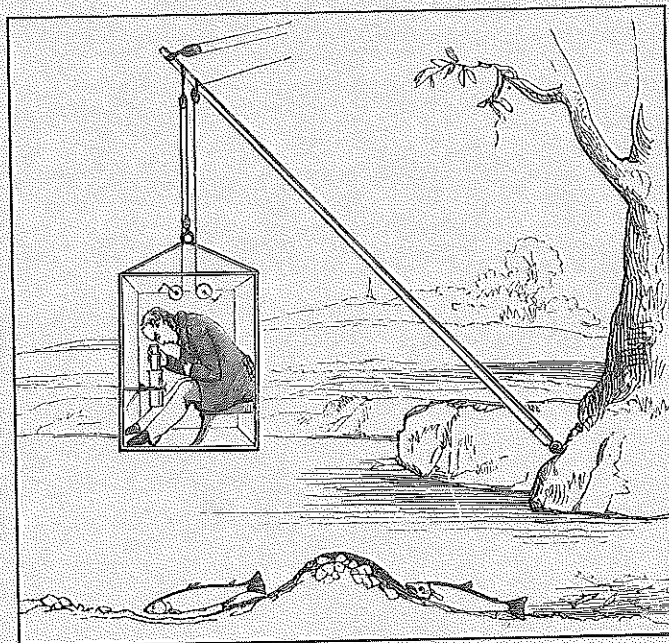


Information från

SÖTVATTENS- LABORATORIET

Drottningholm



HÅKAN WESTERBERG

Ultraljudsteleometri

ULTRALJUDTELEMETRI

Håkans Westerberg

INLEDNING	2
TELEMETRITEKNIKEN	3
Sändare	4
Mottagare	11
Automatiska system	14
LJUD I VATTEN	15
Ljud, grundläggande samband	16
Transmissionsförluster	19
Dämpning	19
Spridning	20
Bubblor	22
Reflexion	22
Refraktion	24
Brus	30
METODOLOGISKA PROBLEM	31
Sändarens inverkan	32
Strömningsmotstånd (a)	33
Buoyancyändring (b)	34
Påverkan akustriskt (c)	34
Påverkan elektriskt (d)	35
Påverkan kemiskt (e)	35
Infektioner (f)	36
Trauma vid hantering (g)	36
Kamouflage (h)	36
Påverkan genom försökssituationen	37
LITTERATUR	38
SUMMARY: ULTRASONIC TELEMETRY	39

INLEDNING

Ultraljudtelemetri som arbetsmetod för fiskeribiologiska undersökningar introducerades i Sverige av Lennart Nyman. Han presenterade tekniken i denna serie 1973. För närvarande pågår ett projekt "Telemetriundersökningar på fisk", som administreras av Fiskeristyrelsen. Projektet startade 1975 och stöds av DCL:s nämnd för värmekraftens miljöfrågor, preliminärt till och med 1978. Projektet syftar allmänt till att bygga upp resurser och metoder för ultraljudtelemetri, och speciellt att använda telemetri vid studier av varmvattenutsläppens eventuella effekter på fisk.

Den internationella utvecklingen inom undervattenstelemetri har varit snabb efter Nymans sammanfattning 1973. För närvarande arbetar ett sextiotal forskargrupper i Canada, England, Japan, Norge, Sovjet, Västtyskland och USA med undervattenstelemetri, och arbetet har tills nu resulterat i cirka 200 artiklar. Karakteristiskt för utvecklingen är att många olika arter studeras, att ultraljudsändarna inte bara används för att ge upplysning om fiskarnas position, utan också för att överföra annan information, samt en förbättring av prestanda hos både sändare och lyssnarutrustning. Laxfiskar har samlat de i särklass största antalet undersökningar, därnäst olika arter bass, i övrigt fördelar sig undersökningarna på ett sextiotal fiskarter samt flera vattenlevande däggdjur och invertebrater. Förutom tryck och temperatur har man telemetriskt överfört mätningar av EKG, EEG, EMG salinitet, ljusstyrka, andnings- och stjärtslagsfrekvens samt simhastighet. Fortfarande är "Underwater Telemetry Newsletter" (utgiven vid Environmental Sciences Div., Oak Ridge National Lab., Oak Ridge, Tn 37830, USA) huvudkällan för information om verksamheten inom undervattenstelemetri.

I Norge har fiskeriforskningsrådet stött ett omfattande tekniskt utvecklingsarbete inom undervattenstelemetri sedan 1973. Arbetet bedrivs vid "Selskapet for Industriell og Teknisk Forskning ved Norges Tekniske Høgskole"; SINTEF.

Resultaten finns redovisade i en serie rapporter (Holand 1973 a, 1974, 1975, Holand och Mohus 1973, 1976, och Holand m.fl. 1974). De konstruktioner av mottagarutrustning och ultraljudsändare som tagits fram vid SINTEF har i stor utsträckning använts vid tillverkning av utrustning för projektet "Telemetriundersökningar på fisk".

Avsikten med denna rapport är att diskutera ultraljudtelemetrins teknologi och metodologi. I det första avsnittet vill jag dels beskriva de olika delarna i en telemetriutrustning och visa vilka begränsningar som finns för storlek och prestanda, dels vill jag presentera den utrustning som har byggts för projektet "Telemetriundersökningar på fisk" och ge en översikt över vad som för närvarande finns kommersiellt tillgängligt.

Förståelse för de speciella förhållanden som gäller för ljudutbredningen i vatten är till stor hjälp vid telemetriexperiment. Det finns en omfattande teknisk speciallitteratur, som framför allt inriktar sig på undervattensakustikens teori och militära tillämpningar. Däremot finns det få framställningar som vänder sig till läsare utan specialkunskaper i fysik. Jag har därför gjort ett försök att sammanfatta de delar av undervattensakustiken som är direkt tillämpliga för telemetriarbetet.

När det gäller utvärderingen av telemetristudiernas resultat finns det många obesvarade frågor om mätmetodens inverkan på fiskarnas beteende. Det sista avsnittet behandlar de metodstudier som har gjorts och diskuterar vilka potentiella felkällor telemetrimetoden kan ha.

TELEMETRITEKNIKEN

Etologiska studier baseras i stor utsträckning på direkta visuella observationer i fält. Med kikare och kamera är man hänvisad till landlevande djur. Sikten i vattnet är så begränsad att rörliga djur, såsom fiskar, svårligen låter sig observeras. Fiskeribiologen blir härigenom väsentligen hänvisad till indirekta metoder, fångststatistik, märkningsförsök och extrapolationer från akvarieobservationer.

Samma problem möter den terrestre biologen när det gäller att studera arter som vistas i tät vegetation eller är aktiva under natten. En lösning gavs med telemetritekniken. De djur man ville studera försågs med en liten radiosändare, med hjälp av en mottagare med pejlantenn kunde man sedan lokalisera och följa djuret. Numera har metoden stor användning i viltforskningen och man utnyttjar avancerad radioteknik, redan 1970 gjordes de första försöken med övervakning via satellit.

Under vatten är dock radiotelemetri så gott som oanvändbar, eftersom radiovågornas dämpning, speciellt i bräckt eller salt vatten, är katastrofalt stor. Fig. 1 visar hur lång sträcka elektromagnetisk strålning fortplantar sig i vatten vid olika frekvenser, innan intensiteten sjunkit till en tusendel av initialvärdet. Vi ser en topp för det synliga ljusets frekvensområde, där strålningen kan penetrera sträckor av storleksordningen 10 m. I övrigt dämpas strålningen tusenfalt på mindre än en meters avstånd från källan för alla praktiskt användbara frekvenser.

Mekaniska vågor, ljud, har emellertid andra och gynnsammare egenskaper. Fig. 1 visar även sträckorna för ljudutbredningen, beräknad på motsvarande sätt som för den elektromagnetiska strålningen. Vi ser att räckvidden är avsevärt större. Med hjälp av ljud har man härigenom kunnat utveckla en ny teknik, ultraljudtelemetri, som kan användas för att studera vattenlevande djurs beteende.

Det finns betydande skillnader mellan radiovågor och ljud, men många grundläggande samband är gemensamma, varför uppbyggnaden av telemetrisystemen och utrustningen blir likartad. Grundelementerna i utrustningen är en sändare, som får följa med djuret, och en mottagare med en riktningskänslig antenn; en hydrofon.

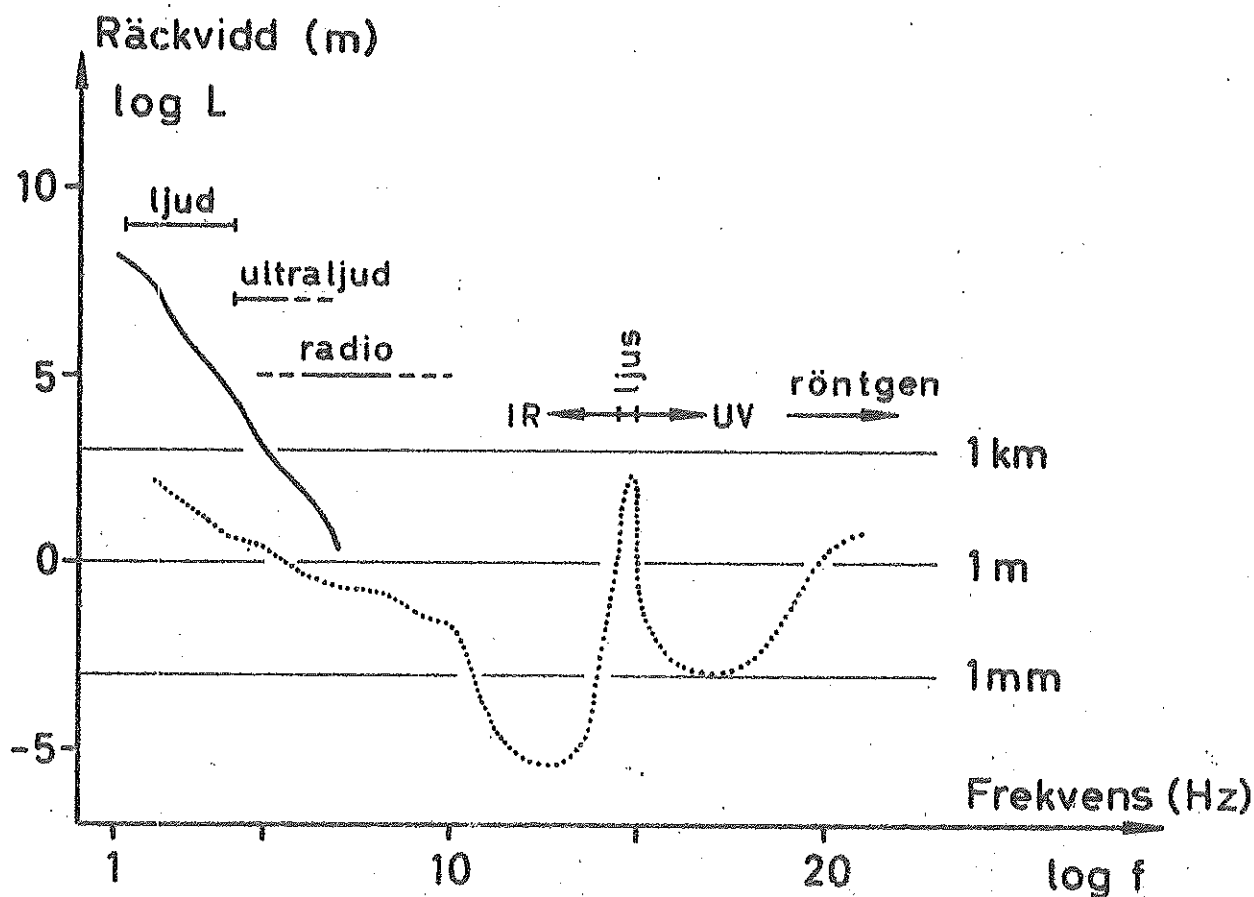


Fig. 1. Sambandet mellan räckvidd och frekvens i havsvatten. Den streckade kurvan visar elektromagnetisk strålning och den heldragna ljudvågor. Räckvidden definieras som den sträcka över vilken ett parallellt strålknippe försvagas 1.000 gånger.

Sändare

Funktionellt kan ultraljudsändaren delas upp i tre delar: en svängare, d.v.s. en anordning som omvandlar elektriska svängningar till mekaniska vibrationer och alstrar ljudvågorna i vattnet, en oscillator, som producerar de elektriska svängningarna och en kraftkälla, normalt ett batteri. Avancerade typer av sändare kan överföra information om sändarens identitet, data om djup, temperatur eller fysiologiska parametrar. För detta krävs en modulator, som styr oscillatoren så att ljudsignalen varierar entydigt med något uppmätt parameter.

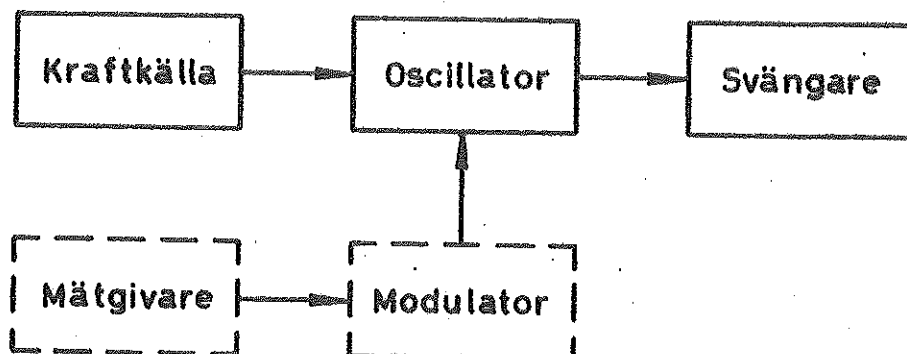


Fig. 2. Blockdiagram för en ultraljudsändare.

Konstruktionen av en telemetrisändare bestäms av följande motstridiga önskemål:

1. Stor livslängd och tillförlitlighet
2. Stor räckvidd
3. Liten storlek och vikt
4. Lågt pris

Att uppfylla de två första kraven försvåras om sändaren samtidigt skall vara liten. Kravet att göra sändaren billig är viktigt, eftersom man normalt aldrig kan räkna med att använda den mer än en gång, och bestämmer naturligtvis vad som är praktiskt möjligt av optimering på de tre första punkterna.

En fundamental begränsning ligger i svängarens storlek. Den typ av svängare som används för telemetrisändare är piezoelektriska; en speciellt preparerad keramik, som kontraherar då en elektrisk spänning läggs över den. En sådan svängare kan bara fungera effektivt för ljudfrekvenser vilkas våglängd är ungefär lika stor som dimensionen på svängaren. Man kan jämföra med en orgelpipa, som förstärker och sänder ut en ton med våglängd som är jämförbar med pipans längd. Som framgick av Fig. 1 ökar dämpningen av ljudet i vatten snabbt med ökande frekvens, d.v.s. med minskande våglängd, motsvarande en minskande storlek på svängaren. Samtidigt är styrkan på den signal som svängaren kan åstadkomma proportionell mot svängarens yta.

Med hänsyn till den ökade dämpningen vid kortare våglängd och till den lägre uteffekten hos en svängare med mindre yta kan man teoretiskt beräkna räckvidden som funktion av storleken.

Beräkningen är gjord för en cylindrisk svängare, vilket är den form som ger maximal våglängd för en given storlek. Resultatet framgår av Fig. 3. Den verkliga räckvidden för en sändare kan bero av flera faktorer, som inte ingår i beräkningarna, varför absolutvärdet kan variera, men den relativa variationen med svängarens storlek är ofrånkomlig.

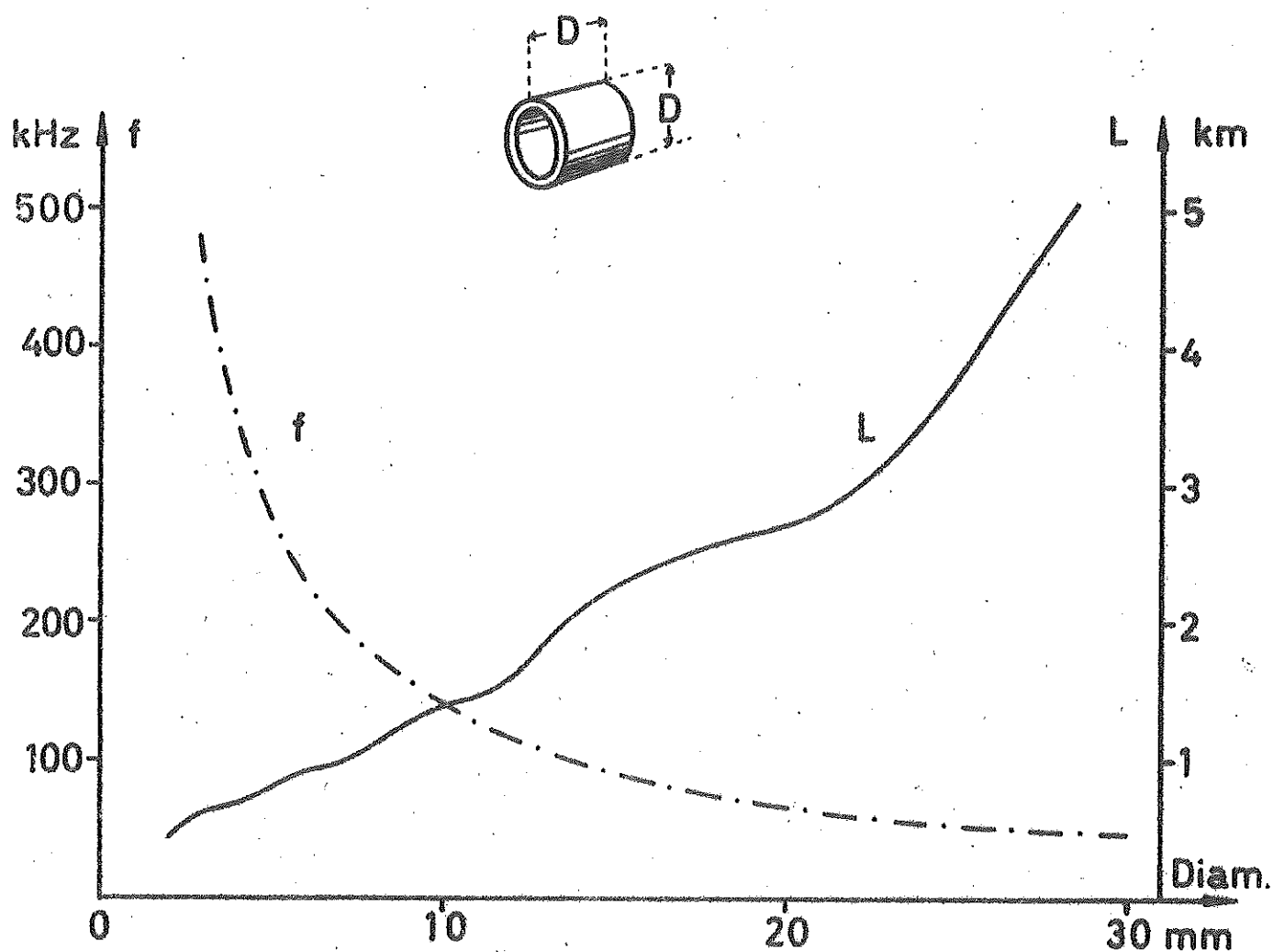


Fig. 3. Teoretiska räckvidden hos en ultraljudsändare som funktion av svängarens dimensioner.

Livslängden påverkas både av storleken och räckvidden hos sändaren. Det krävs större batterier både för längre driftstid och för ökad sändareffekt. Ett ofta använt sätt att minska den totala effektförbrukningen utan att behöva minska räckvidden är att

sända signalen i korta pulser. För att med örat kunna urskilja en ljudpuls kan dock inte pulsen vara mycket kortare än en hundraedels sekund. Vidare får pulsrepetitionsfrekvensen inte vara för låg om det skall bli praktiskt möjligt att söka signalen i olika riktningar, ett normalt värde är cirka 1 puls/s. Detta ger en medeleffektförbrukning av storleksordningen 1 % av vad som skulle krävas för en kontinuerlig signal.

I Fig. 4 har livslängden för en hypotetisk sändare beräknats som funktion av batteridelens storlek. Sändaren antas ha en akustisk uteffekt som ger omkring 1 km räckvidd, och en pulslängd som är 1 % av pulsrepetitionstiden. Beräkningen utgår från ett cylindriskt kvicksilverbatteri med konstant batterikapacitet per volymsenhet, försett med ett 2 mm tjockt isolerande hölje. I praktiken är urvalet av batteristorlekar starkt begränsat, och batterikapaciteten per volymsenhet avtar för de minsta typerna.

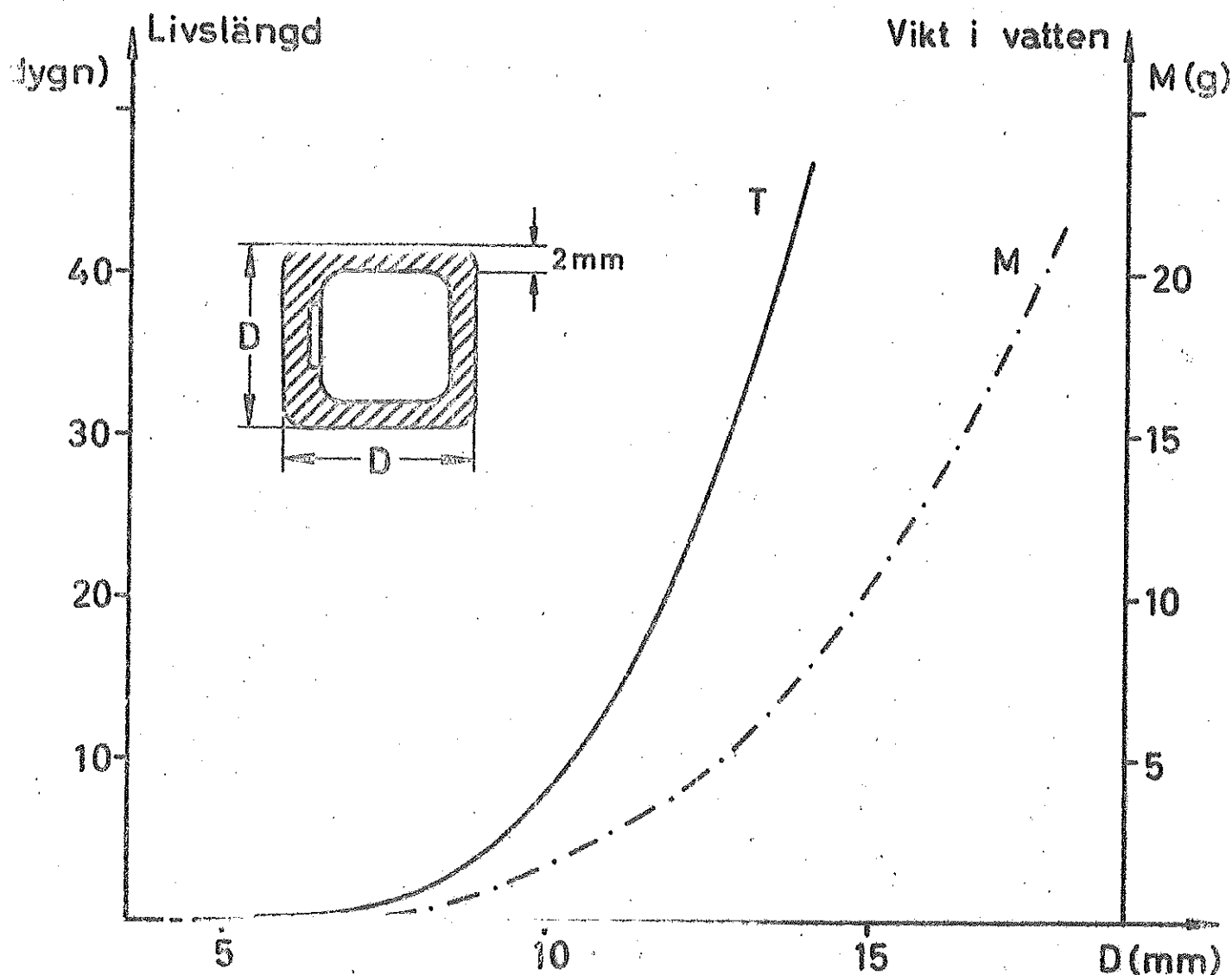
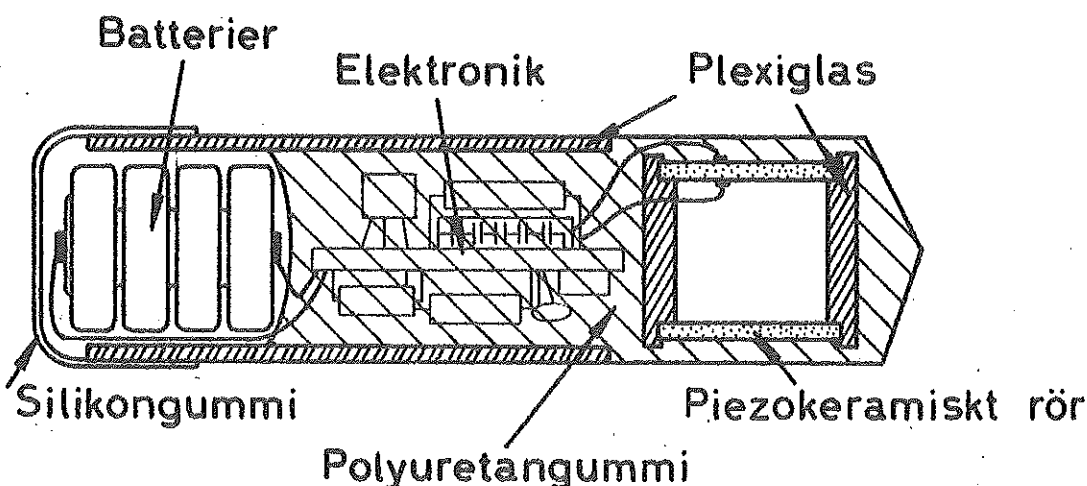


Fig. 4. Teoretisk livslängd hos en ultraljudsändare som funktion av batteridelens dimensioner.

Vi har sett hur kraven på livslängd och räckvidd sätter undre gränser för storleken på en sändare. Den tredje funktionella enheten i den kompletta sändaren, oscillatoren, bestäms till sin storlek mer av kraven på lågt pris och tillförlitlighet. Genom utvecklingen av t.ex. fickräknare och elektroniska armbandsur finns det numera ett stort urval av miniaturiserade elektronikkomponenter. För en enkel sändare utan informationsöverföring kan därför den behövliga elektroniken utan större svårighet packas på en volym, som är mindre än svängare och batteri, med relativt konventionell teknik. Dessutom är komponentkostnaderna små jämfört med priset för svängaren.

I Tabell 1 och 2 redovisas data för ett antal sändare som finns att köpa. I stor utsträckning använder de grupper som bedriver telemetriundersökningar sändare som tillverkats icke kommersiellt inom undersökningens ram. Vårt telemetriprojekt tillverkar också sändare, vars konstruktion bygger på den norska SINTEF-modellen. Utseende och data framgår av Fig. 5.



Skala 2:1

Diameter	15 mm	Bärfrekvens	80 - 130 kHz
Längd	55 mm	Pulsfrekvens	0.5 - 2 Hz
Vikt i vatten	6 g	Pulslängd	~30 ms
Livslängd	~30 dygn	Signalnivå	~140 dB re 1 μ Pa

Fig. 5. Ultraljudsändare.

TABELL 1

Tillverkare se Tabell 2	Beteckning	Dimensioner m m Diam.	Vikt i vtn g	Räckvidd ca m	Livs-längd dygn	Pris ca Kr	Övrigt
A	T-1	14	5	100	>20	440	
	T-2	14	9	500	>20	600	
	T-3T	16	16	800	>20	900	Temperatur
	T-4P	16	18	800	>20	1200	Tryck
	T-5	9	4	20	20	360	
B		8		500	4	400	
		8		500	4	500	Temperatur
C		16	8	1000	365	560	
		16	8	1000	365	620	Temperatur
D		23	50		90	600	
E		19	34		70	250	
F	MP3001	10	5		2		
	MP0501	32	40		7		
G	SR69	14	9		20	340	
	SR69A	19	30		45	380	
	SR69B	14	12		15	390	
	SR50	19	35		45	420	
H	TI85	11	5	500	12	200	
	TI85/2	13	7	800	20	200	
	TI500	21	11	800	60	250	

TABELL 2Leverantörer av telemetrimateriel

- A. Bayshore Systems Corp
5406 A Port Royal Rd
Springfield, Va 22151, U S A
- B. Chipman Instruments
641 Charles Lane
Madison, Wisc 53711, U S A
- C. K-Dan Systems
2618 W Calle Tonalá
Tucson, Ariz 85705, U S A
- D. Fried. Krupp GmbH Atlas-Elektronik
Sebaldsbrücker Heerstr. 235
28 Bremen 44, Västtyskland
- E. Lawson Instruments
P O Box 428
Woods Hole, Ma 02543, U S A
- F. Marconi Space & Defence Systems Ltd
Cobham Road, Frimley
Camberly, Surrey, England
- G. Smith-Root Inc.
14014 N E Salmon Creek Av
Vancouver, Wash 98665, U S A
- H. H Tinsley & Co Ltd
Werdnee Hall, South Norwood
London SE 25, England
- I. Ducane Corporation, Ultrasonic Div.
St Charles, Illinois 60174, U S A

Mottagare

För att lokalisera och följa sändaren krävs en undervattensmikrofon, en hydrofon. Denna hydrofon utgörs av en svängare av samma slag som i en ultraljudsändare, men den utnyttjas omvänt, ljudvågorna som träffar den omvandlas till elektriska svängningar. Den elektriska signalen förstärks sedan i en mottagare och presenteras för observatören som en hörbar ton eller på något annat lämpligt sätt. Elektroniken i mottagaren är i allt väsentligt densamma som i en radiomottagare. Flera konstruktioner finns att köpa, se Tabell 3.

För projektet "telemetristudier på fisk" har vi, på samma sätt som när det gäller sändarna, valt att tillverka mottagaren själv, med en konstruktion som tagits fram av SINTEF som förebild.

Vid spårning måste man kunna avgöra riktningen från mottagaren till sändaren. Två principer används för detta, den vanligaste och enklaste är att göra hydrofonen känsligare i en sektor, och genom att vrida den runt bestämma i vilken riktning sändaren hörs starkast. Den andra principen är att placera tre eller flera hydrofoner i ett horisontellt mönster. En ljudpuls kommer då att anlända först till den hydrofon som ligger närmast sändaren, och med hjälp av skillnaderna i ankomsttid mellan de olika hydrofonerna kan riktningen till sändaren beräknas. Fördelen med detta arrangemang är att hydrofonerna kan monteras fast under en båt utan känsliga mekaniska överföringar, nackdelen är framförallt att elektroniken blir mer komplicerad och dyrbar. En komplett spårningsutrustning enligt denna princip tillverkas av D (se Tabell 2) och kostar cirka 110.000 kronor.

Vanligare är den vridbara riktningskänsliga hydrofonen. Vid korttidsförsök och arbete från små öppna båtar räcker det med en hydrofon på en stav, som vrids för hand. Vid försök som pågår längre tid, är det en stor fördel om hydrofonen kan monteras på båten och fjärrstyras, så att man samtidigt bekvämt kan sköta hydrofonen och manövrera båten.

TABELL 3

Tillverkare se Tabell 2	Dimensioner cm	Frekvensområde kHz	Batteridrift timmar	Pris ca Kr	Anmärkning
A	25 x 18 x 15	30 - 120	20	6000	
C	38 x 18 x 18	65 - 85	30	2300	
E	25 x 18 x 18	10 - 220	-	7200	Automatisk först.regl.
G	20 x 20 x 15	25-80 / 60-180	-	7800	Laddningsbara batterier
I	diam 12 x 23	30 - 45	50	13000	För användning under vatten

Samtliga priser inklusive handhydrofon

En sådan elektriskt manövrerad hydrofon har konstruerats för telemetriprojektet. Utseendet och funktionen framgår av Fig. 6. Höljet runt hydrofonen och den vridbara reflektorn är strömlinjeformad. Anledningen är inte i första hand behovet av att minska strömmotståndet i vattnet, utan att hindra virvelbildning runt hydrofonen, vilket annars orsakar brus som försvårar lyssnandet även vid låga farter.

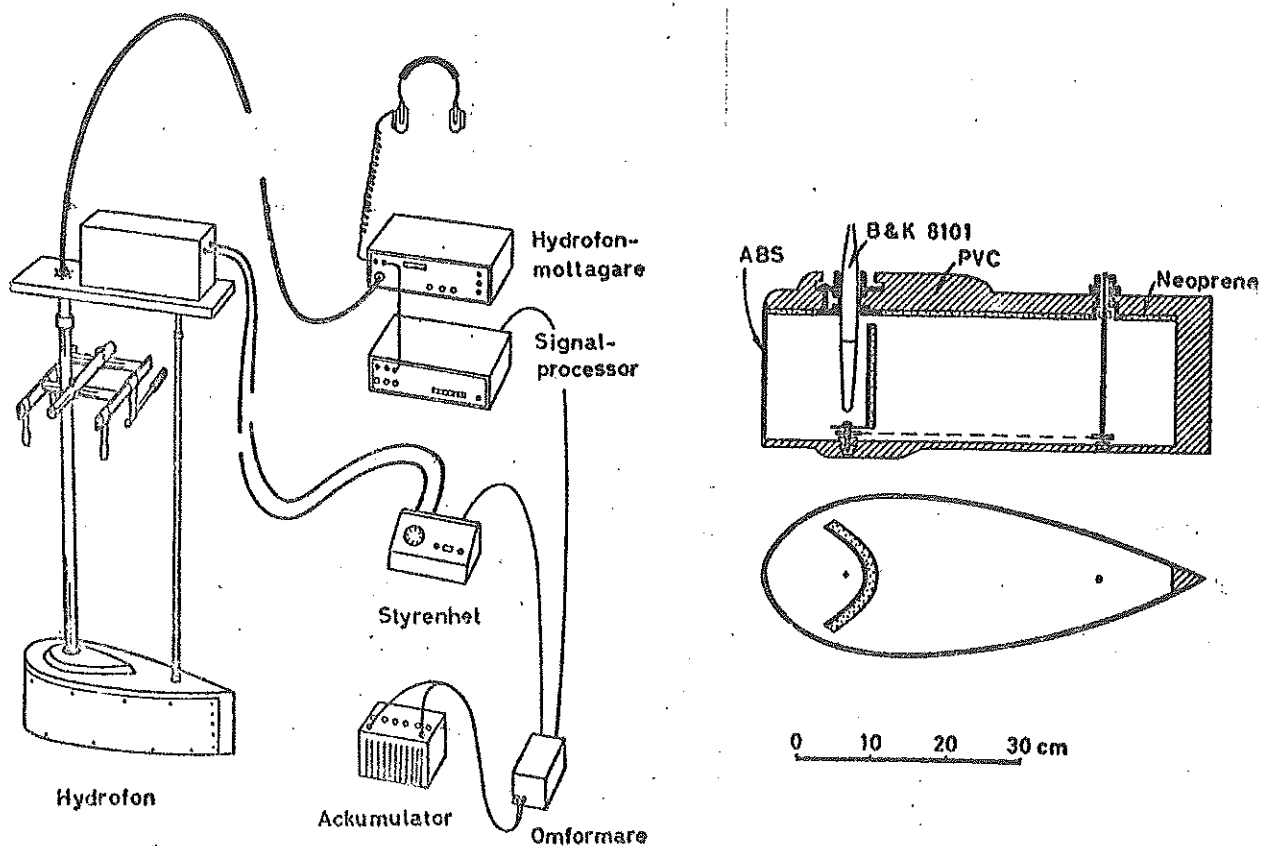


Fig. 6. Riktningsskänslig hydrofon och lyssnarutrustning byggd för projektet "telemetriundersökningar på fisk".

Automatiska system

Den utrustning som beskrivits hittills är avsedd för undersökningar där man följer fisken från båt. Normalt kräver detta att fisken följs kontinuerligt, eftersom den begränsade räckvidden gör chansen liten att återfinna en fisk, som fått förflytta sig obehövligt under längre tid. Uppenbarligen kan arbetsinsatsen bli stor för många typer av undersökningar.

Att automatisera spårningen kan därför vara av värde. Det enklaste steget i denna riktning är automatiska, fasta lyssnarstationer, som registrerar när en fisk med sändare passerar i stationens närhet. Denna typ av instrument är framförallt användbar i floder och smala vattendrag där stationen kan placeras så att fisken inte kan passera utan att komma inom hörhåll.

Kommersiellt finns övervakningsstationer av detta slag att få, t.ex. genom G å 18.700 kronor. Dessa är dock tänkta att placeras på land, med kabel ut till en hydrofon i vattnet. Detta medför risk för åverkan på stationerna, och gör dem oanvändbara till exempel för att observera besöksfrekvensen vid en plats som ligger långt från land. Därför har vi utvecklat en registrerande lyssnarstation där mottagare och en skrivare placerats i en vattentät behållare och med hydrofon i direkt anslutning till denna. Utseendet och mätprincipen framgår av Fig. 7. Registreringspapper och batterier byts en gång varje vecka. Genom att skrivarens utslag är proportionellt mot pulsfrekvensen hos sändaren kan man särskilja 6-8 olika sändare.

För att automatiskt övervaka en märkt fiskes rörelse i detalj har SINTEF utvecklat ett avancerat system. Principen är att flera hydrofoner placeras ut i undersökningsområdet, så att i varje punkt minst tre hydrofoner finns inom sändarens räckvidd. Hydrofonerna förankras och signalen från dem förs via en radioboj på ytan, eller direkt med kabel, till en mottagarcentral i land. Skillnaderna i ljudpulsernas ankomsttider mellan olika hydrofonpar mäts noggrant och matas in i en minidator. Med hjälp av data om hydrofonernas positioner och ljudets ankomsttider kan så datorn beräkna sändarens läge och direkt plotta det på en X-Y-skrivare eller lagra successivt positioner på ett skrivminne för senare bearbetning. I de norska experimenten, där man t.ex. följer rörelserna hos gråsej i en knappt kilometerstor fjord, kan man bestämma fiskens läge med en osäkerhet av mindre än en meter. Positionsbestämningens noggrannhet bestäms i första hand av med vilken noggrannhet läget för de fasta hydrofonerna är känt. Kostnaderna för detta system torde vara av storleksordningen 500.000 kronor.

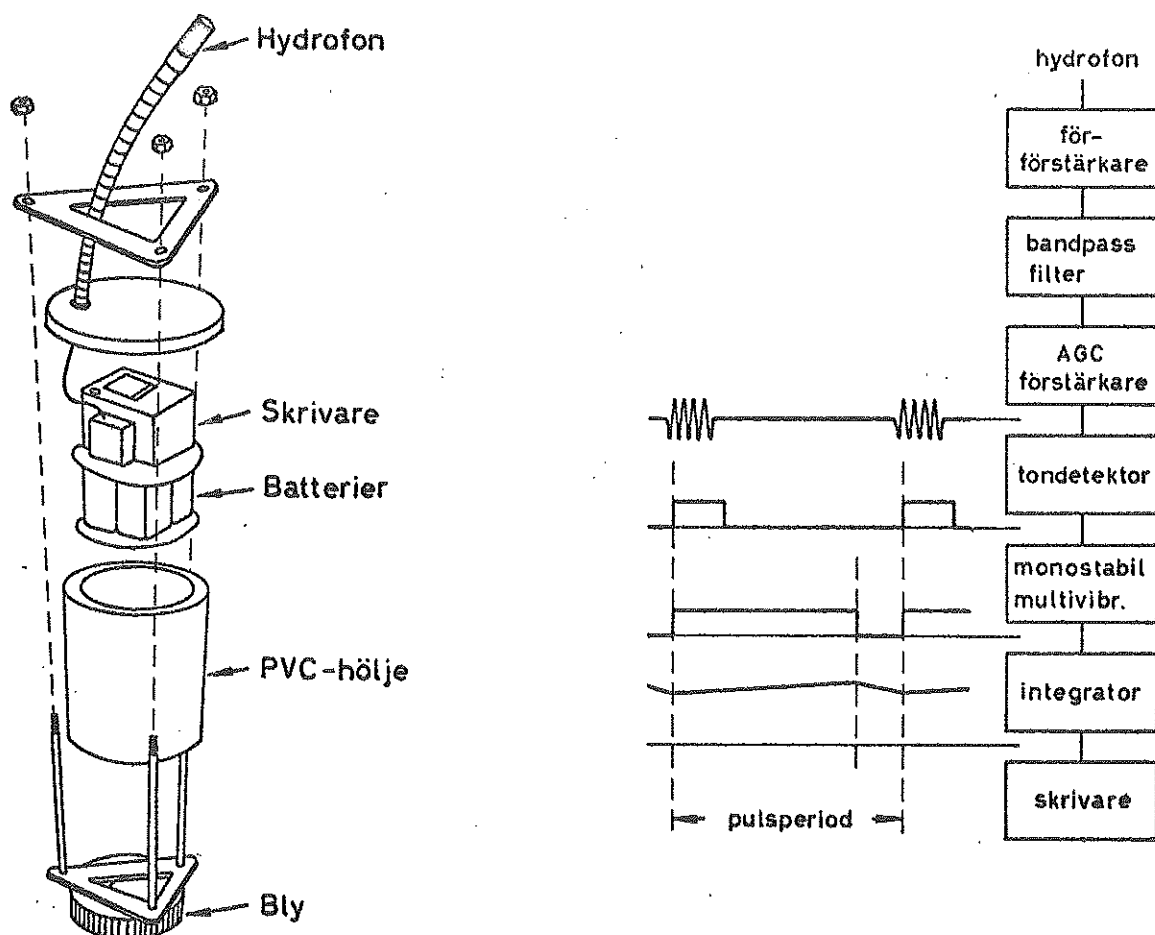


Fig. 7. Automatisk lyssnarstation, utseende och blockdiagram.

LJUD I VATTEN

Jaques-Yves Costeau gav epitetet "den tysta världen" åt under-vattensmiljön. Intet kunde vara mer missvisande. Havet är fyllt av ljud, från vågor, fartyg och djur. Anledningen att ingenting hörs ovanför vattenytan är att vid övergången mellan vatten och luft reflekteras ljudet praktiskt taget fullständigt, ett fenomen som till exempel visar sig i att man blir lomhörd av att få vatten i öronen.

Ljudets utbredning i vatten har många säregna egenskaper. Man får motsvarigheterna till optiska villor, som hägringarna och speglingarna i det marknära luftlagret. Den svaga ljudsignalen från en telemetrisändare kan vid ett tillfälle höras starkt över stora avstånd, men vid ett annat dö bort abrupt om man avlägsnar sig endast en kort sträcka från sändaren.

Det följande är ett försök att göra en allmän, icke-teknisk presentation av de delar av undervattensakustiken som har störst praktiskt intresse för telemetriarbete. Det finns flera teoretiska och tekniska skrifter om undervattensakustik för den som vill studera problemen i större detalj, t.ex. Urick 1975, Tolstoy och Clay 1966, Tucker och Gazey 1966 och Cushing 1973.

Ljud, grundläggande samband

Ljud är en vågrörelse där en serie tryckfronter fortplantar sig genom ett medium. I fronten rör sig partiklarna en obetydlig sträcka framåt i ljudets utbredningsriktning, vilket ger en förtätning och en tryckökning, i nästa ögonblick vänder partiklarna, mediet expanderar och trycket sjunker. Avståndet mellan två på varandra följande fronter är ljudets våglängd och antalet fronter som passerar en punkt per tidsenhet kallas ljudets frekvens. Uppenbarligen blir frontens hastighet, d.v.s. ljudhastigheten, lika med våglängden multiplicerad med frekvensen. Ändras frekvensen ändras dock inte ljudhastigheten; högfrekventa d.v.s. höga toner såväl som låga når fram samtidigt även längst bak i en konsertsal. Följaktligen måste ljudets våglängd minska lika mycket som frekvensen ökar, vad som bestämmer ljudhastigheten är inte ljudets karaktär utan mediets egenskaper.

Ljudhastigheten i vatten är fyra gånger större än i luft, nämligen cirka 1.500 m/s. Hastigheten varierar något med temperatur och salthalt. En temperaturökning med en grad medför en hastighetsökning av 3 till 4 m/s, och en salthaltsökning av en promille ökar ljudhastigheten med cirka 1.5 m/s. Ljudhastigheten ökar också något när vattentrycket ökar, ljudhastigheten på 100 meters djup är nära 2 m/s högre än vid ytan. Fig. 8 visar mer detaljerat sambandet mellan ljudhastigheten, temperatur och salthalt.

När ljudvågorna rör sig genom vatten följer uppenbarligen inte vattnet själv med, däremot bär vågen med sig mekanisk energi. Mängden energi som per tidsenhet passerar genom en ytenhet orienterad vinkelrätt mot rörelseriktningen kallas ljudets intensitet. Intensiteten är proportionell mot tryckvariationerna i vågrörelsen, närmare bestämt mot medelvärdet av kvadraten på tryckfluktuationerna.

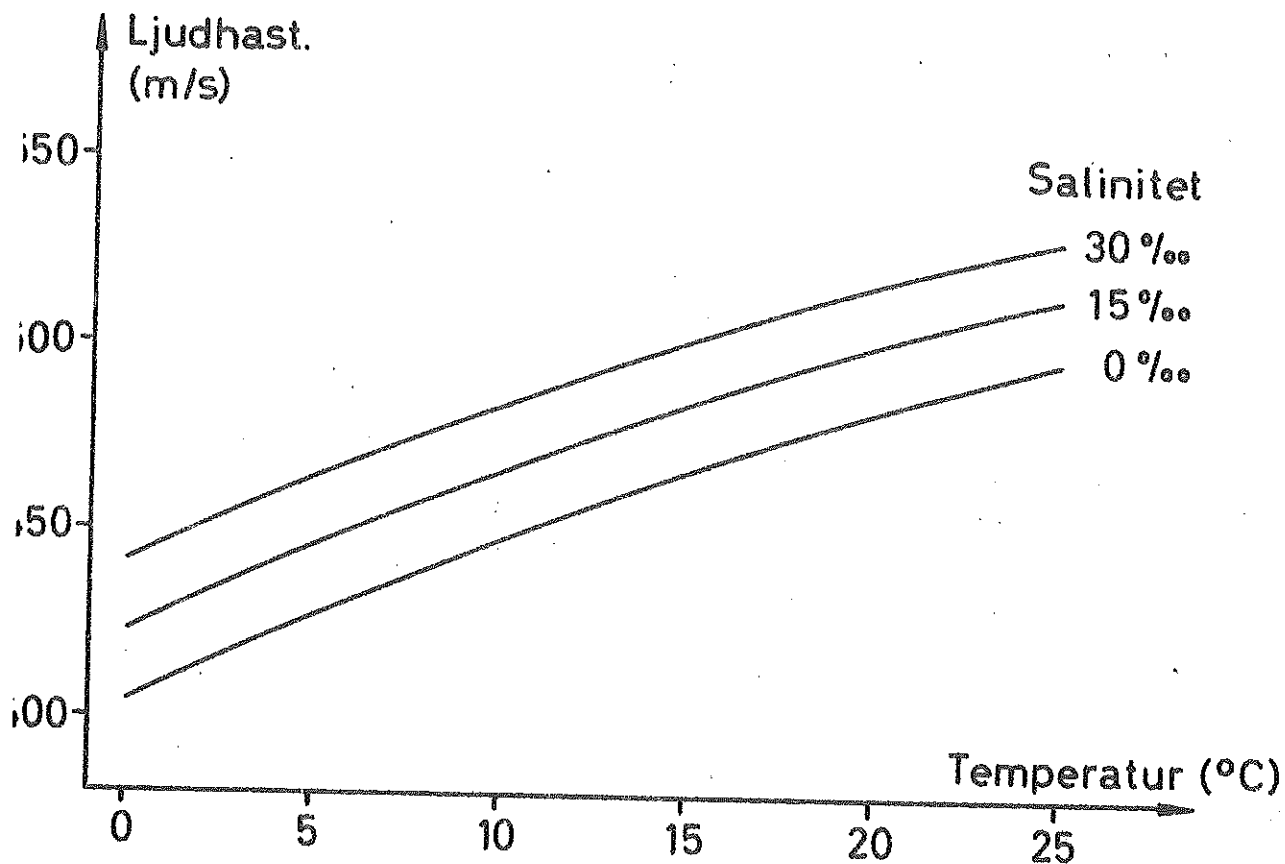


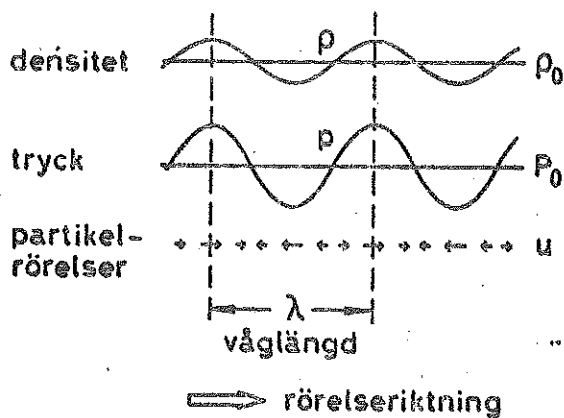
Fig. 8. Ljudhastigheten i vatten som funktion av temperatur och salthalt.

Ljudintensiteten är alltså en effekt per ytenhet. Det vore då naturligt att tro att man också mäter ljudintensitet t.ex. i enheter som W/m^2 . Så är dock inte fallet. I stället har man bestämt att intensiteten hos en ljudvåg med ett visst referenstryck skall vara grundenhet. Ljudintensiteten anges sedan som hur många gånger större intensiteten är i det uppmätta ljudet jämfört med intensiteten i ett ljud vars tryckfluktuation är lika med referenstrycket. Det referenstryck som numera har accepterats internationellt är en mikropascal ($1 \mu Pa$), vilket är detsamma som en etthundramiljarddel atmosfär, och ger en högst obetydlig ljudintensitet. Man skall alltså ange intensiteten för ett ljud, som är 100 gånger starkare, korrekt, men klumpigt, genom att skriva "intensiteten 100 relativt ett ljud med trycket 1 mikropascal", förkortat 100 re $1 \mu Pa$. Tryckfluktuationerna i detta ljud har inte medelvärdet $100 \mu Pa$, vilket man skulle kunna förledas att tro av det förkortade skrivsättet. Eftersom intensiteten är proportionell mot kvadraten på trycket blir i stället tryckfluktuationerna $\sqrt{100} = 10 \mu Pa$.

TABELL 4

	Avstånd		Ljudnivå dB re 1 μ Pa		Ljudintensitet re 1 μ Pa		Ljudtryck μ Pa	
	m		5 kHz	100 kHz	5 kHz	100 kHz	5 kHz	100 kHz
Bakgrundsbrus lugnt vatten		30	25	$1.0 \cdot 10^3$	$3.2 \cdot 10^2$	$3.2 \cdot 10^1$	$1.8 \cdot 10^1$	
Bakgrundsbrus hamnråde		65	35	$3.2 \cdot 10^6$	$3.2 \cdot 10^3$	$1.8 \cdot 10^3$	$5.6 \cdot 10^1$	
Ultraljudsändare	500	-	46	-	$4.0 \cdot 10^4$	-	$2.0 \cdot 10^2$	
Bakgrundsbrus måttligt regn		77	55	$5.0 \cdot 10^7$	$3.2 \cdot 10^5$	$7.1 \cdot 10^3$	$5.6 \cdot 10^2$	
Trålarare 10 knop	30	100	66	$1.0 \cdot 10^{10}$	$4.0 \cdot 10^6$	$1.0 \cdot 10^5$	$2.0 \cdot 10^3$	
Ultraljudsändare	30	-	100	-	$1.0 \cdot 10^{10}$	-	$1.0 \cdot 10^5$	
Bottentrål	30	120	-	$1.0 \cdot 10^{12}$	-	$1.0 \cdot 10^6$	-	

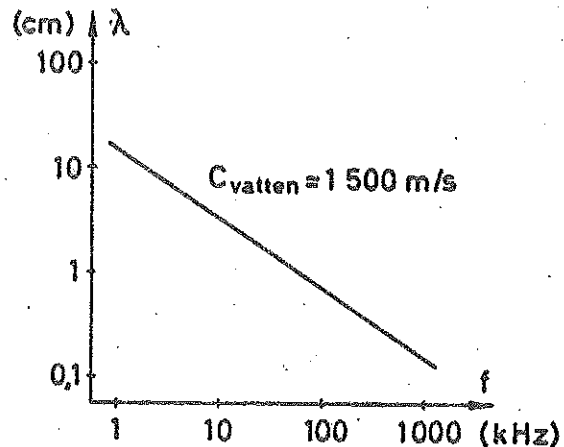
Ljudvågor definitioner



- C Ljudhastighet
T Periodtid
f Frekvens

Det gäller:

$$f = \frac{1}{T}, \quad c = \frac{\lambda}{T} = \lambda f, \quad p = \rho c u$$



Ljudintensitet, I , definieras som

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p^2}{\rho c} dt$$

För att ytterligare förvirra situationen anger man normalt logaritmen av intensiteten och kallar det ljudnivå. Detta har fördelen att siffervärdena för ljudnivå alltid blir hanterbart stor. Enheten som används kallas decibel (dB) och definieras på följande sätt. Om en ljudintensitet är A gånger större än intensiteten hos ett ljud med trycket $1 \mu\text{Pa}$ och $N = 10 \cdot \log A$, så är ljudnivån N dB re $1 \mu\text{Pa}$. Tabell 4 visar exempel på numeriska värden för intensiteter och ljudnivåer hos ljud under vatten.

Transmissionsförluster

Intensiteten hos ett ljud avtar snabbt med avståndet från ljudkällan. Avtagandet beror på två oberoende processer. Dels förlorar ljudet energi till vattnet genom friktionsförluster, detta kallas dämpning. Dels skall den totala effekten fördelas över en större och större yta, en geometrisk spridning.

Dämpning

Ett riktat parallellt ljudknippe påverkas endast av dämpningen. Vattenpartiklarnas små rörelser fram och tillbaka i ljudvågen bromsas av friktionen och ljudenergi övergår i värme. Finns det salter i vattnet kan det tillkomma en energiförlust genom att saltet dissocieras och rekombineras i takt med tryckfluktuationerna. Magnesiumsulfat orsakar genom denna effekt att dämpningen i havsvatten är väsentligt större än i sötvatten.

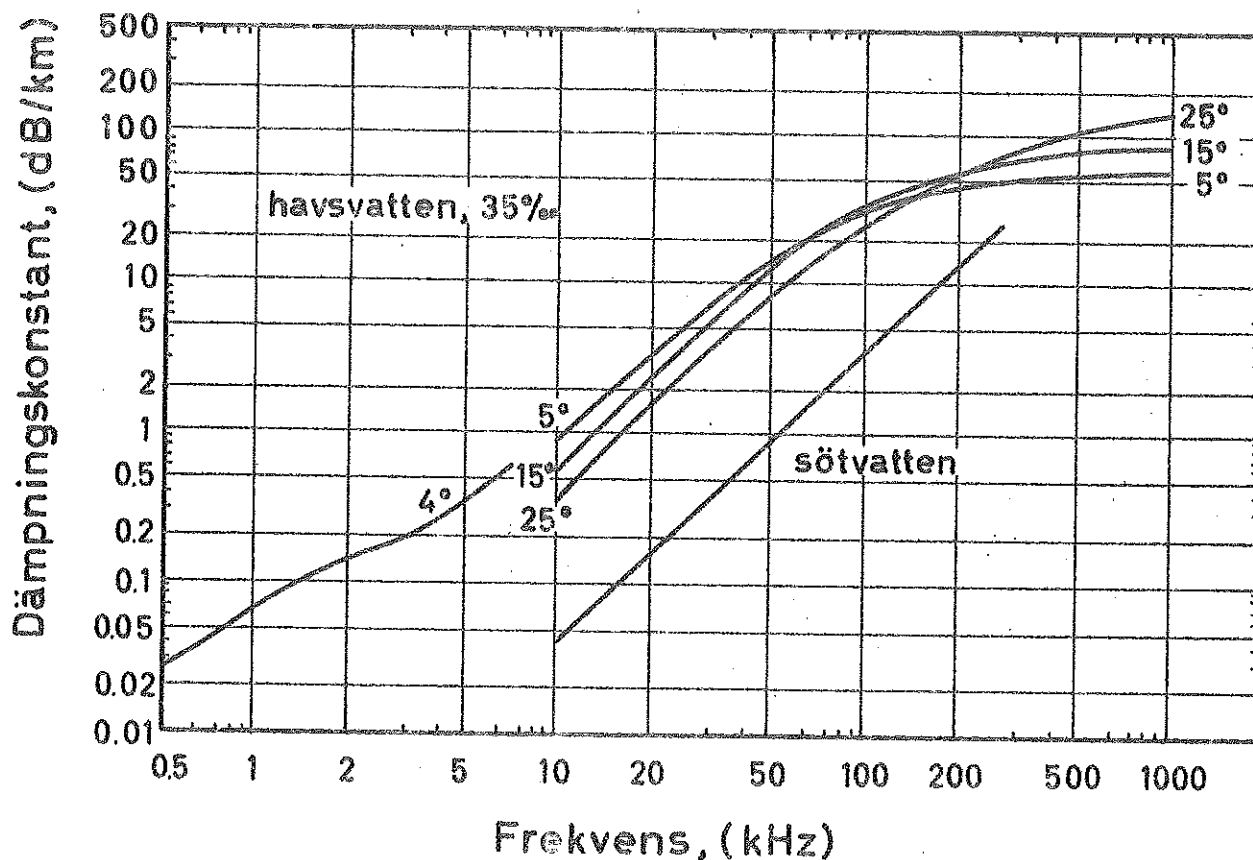


Fig. 9. Dämpningskonstanten som funktion av frekvens, salthalt och temperatur.

Intensitetens avtagande genom dämpningen sker exponentiellt. Det gäller alltså att över en given sträcka intensiteten avtar med en konstant bråkdel av intensiteten vid sträckans början. Det exponentiella avtagandet medför, att ljudnivån räknad i dB, minskar lineärt med avståndet från ljudkällan och dämpningens storlek kan anges med en konstant, normalt i enheten dB/Km.

Dämpningskonstanten varierar starkt med ljudets frekvens. Som visas i Fig. 9 är dämpningen minst vid låga frekvenser. Vid mycket höga frekvenser uppför sig söt- och saltvatten på samma sätt, men vid lägre frekvenser är dämpningen väsentligt större i saltvatten. Vid 100 kHz halveras ljudintensiteten på en sträcka av 1.000 m i sötvatten, i saltvatten redan på 100 m.

Spridning

En telemetrisändare måste konstrueras så, att den sänder ljud ungefär lika starkt i alla riktningar, eftersom det inte går att kontrollera sändarens orientering när den placerats på det djur som skall studeras. Den totala ljudenergin fördelas därför på en större och större yta då avståndet till sändaren ökar.

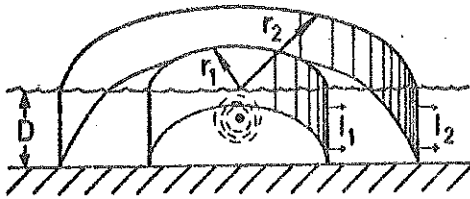
I fritt vatten sprids ljudet som en sfär med sändaren som medelpunkt. Sfärens yta är proportionell mot kvadraten på radien, och intensiteten avtar alltså på grund av den geometriska spridningen som kvadraten på avståndet.

Då avståndet till sändaren är stort jämfört med vattendjupet kommer en del av ljudenergin att reflekteras i vattenytan och mot botten och sedan addera sig till direktljudet. Den totala intensiteten minskar därför i detta fall inte lika snabbt som vid sfärisk spridning. Ljudenergin fördelas i stället på cylinder- ytor, vilka ökar sin yta proportionellt med avståndet. Detta kallas cylindrisk spridning. I praktiken är reflexionerna inte fullständiga, och den geometriska spridningen blir ett mellanting mellan sfärisk och cylindrisk spridning.

På korta avstånd från sändaren domineras intensitetsminskningen stort av den geometriska spridningen. Men effekten blir relativt sett mindre ju större avståndet till sändaren är, och på stora avstånd är dämpningens bidrag till intensitetsminskningen alltid större än spridningen.

Geometrisk spridning

Cylindrisk



Ytorna är

$$Y_1 = 2\pi r_1 D \quad Y_2 = 2\pi r_2 D$$

Det gäller

$$l_1 Y_1 = l_2 Y_2$$

Om $r_1 = 1$ blir

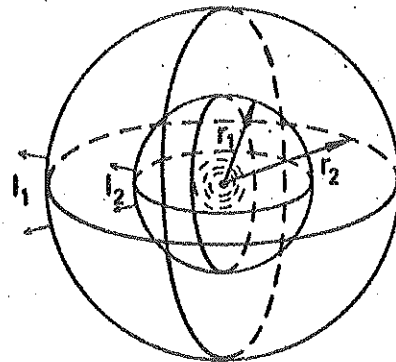
$$\frac{l_2}{l_1} = \frac{1}{r_2}$$

Ljudnivåändringen i dB är F och definieras som

$$F = 10 \log \frac{l_2}{l_1} = -10 \log r_2 \text{ (cylindrisk)}$$

$$= -20 \log r_2 \text{ (sfärisk)}$$

Sfärisk



$$Y_1 = 4\pi r_1^2 \quad Y_2 = 4\pi r_2^2$$

$$\text{Om } r_1 = 1 \text{ blir } \frac{l_2}{l_1} = \frac{1}{r_2^2}$$

Bubblor

Bubblor är ett viktigt problem vid arbete med undervattensljud. Alla som använt ekolod vet, att när man backar, försvinner bottenregistreringen fullständigt. Anledningen är att propeller-vattnet, som är rikt på bubblor, effektivt dämpar ekolodets ljud-pulsér. Även mycket små mängder gas påverkar vattnets akustiska egenskaper drastiskt. Om t.ex. 0.01 % av volymen utgörs av små luftbubblor, så sjunker ljudhastigheten till omkring hälften och dämpningen ökar till mer än 1.000 gånger vad som gäller för luft-fritt vatten.

Små mängder bubblor finns alltid naturligt i vatten. Källorna är i huvudsak brytande vindvågor, som injicerar bubblor i de översta metrarna, och växtplankton, som vid fotosyntesen kan producera gasbubblor i hela den fotiska zonen. Koncentrationen av bubblor med biologiskt ursprung varierar under året i takt med produkti-viteten i havet. Dessutom varierar mängden under dygnet och har som regel maximum under eftermiddagen eller kvällen. En stilla sommardag kan dämpningen av denna anledning vara mer än dubbelt så stor på kvällen som på morgonen.

Vindvågornas inverkan är komplicerad: Vid vindstyrkor mindre än cirka 5 m/s kan de tryckfluktuationer som sjögången åstadkommer göra att små bubblor slås samman och stiger snabbare upp till ytan. Detta medför att lyssningsförhållandena är bättre vid mått-lig sjögång än vid helt stilla väder. Över 5 m/s börjar vågorna bryta, och bubbelmängden ökar snabbt. Mängden avtar med djupet, varför dämpningseffekten är större ju grundare hydrofonen är placerad. Det är svårt att ge kvantitativa uppgifter om hur stor dämpningen blir, eftersom den beror av flera faktorer än vind-styrka och djup, men det är en begränsande faktor av betydelse vid arbete i hårt väder.

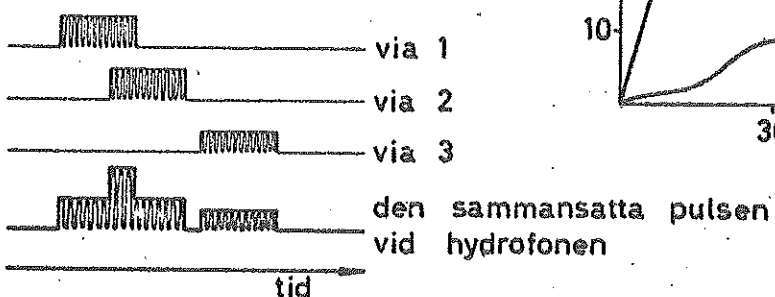
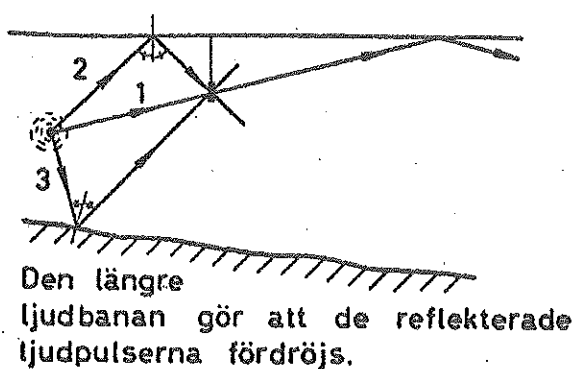
I propellervattnet från den egna båten eller något passerande fartyg finns också stora mängder bubblor. Avsevärd tid, 10-20 minuter efter passagen, kan propellervattnet vara en effektiv ridå för ljudet om sändare och mottagare befinner sig på mot-satta sidor om bubbelstråket.

Reflexion

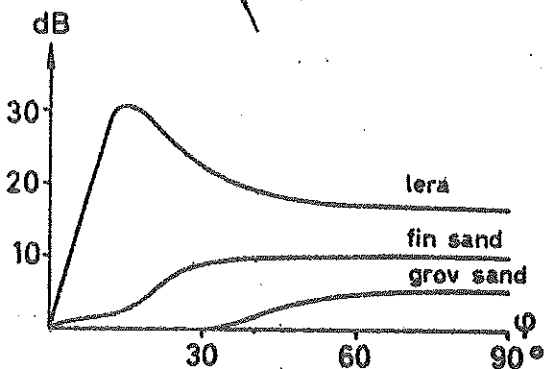
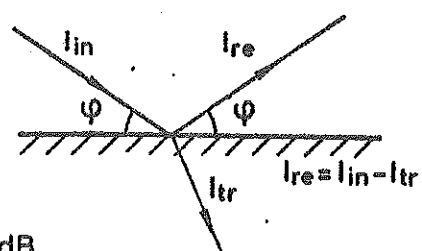
En helt stilla vattenyta fungerar som en nära nog perfekt spegel för ljud. Den stora skillnaden i ljudhastighet gör att ljudet reflekteras nedåt igen. För reflexionen gäller samma lagar som i optiken, d.v.s. infallande vinkel är lika stor som reflexions-vinkeln. En havsyta som deformeras av vindvågor reflekterar fort-farande ljud, men ekot är mer komplicerat än från en plan yta. Vågorna omväxlande sprider och samlar ljudenergin i skiftande riktningar, och för en mottagare i en fixerad punkt kommer ekots intensitet att fluktuera starkt i tiden.

Bottenekot är i allmänhet svagare än ytekot. Ljudhastighetsskillnaden är inte så stor, varför en del av ljudet kan passera bottenytan och fortsätta ned i sedimenten. Hur stor del som reflekteras avgörs av bottenmaterialets beskaffenhet och av infallsvinkeln. Hårda sandbottnar reflekterar bra, och ljud som kommer in nära parallellt med botten reflekteras till en större del än ljud med stor infallsvinkel.

Reflexion



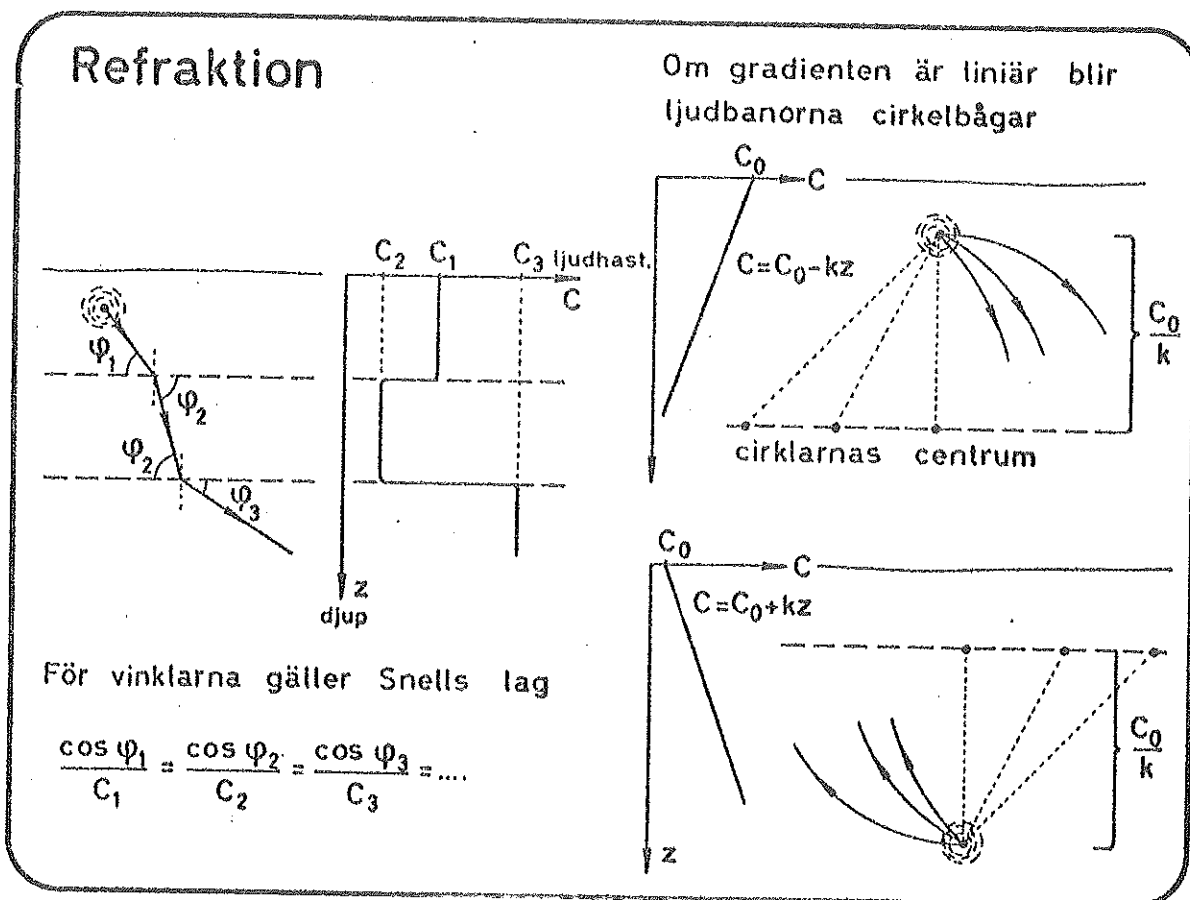
Förluster vid bottenreflexion



Refraktion

Vad som sagts om ljudets geometriska spridning har förutsatt att ljudhastigheten i vattnet är konstant. Detta gäller aldrig. Även när salthalts- och temperaturskiktningen försvinner vid total omblandning så är ljudhastigheten tryckberoende och i homogent vatten ökar ljudhastigheten långsamt med djupet.

När ljudhastigheten varierar bryts ljudet. Fenomenet kallas refraktion. Om ljudhastigheten ändras språngvis, som i en skarp termoklin, kommer ljudbanorna att vara nära rätta linjer över och under språnget, men ändra riktning vid passage genom språnget. Brytningen blir större ju större skillnaden i ljudhastighet är. Vinkeln mellan ljudbanorna och språngskiktet minskar då ljudet går från ett skikt med lägre till ett med högre ljudhastighet och omvänt. Om ljudhastigheten varierar kontinuerligt blir ljudbanorna krökta linjer. Krökningen sker mot den riktning i vilken ljudhastigheten minskar.



En fundamental skillnad mellan förhållandena vid geometrisk spridning i homogent och skiktat vatten är att i homogent vatten det alltid finns en direktbana för ljudet mellan sändaren och mottagaren. Om avståndet är stort blir intensiteten låg, men signalen finns där och kan göras hörbar om sändaren görs tillräckligt stark. Är vattnet skiktat uppkommer emellertid skuggzoner; regioner till vilka direktljudet från sändaren aldrig kan nå. Under sommarförhållanden med hög temperatur, d.v.s. hög ljudhastighet, vid ytan och kallare vatten på djupet tenderar ljudbanorna att krökas nedåt. Vid detta tillfälle uppstår en skuggzon uppe vid vattenytan. Om man med sin mottagare rör sig bort från sändaren avtar ljudintensiteten abrupt då mottagaren passerar gränsen in i skuggzonen.

Vintertid är bottenvattnet oftast varmare, och har högre ljudhastighet än ytvattnet. Detta medför att ljudbanorna kröks uppåt. Skuggzonen startar i denna situation vid botten och sprider sig med ökande avstånd upp mot ytan. Fullständigt tyst blir det i praktiken inte i skuggzonen, eftersom ljud genom att reflektera en eller flera gånger vid ytan och mot botten kan tränga in i den!

I Fig. 10 ges några schematiska exempel på ljudbanornas utseende vid karakteristiska hydrografiska situationer. Ljudbanorna för ett antal startvinklar kring horisontalplanet är utriktade och vinklarna mellan två på varandra följande banor är lika stor för alla banor. Detta innebär att avståndet mellan ljudbanorna ger ett mått på ljudintensiteten. Som referens ges ljudbanorna vid en situation utan skiktning (A). I en sommarsituation syns den typiska skuggzonen vid ytan (B). En vinterskiktning (C) koncentrerar ljudintensiteten till området närmast sändaren. Mer komplicerad variation av ljudhastigheten med djupet, medför en oregelbunden ljudutbredning (D), ger exempel på hur ljudet kan fokuseras, så att ljudintensiteten i ett område på relativt stort avstånd från sändaren blir större än vad den är närmare ljudkällan.

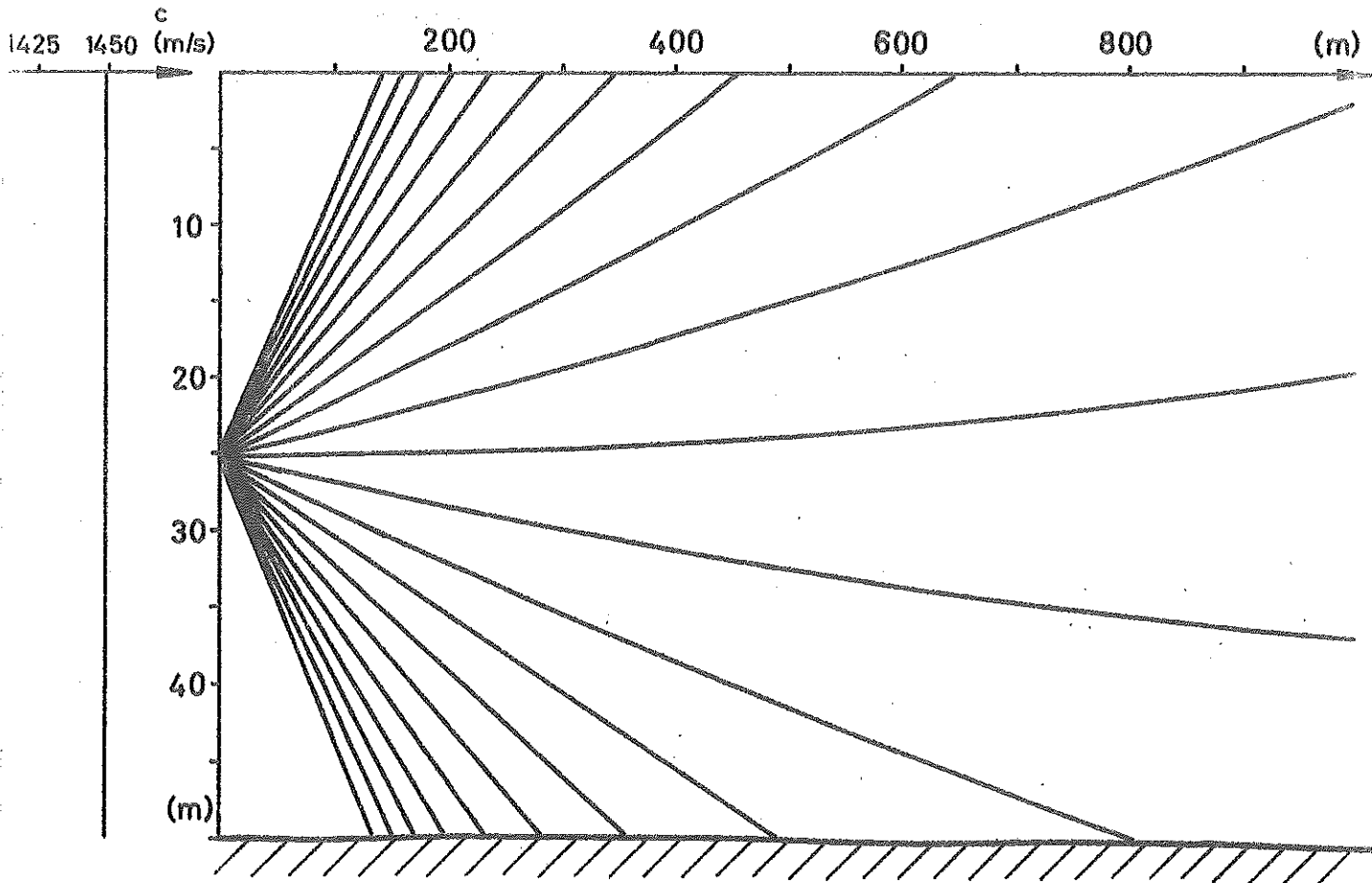
Ett speciellt fenomen är förekomsten av ljudkanaler. Detta uppkommer, som (E) visar, då ljudhastigheten har ett minimum. Ljudet fångas i ett skikt runt djupet för ljudhastighetsminimum och kan på detta sätt sprida sig över stora avstånd, utsatt endast för cylindrisk spridning.

Fig. 10. Ljudutbredningen sedd i ett vertikalsnitt vid olika typer av skiktning. Sändaren befinner sig på 25 m djup. Ljudbanorna är utritade för ett antal startvinklar kring horisontalplanet. Vinkelskillnaden mellan två successiva banor är 1 grad. Vid jämförelser mellan diagrammen gäller att det vertikala avståndet mellan ljudbanorna är omvänt proportionellt mot ljudintensiteten. Där banorna ligger tätt är intensiteten hög.

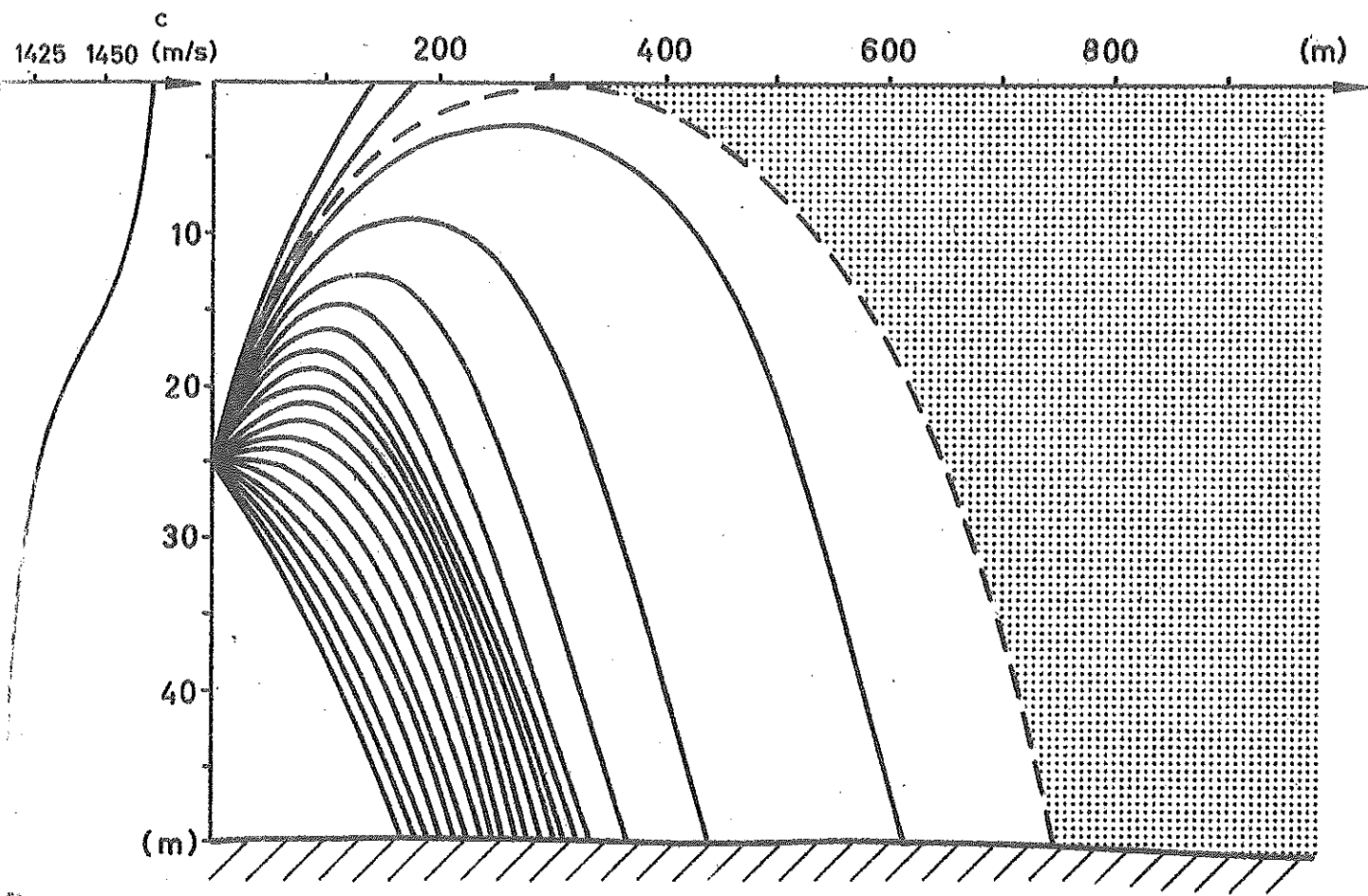
De rastrerade områdena markerar skuggzoner; området till vilka det inte finns någon direkt ljudbana.

Ljudhastighetsvariationen i exemplen motsvarar en maximal temperaturdifferens mellan yt- och botten- vatten av $10-15^{\circ} \text{C}$.

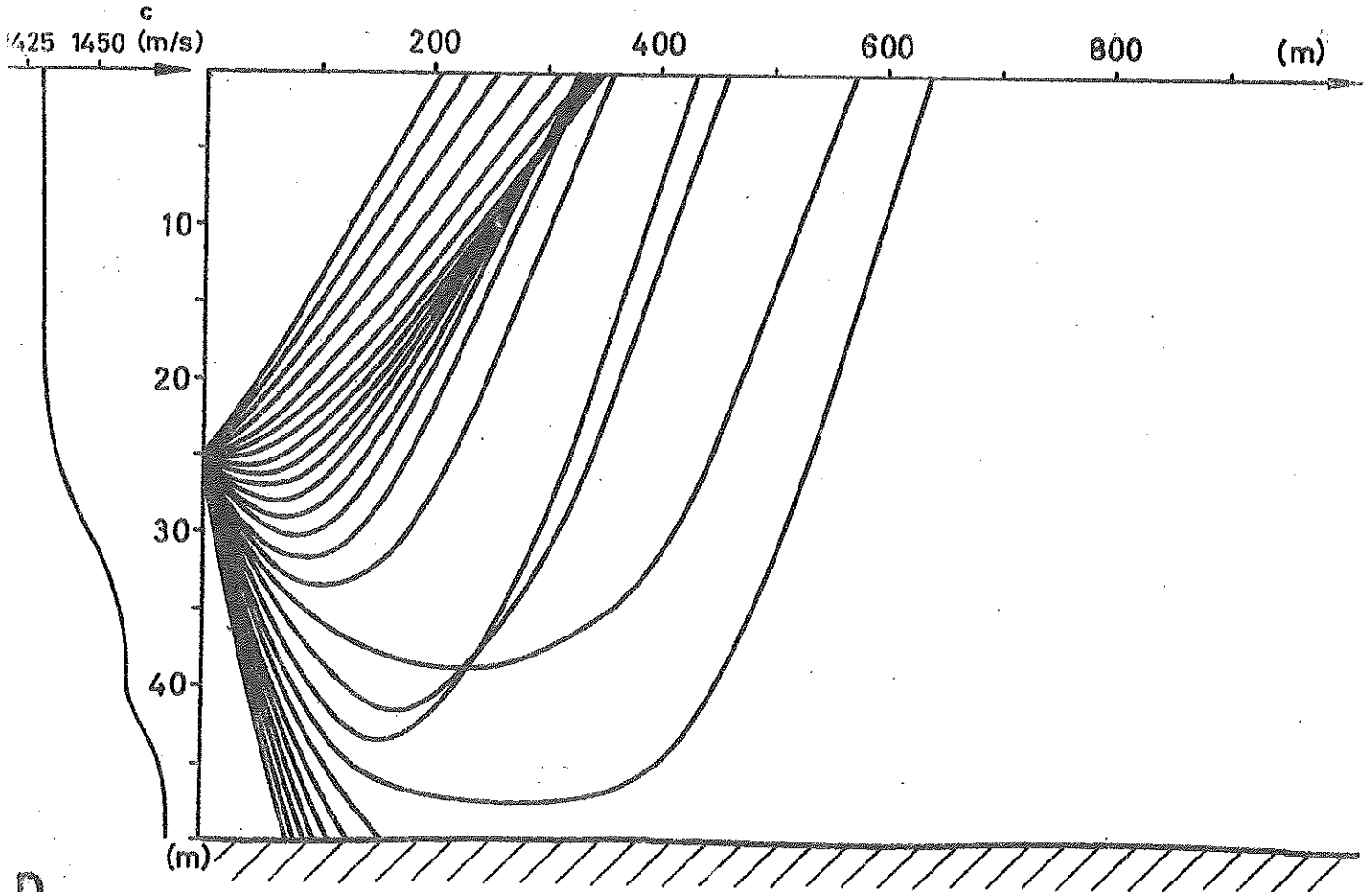
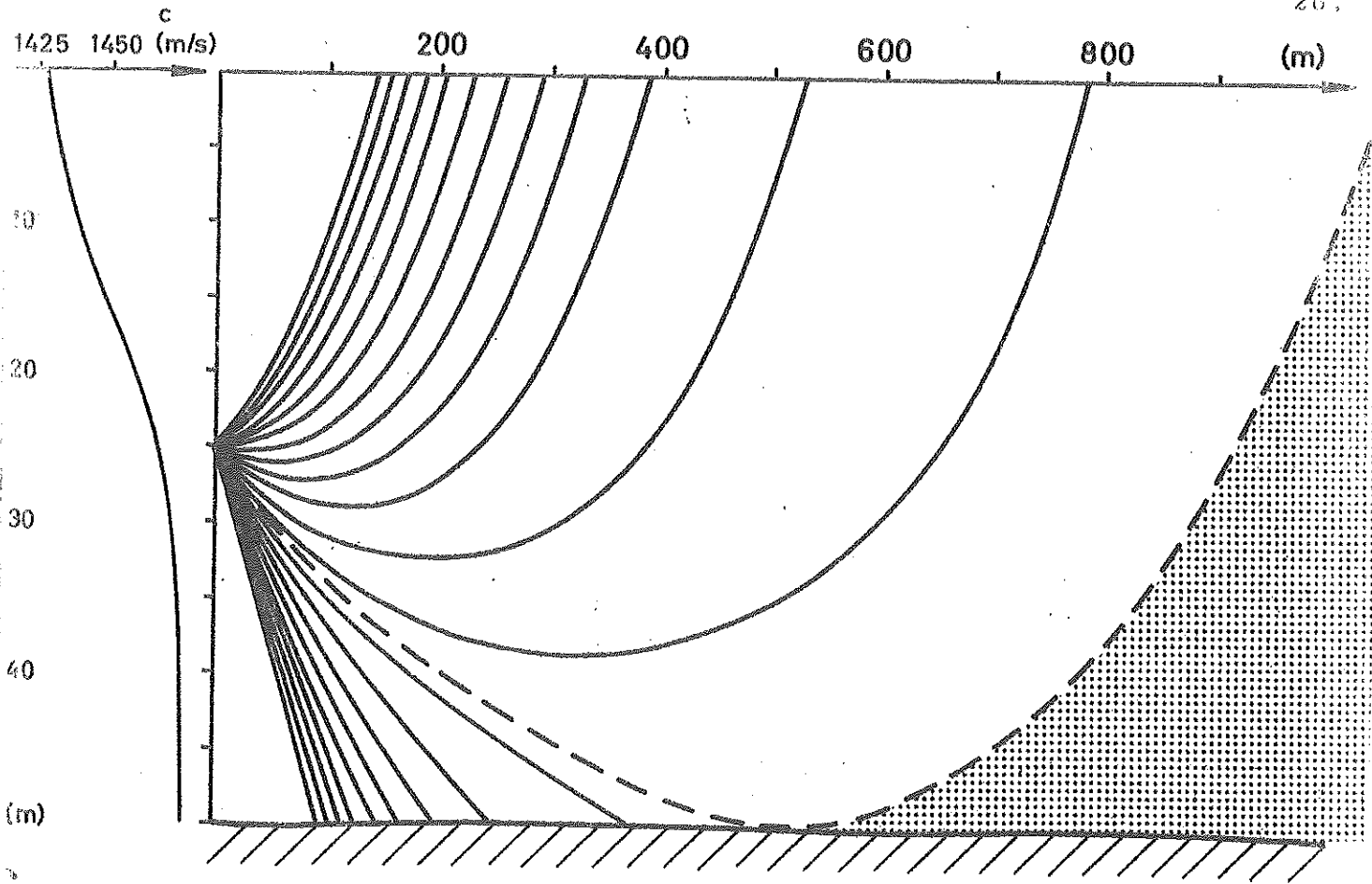
- A. Homogent vatten. Tryckeffekten gör att ljudhastigheten ökar med djupet, varför banorna är något krökta uppåt.
- B. Sommarsituation med schematisk, utjämnad termoklin. Maximala räckvidden är i detta exempel 350 m, oberoende av signalstyrkan.
- C. Vintersituation, där salthaltsskiktning i kombination med temperaturen ger en ökning av ljudhastigheten mot botten.
- D. Samma som C, men med något oregelbunden skiktning. Observera fokuseringen och den höga ljudintensiteten på cirka 350 m avstånd från sändaren.
- E. Situation med ljudhastighetsminimum och ljudkanal.



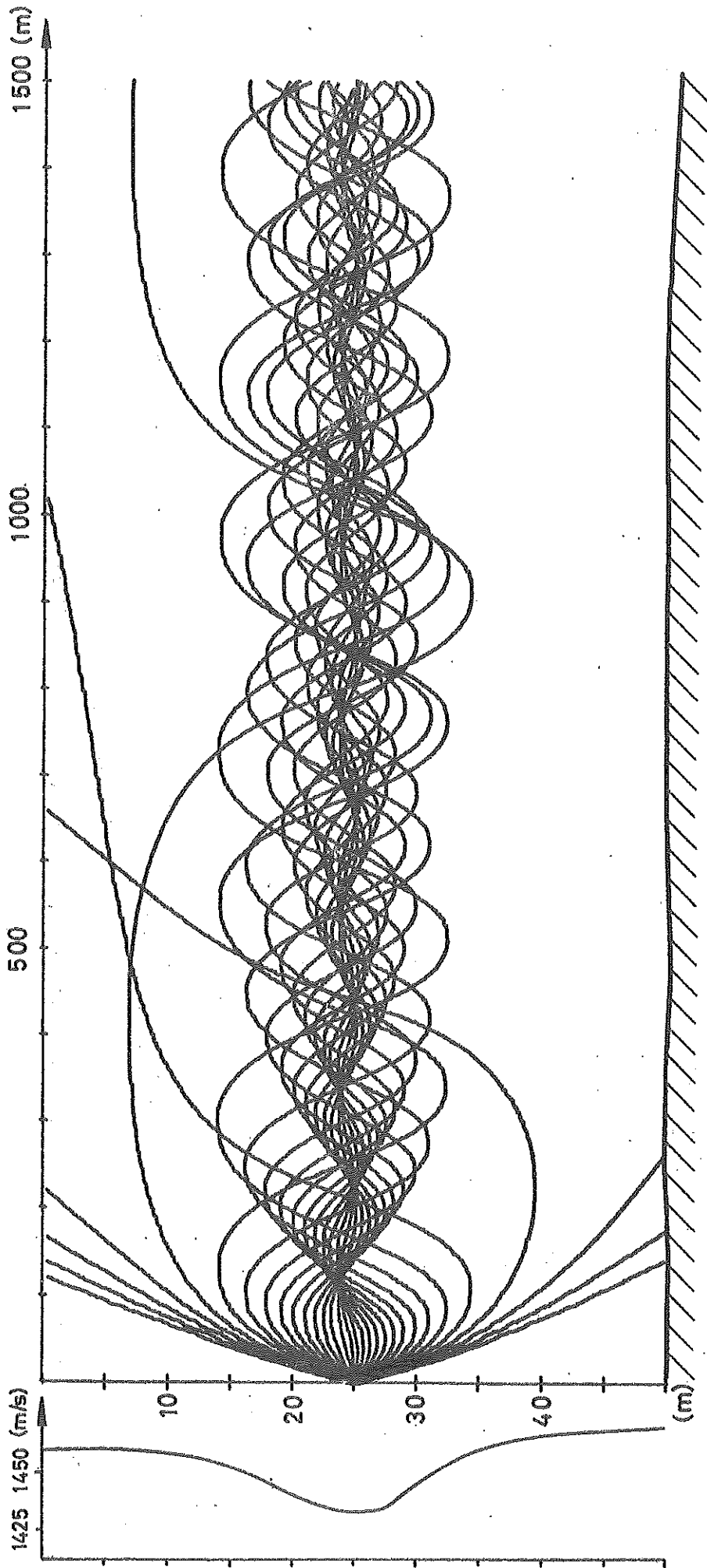
A



B



D



E

Brus

Signalen från telemetrisändaren måste urskiljas mot en bakgrund av ständigt förekommande ljud i havet. Detta bakgrundsbrus varierar i styrka under olika betingelser och vid olika frekvenser. För låga frekvenser gäller att brusnivån sjunker för ökande frekvens, och är som minst någonstans kring 100 kHz. Vid ytterligare högre frekvenser ökar intensiteten igen.

Man kan särskilja fem olika källor till det ständigt pågående bakgrundsbruset, som var och en dominerar inom ett frekvensområde.

- I. Seismiska störningar orsakar brus med mycket hög intensitet vid extremt låga frekvenser.
- II. Turbulensen i havet ger brus i området upp till 20 Hz.
- III. Ljudet från avlägsen fartygstrafik dominerar den lågfrekventa delen av det hörbara ljudet. Intensiteten varierar beroende på trafiktätheten.
- IV. Vindvågor på havsytan är huvudkällan till brus i den högfrekventa delen av det hörbara ljudet och för lågfrekventa ultraljud. Intensiteten avtar med ökande frekvens, och ökar vid ökande vindstyrka. En fördubbling av vindstyrkan ger approximativt en fyrdubbling av brusets intensitet.
- V. Molekylrörelserna kring hydrofonen orsakar ett brus, vars intensitet ökar snabbt med ökande frekvens, och som dominerar brusnivån för frekvenser över cirka 100 kHz.

Fig. 11 visar typiska värden för brusnivån som en funktion av frekvensen.

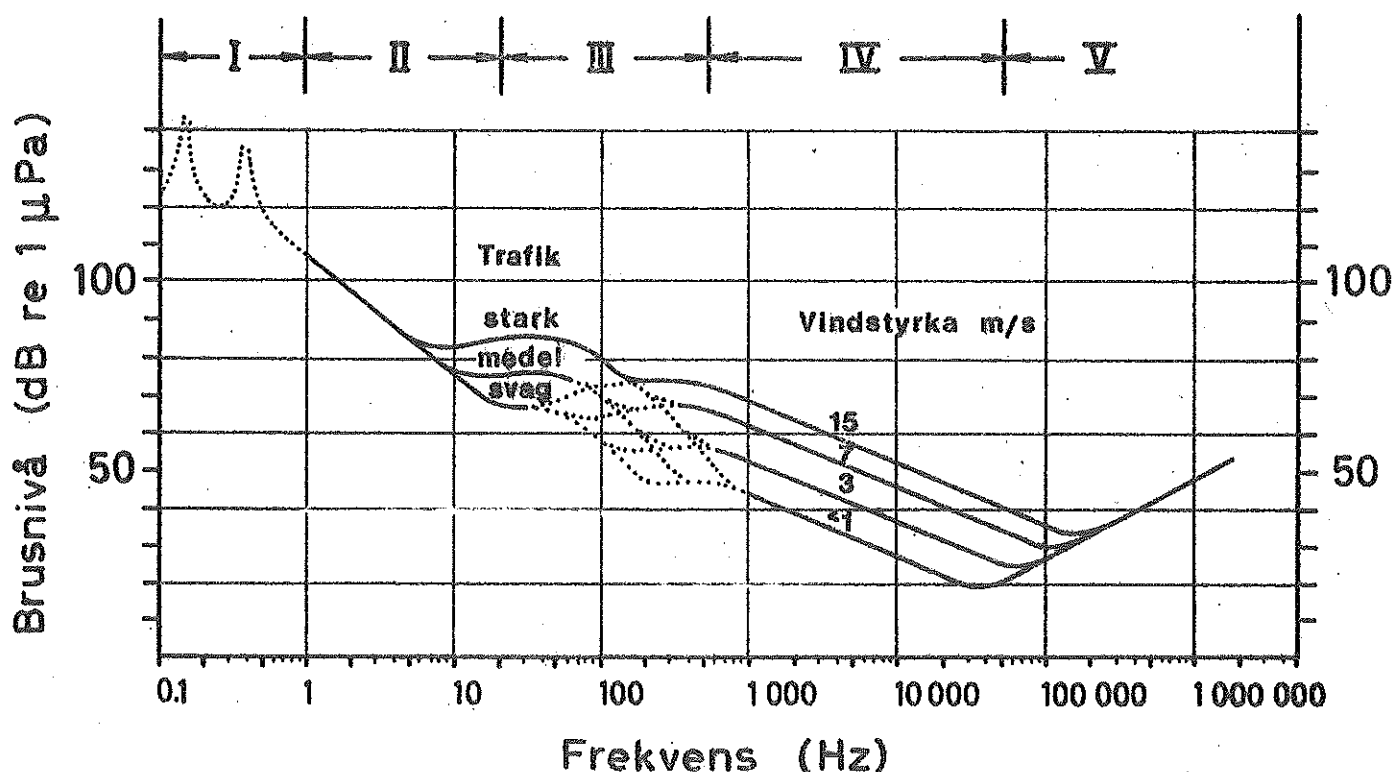


Fig. 11. Bakgrundsbrusets ljudnivå i havet som funktion av frekvensen.

Till detta kontinuerliga brus adderar sig bruset från källor av mer tillfällig natur. Viktigast är regnbrus. En häftig regn-
skur kan öka brusintensiteten tusenfalt eller mer och göra te-
lemetriarbetet svårt eller omöjligt (Fig. 12). Vidare förekom-
mer ljud från fiskar, valar o.s.v., som i det hörbara området
kan ha hög intensitet, men sällan är besvärande i ultraljudom-
rådet.

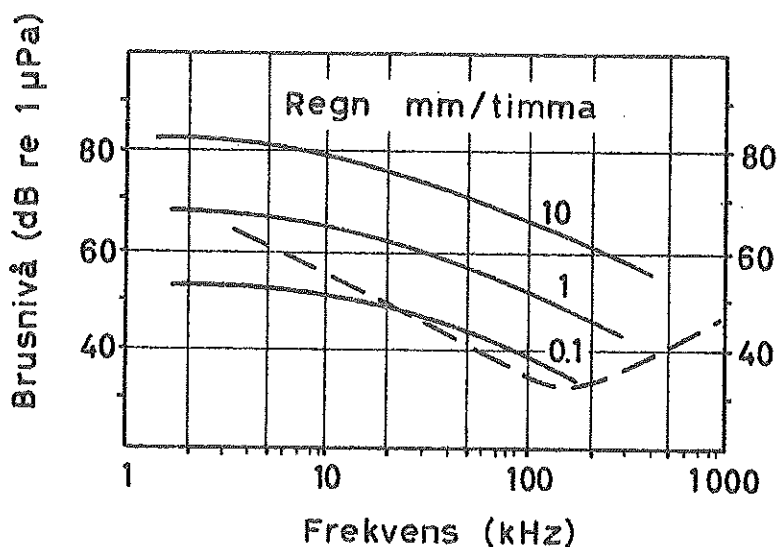


Fig. 12. Brusnivå vid regn av olika intensitet. Den streckade kurvan visar brusnivån vid 15 m/s utan regn.

METODOLOGISKA PROBLEM

Undervattenstelemetrins stora fördel jämfört med konventionell märkning är att man kan studera fiskens rörelser och reaktioner kontinuerligt och i detalj. Hur representativa observationerna är för fiskens naturliga beteende är dock i många fall oklart. Märkning med en ultraljudsändare är ett omfattande ingrepp och genom sändarens begränsade livslängd blir det nödvändigt att göra observationerna på fisken under en relativt kort tidsperiod omedelbart efter märkningen. Naturligtvis kan sändaren genom sin vikt och storlek påverka beteendet och det fartyg som utför undersökningen kan vara en störande faktor. Förvånansvärt få undersökningar av dessa problem finns gjorda, varför denna genomgång till stor del begränsar sig till att påpeka tänkbara felkällor utan att kvantifiera dem.

Sändarens inverkan

För att anbringa sändaren på fisken används tre metoder, vilken alla har specifika nackdelar. Metoderna är:

- A. Utvändig fastsättning
- B. Placering i magsäcken
- C. Inoperering i kroppshålan

En genomgång av vilken metod som använts i publicerade telemetriexperiment visar följande relativa fördelning: A 50 %, B 30 % och C 20 %.

Utvändig placering är ofta det enda alternativet vid arbete med fiskar som är relativt små i förhållande till sändaren. Utförandet varierar, vanligast är att låta sändaren släpa i en metall- eller suturtråd fäst på ryggen, men den kan också hängas under stjärtspolen eller sys fast på rygg eller sida. Metoden har flest påtagliga nackdelar men är enkel och kanske därför så ofta använd.

Placering i magsäcken är en metod som ger få negativa effekter på fisken. Att den inte fått en dominerande användning beror på att fisken lätt kan göra sig av med sändaren och att det vid spårningen är omöjligt att avgöra om det är detta som inträffat eller om det är fisken som ligger stilla på botten. Lax och ål, som fastar under lekvandringen, tycks behålla sändaren praktiskt taget obegränsad tid. Andra arter spottar upp den efter en period av några timmar eller dygn.

Genom ett snitt i buken kan sändaren föras in i bukhålan varvid man uppnår samma fördelar som vid utvändig placering, d.v.s. att det är svårt eller omöjligt för fisken att bli av med sändaren, samtidigt som man undviker nackdelarna med ökat simmotstånd och risk för att fisken snärjer sig fast. Metoden är den som kräver mest arbete och kan vara svår att använda i fält.

Beroende av vilken fastsättningsmetod som används kan man förvänta sig olika grad av direkt eller indirekt påverkan. Tabell 5 ger en sammanställning av några tänkbara effekter, vilka i det följande skall kommenteras mer utförligt.

Tabell 5. Typer av påverkan av sändaren vid olika metoder för fastsättning på fisk. + och ++ anger stor respektive mycket stor risk för påverkan.

	M e t o d		
	A	B	C
Direkta effekter			
a. Ökat simmotstånd	++	0	0
b. Ändring av buoyancy	+	+	+
c. Påverkan akustiskt	(+)	(+)	(+)
d. Påverkan elektriskt	(+)	(+)	(+)
e. Påverkan kemiskt	0	++	+
Indirekta effekter			
f. Infektioner	+	0	++
g. Trauma vid hantering	+	+	++
h. Minskat kamouflag	+	0	0

Strömningsmotstånd (a)

Strömningsmotståndet på en sändare av långsträckt form är approximativt proportionell mot sändarens totala yta och mot rörelsehastigheten i kvadrat. För fisken gäller samma samband, den procentuella ökningen av strömningsmotståndet är alltså oberoende av hastigheten och storleken ges av förhållandet mellan sändarens respektive fiskens ytor. Det direkta strömmotståndet torde alltså kunna försummas om sändaren görs liten, säg mindre än 10 % av fiskens dimensioner. Experiment visar dock att sändaren ändå kan ha markant effekt på energiförbrukningen. Bruce (1973) redovisar ett försök med uppmätning av syreförbrukning vid kontinuerlig simning med och utan en sändartrapp fäst i en kort tråd på ryggen av försöksfisken. Om man beräknar strömmotståndet på attrappen och den syreförbrukning detta motsvarar, visar det sig att den uppmätta ökningen är signifikant större. Dessutom ökar den relativa skillnaden med hastigheten. Andra experiment visar en markant minskning av maximal simhastighet med utvändigt fastsatt sändare (Mc Cleave och Stred 1975). En trolig förklaring till dessa observationer är att effektiviteten i en fisks simrörelser är starkt avhängig av kroppens strömlinjeform. Även en liten sändare kan störa strömfältet och ge stor inverkan på simningens effektivitet. En konsekvens av detta är att sändarens placering troligen är kritisk. Det finns inga undersökningar gjorda om detta problem, men principiellt borde en fastsättning tätt intill kroppen vara att föredraga jämfört med att låta sändaren släpa löst. Vidare är amplituden på simrörelserna minst närmast fiskens huvud varför en placering så långt fram som möjligt borde vara gynnsam.

Buoyancyändring (b)

Oberoende av hur sändaren placeras, kommer sändarens nettovikt att adderas till fiskens vikt i vatten. Fiskar med simblåsa håller sig neutralt flytande genom att kroppens negativa buoyancy kompenseras av gas i simblåsan. En tumregel är att 5 % av fiskens vikt i luft behöver balanseras med hjälp av simblåsan (Steen 1970). Det är alltså dessa 5 % av kroppsvikten som skall jämföras med viktillskottet från sändaren. Reaktionen på den extra belastningen kommer att variera beroende på om fisken, som märks med sändaren har sluten simblåsa, har simblåsa med förbindelse till tarmen eller tillhör en art som saknar simblåsa.

För en fisk med sluten simblåsa kan man förvänta sig att den som en första reaktion simmar aktivt uppåt, eller eventuellt låter sig sjunka till botten. Genom gasutsöndring ökar simblåsans volym och fisken kan kompensera viktökningen. Detta är en långsam process som typiskt tar flera timmar i anspråk (Fänge 1953). Arter med förbindelsegång mellan tarmkanal och simblåsa har möjlighet att simma upp till ytan och snappa luft i tillräcklig mängd för att omedelbart kompensera viktökningen.

Man bör observera att det inte bara är den omedelbara viktkompensationen som är ett problem med närvaron av en extratyngd. Den ökade simblåsevolymen i sig medför ett ökat metaboliskt arbete för varje djupändring fisken utför. Den relativa ökningen av energiåtgången för att hålla simblåsan vid konstant volym vid djupändringen är direkt proportionell mot den relativa ökningen av fiskens simblåsevolym, d.v.s. nettobuoyancy på grund av sändarens viktillskott.

Fiskar utan simblåsa tvingas att motverka viktökningen genom att simma mer energiskt uppåt, eventuellt genom att öka den horisontella hastigheten. Normalt gäller för fiskar utan simblåsa att då de t.ex. simmar horisontellt med en hastighet av 1 kroppslängd/sek åtgår hela 60 % av den totala energiförbrukningen till att upphäva sjunktendensen (Steen 1970). Uppenbarligen kan en ytterligare ökning av nettobuoyancy tänkas ha drastiska effekter i detta fall.

Påverkan akustiskt (c)

Om fisken kan uppfatta ultraljudpulserna från sändaren finns det anledning att vänta sig att dessa kan störa fiskens naturliga beteende. Hos de relativt få arter som är ordentligt undersökta vad avser hörsel finner man dock att hörbarhetsområdet sällan sträcker sig högre än någon eller några kHz (Hawkins 1973), d.v.s. långt under de ultraljudfrekvenser som används

för telemetrisändare. Det finns emellertid risk för att sändare inte avger en ren ton, utan vid sidan av ultraljudspulsen sänder ut ljud med lägre frekvens.

Akvarieförsök med den fiskart och typ av sändare som är aktuell kan vara av värde för att konstatera akustiska störningar. Om fisken reagerar då sändaren slås på och av är det uppenbarligen ett dåligt tecken och det kan vara lämpligt att pröva med en annan typ av sändare.

Påverkan elektriskt (d)

Kring en ultraljudsändare i funktion alstras magnetiska och elektriska fält, vilka varierar i takt med ljudpulserna. Huvudkällan är den fluktuerande ström som flyter i anslutningstrådarna till batteriet. Kunskapen om aquatiska djurs förmåga att detektera svaga elektromagnetiska fält är bristfällig, men det finns anledning att misstänka att det är en egenskap som finns hos ett flertal arter, se t.ex. Kalmijn 1974.

Teoretiskt finns här alltså ytterligare ett sätt på vilket sändaren kan störa den fisk som undersöks. Att så verkligen kan vara fallet görs troligt av observationer som rapporterades av Mc Cleave vid American Fisheries Society's årsmöte 1976. Han observerade att laxsmolt fick sin hjärtrytm störd av, och i viss mån synkroniserad till, en pulsad ultraljudsändare. I övrigt tycktes fiskens prestationsförmåga och beteende dock vara opåverkad av sändaren.

Påverkan kemiskt (e)

När sändaren placeras i bukhålan eller magsäcken är materialet i sändaren av stor betydelse. De allra flesta telemetrisändare på marknaden är ingjutna i uretångummi eller epoxylplast, ämnen som i princip är biologiskt inaktiva och ogiftiga, men som i praktiken ofta avger starkt irriterande och giftiga ämnen. Detta beror på förekomsten av rester av härdare som inte reagerat vid polymiseringen. Speciellt gäller detta snabbhärdande epoxityper, som ofta används för att isolera batteriet efter inkopplingen och som inte har hunnit att åldras och avge giftiga gaser före det att sändaren placeras i fisken.

Noggrannhet vid blandningen av komponenterna i gjutmassan och ett bad i cirka 50 % HCl följt av ordentlig sköljning i vatten är ett sätt att undvika oavsiktliga förgiftningar.

Speciellt viktigt är det att inte någon del av ett kvicksilverbatteri blir isolerad och kommer i kontakt med magsafterna. Resultatet är kraftig elektrolys och batteriet förstörs snabbt samtidigt som det frigörs kvicksilverklorid.

Infektioner (f)

Infektioner är en potentiell felkälla av betydelse vid telemetriexperiment som sträcker sig över längre tidsperioder. Henderson m.fl. (1966) gjorde ett försök där cirka 700 white bass (*Roccus chrysops*) försågs med sändarattrapper, vilka placerades efter de tre metoderna A, B och C ovan. Återfångsterna under en period av en månad analyserades och det visade sig att återfångsterna av fiskar med utvändigt märkning eller med sändarattrappen i bukhålan var mindre än hälften av återfångsten av kontroller och fiskar med sändaren placerad i magsäcken. Vidare hade mer än 50 % av de utvändigt märkta fiskarna förlorat sändaren. Hur återfångsterna varierar med tiden efter utsättningen framgår inte av redovisningen och tolkningen av resultaten är något osäker, men det förefaller troligt att de återspeglar en ökad dödlighet bland fiskar märkta enligt metod A och C och infektioner i såret vid fastsättnings-tråden respektive operationssnittet är då en sannolik orsak (se även punkt h).

Trauma vid hantering (g)

I och med att ett telemetriförsök normalt börjar omedelbart efter märkningen och ofta inte sträcker sig över längre period än något dygn, är det en viktig förutsättning att fisken är i god kondition då den sätts ut. Självklart sätter detta restriktioner på vilka metoder som kan användas då det gäller att fånga fiskarna för experimentet, men också hanteringen vid märkningen är kritisk. Vid försök med telemetrisk överföring av EKG från torsk observerade t.ex. Holand och Mohus (1976) en signifikant ökad hjärtfrekvens under cirka ett dygn efter märkningen. Sändaren hade då placerats i magsäcken och en elektrod sytts fast under huden. Operationen gjordes i luft under narkos med MS 222, och tog mindre än fem minuter att utföra. När man istället hanterade fisken under vatten vid operationen sjönk hjärtaktiviteten till normal nivå redan efter 3-4 timmar. Skillnaden förklaras troligen av att fisken bygger upp en stor syreskuld vid hantering i luft, vilken kräver lång tid att återställa.

Kamouflage (h)

En ultraljudsändare som placeras utvändigt är ofta mycket iögonfallande. Mindre fiskar, som märks på detta sätt, kan därför utsättas för ökad predation. Även om det inte finns några naturliga fiender, kan själva sändaren locka till attack från andra fiskar. Detta har observerats av Ichihara m.fl. (1972) på yellowtail (*Seriola quinqueradiata*) vid akvarieförsök.

Young m.fl. (1972) redovisar i motsats till detta ett akvarieförsök med utvändigt märkta öringar, där sändaren inte gav någon skillnad i aktivitet eller beteende. Så förblev t.ex. den dominanta fisken dominant även efter märkningen.

Påverkan genom försökssituationen

Förutom kvarvarande stressymtom, som kan finnas efter hanteringen av försöksfisken före utsättningen, finns det direkta och indirekta störande faktorer under telemetriförsökets gång. Den mest betydelsefulla är närvaron av följebåten, vilken i de flesta fall kontinuerligt finns i fiskens närhet. Vattnets goda transmissionsegenskaper för ljud är ju en förutsättning för spårningen och en båtmotor och propeller är effektiva bullerkällor, varför det finns anledning att tro att de flesta fiskar kan höra båten. Speciellt arter med koppling mellan simblåsa och hörselnäcka, Webersk apparat, har god hörsel, men även andra arter kan urskilja ljud, speciellt i frekvensområdet under 1 kHz (Hawkins 1973).

Man kan tänka sig två typer av reaktion på buller från båtar; en ospecifik skrämselfreaktion då intensiteten hos ljudet blir hög, eller en undflyendereaktion från ljudkällan. Exempel på den första typen av reaktion har jag observerat t.ex. på ål, som dyker till större djup då en båt passerar i närheten. Den återgår sedan till det tidigare simdjupet. Torsk tycks reagera genom att stoppa upp på botten, och inte flytta sig förrän båten avlägsnat sig. Andra arter tycks praktiskt taget okänsliga för buller, jag har observerat hur laxar summit tätt förbi mudderverk utan att låta sig skrämmas av dånet från skoporna. Det är rimligt att anta att arter som uppehåller sig i strömmande vatten, där bakgrundsbruset ofta är kraftigt, är mindre känsliga för ljudstörningar.

En riktad undflyendereaktion förutsätter att fisken kan lokalisera ljudkällan med hörseln. Detta är en kontroversiell fråga. Den mest accepterade ståndpunkten tycks vara att fiskar inte har riktningskänslig hörsel (van Bergeijk 1964), men vissa dressyrförsök motsäger detta (Jensen och Balchen 1967). Om det är så att fiskar kan avgöra varifrån ett ljud kommer finns det en stor risk att man vid ett telemetriförsök systematiskt jagar fisken i en bestämd riktning. Båten driver mellan lägesbestämningarna på grund av vind och ström i en konstant riktning. Härigenom kommer båten normalt att närma sig fisken från samma riktning vid varje ny positionsbestämning.

Som regel bör man alltså undvika att komma allt för nära fisken och hellre göra positionsbestämningar genom att observera bäringen till sändaren från två eller tre punkter. Sedan beräknas positionen med hjälp av krysspejling. Om man dessutom försöker variera båtens bäring slumpmässigt runt fisken minskar risken för systematiska felobservationer.

Ytterligare flera faktorer kan tänkas påverka observationer som görs med telemetritekniken. En stimfisk som släpps ut utan kontakt med artfränder kan misstänkas uppföra sig typiskt. Att fisken varit fångad i någon viss typ av redskap kan också påverka beteendet. Förflyttningen mellan fångst och utsläppsplats är ytterligare en störande faktor. Sannolikt är dessutom variationen i känslighet mellan olika arter betydande, men kunskapen om graden av påverkan i dessa avseenden är praktiskt taget obefintlig.

LITTERATUR

- Bruce, S. 1973. Transmitter attachment and fish behaviour. Underwater Telemetry Newsletter 3(1):8-11.
- Cushing, D. 1973. The detection of fish. Pergamon Press. Oxford. 200 p.
- Fänge, R. 1953. The mechanisms of gas transport in the euphysoclist swimbladder. Acta Physiol.Scand. 30, Suppl. 110:1-133.
- Hawkins, A.D. 1973. Sensitivity of fish to sound. p. 291-340. Ur Oceanography and Marine Biology Vol. II. Red.: H. Barnes. George Allen and Unwin Ltd, London.
- Henderson, H.F., A.D. Hasler och G.G. Chipman. 1966. An ultrasonic transmitter for use in studies of movements of fish. Trans.Amer.Fish.Soc. 95:350-356.
- Holand, B. 1973 a. Fjernmålning fra fisk, delrapport 1 -Signaler i vann-. SINTEF Report STF48 A73038. 68 p.
- 1973 b. Fish Telemetry, Report 3 -1973 Experiments-. SINTEF Report STF48 A73052. 22 p.
- 1974. Fish Telemetry, Report 4 -Ultrasonic tagging of cod in Lofoten-. SINTEF Report STF48 A74018. 14 p.
- 1975. Fish Telemetry, Report 6 -Devices and results 1974-. SINTEF Report STF48 A75065. 78 p.
- och I. Mohus. 1973. Fish Telemetry, Report 2 -1973 Equipment-. SINTEF Report STF48 A73051. 29 p.
- och I. Mohus. 1976. Fish Telemetry, Report 7 -Devices and results 1976-. SINTEF Report STF48 A76076. 67 p.
- I. Mohus och R. Berntsen. 1974. Fish Telemetry, Report 5 -Devices and results 1974-. SINTEF Report STF48 A74049. 89 p.
- Ichihara, T., M. Soma, K. Yoshida och K. Suzuki. 1972. An ultrasonic device in biotelemetry and its application to tracking a yellowtail. Bull.Far.Seas.Fish.Lab. 7:27-47.
- Jensen, A och J.G. Balchen. 1976. Konditionering av sei i uberørt miljø. Teknisk notat nr 86. SINTEF Report STF48 F76075. 15 p.
- McCleave, J.D. och K.A. Stred. 1975. Effect of dummy telemetry transmitters on stamina of Atlantic salmon smolts. J.Fish. Res.Bd.Can. 32(4):559-563.
- Nyman, L. 1973. Undervattensteleometri - en ny teknik i forskningens tjänst. Information från Sötvattenslaboratoriet, Drottningholm. (2). 29 p.
- Steen, J.B. 1970. The swimbladder as a hydrostatic organ. p. 414-443. Ur Fish Physiology Vol. IV. Red.: W.S. Hoar och D.J. Randall. Academic Press, New York.

- Tolstoy, I. och C.S. Clay. 1966. Ocean Acoustics. Mc Graw-Hill, New York. 293 p.
- Tucker, D.G. och B.K. Gazey. 1966. Applied Underwater Acoustics. Pergamon Press, Oxford. 244 p.
- Urick, R.J. 1975. Principles of Underwater Sound. Mc Graw-Hill, New York. 2nd Ed. 384 p.
- Van Bergeijk, W.A. 1964. Directional and nondirectional hearing in fish. p. 281-299. Ur Marine Bio-Acoustics Vol. I. Red.: W.N. Tavolga. Pergamon Press, New York.
- Young, A.H., P. Tytler, F.G.T. Holliday och A. Mc Farlane. 1972. A small sonic tag for measurements of locomotor behaviour in fish. J.Fish.Biol. 4(1):57-65.

SUMMARY: ULTRASONIC TELEMETRY

The ultrasonic telemetry technology is presented. Special emphasis is given to the inherent limits put on the design of transmitters. In particular the conflicting demands for large range, small size and long operational life are discussed and quantified. The specifications of the equipment built for the project "Telemetristudier på fisk" ("Ultrasonic tracking of fish") of the Swedish Fishery Board are presented.

An account is given of basic underwater acoustics, with emphasis on practical aspects in biotelemetry work.

Some methodological problems in telemetry experiments is reviewed. Different modes of action of the transmitter on the behaviour of fish is discussed and some possible dangers of interference in the experimental situation is pointed out.