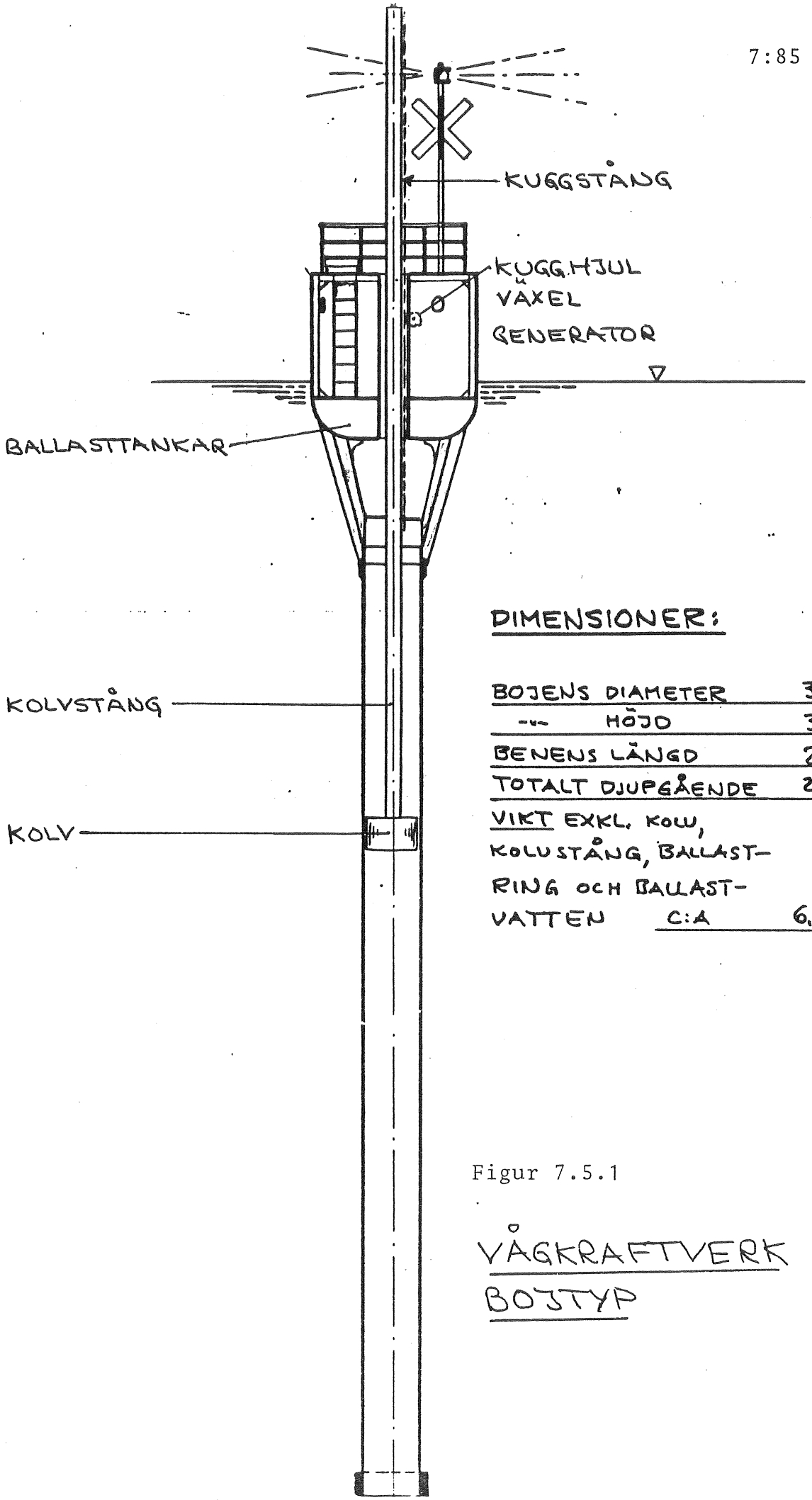
b) Krafter och rörelser i förankringssystemet samt krafter på och rörelser hos bojen.
   Beständighet
   Beväxning

c) Mätsystem och mätmetodik i marin miljö. Överföring av mätsignaler via radiosignaler till land (vid försöken i Lygnern överfördes mätsignaler via bottenförlagd kabel).

7.5.2 Konstruktion och funktion

Se figur 7.5.1.

Bojen är cylindrisk med i botten avrundade hörn. Diametern är 3 m och totala höjden 3 m. Under bojen hänger ett i båda ändar öppet



DIMENSIONER:

BOJENS DIAMETER	3 M
-"- HÖJD	3 M
BENENS LÄNGD	2 M
TOTALT DJUPGÅENDE	23M
VIKT EXKL. KOLV, KOLVSTÅNG, BALLAST-RING OCH BALLAST-VATTEN C:A	6,2 TON

Figur 7.5.1

VÅGKRAFTVERK
BOJTYP

20 m långt rör. Inuti röret finns en kolv med en kolvstång som löper genom bojen. På denna stång är fäst en kuggstång som verkar på ett kugghjul vilket i sin tur driver en synkrongenerator via en växel med utväxling 1:16. När vågorna får bojen att svänga uppkommer en relativ rörelse mellan bojen och vattenmassan i det långa röret varvid kolven rör sig och driver generatorn. Amplituden hos denna relativa rörelse kan bli större än den för vågorna, när vattenmassan i röret svänger i motfas relativt bojen.

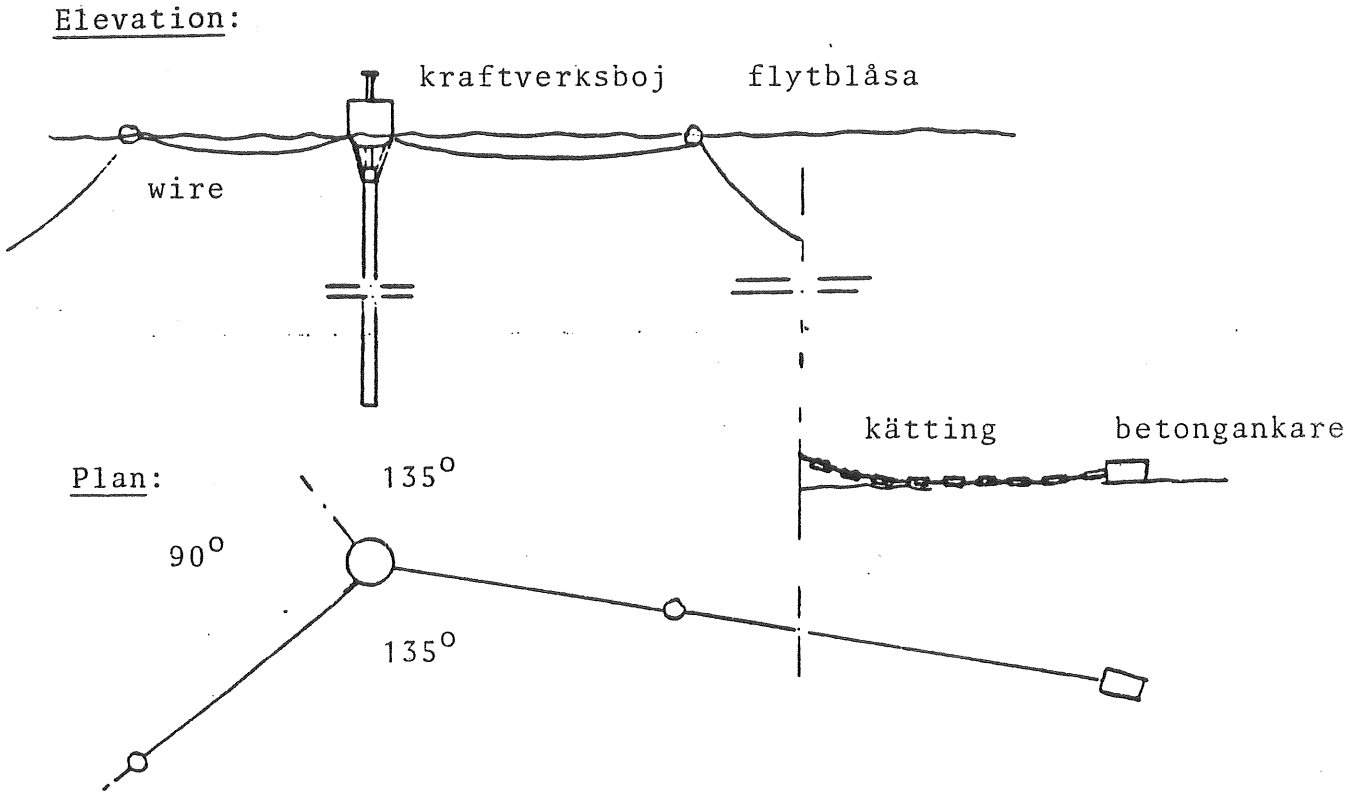
Den genererade elektriska växelspänningen likriktas. Energin utnyttjas för att omväxlande ladda batterier ombord på bojen och värma doppvärmare i vattnet utanför. Skiftena styrs av en klocka ombord. Denna ser även till att stegvis ändra belastningen på generatorn vilket innebär att maskineriets motstånd mot kolvrörelsen ändras.

I bojen finns givarna som ger mätsignaler vilka via radion sänds till landstationen i Långedrag. De överförda signalerna kommer från en vågmätare utanför bojen, som alltså mäter vattenytans momentana nivå, en tachometer mäter generatorns varvtal, en spänningsdelare ger generatorns spänning och en shunt ger dess strömstyrka, en accelerometer ger bojens hävning samt en kraftgivare ger kraften i kolvstången.

Generatorn ger maximalt 17 kW men torde vanligtvis ge en medeleffekt på omkring 5 kW.

Förankringssystem

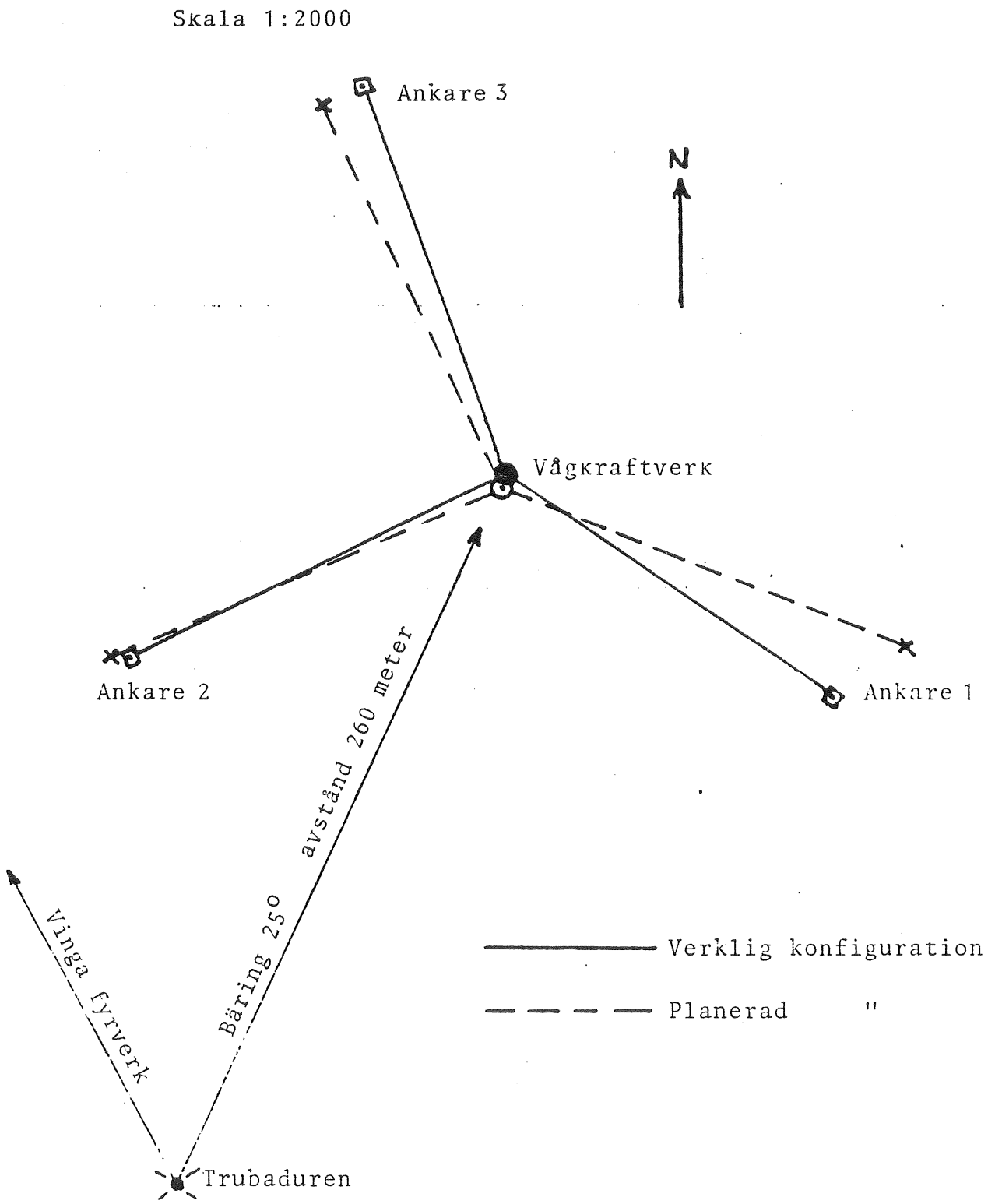
Ett trepunkts förankringssystem enligt figur 7.5.2 beräknades för vågkraftbojen.



Figur 7.5.2 Skiss av planerat förankringssystem.

Ankarlinorna var avsedda att till sin övre del utgöras av stålwire och till sin undre del av kätting, men en överslagsdimensionering utfördes först för ett likvärdigt system med samma vikt per längdenhet för hela linan.

Flytblåsorna avsågs att ta upp hela ankarlinans tyngd och att vid extremt stora belastningar dras ned under vattenytan och på så sätt ge extra marginaler. Förankringssystemets inverkan på bojens vertikalrörelse borde bli liten med det använda arrangemanget.



Figur 7.5.3 Förankringskonfiguration

7.5.3 Utförda försök 1980

IPS-kraftverkets första säsong i havet bjöd på en rad besvikelser. Den mekaniska kraftöverföringen från kolvstång till generator havererade på grund av felkonstruktion, se GR:34. Kuggstången miste sina kuggar vilket innebar att det ej gick att dämpa kolvens rörelser. Detta ledde givetvis till stora amplituder, och vid en mycket kraftig höststorm slogs kolvstångens extradeplacements-kropp sönder mot bojens undersida varpå kolven sjönk.

I detta läge bestämdes i samråd med STU att istället för att ta upp IPS-bojen skulle en serie mätningar av förankringskrafterna göras. Mätsystemet och radiodelen var ju helt intakta och bortsett från det självklara intresset för förankringskrafter bedömdes det som värdefullt att få mäterfarenheter till efterföljande säsong. Således kopplades kraftgivare in mellan IPS-bojen och förank-ringarnas ytwirar. Kraftgivarna mm finns beskrivet i GR:34.

På grund av det begränsade antalet bryggförstärkare i mätsystemet kunde under dessa mätningar ej både bojrörelse och vågor mätas (accelerometrar i båda fallet). Vågmätning bedömdes som mest givande. Vågmätaren blev dock utsatt för allt för stora påkänningar varför den gick läck och upphörde att fungera efter halva mät-tiden.

Bortsett från en liten felbehandling av förstärkarna (leverantörens bristande information) gick dessa förankringskraftmätningar all-deles utmärkt. Mätdatabortfallet kan sägas vara i stort sett noll och kvaliteten på mätdata mycket hög.

I tabellen nedan visas de mätningar som gjordes. De vågdata som redovisas här är tagna från SMHI:s vågmätare (placerad ca 300 m VSV IPS-bojen).

Figur 7.5.1
Utförda mätningar av förankringskrafter på IPS-kraftverket.

Datur/nr	Tid	Vindriktn	Vindhast	Signifikant våghöjd
801022/1	2100	ONO	7.3 m/s	0.56 m
/2	2230	O	8.5	0.59
801023/1	1530	O	10.7	0.65
/2	1615	O	9.5	0.65
/3	1645	O	8.8	0.69
801024/1	1045	S	7.5	1.09
/2	1115	S	7.5	1.09
/3	1145	S	8.3	1.08
801026/1	1515	lugnt		0.38
801027/1	1100	SO	12.0	1.55
/2	1205	SO	12.0	1.55
/3	1325	SO	14.4	1.58
/4	1405	SO	15.4	2.01
/5	1430	SSO	15.0	2.04
/6	1445	SSO	14.3	2.08
/7	1532	SSO	14.5	2.14
/8	1547	SSO	14.5	2.20
/9	1616	SSO	14.8	2.20
801028/1	1955	SSV	8.6	0.89
/2	2005	SSV	8.6	0.89
/3	2015	SSV	8.6	0.89

Mätningen 801027/2 lagrades felaktigt på disketten, varför dessa resultat fallit bort.

För mätningarna 801022 och i viss mån även 801023 gäller att två vädersystem härskade på västkusten. På Kattegatt var vinden måttlig till frisk SV och på Skagerrak var den måttlig till fisk O. Detta gär förstås upphov till två vågsystem, ett från O med hög frekvens och liten våghöjd och ett från SV med lägre frekvens men större våghöjd (stryklängderna!).

Utvärderingsmetodik

Som resultat av en mätning erhölls tre krafttidsserier, en för varje förankringslina, lagrade i diskret form på diskett. Varje tidsserie innehåller 1024 värden för frekvensanalysens skull (antal värden = 2^n). Tidsavståndet mellan värdena, samplingstiden, valdes till 0.3, 0.4 eller 0.5 sekunder. Mätvärdena är sedan behandlade enligt följande:

a. Kalibrering, nollnivåjustering och rimlighetskontroll.

b. Beräkning av resulterande kraft och riktning genom vektoriell addition.

c. Plottning av tidsserier.

d. Tidsserieanalys.

e. Frekvensanalys.

f. Speciell lågfrekvent analys för några mätserier.

g. Beräkning av överföringsfunktioner mha SMHI:s vågmätningar för vissa mätserier.

Databehandlingen är gjord på samma minidatorsystem som användes vid mätningarna, dvs ABC-80 + Datadisc 80.

a. Kalibrering, nollnivåjustering och rimlighetskontroll.

Vid inkopplingen av kraftgivarna till bryggförstärkaren i IPS-bojen gjordes pga dålig apparatkännedom ett litet misstag som resulterade i att den sanna nollkraftnivån på mätsignalen aldrig blev registrerad. Därför fick ett speciellt förfarande tillgripas för nollnivåjusteringen. Mätvärdena kalibrerades till [kilopond] och lagrades på nya disketter. Härefter gjordes en rimlighetskontroll för att få bort eventuella störningar i radioöverföringen. Kraftamplituderna antogs vara Rayleigh-fördelade (vilket visade sig stämma hyggligt) och utgående från detta kunde extrema toppar (> 3 × förväntat maxvärde) strykas och sättas till en statistisk rimlig nivå. Samtliga mätserier

plottades sedan och utgående från dessa plottar kunde nollnivån för varje förankringslina läggas in så att man har en rimlig kraft i respektive lina även vid en läsituation (wirens egenvikt t ex). Nollnivåerna valdes så att ingen underskattning av krafterna riskerades.

b. Beräkning av resulterande kraft och riktning genom vektoriell addition.

Den resulterande förankringskraften för en konstruktion är i allmänhet av stort intresse då den t ex kan vara dimensionerande för hela eller delar av konstruktionen. För att erhålla resulterande förankringskraft har i detta fall en vektoriell addititon utförts så att man som resultat erhåller förankringskraftens storlek och riktning.

c. Plottning av tidsserier.

För att få en uppfattning av hur förankringskrafternas variation ser ut plottades tidsserierna efter ovanstående behandling, se exempel på resultatredovisning nedan.

d. Tidsserieanalys.

Ur respektive förankringskrafts tidsserie beräknades följande parametrar:

$\overline{F}$ = medelvärdet

F_{max} = största kraften

$F_{1/3}$ = medelvärdet av den högsta tredjedelen av kraftens dubbelamplituder

T_{ZF} = nollkryssningsperioden. Här utgörs nollan av $\overline{F}$.

σ^2 = variansen för kraftens variation.

n = antal justerade värden i rimlighetskontrollen.

Se exempel på resultatredovisning.

e. Frekvensanalys.

Denna gjordes med ett datorprogram som bygger på Cooley-Tukeys FFT-algoritm.

Ur de spektra man får vid frekvensanalysen beräknades följande parametrar:

m_o = ytan under spektrum

F_s = $4\sqrt{m_o}$ = signifikant kraft

T_{zF} = $\frac{m_o}{m_2}$ där m_2 är andra momentet i spektrum.

Om en tidsseries amplituder är Rayleigh-fördelade gäller följande

F_s = $F_{1/3}$

T_{2F} = $0.95 \times T_z$

σ^2 = m_o

Dessa samband kan alltså användas för att avgöra om tidsseriernas amplituder kan vara Rayleigh-fördelade och även för kontroll av frekvensanalysens riktighet.

I spektrum kan man se vid vilka frekvenser de största krafterna finns. Spektra användes sedan vid framtagning av överförings-funktioner.

f. Speciell lågfrekvent analys för några mätserier.

Den 28/10 gjordes tre mätningar direkt efter varandra (endast diskettlagringstid emellan). På detta sätt åstadkoms en mätning med 3×1024 punkter per förankring. Med en samplingstid på 0.5s ger detta en mättid på 1536 s eller nästan 26 minuter. Avsikten med denna långa mättid var att kunna göra en frekvensanalys där de mer lågfrekventa svängningarna kunde upptäckas. Framför allt förankringssystemets egenfrekvens skulle på detta sätt kunna fås fram.

Rent praktiskt plockades var tredje mätpunkt ut så att resulterande tidsserier innehöll 1024 värden med en samplingstid på 1.5s. Denna mätserie bandpassfiltrerades i ett numeriskt filter.

HP-filtrets brytfrekvens valdes till 0.005 H_z. LP-filtrering gjordes upprepade gånger med brytfrekvensen 0,066 H_z till dess tidsserien såg ut att innehålla endast den dominerande svängningen. På den så erhållna tidsserien gjordes sedan en förenklad tidsserieanalys där antalet nollgenomgångar räknades och alltså gav en periodtid för dessa långsamma svängningar.

En detaljfrekvensanalys för området 0.005 - 0.100 H_z gjordes också för att man skulle kunna se om här fanns någon signifikant topp svarande mot den ovan erhållna periodtiden.

Motsvarande analys gjordes även för den resulterande kraften för en av de vanliga mätningarna. Skillnaden blir ju då att totala tiden blir kortare och därmed antalet nollgenomgångar färre. Detta gör osäkerheten i analysen större.

g. Beräkning av överföringsfunktioner.

För att senare kunna jämföra mätresultaten med teoretiska beräkningar beslöts att ta fram en operator för kraften i lina 1 den 27/10. Vindriktningen (och enligt antagande därmed vågriktningen) ligger i stort sett i linje med förankringslina 1. Vågsituationerna vid mätningarna den 27/10 är växande med H_s = 1.55 - 2.20 meter.

Den vågmätning som gjordes alldeles intill kraftverket gav resultat till ca halva antalet mätningar. För framför allt mätningarna den 27/10 finns inga resultat av dessa vågmätningar. Därför valdes att använda resultaten av de vågmätningar som SMHI utför rutinmässigt 150 meter NV Trubaduren. Resultat från dessa redovisas för varje hel timme.

Eftersom de valda SMHI-vågmätningarna ej stämmer exakt i tid och rum med förankringskraftmätningarna kunde ej den bästa metoden - kors-FFT - användas för framtagning av överföringsfunktioner.

I stället gjordes en enkel division:

$$Y(f) = S_F(f)/S_\zeta(f) \qquad \ldots(7.5.1)$$

där $S_F(f)$ är kraftspektrum
och $S_\zeta(f)$ är vågspektrum

Operatorn Y(f) visade sig dock variera kraftigt för olika vågsituationer varför andra former provades. Slutligen visade det sig att följande operator var relativt oberoende av vågsituationen

$$Y(f) = \sqrt{S_F(f)}/S_\zeta(f) \qquad \ldots(7.5.2)$$

Denna operator gäller då endast den dynamiska delen av förankringskraften. Försök att få fram en operator för den statiska delen av krafterna har varit resultatlösa.

7.5.4 Resultat 1980

I tabell7.5.2 visas resultaten av samtliga mätningar utom 801026/1 då denna enbart användes för att bestämma mätsignalernas nollnivåer, se ovan.

Som synes är de maximala krafterna förhållandevis små, vilket beror på att förankringssystemet som använts är mycket eftergivligt. Den högsta registrerade kraften under mätperioden är 1596 kp vid mätning 801027/9 vid en våghöjd på 2.20 meter och en vågperiod på 5.1 sekunder. I figur7.5.4 som visar tidsserier och spektrum från denna mätning syns att det finns ett fåtal höga toppar i kraften i lina 1. Detta beror på att om förankringsblåsan dras ner under vattnet så att wiren blir sträckt hela vägen från bojen ner till kättingen, så försvinner en av fjädrarna i systemet med en stor ökning i kraften som följd. Den andra fjädern som består i att kättingen lyfts från botten försvinner först när hela kättingen är sträckt varvid kraften ökar mycket brant.

Att förankringskrafternas amplituder ej är helt Rayleigh-fördelade framgår av tabell 7.5.2 ur skillnaden i $F_{1/3}$ och F_s. Detta är ju helt naturligt med hänsyn till ovan beskrivna olinjäriteter. Skillnaden mellan $F_{1/3}$ och F_s är dock för de flesta mätningarna ganska liten. Anmärkningsvärt är att F_s hela tiden är störst och någon förklaring till detta är svår att finna.

Av tabellen framgår också att F_{ZF} och T_{2F} för förankringarna är mindre än T_2 för vågorna även vid de lägsta vågperioderna. Man skulle kunna tänka sig att den största delen av förankringskraften härrörde sig från det rena vågtrycket och en mindre del från kraftverkets hävrörelse men detta motsägs av resultaten. En tänkbar förklaring är att förankringsblåsornas rörelser antagligen inverkar ganska mycket på kraften och att dessa givetvis påverkas mest av de högfrekventa komponenterna i vågorna. I fig.7.5.5 som visar tidsserier och spektrum från mät-

ning 801022/2 kan man se detta i spektrumen för de tre linorna. Trots att vågspektrumets topp ligger på 0.2 Hz har lina 1 och 2 sina största kraftamplituder vid 0.4 - 0.5 Hz. Spektrumet för kraften i lina 3 däremot sammanfaller väl med vågspektrumet.

I fig 7.5.6 visas resulterande förankringskraft och dennas riktning för mätning 801027/7 och i fig. 7.5.7 visas motsvarande för mätning 801028/1+2+3. Skillnaden mellan dessa är tidsseriens längd, 512 resp. 1536 sekunder. Den maximala kraften i den mest belastade linan är i båda mätningarna större än den resulterande kraften, vilket är helt naturligt. Vad gäller den resulterande kraftens riktning är den i båda mätningarna förvånansvärt konstant och dessutom lika trots en vindvridning från SSO 801027 till SSV 801028. Detta är något förbryllande då lina 2 har högre dynamisk kraft än lina 1 801028 medan det är tvärtom 801027. Det är tydligtvis det högre medelvärdet i lina 1 som är avgörande och detta skulle kunna tyda på att nollnivåjusteringen är något felaktig.

I många av de framtagna kraftspektrumen kan man se en ganska kraftig topp i frekvensområdet 0 - 0.1 Hz. Denna topp antogs komma ifrån hela systemets egensvängning i horisontalled, varför en speciell analys för de låga frekvenserna gjordes för mätningarna 801027/7 och 801028/1+2+3, i båda fallen avseende resulterande kraften. I figurerna 7.5.8 och 7.5.9 visas bandpassfiltrerade tidsserier (se föregående avsnitt) och i figurerna 7.5.10 och 7.5.11 visas motsvarande spektrum. För 801027/7 gäller att den filtrerade tidsseriens T_z och spektrumets T_{topp} båda är 28 sek. För 801028/1+2+3 är motsvarande perioder 42 och 34 sekunder. Olikheterna mellan de båda mätningarnas resultat kan förklaras bl.a. av att filtreringen är något subjektivt gjord. Det råder emellertid inget tvivel om att det är hela systemets egensvängning i horisontalled det är fråga om här. Maximal dubbelamplitud m.a.p. kraften för denna lågfrekventa svängning är för 801027/7 125 kp och för 801028/1+2+3 mindre än 30 kp.

I figur 7.5.12 visas de överföringsfunktioner som räknats fram enligt ovanstående avsnitt. I figur 7.5.13 visas motsvarande vågspektrum, och härur framgår att det kanske varit för lite variation i vågorna för att man ska kunna dra några egentliga slutsatser om de framtagna överföringsfunktionerna. Emellertid förefaller det klart att man får högre krafter om vågorna har mycket energi i de högre frekvenserna.

Tabell 7.5.2 Resultat från förankringskraftmätningar

				TIDSSERIEANALYS						FREKVENSANALYS			VIND		VÅGOR	
DATUM/NR.	KL.	dT	LINA	n_{KORR}	F_{MAX}	$\bar{F}$	$F_{1/3}$	T_{ZF}	σ^2	F_S	T_{ZF}	m_0	U	RIKTN.	H_S	T_Z
		SEK	NR.		KP	KP	KP	SEK		KP	SEK		M/S		M	SEK
801022/1	2100	.4	1	0	517	325	159	1.98	2153	185	2.04	2139	7.3	ONO	.56	3.6
			2	0	214	164	47	2.16	146	46	1.90	132				
			3	0	190	129	39	2.30	104	40	2.02	100				
801022/2	2230	.4	1	0	396	281	128	2.19	1272	143	2.00	1278	8.5	O	.59	3.4
			2	0	211	160	43	2.25	123	42	2.01	110				
			3	0	172	128	39	2.54	100	41	2.40	105				
801023/1	1530	.4	1	0	431	259	145	2.61	1899	168	2.38	1764	10.7	O	.65	3.3
			2	0	230	132	37	2.41	100	35	1.72	77				
			3	0	336	172	141	2.71	1638	160	2.61	1600				
801023/2	1615	.3	1	0	406	234	121	2.36	1295	125	2.25	977	9.5	O	.65	3.3
			2	0	185	134	26	2.15	38	21	1.72	28				
			3	0	341	181	150	2.72	1665	155	2.71	1502				
801023/3	1645	.5	1	0	367	232	121	2.83	1262	139	2.67	1208	8.8	O	.69	3.7
			2	5	152	132	14	2.68	13	14	2.24	12				
			3	0	386	178	138	2.94	1529	154	2.80	1482				
801024/1	1045	.5	1	1	451	220	136	2.98	1401	145	2.62	1314	7.5	S	1.09	4.2
			2	0	280	169	76	2.80	478	81	2.52	410				
			3	4	169	92	50	3.22	149	50	2.46	156				

Tabell 7.5.2 Resultat från förankringskraftmätningar

				TIDSSERIEANALYS						FREKVENSANALYS			VIND		VÅGOR	
DATUM/NR.	KL.	dT	LINA	n_{KORR}	F_{MAX}	$\bar{F}$	$F_{1/3}$	T_{ZF}	σ^2	F_S	T_{2F}	m_0	U	RIKTN.	H_S	T_2
		SEK	NR.		KP	KP	KP	SEK		KP	SEK		M/S		M	SEK
801024/2	1115	.4	1	0	420	233	143	2.59	1702	163	2.67	1661	7.5	S	1.09	4.2
			2	0	291	178	91	3.00	664	97	2.85	588				
			3	0	170	95	57	3.39	214	56	2.96	196				
801024/3	1145	.5	1	0	352	222	133	2.93	1395	145	2.61	1314	8.3	S	1.00	4.2
			2	0	259	162	82	2.94	505	81	2.47	518				
			3	1	202	96	72	3.24	337	73	2.38	333				
801027/1	1100	.5	1	0	701	390	188	3.51	3078	218	3.33	2970	12.0	SO	1.55	4.4
			2	0	394	245	129	3.48	1349	144	3.17	1296				
			3	0	194	110	54	3.76	208	55	3.25	189				
801027/3	1325	.5	1	1	813	454	289	3.66	6487	313	3.53	6123	14.4	SO	1.58	4.6
			2	0	462	279	148	3.39	1891	171	3.09	1828				
			3	1	218	118	71	3.74	326	71	3.15	315				
801027/4	1405	.5	1	4	947	476	298	3.37	7475	342	3.54	7310	15.4	SO	2.01	5.0
			2	1	489	292	160	3.48	2140	181	3.30	2048				
			3	2	223	119	75	4.16	337	71	3.22	315				
801027/5	1430	.5	1	0	997	483	316	3.20	8985	374	3.46	8742	15.0	SSO	2.04	5.0
			2	1	455	281	158	3.53	2029	174	3.15	1892				
			3	1	228	119	84	4.10	417	81	3.13	410				

Tabell 7.5.2

Tabell 7.5.2 Resultat från förankringskraftmätningar

				TIDSSERIEANALYS						FREKVENSANALYS			VIND		VÅGOR	
DATUM/NR.	KL.	dT	LINA	n_{KORR}	F_{MAX}	$\bar{F}$	$F_{1/3}$	T_{ZF}	σ^2	F_S	T_{ZF}	m_0	U	RIKTN.	H_S	T_Z
		SEK	NR.		KP	KP	KP	SEK		KP	SEK		M/S		M	SEK
801027/6	1445	.5	1	0	1213	480	331	3.53	9172	367	3.48	8418	14.3	SSO	2.00	5.1
			2	0	509	291	167	3.39	2512	197	3.36	2426				
			3	0	283	119	82	4.10	461	85	3.17	452				
801027/7	1532	.5	1	3	1137	466	369	3.53	11526	436	3.76	11881	14.5	SSO	2.14	5.1
			2	4	546	285	190	3.74	2715	210	3.33	2756				
			3	10	255	120	90	4.23	476	87	3.23	473				
801027/8	1547	.5	1	1	908	451	300	3.61	7473	337	3.63	7098	14.5	SSO	2.20	5.1
			2	0	465	276	173	4.06	2418	195	3.51	2377				
			3	0	246	120	94	4.23	535	93	3.31	541				
801027/9	1616	.5	1	2	1596	451	341	3.76	11349	374	3.74	8742	14.8	SSO	2.20	5.1
			2	0	533	281	168	3.61	2375	183	3.37	2083				
			3	0	298	119	90	4.03	498	84	3.05	441				

Tabell 7.5.2

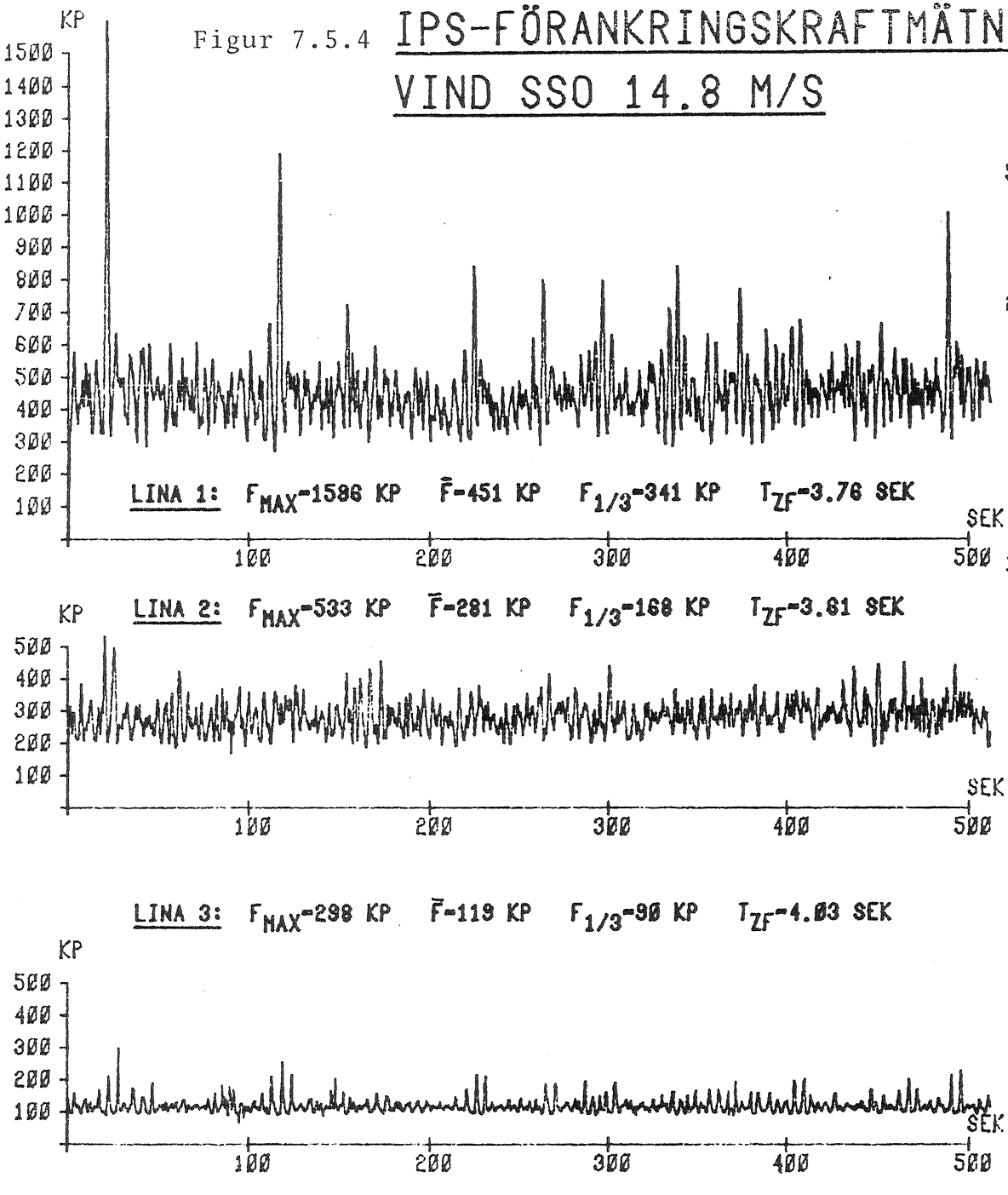
Tabell 7.5.2 Resultat från förankringskraftmäningar

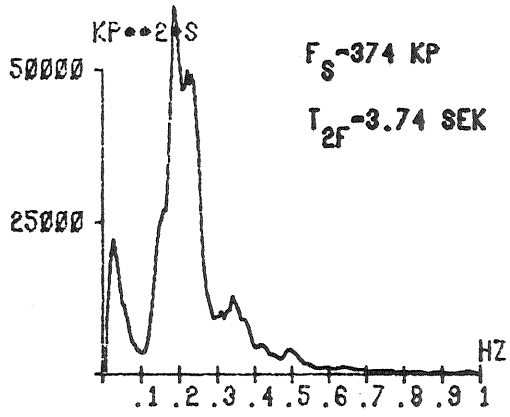
				TIDSSERIEANALYS						FREKVENSANALYS			VIND		VÅGOR	
DATUM/NR.	KL.	dT	LINA	n_{KORR}	F_{MAX}	$\bar{F}$	$F_{1/3}$	T_{ZF}	σ^2	F_S	T_{2F}	m_0	U	RIKTN.	H_S	T_2
		SEK	NR.		KP	KP	KP	SEK		KP	SEK		M/S		M	SEK
801028/1	1955	.5	1	0	348	285	47	2.53		48	2.29		8.6	SSV	.89	3.8
			2	0	364	287	82	3.52		90	3.48					
			3	0	181	112	52	3.19		54	2.98					
801028/2	2005	.5	1	0	359	287	50	2.64		52	2.10		8.6	SSV	.89	3.8
			2	0	298	209	81	3.48		84	3.18					
			3	0	212	114	70	3.32		73	2.87					
801028/3	2015	.5	1	0	324	285	33	2.50		43	2.35		8.6	SSV	.89	3.8
			2	0	341	212	89	3.68		100	3.51					
			3	0	219	117	67	3.25		70	3.08					

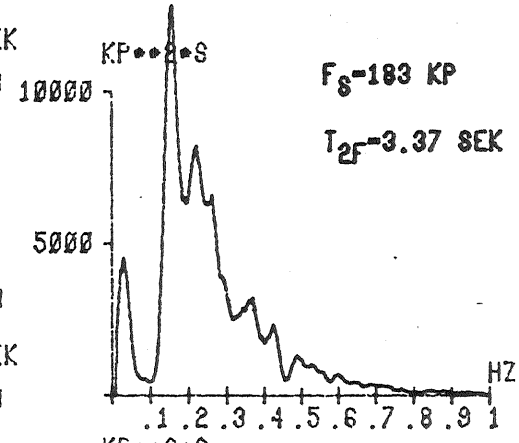
Tabell 7.5.2

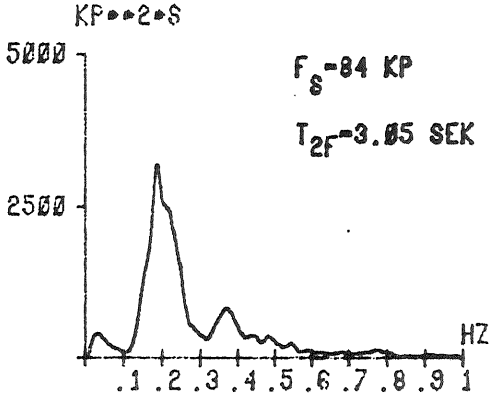
Figur 7.5.4 IPS-FÖRANKRINGSKRAFTMÄTNING 8Ø1Ø7/9

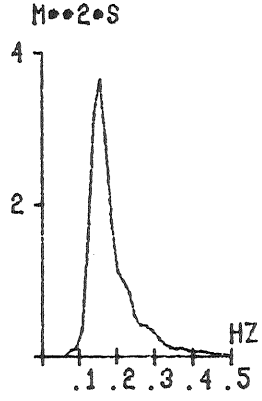
VIND SSO 14.8 M/S

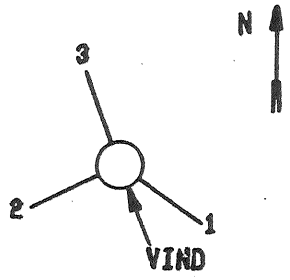












KONFIGURATION

VÅGOR

H_S-2.20 M

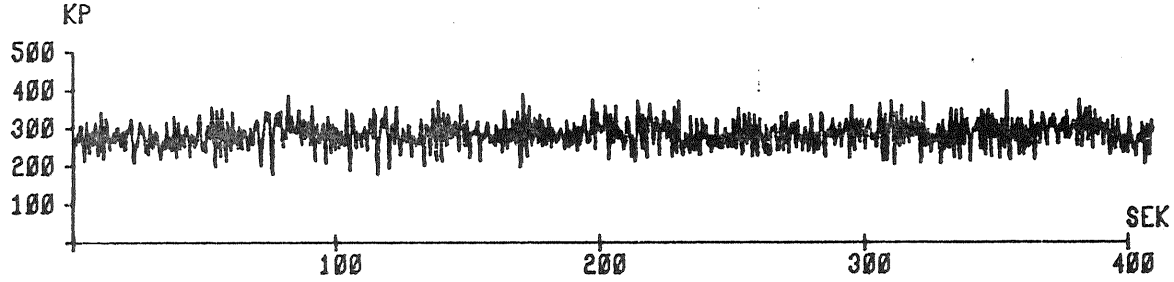
T_2-5.1 SEK

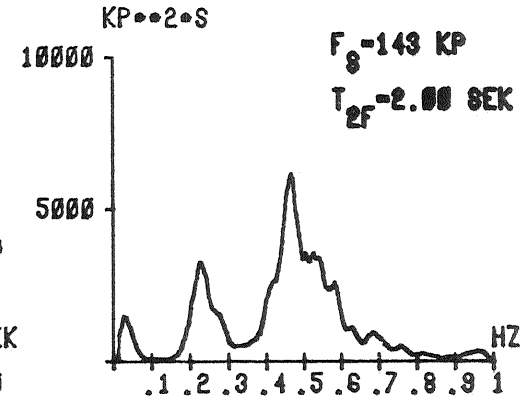
Figur 7.5.4

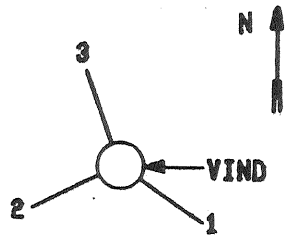
Figur 7.5.5 IPS-FÖRANKRINGSKRAFTMÄTNING 801022/2

VIND 0 8.5 M/S

LINA 1: F_{MAX}=396 KP $\bar{F}$=281 KP $F_{1/3}$=128 KP T_{ZF}=2.18 SEK

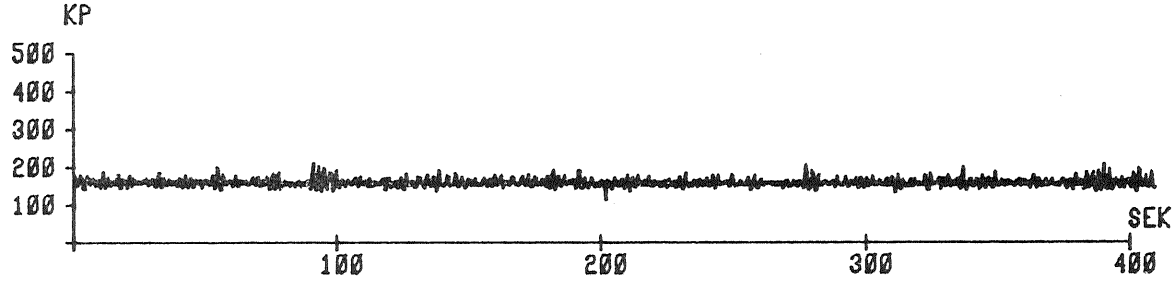


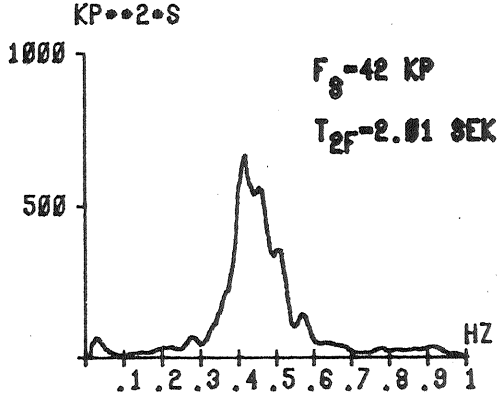


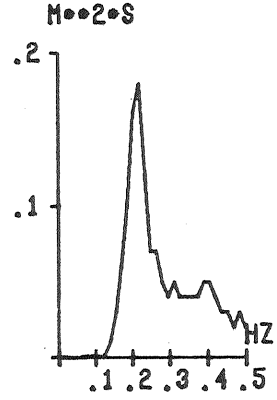


KONFIGURATION

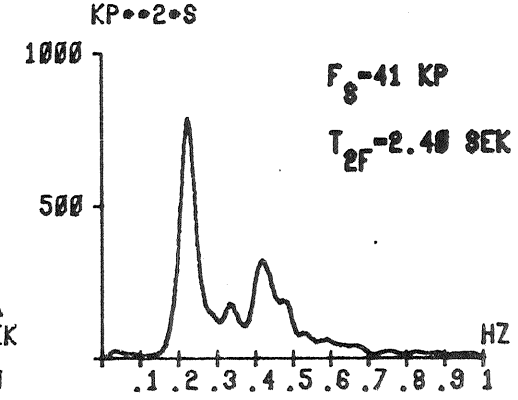
LINA 2: F_{MAX}=211 KP $\bar{F}$=168 KP $F_{1/3}$=43 KP T_{ZF}=2.25 SEK







LINA 3: F_{MAX}=172 KP $\bar{F}$=128 KP $F_{1/3}$=39 KP T_{ZF}=2.54 SEK



VÅGOR

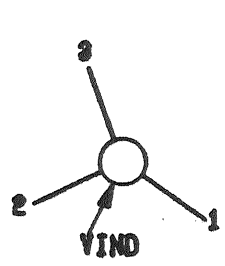
H_S=.59 M

T_2=3.4 SEK

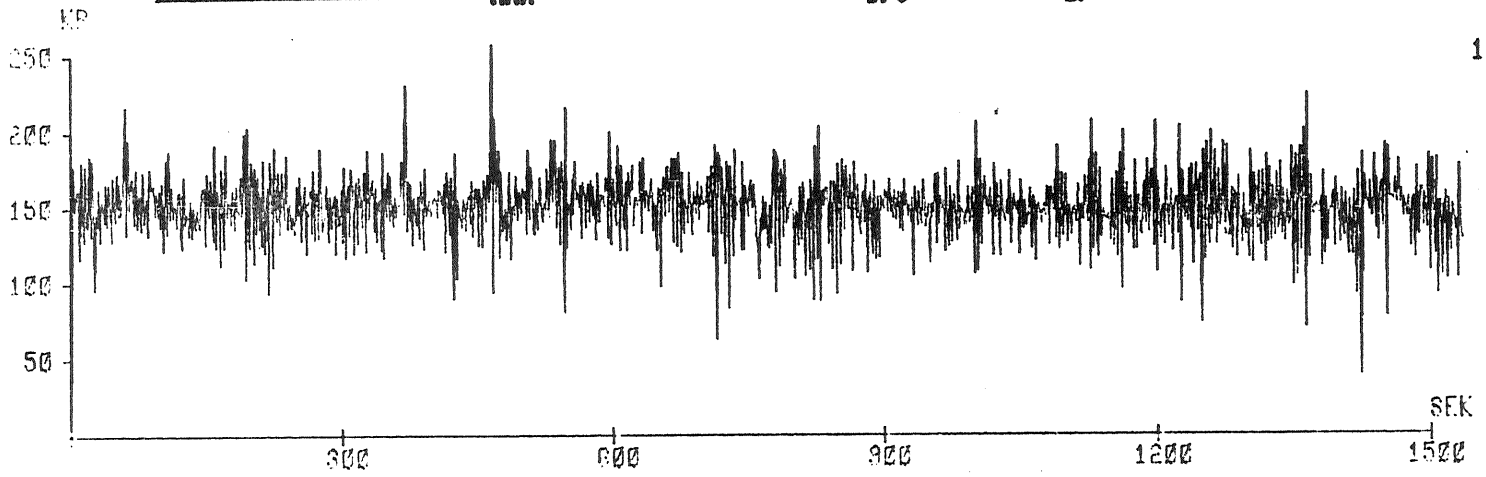
Figur 7.5.5

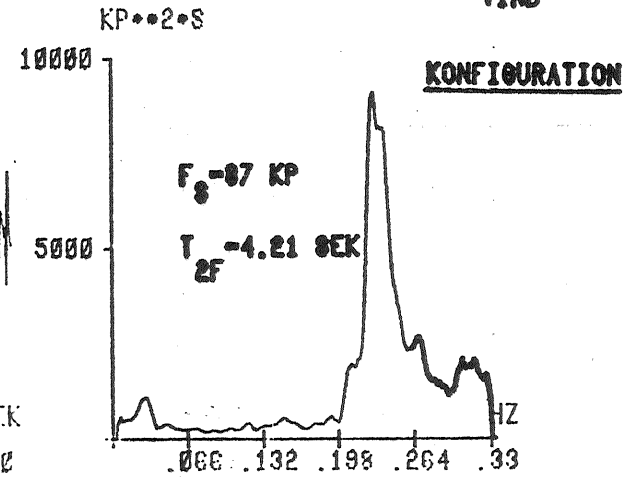
Figur 7.5.7 IPS-FÖRANKRINGSKRAFTMÄTNING 801028/1+2+3

VIND SSV 8.6 M/S

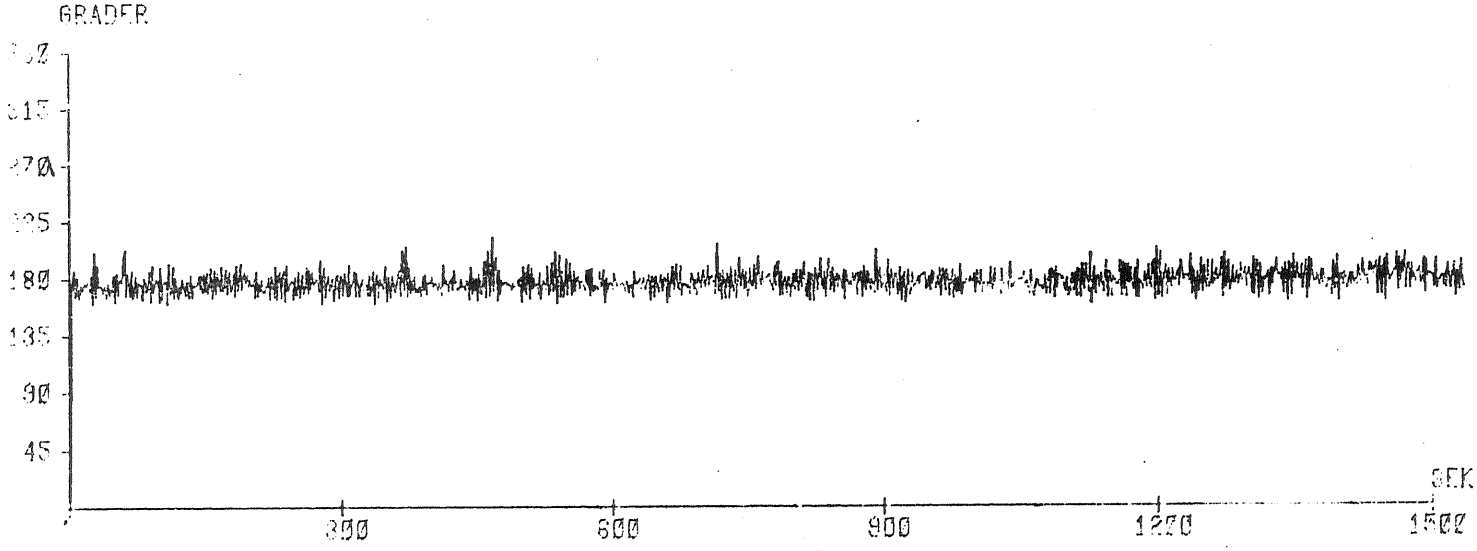


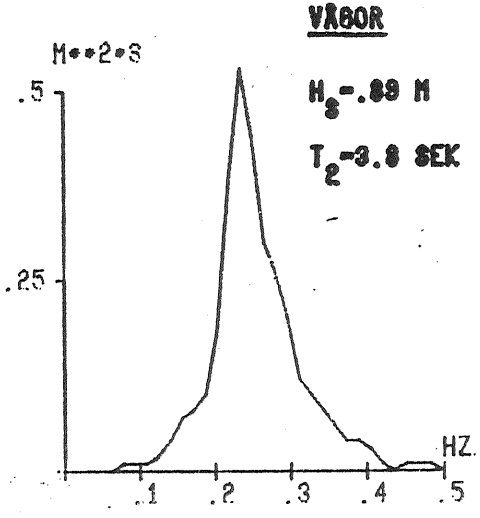
RESULTERANDE KRAFT: F_{MAX}=257 KP $\bar{F}$=148 KP $F_{1/3}$=76 KP T_{ZF}=4.57 SEK



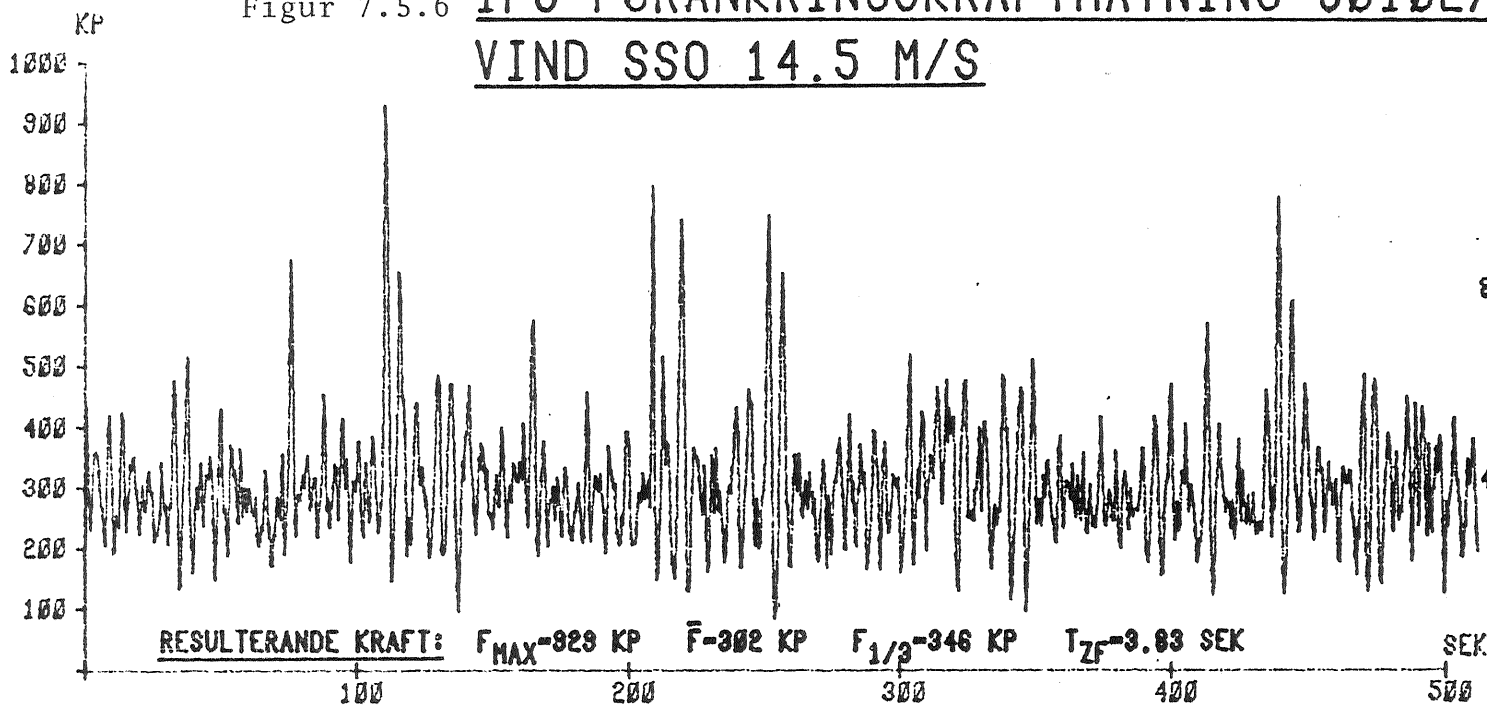


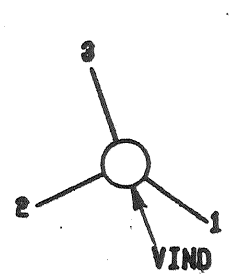
RESULTERANDE RIKTNING



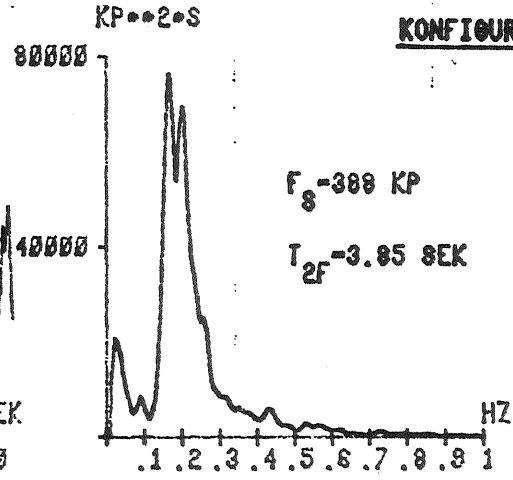


Figur 7.5.6 IPS-FÖRANKRINGSKRAFTMÄTNING 801027/7
VIND SSO 14.5 M/S

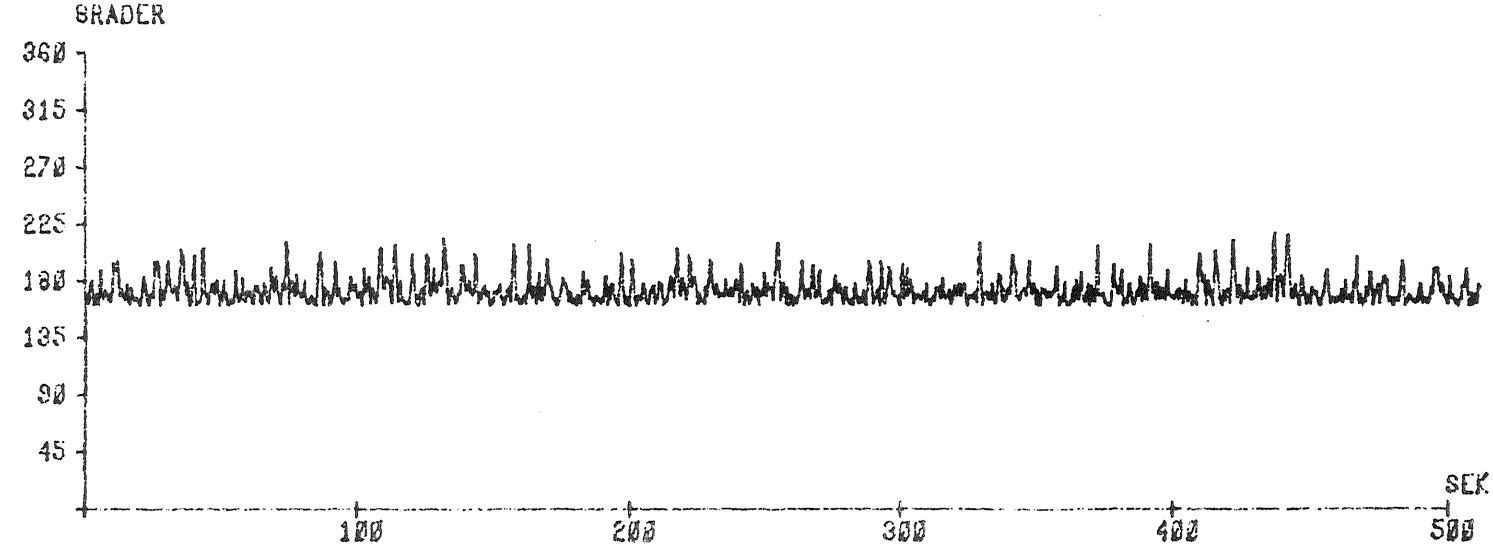


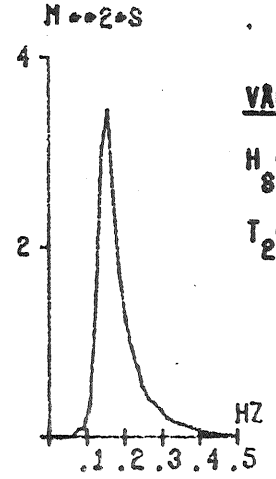


KONFIGURATION



RESULTERANDE RIKTNING





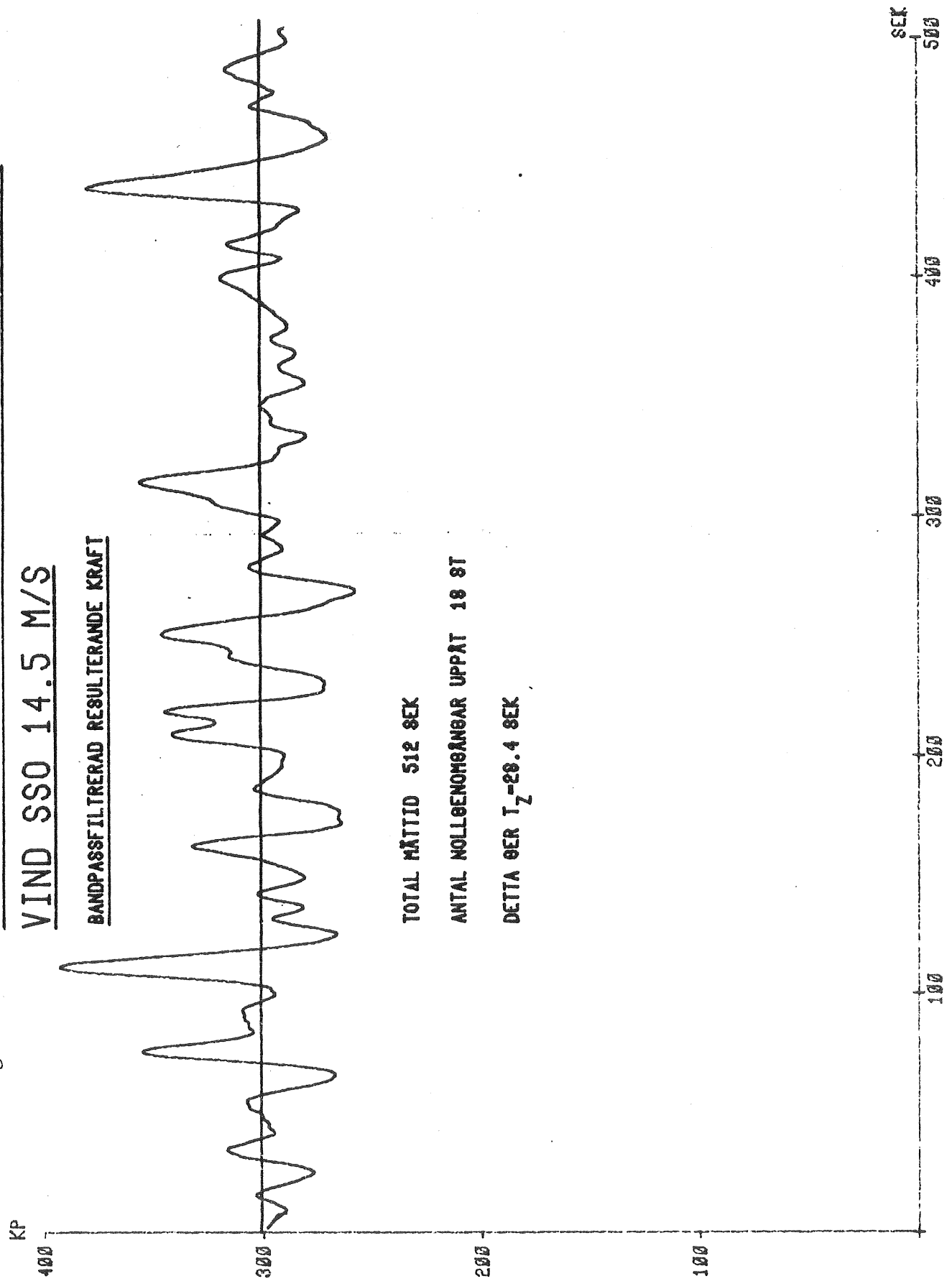
VÅGOR

H_S=2.14 M

T_2=5.1 SEK

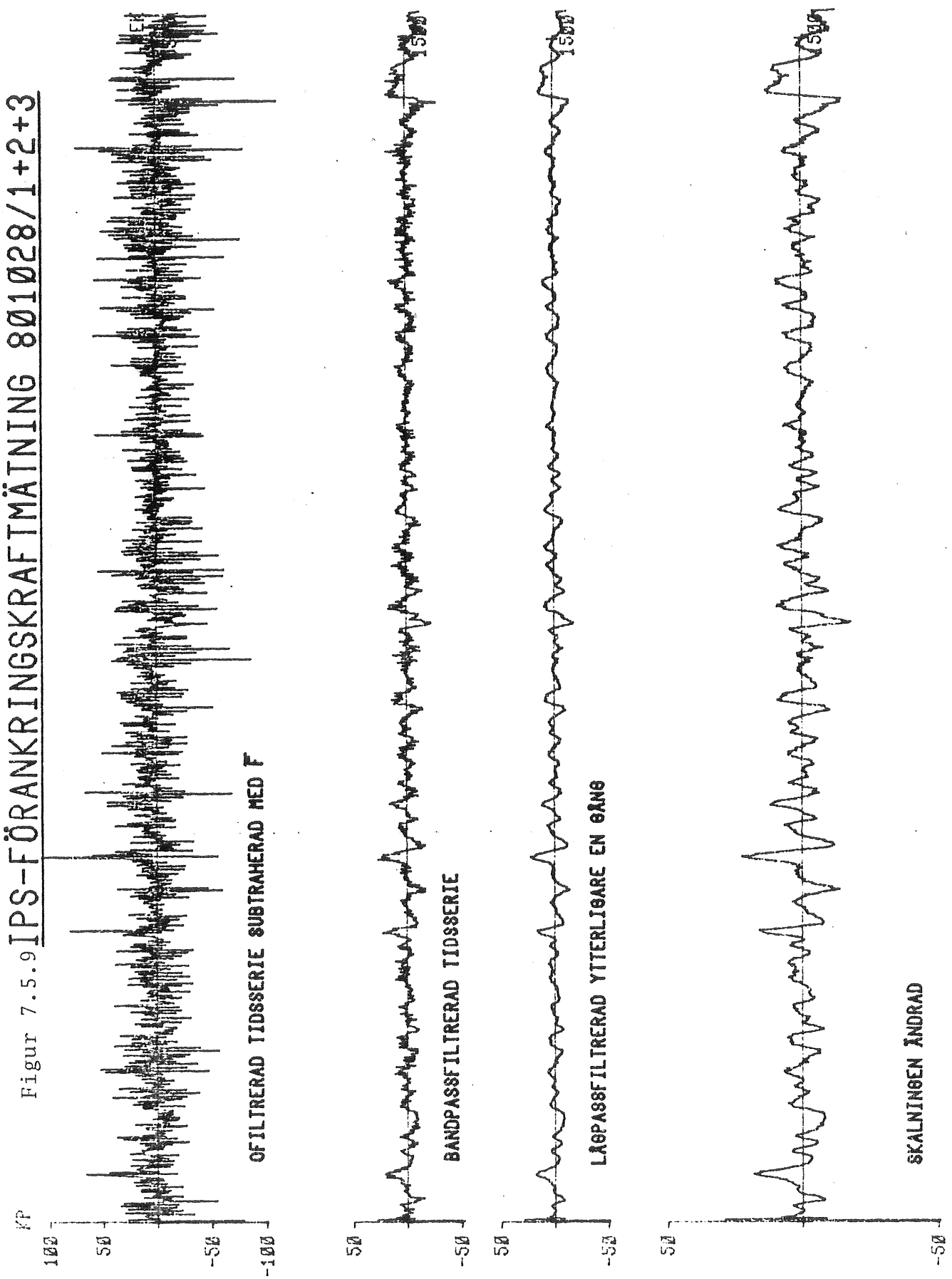
Figur 7.5.6

Figur 7.5.8

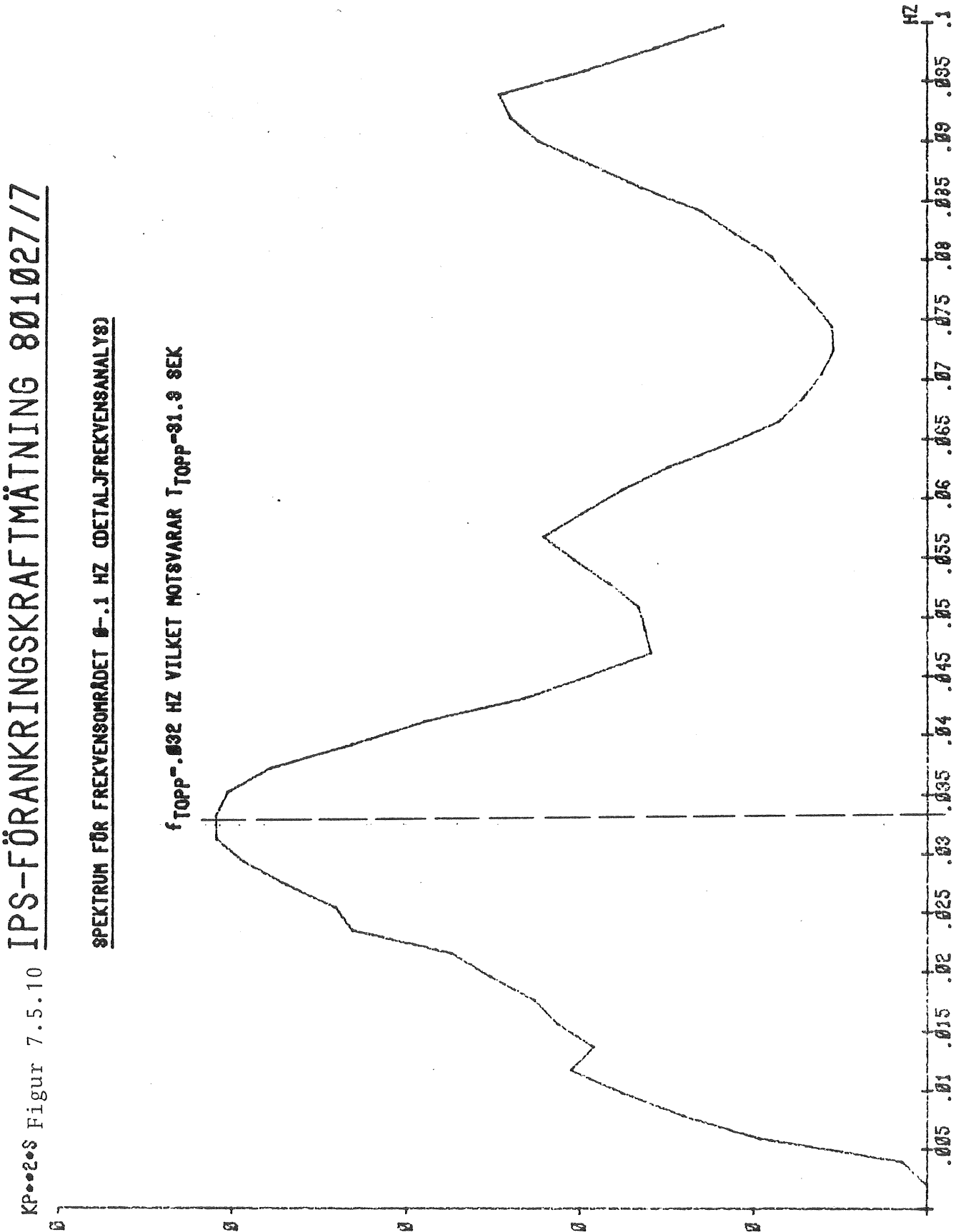


Figur 7.5.8

Figur 7.5.9

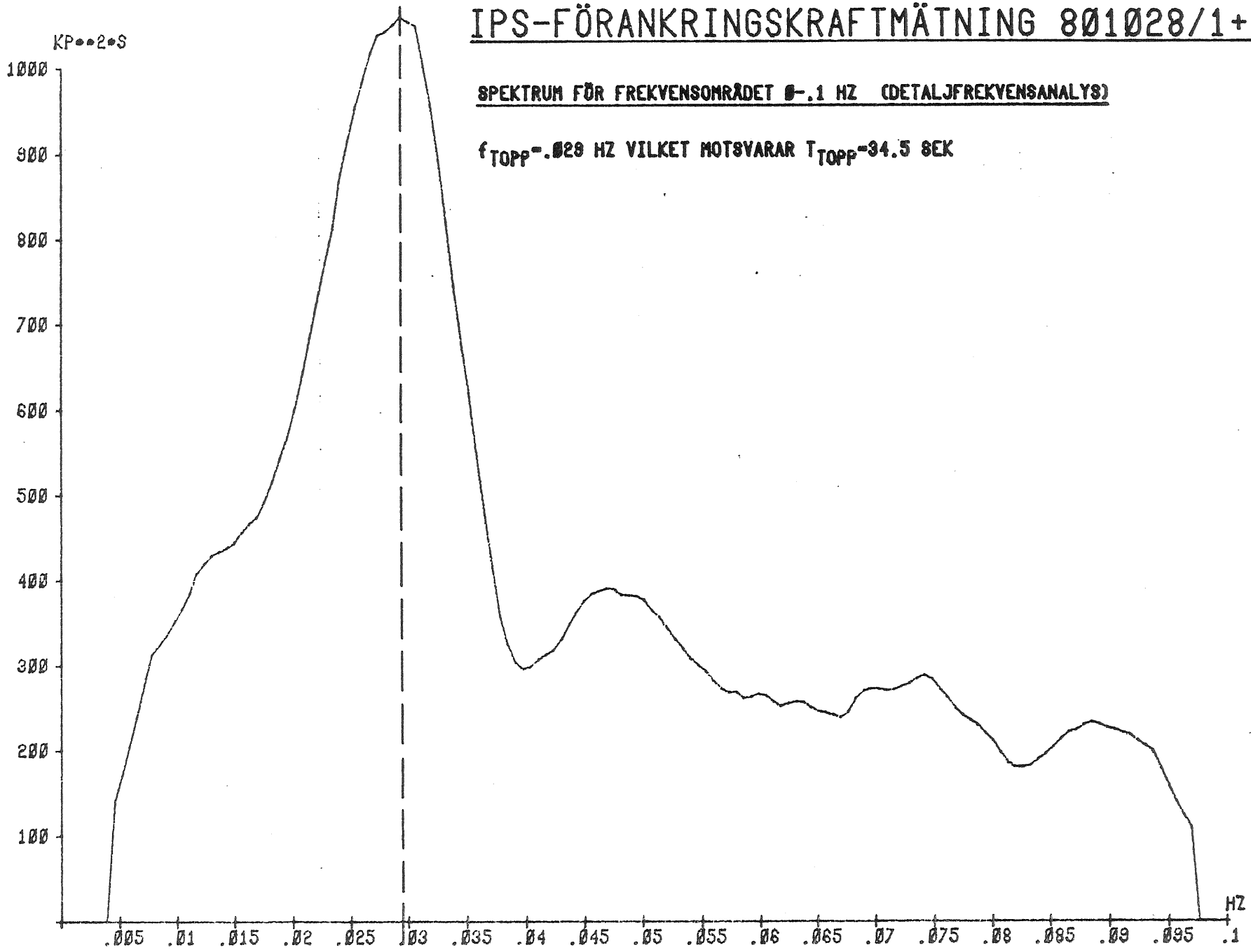

Figur 7.5.9 IPS-FÖRANKRINGSKRAFTMÄTNING 801028/1+2+3
KP
100
50
-50
-100
OFILTRERAD TIDSSERIE SUBTRAHERAD MED F
50
-50
BANDPASSFILTRERAD TIDSSERIE
50
-50
LÅGPASSFILTRERAD YTTERLIGARE EN GÅNG
50
-50
SKALNINGEN ÄNDRAD

Figur 7.5.10


IPS-FÖRANKRINGSKRAFTMÄTNING 801027/7
KP••2•S Figur 7.5.10
SPEKTRUM FÖR FREKVENSOMRÅDET 0-.1 HZ (DETALJFREKVENSANALYS)
f_{TOPP}=.032 HZ VILKET MOTSVARAR T_{TOPP}=31.3 SEK
25000
20000
15000
10000
5000
HZ
.005 .01 .015 .02 .025 .03 .035 .04 .045 .05 .055 .06 .065 .07 .075 .08 .085 .09 .095 .1

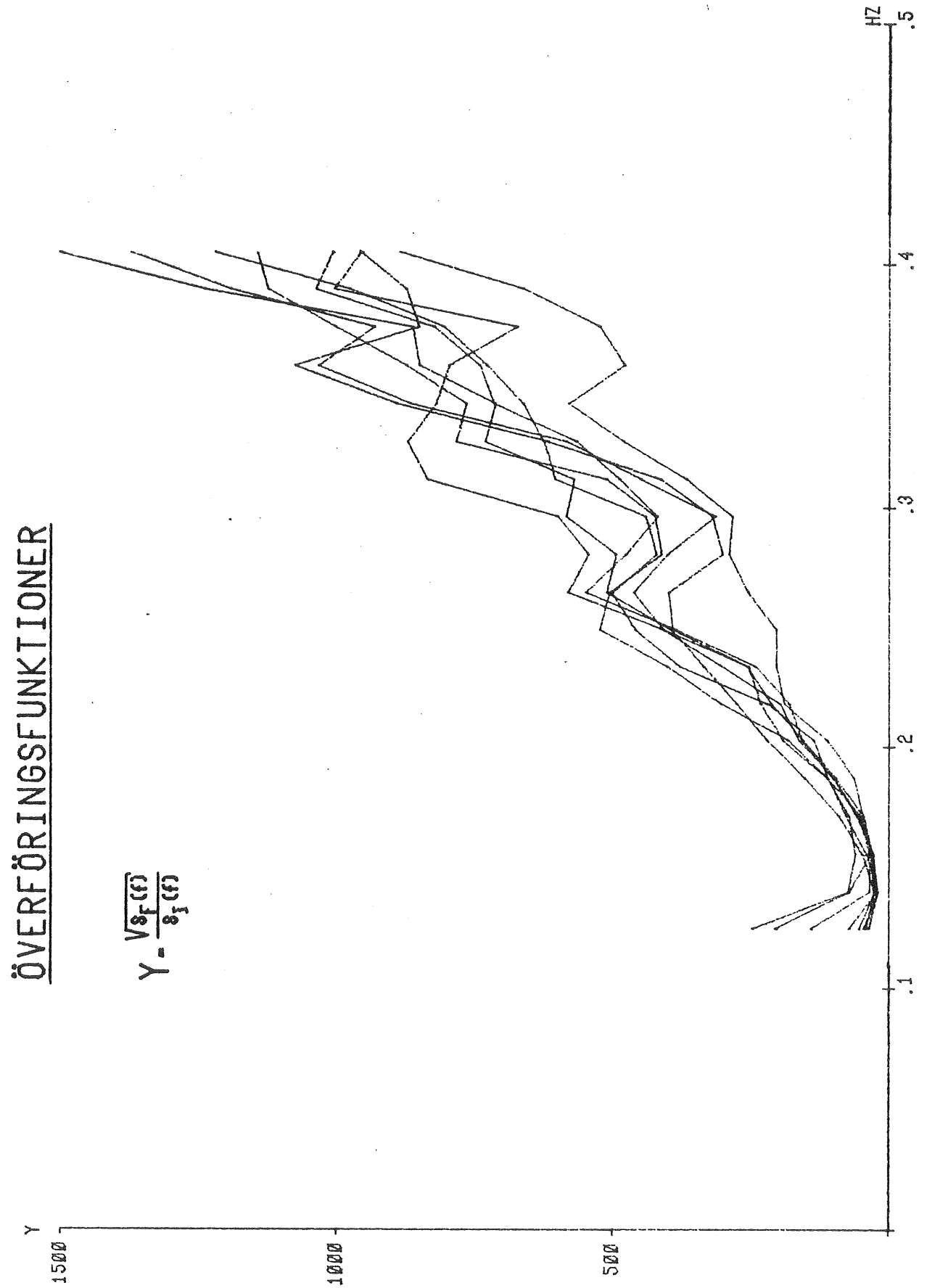
Figur 7.5.11

IPS-FÖRANKRINGSKRAFTMÄTNING 801028/1+2+3

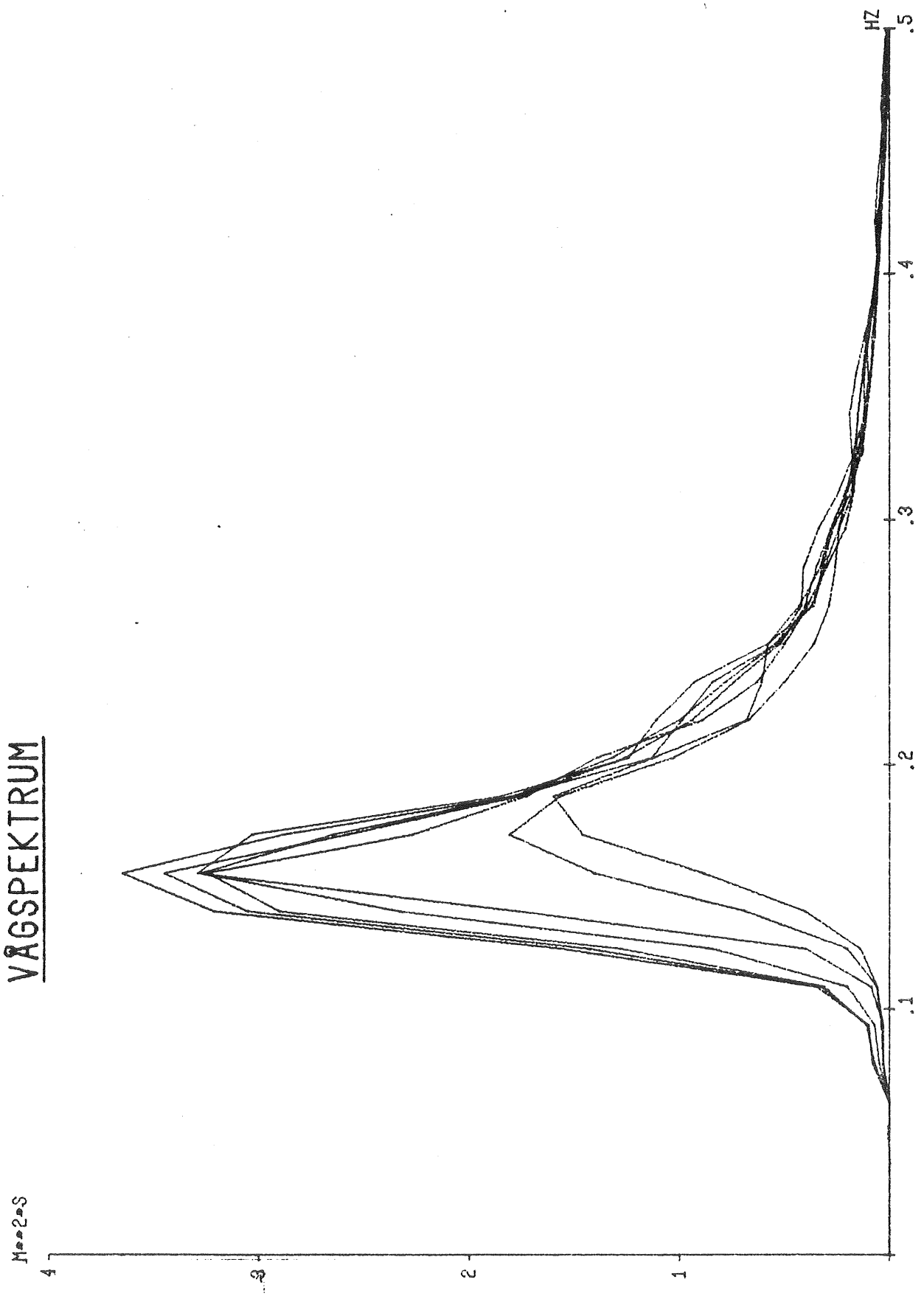


Figur 7.5.11

Figur 7.5.12


Figur 7.5.12 IPS-FÖRANKRINGSKRAFTMÄTNING 801027
ÖVERFÖRINGSFUNKTIONER
$Y = \frac{\sqrt{S_F(f)}}{S_I(f)}$
Y
1500
1000
500
.1
.2
.3
.4
.5
HZ

Figur 7.5.13



Figur 7.5.13 IPS-FÖRANKRINGSKRAFTMÄTNING 801027 VÅGSPEKTRUM

7.5.5 Utförda försök 1981

Bojen sjösattes 4 juni med hjälp av sjöfartsverkets tjänstefartyg Virgo. Den togs upp cirka en månad senare (9 juli) på grund av att kolven sjunkit och att en förankring uppenbarligen blivit påseglad. Bojen togs till Lindholmen för reparation. En ny kolv av stål tillverkades, en bastantare koppling mellan axeln och generatorn monterades och elsystemet modifierades.

Den 19 augusti sjösattes bojen på nytt. Efter en period med stiltje och diverse intrimning startades mätningarna den 5 september, dock utan vågmätare. 10 mätningar gjordes på detta sätt, för medelvärdesjämförelser mellan vågeffekt och bojeffekt kunde dock SMHI:s mätvärden användas.

På grund av jordfel vid mottagningsstationen i Långedrag gick demodulatorn sönder och fick skickas till Tyskland på reparation. Efter reparationen kopplades även vågmätaren in och mätningarna startades på nytt 21 september. Batteriladdaren havererade på grund av oväntat stor ström varför batterierna vid mätning fick bytas ungefär var femte dag. Eftersom bojen är dimesionerad för sommarvågor och det nu var höst var vågorna betydligt större än önskat. Därför har endast ett fåtal serier med periodtider mindre än resonansperiodtiden kunnat registreras. I andra mätomgången gjordes ca 80 mätningar varav 4 med användbara vågregistreringar.

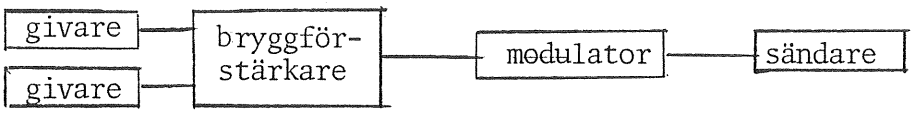
Verkningsgradskurvan har därför inte kunnat kartläggas fullständigt. För vågperiodtider större än resonansperiodtiden är verkningsgradskurvan bestämd med större säkerhet. Mätningarna på bojen är även utförda under mycket hårt väder t ex stormen 8-9 oktober. Från helikopter filmades och fotograferades bojen den 9 oktober. Bojen togs upp 26 oktober och placerades på Lindholmen över vintern.

Försöksanordningar

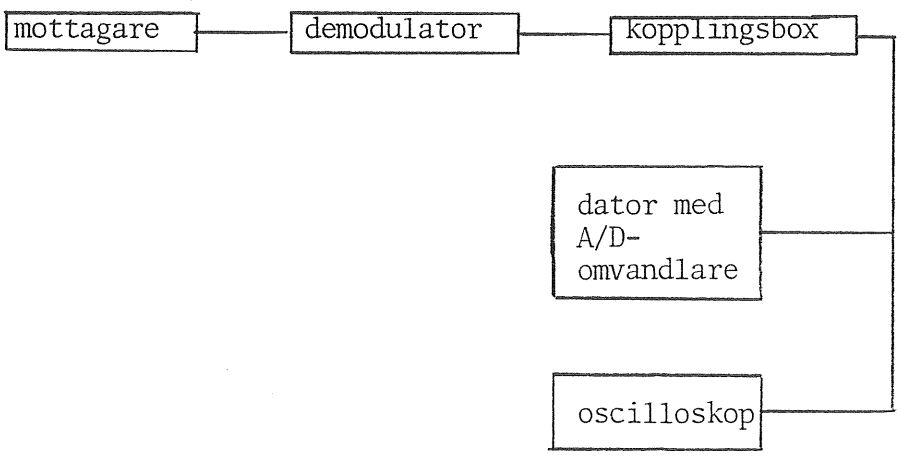
Försöksanordningarna på 1981 års IPS-boj ser i stort sett ut som på 1980 års boj.

Sex mätsignaler har upptagits. Dessa är generatorns varvtal (kolvens hastighet relativt bojen), ena upplagskraften hos den axel som kugghjulet är placerat på, bojens acceleration, vågorna nära bojen, spänningen från generatorn och strömmen från generatorn. Dessa signaler har via en bryggförstärkare med valbar förstärkning och valbar matningsspänning pulskodmodulerats och sänts med radio till mottagningsstationen i Långedrag.

Signalerna har demodulerats och registrerats med hjälp av en A/D-omvandlare och en bordsdator. Mätprogrammet fungerar så att det med valbar samplingstid läser in ett valbart antal mätvärden från de sex kanalerna. Dessa mätvärden lagras på disketter. Ett oscilloskop har funnits till hands för direkt observation av signalerna. Det har visat sig att vågmätarsignalen har så mycket störningar att endast ett fåtal serier har kunnat användas. De andra fem signalerna har inte varit så störningskänsliga. Mätningarna har varit styrda av en klocka placerad i bojen. Denna har varit inställd så att mätning har skett varannan timme och batteriladdning varannan timme. Under mättimmen har klockan kopplat om fältströmmar till fyra olika värden, som då motsvarar fyra olika dämpningar (belastningar) hos generatorn.



Figur 7.5.14 Mät och sändarsystemet.



Figur 7.5.15 Mottagarsystemet.

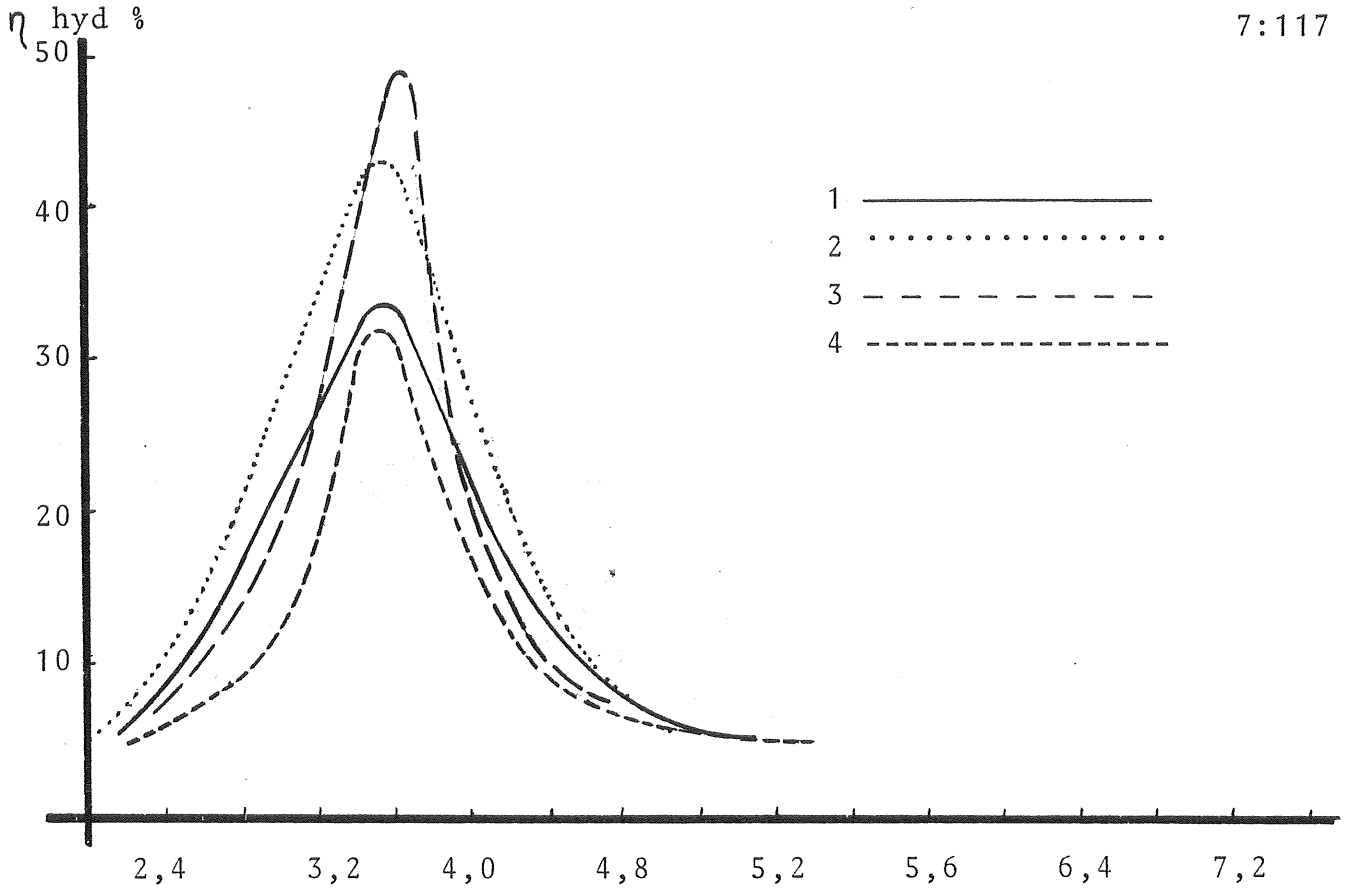
7.5.6 Resultat 1981

Syftet med försöken vid Trubaduren har varit att få ett mått på dels den hydrodynamiska medelverkningsgraden dels den totala medelverkningsgraden för olika vågsituationer. På grund av diverse förseningar (se ovan) kom mätningarna inte igång förrän i september. Hösten har dessutom varit mycket blåsig. Mätningar i små vågor har därför inte kunnat ske. Bojens verkningsgradskurvor (figur 7.5.16, 17) för vågperiodtider lägre än bojens resonansperiodtid är därmed inte fullständigt kartlagd.

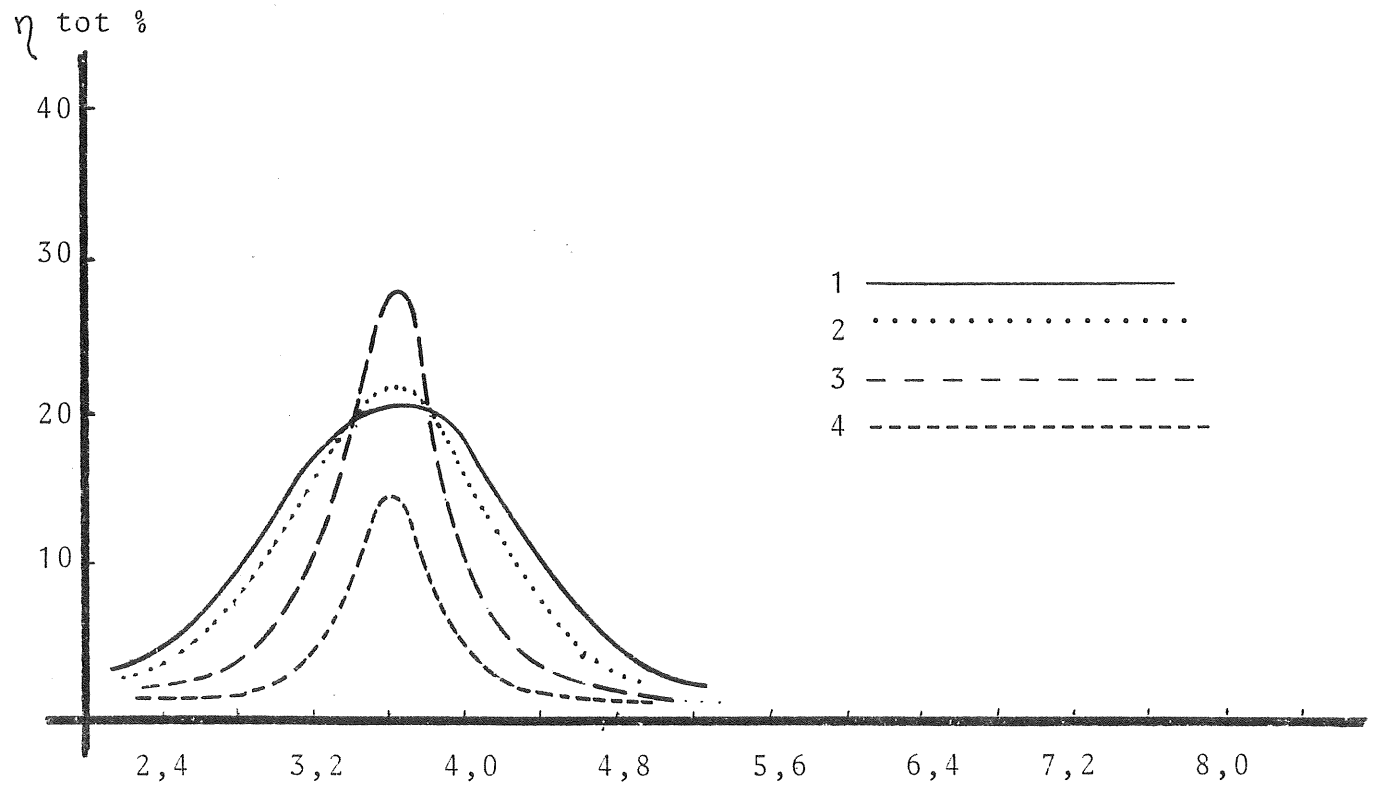
Både den hydrodynamiska medelverkningsgraden och den totala medelverkningsgraden har sina maxima vid 3.6 s. Detta är något högre än beräknat om man använder skalfaktorn från Lygnernmodellen fås resonansperiodtid 3.1 s. Det högre värdet beror sannolikt på förträngningen i röret som dels ökar bojens massa dels ökar bojens "added mass".

Den totala medelverkningsgradens maximala värde är nära 30 % (se figur 7.5.20) och den hydrodynamiska medelverkningsgradens maximala värde är nära 50% (se figur 7.5.19).

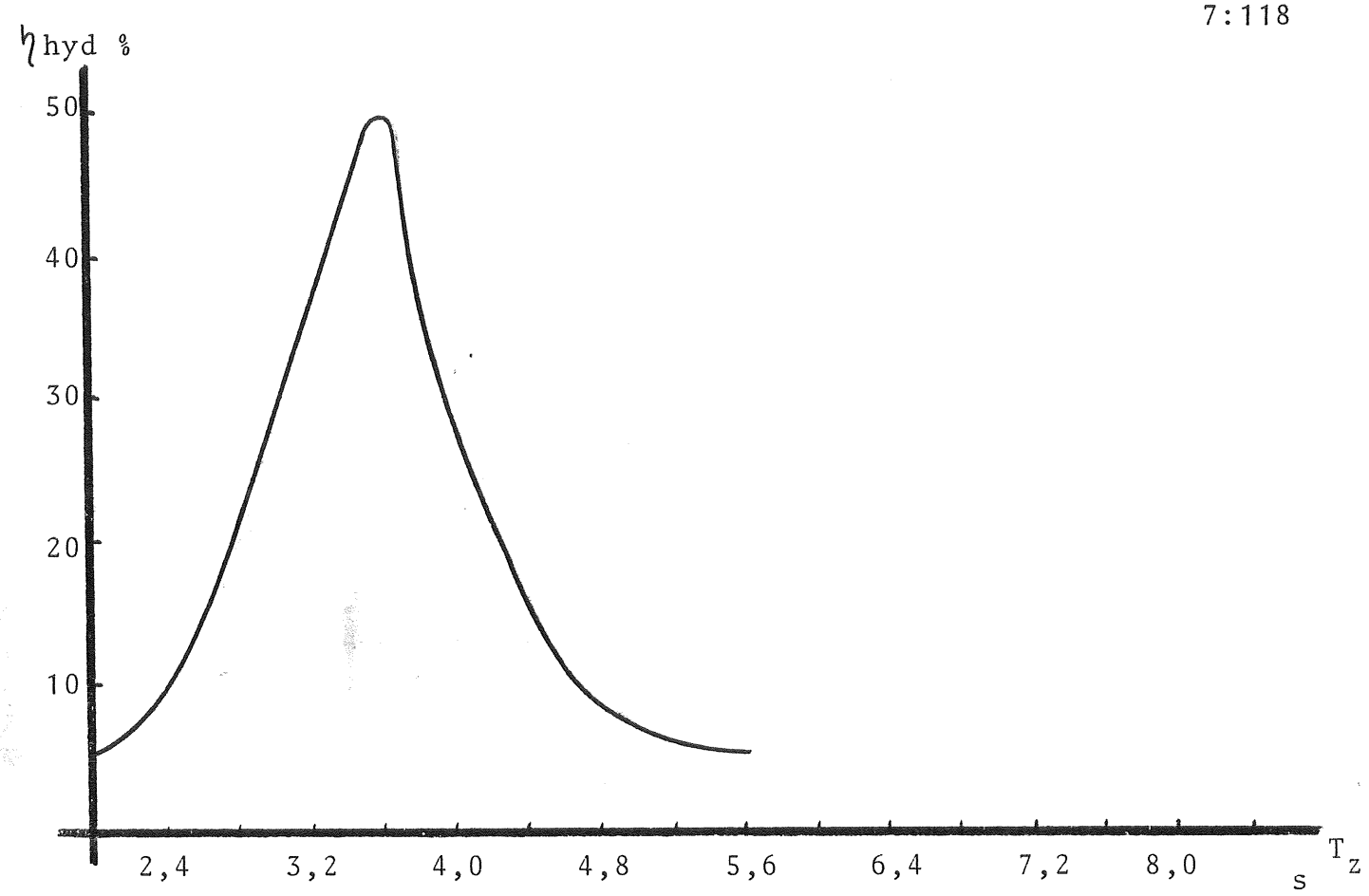
Generatorns dämpning har stor inverkan på verkningsgraden (se figur 7.5.18). Med de fyra olika dämpningar som använts har verkningsgradsmaximum täckts in. För maximal verkningsgrad krävs en yttre dämpkonstant b_1, som varierar mellan 10 kNs/m och 20 kNs/m.



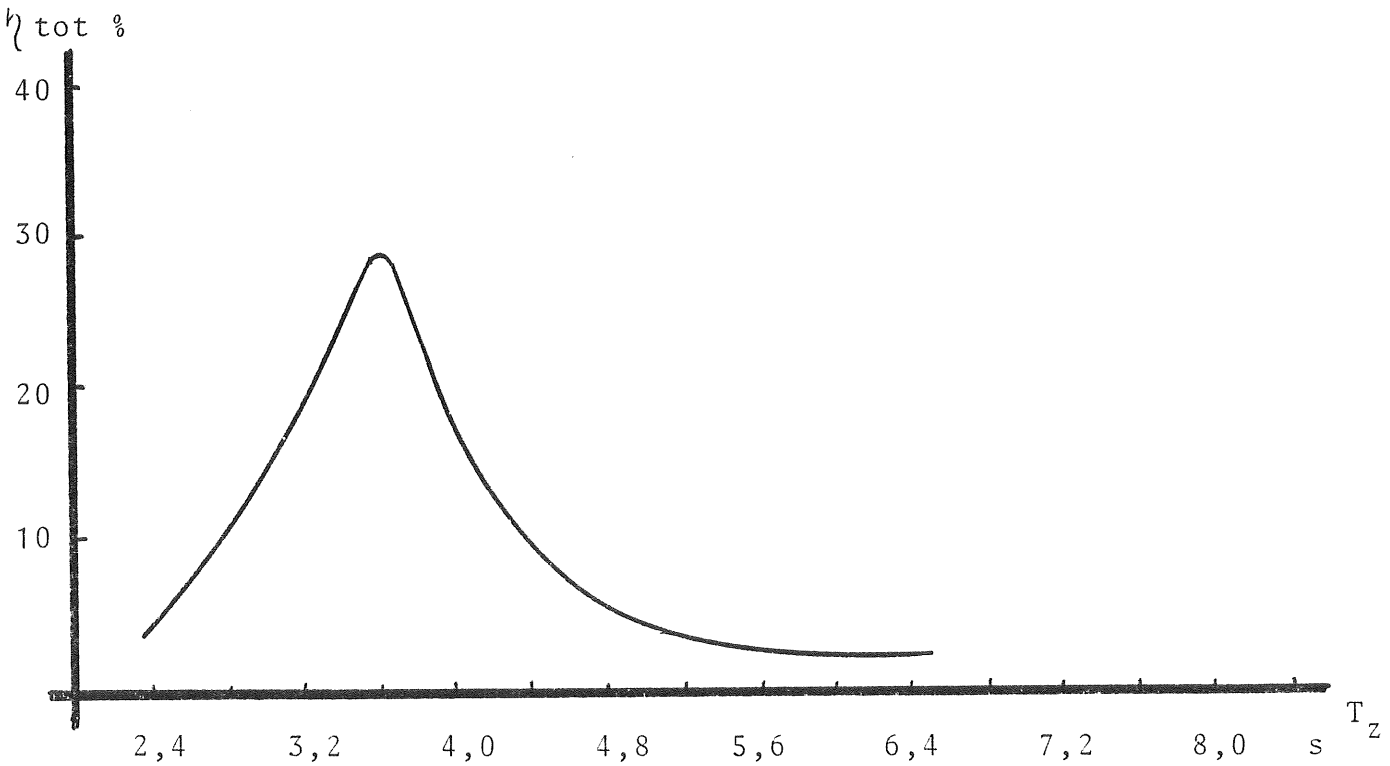
Figur 7.5.16 Hydrodynamisk medelverkningsgrad som funktion av periodtiden vid olika generatordämpning.



Figur 7.5.17 Totala medelverkningsgraden som funktion av periodtiden vid olika generatordämpning.

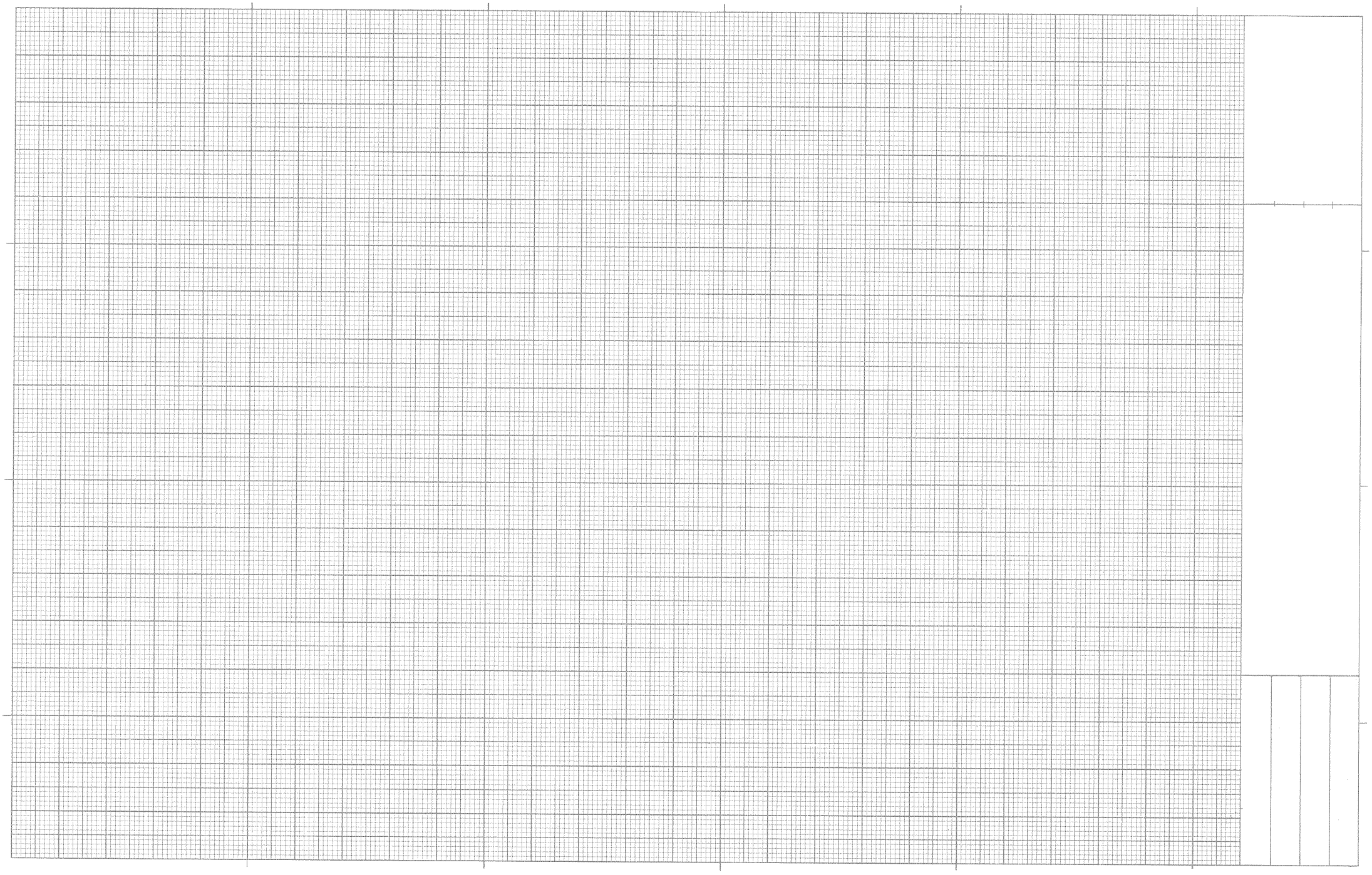


Figur 7.5.18 Hydrodynamisk medelverkningsgrad som funktion av periodtiden.



Figur 7.5.19 Totala medelverkningsgraden som funktion av vågperiodtiden.

SIS 732501 · 514 A4 · 1 x 1 mm



Energiproduktionsberäkningar

Energiproduktionen från en boj av IPS-typ på en viss plats beror på tre faktorer:

- den tillgängliga vågenergin och dess fördelning över olika frekvenser
- omvandlarens verkningsgrad
- omvandlarens utformning (storlek, massa)

Mha ett scatterdiagram över energin i vågorna, Svensson (1981), kan en kurva som visar energin (i kWh/m) som funktion av periodtiden T_z (s) uppritas (figur 7.5.21). På samma sätt kan en kurva för omvandlarens medelverkningsgrad ritas (figur 7.5.21). Vid omskalning flyttas sedan verkningsgradskurvans maximum. En skalfaktor α för den nya bojprototypen fås mha Froudes modellag.

$$\alpha = \left(\frac{Tp}{Tm}\right)^2 \qquad T = \text{periodtiden (s)}$$

$$l_p = \alpha \cdot lm \qquad l = \text{längdmått (m)}$$

$$m = \alpha^3 \cdot m_m \qquad m = \text{massa (kg)}$$

Index m står för modell och p för prototyp.

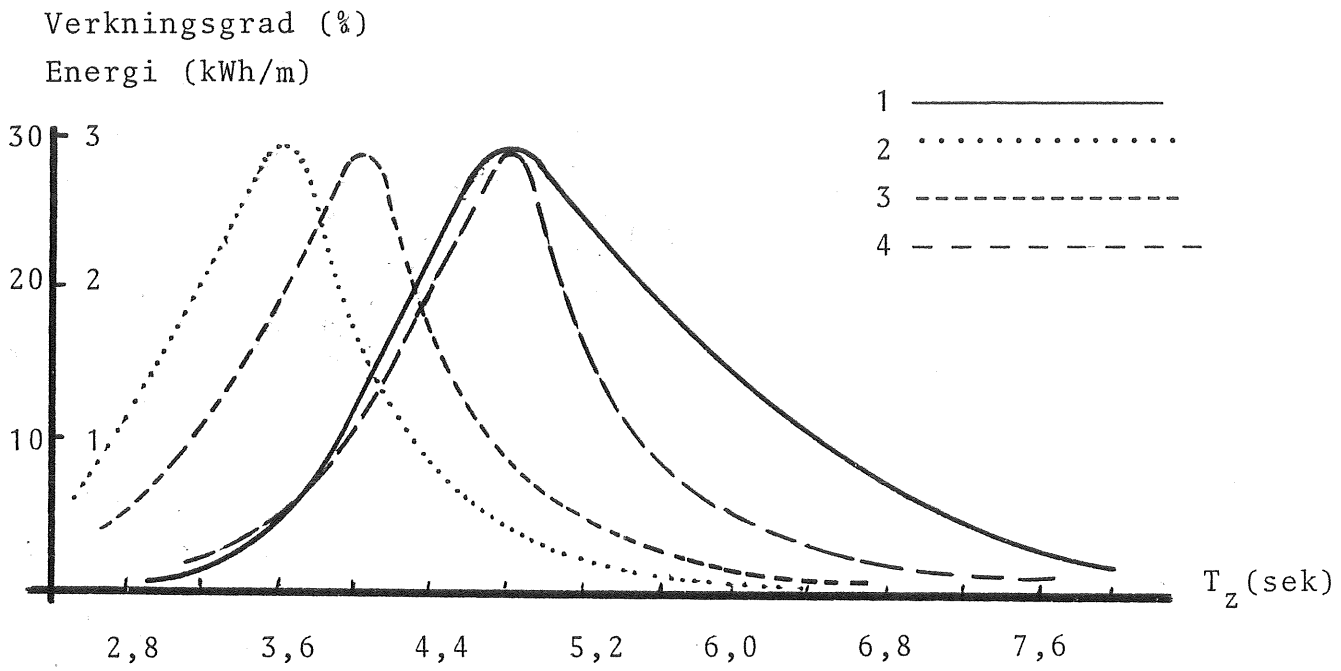
Om energiproduktionen på detta sätt beräknas dels vid Trubaduren dels vid Ölands södra grund erhålles följande resultat för IPS-bojen och för några uppskalade bojar.

Trubaduren, se figur 7.5.21.

	IPS-bojen	Uppskalad boj nr 1	Uppskalad boj nr 2	Uppskalad boj nr 3
Resonansperiodtid s	3,6	4,0	4,0	4,8
Skalfaktor α	1	-	1,2	1,8
Massa ton	9		17	51
Diameter m	3	3	3,7	5,3
Energiproduktion MWh/år	2,5	3	3,6	7,2

Boj nr 1 är inte uppskalad med Froudes modellag utan resonansperiodtiden är förflyttad från 3.6 s till 4.0 s genom ökning av

bojens massa.

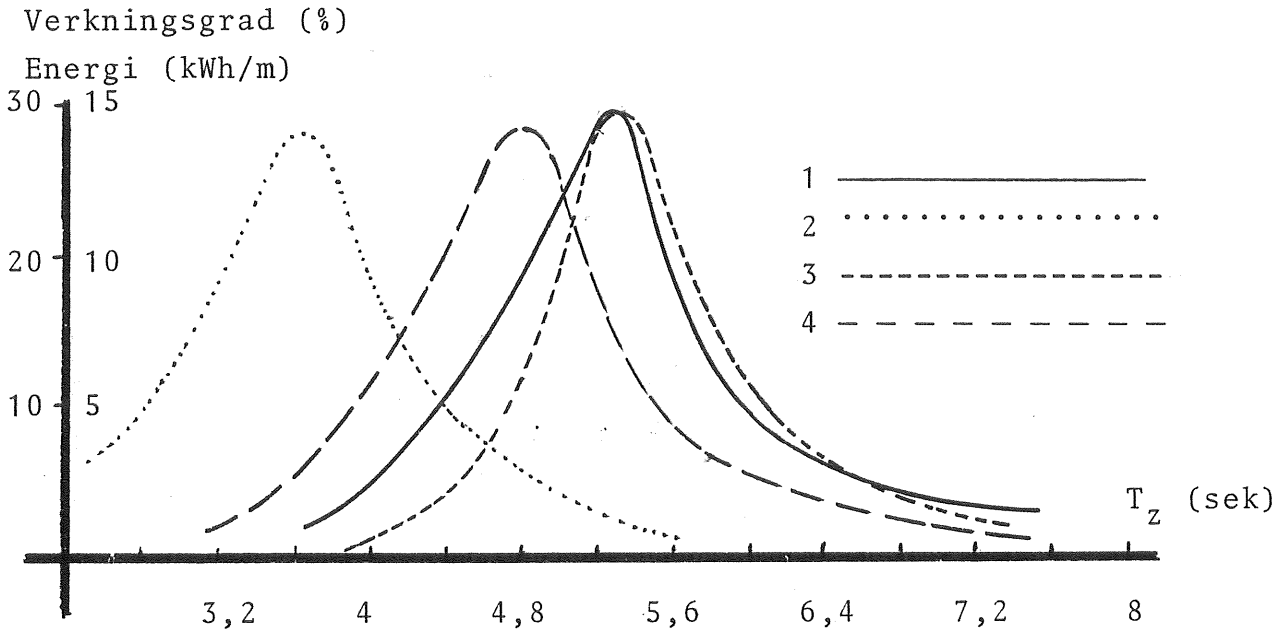


Figur 7.5.20 1. Energin i vågorna vid Trubaduren maj 79-april 80.
2. Verkningsgradskurvor för IPS-bojen.
3. Verkningsgradskurvor för boj nr 1 och 2.
4. Verkningsgrad för boj nr 3.

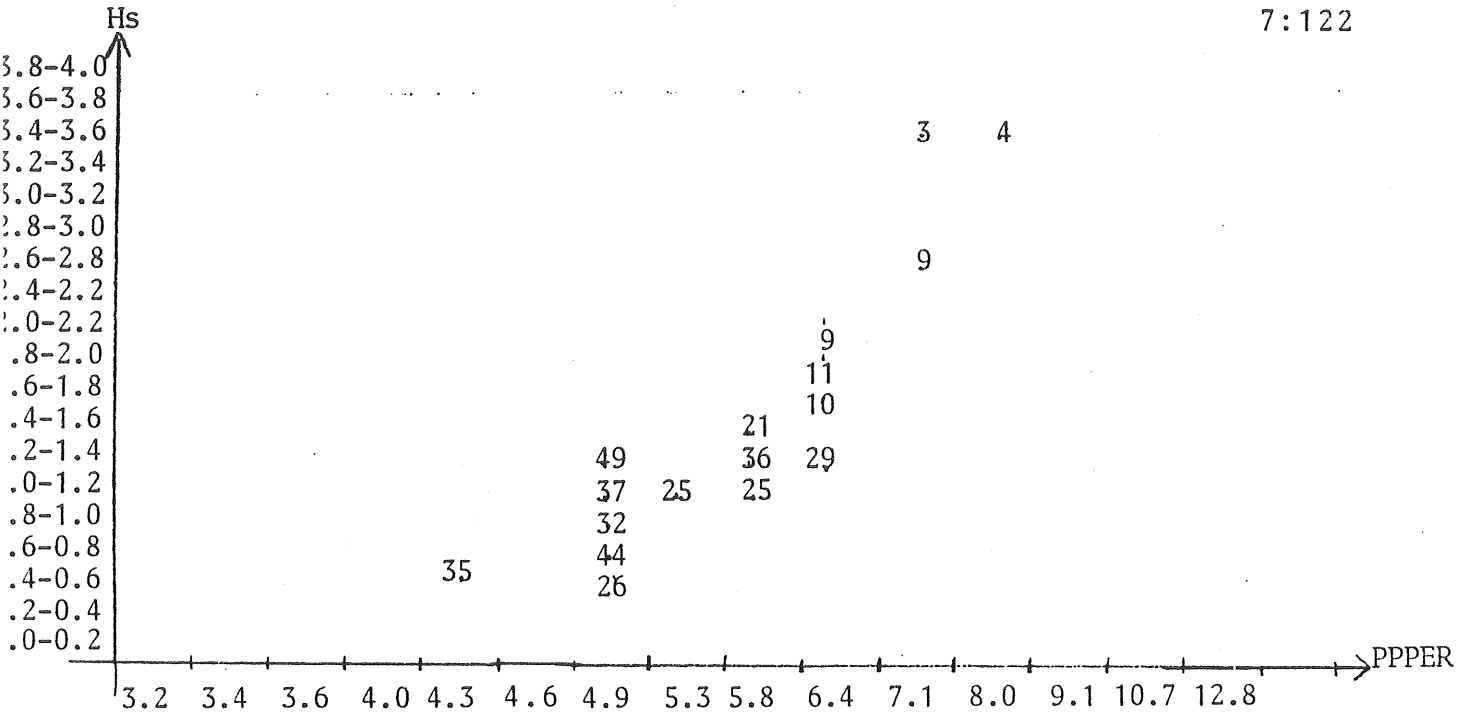
Ölands_södra_grund se figur 7.5.22

	IPS-bojen	Uppskalad boj nr 4	Uppskalad boj nr 5
Resonansperiodtid s	3,6	4,8	5,3
Skalfaktor α	1	1,78	2,17
Massa ton	9	51	92
Diameter m	3	5,3	6,5
Energiproduktion MWh/år	5,7	30	40

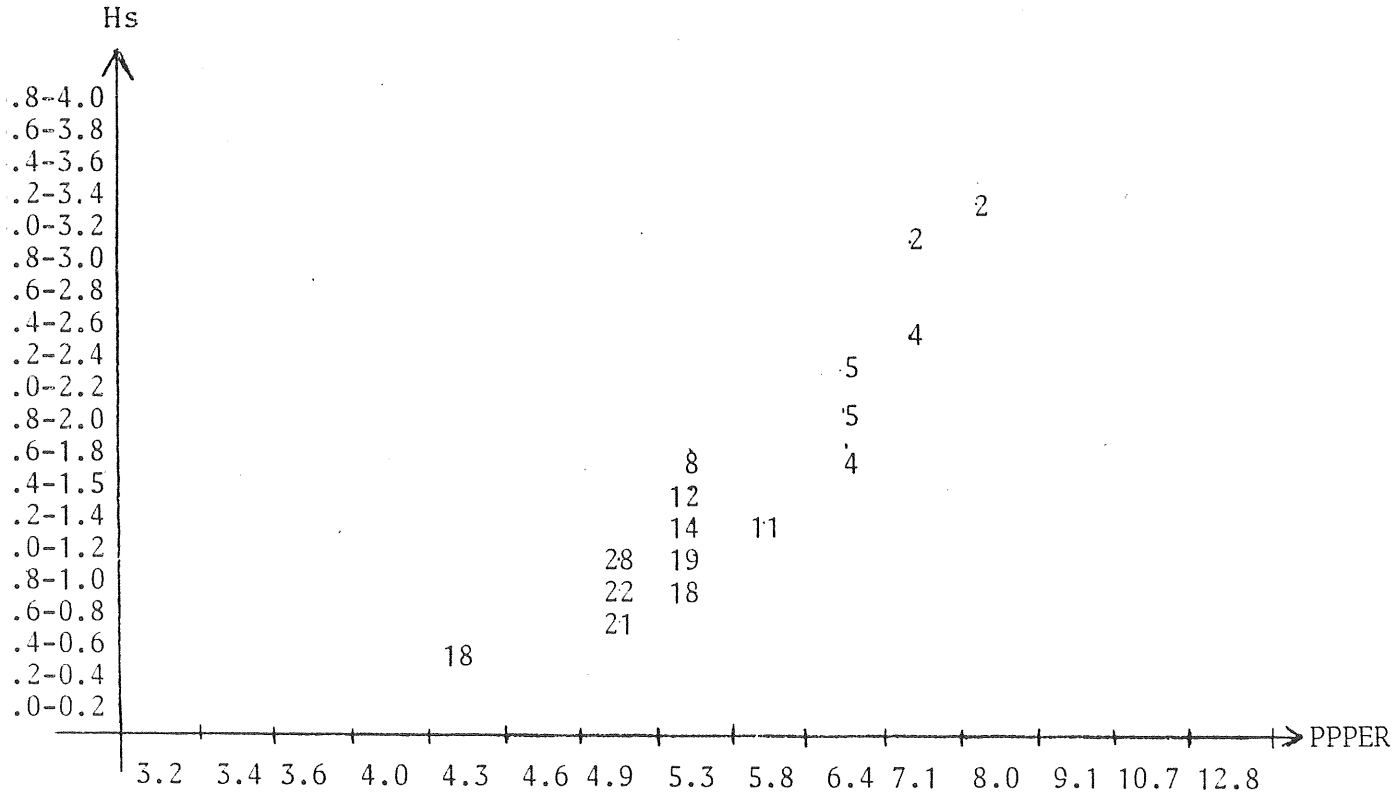
Man kan notera att 10 st IPS-bojar à 90 ton ger 57 MWh/år jämfört med 40 MWh/år för den uppskalade 90-tons bojen!



Figur 7.5.21 1. Energin i vågorna vid Ölands södra grund maj -79 - 80.
2. Verkningsgradskurvan för IPS-bojen.
3. Verkningsgradskurvan för boj nr 4.
4. Verkningsgradskruvan för boj nr 5.



Figur 7.5.22 Hydrodynamisk medelverkningsgrad för olika vågsituationer.



Figur 7.5.23 Total medelverkningsgrad vid olika vågsituationer.

7.6 Referenser

Havelock, T. (1955): Waves Due to a Floating Sphere Making Periodic Heaving Oscillations. Proceedings of the Royal Society of London, A-231, 1-7.

Hylander (1979): Datorbaserade mät- och bearbetningsrutiner vid energiupptagning med en modellboj i sjöförsök. Examensarbete inst för elektromaskinlära, CTH, Göteborg 1979.

Se även gruppraporterna GR:11, GR:13, GR:14, GR:16, GR:17, GR:24, GR:26, GR:32, GR:35, GR:37, GR:38, GR:43.

Svensson J (1980): Vågdata från svenska kustvatten 1979-1980, SMHI rapport RH0 30.

NE 1981:16 Akvatisk Energi