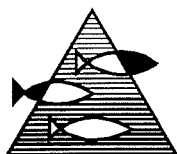


PROSJEKTRAPPORT

ISSN 0071-5638



HAVFORSKNINGSINSTITUTTET

MILJØ - RESSURS - HAVBRUK

Nordnesparken 2 Postboks 1870 5024 Bergen

Tlf.: 55 23 85 00 Fax: 55 23 85 31

Forskningsstasjonen

Flødevigen

4817 His

Tlf.: 37 01 05 80

Fax: 37 01 05 15

Austevoll

Havbruksstasjon

5392 Storebø

Tlf.: 56 18 03 42

Fax: 56 18 03 98

Matre

Havbruksstasjon

5198 Matredal

Tlf.: 56 36 60 40

Fax: 56 36 61 43

Distribusjon:

ÅPEN

HI-prosjektnr.:

10.03.7

Oppdragsgiver(e):

Norges forskningsråd

Oppdragsgivers referanse:

89.009

Rapport:

FISKEN OG HAVET

NR. 21 - 1995

Tittel:

AKUSTISK MENGDEMÅLING
AV OPPDRETTLAKS

Senter:

Ressurs

Seksjon:

Fangst

Forfatter(e):

Jon-Erik Juell og Jan Erik Fosseidengen

Antall sider, vedlegg inkl.:

33

Dato:

30.09. 1995

Sammendrag:

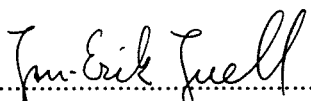
Akustisk biomassemåling av oppdrettlaks ville være et skånsomt og effektivt alternativ til tradisjonelle metoder. Dette arbeidet belyser variasjon i akustisk målstyrke hos laks i relasjon til svømmeatferd i merd. Eksperimentelle forsøk indikerte en ikke-lineær sammenheng mellom målstyrke (fra buksiden) og svømmedyp. Det var videre store variasjoner i målstyrke avhengig av laksens tiltvinkel. Atferdsstudier viste at laksens svømmeatferd varierer med lysforholdene og at dette påvirker den akustiske målstyrken. Resultatene viser at akustisk mengdemåling av oppdrettlaks må baseres på en samplingsstrategi tilpasset realistiske oppdrettsforhold.

Emneord - norsk:

1. Lakseoppdrett
2. Hydroakustikk
3. Biomasse

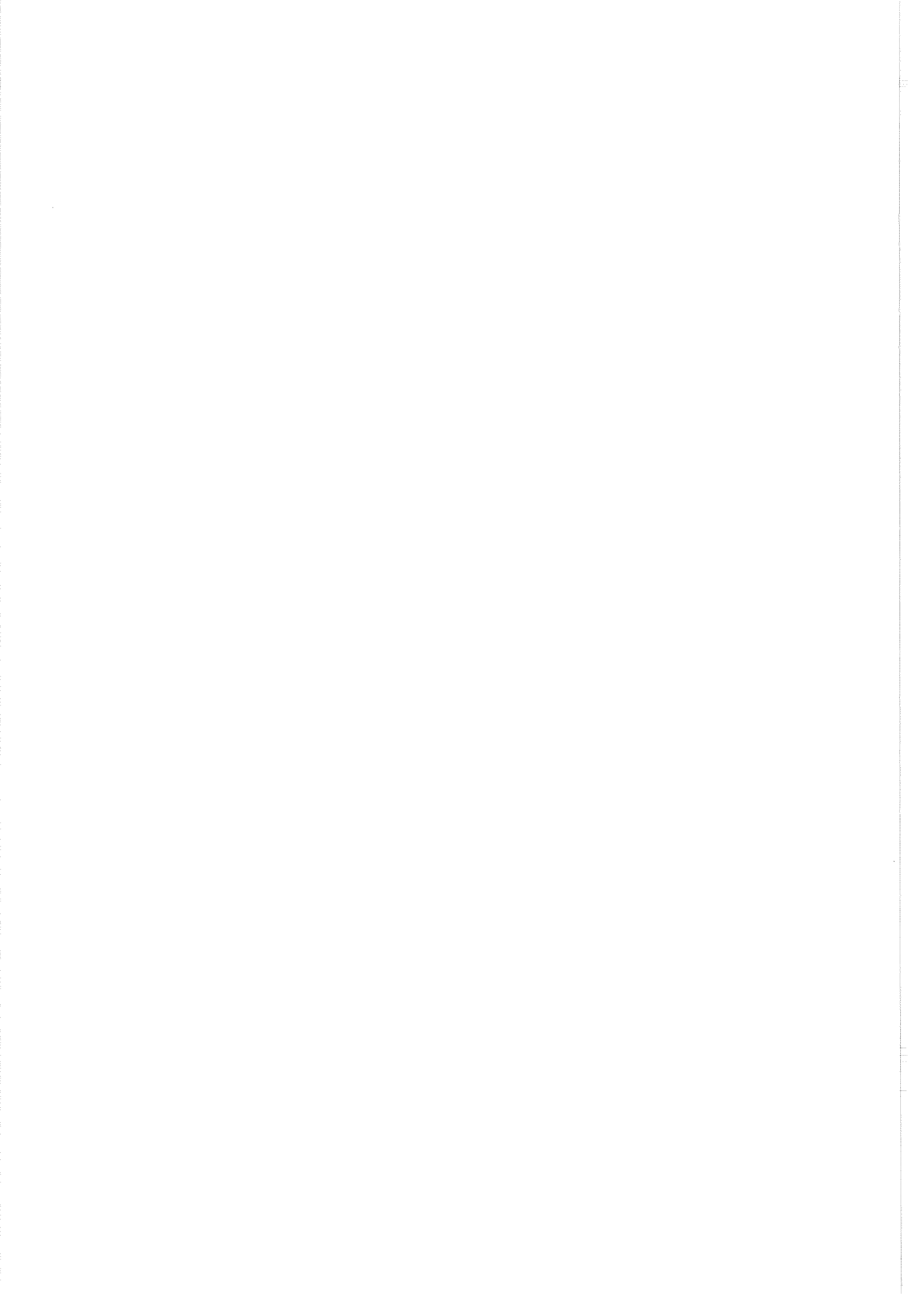
Emneord - engelsk:

1. Salmon farming
2. Hydroacoustics
3. Fish-biomass


.....
Prosjektleder


.....
Seksjonsleder

k 4009



INNHOLDSFORTEGNELSE

SAMMENDRAG	5
SUMMARY	6
BAKGRUNN	7
MATERIALE OG METODER	9
Akustisk målstyrke	9
Svømmeatferd	13
RESULTATER OG DISKUSJON	13
Akustisk målstyrke	13
Svømmeatferd	16
Akustisk mengdemåling av oppdrettslaks	19
TAKK	22
REFERANSER	22

SAMMENDRAG

Kontinuerlig overvåkning av biomassen i ulike merder på et oppdrettsanlegg ville kunne bidra til en mer effektiv drift. Anvendelse av hydroakustikk til dette formålet ville være et skånsomt og effektivt alternativ til tradisjonelle metoder. Dette krever imidlertid kunnskap om laksens akustiske refleksjonsegenskaper (målstyrke). Målet med dette arbeidet var å belyse variasjon i akustisk målstyrke i relasjon til svømmeatferd hos laks i merd. Ekseprimentelle målstyrkemålinger indikerte en ikke-lineær sammenheng mellom laksens målstyrke (fra buksiden) og svømmedyp. Videre ble det etablert en størrelsesavhengig målstyrkefunksjon i tiltvinkelintervallet $-10 - +10^{\circ}$. Atferdstudier viste at laksen svømmeatferd er avhengig av lysforholdene og at dette har stor betydning for den akustiske refleksjonen. Laksen svømmer dypere og hopper mer om dagen enn om natten. En klar økning i rullfrekvens i skumringen indikerte en aktiv regulering av oppdrift ved overgang fra "dagatferd" til nattatferd". Laksens tiltvinkelfordeling indikerte positiv oppdrift om natten. Resultatene viser at hvis en skal anvende akustikk til å mengdemåle oppdrettslaks, må det må utvikles en samplingsstrategi tilpasset realistiske oppdrettsforhold.

SUMMARY

Continuous monitoring of the biomass in salmon cages is likely to increase the production efficiency. It would optimize density-dependent farm procedures, e.g. food and drug administration, and provide a possibility for early detection of major escapes or thefts of fish. The importance of a correct biomass estimate increases with growth in biomass and are of great value for efficient delivery of fish quantities agreed in advance. Traditional methods for biomass estimation are often labour intensive and stress the fish. The use of hydroacoustic methods would be a gentle and efficient alternative, but require knowledge of the acoustic reflection properties (target strength, TS) of salmon to be accurate. The aim of the present study was to investigate variations in ventralaspect TS of caged salmon, both by experimental studies and by behavioural observations of caged salmon.

Change in swimming depth was simulated by a novel method where the swimbladder volume was manipulated by inserting a thin polyethylen tube through the pneumatic duct of dead adult salmon. A non-linear relationship between TS and swimming depth in the upper 20 m was indicated. Experimental measurements of tilt angles indicated a maximum TS at -2 to -4° in fish with a swimbladder volume giving neutral bouyancy at 1 m depth. The swimming behaviour of 1617 salmon (2.3 kg) in a 750 m^3 cage changed with light intensity and had a considerable effect on the acoustic backscattering from the cage. Swimming depth and surface activity (leaping) was lower at night than day. The mean tilt angle, recorded from still-photos, indicated a positive boyancy at nighttime. A peak in rolling behaviour at dusk suggested that the salmon actively regulated their boyancy prior to the "inactive" night period.

The observed variations in TS and behaviour have major implications for the use of the echo-integration method to estimate biomass of caged salmon and suggest that a special sampling routine for farm conditions must be developed.

BAKGRUNN

Effektiv og miljøvennlig lakseproduksjon i merd er avhengig av gode overvåknings- og kontrollrutiner. Kontroll med mengden av fisk (biomasse) i de enkelte merdene er i denne sammenheng en viktig faktor. I tillegg til at et godt biomassemål er viktig ved vurdering av ulike innsatsfaktorer og driftsrutiner (medisinrasjonering, formengde, fisketetthet, antall leppefisk, m.m.), vil en kontinuerlig overvåkning av biomassen i merdene gjøre det mulig å oppdage rømming og tyveri på et tidlig tidspunkt. Nytteverdien av biomassekontroll øker i takt med fiskens tilvekst og er ikke minst viktig for å kunne levere forhåndsavtalte kvanta til slakting på en effektiv måte.

Tradisjonelt blir biomassen i en merd beregnet ved å telle antall fisk og multiplisere med gjennomsnittsvekten på et lite utvalg av fisk. Telling foregår normalt ved utsetting av smolt og senere ved sortering eller uttynning av fisketettheten. Mellom disse telleoperasjonene bestemmes biomassen ved å måle gjennomsnittsvekten. Det store antallet individer i et merdanlegg gjør det imidlertid arbeidskrevende og ofte forbundet med stress for fisken å holde kontroll med biomassen. Det har derfor vært nedlagt et betydelig arbeid for å finne mer effektive og skånsomme alternativer for biomassemåling. I tillegg til ulike typer telleapparat er det utviklet optisk teknologi som anslår fiskens vektfordeling uten at den tas ut av vannet. Dette gjøres ved at fisken trenges eller frivillig svømmer gjennom ulike typer rammer eller gitter.

Et enda mer skånsomt og effektivt alternativ ville være å anvende hydroakustiske metoder (utsending av lyd gjennom vann og måling av lydrefleksjon) til å overvåke biomassen i en merd. Hydroakustikk har i dag bred anvendelse for å skaffe seg informasjon om det marine miljø (leting etter olje, ubåter, fisk, m.m.), og i fiskeriforskning har hydroakustikk lenge vært et viktig redskap i overvåkning av fiskebestandene (se f.eks. MacLennan og Simmonds 1992). Det siste tiåret har hydroakustikk også i økende grad blitt anvendt innen havbruksforskning (Bjordal m.fl. 1986; Kils 1989; Juell 1991; Huse og Holm 1993; Juell m.fl. 1993, 1994; Fernø m.fl. 1995). Dette har lagt grunnlaget for utvikling av hydroakustiske overvåkningsystemer for fiskeoppdrett i merd. Systemene kan blant annet brukes til å overvåke fiskens atferd (Bjordal m.fl. 1993; Dunn og Dalland 1993), styre foring (Bjordal m.fl. 1993; Juell m.fl.

1993) og utløse alarmer (Juell m.fl. 1995). Det ville ha stor nytteverdi hvis slike systemer også kunne gi et presist biomassemål.

Akustisk biomassemåling kan gjøres på to prinsipielt forskjellige måter. Den ene baserer seg på å bestemme størrelsesfordeling og gjennomsnittsvekt ved å måle lydrefleksjon fra et utvalg enkeltindivider og siden multiplisere med antall fisk bestemt ved en separat tellemetode (Dunn og Dalland 1993). Alternativt kan man anvende ekkointegrasjonsmetoden (Dragesund og Olsen 1965; MacLennan og Simmonds 1992), som i dag er et av de viktigste redskapene i overvåkningen av våre fiskebestander. En klar fordel ved å anvende denne metoden ville være at man kunne "telle" fisken i en normal driftsituasjon uten å måtte føre fisken gjennom et telleapparat. Hydroakustiske metoder bygger imidlertid på flere forutsetninger for å gi presise målinger. Problemstillinger knyttet til samplingsmetodikk og demping av akustiske signaler på grunn av høye fisketetthet er blitt fokusert på i tidligere studier (Furusawa m.fl. 1983, 1992; Burczynski m.fl. 1990). En annen viktig forutsetning er kjennskap til fiskens akustiske refleksjonsegenskaper (målstyrke) under målingen. Målstyrke er definert som:

$$TS = 10 \log \cdot \sigma / 4\pi$$

hvor σ er fiskens gjennomsnittlige akustiske tverrsnitt (m^2). Målstyrken hos en fisk er altså et mål på den gjennomsnittlige akustiske refleksjonen fra en fisk. Hos fisk med svømmeblære er mer en 90% av den akustiske refleksjon forårsaket av svømmeblæren (Foote 1980). Fordi størrelsen på svømmeblæren øker i takt med fiskens lengdevekst, angis målstyrke hos fisk normalt som en funksjon av fiskelengde (L) på formen:

$$TS = a \log(L) + b$$

hvor konstantene a og b bestemmes ut fra empiriske målinger. Det er denne sammenhengen som gjør det mulig å beregne størrelsen på enkeltindivider ved å måle målstyrken. I tillegg vil fiskens atferd (se f.eks. MacLennan m.fl. 1990) og fysiologi (Ona 1990) kunne ha betydelig innvirkning på den akustiske målstyrken. Arbeidet rapportert her har hatt som mål å belyse hvordan svømmeatferd hos laks i oppdrettsmerder påvirker dens akustiske målstyrke.

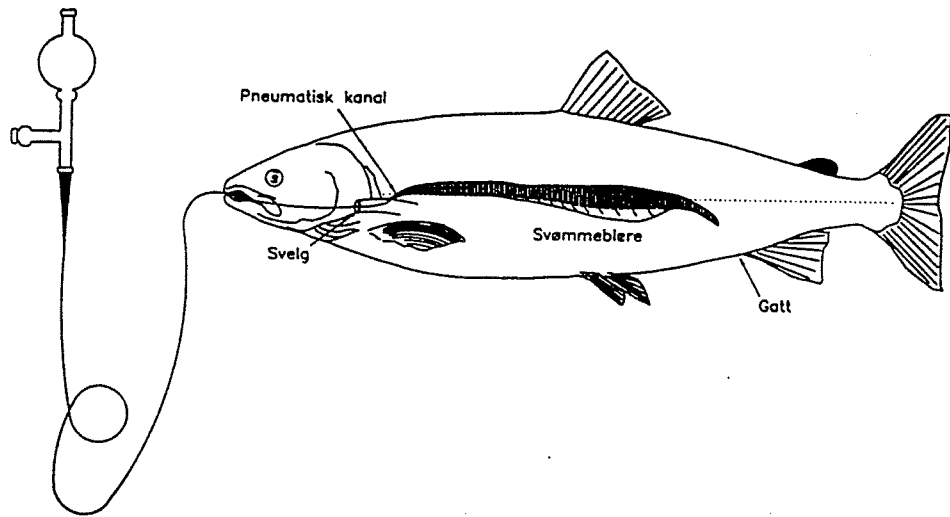
MATERIALE OG METODER

Eksperimentelle målstyrkemålinger og atferdstudier ble utført ved Austevoll Havbrukstasjon. Alle akustiske målinger ble utført med "Merdøye" (Lindem Data Acquisition, Oslo) som er et overvåkningsystem for fisk i merder. Systemet opererer på 50 kHz med en pulslengde på 1.0 ms og ekkoverdier integreres over 0,5 m dybdeintervaller og lagres i en PC. Svingere med åpningsvinkel på 28° og 42° ble brukt henholdsvis under målstyrkemålinger og atferdstudier. Systemet ble kalibrert med en 38,1 mm tungsten karbid standardkule med beregnet målstyrke -41.0 dB ved 50 kHz i sjøvann (Foote 1990). Alle målingene ble utført på fiskens bukside fordi dette er det mest relevante observasjonsaspektet ved anvendelse av hydroakustikk i akvakultur.

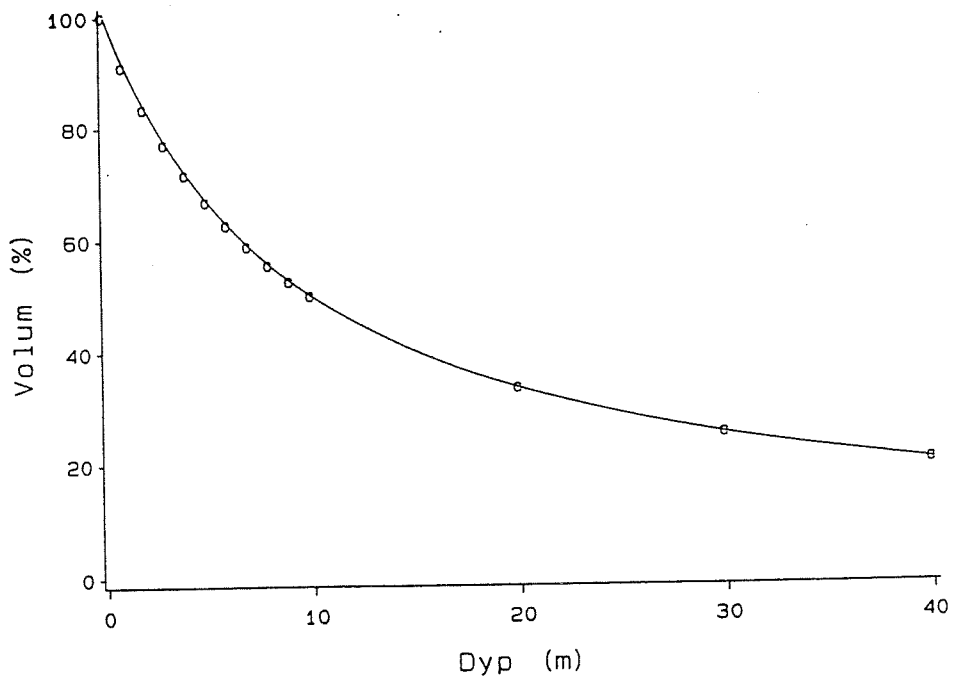
Akustisk målstyrke

Atlantisk laks hører til gruppen physostome fisk som har åpen svømmeblære og en kanal (den pneumatiske kanal) som munner ut omtrent midt i svelget (Figur 1). Laksen kan dermed regulere gassvolumet i svømmeblæren ved å svelge eller "rape" luft. Reguleringen foregår sannsynligvis ved at muskulaturen i svelget og i en spinthermuskel rundt inngangen til den pneumatiske kanal synkroniseres for å presse luft inn i eller ut av svømmeblæren. Når svømmedypet øker vil svømmeblærevolumet reduseres på grunn av økt trykk. Figur 2 illustrerer at den relative volumendringen er størst nærmest overflaten hvor oppdrettslaks normalt oppholder seg. Fordi svømmeblæren er det viktigste organet for refleksjon av lyd, skulle en anta at endringer i svømmedyp i dette dybdeintervallet skulle ha en betydelig effekt på målstyrken.

For å undersøke dette ble det utviklet en modifisert utgave av metoden anvendt av Nakken og Olsen (1977) og Ona (1982). Ved å føre en tynn polyetylen slange (diameter 1,9 mm) inn i svelget og videre inn gjennom den pneumatisk kanal, kunne svømmeblæren fylles og tømmes ved hjelp av en Peleus-ballong (se Figur 1). Kalibrering viste at den ga ca. 19 ml gass per trykk. Slangen ble montert på døde individer, og for å unngå at det festet seg luftbobler til gjellenes store overflate, ble disse samt underkjeve fjernet. Fisken ble så tømt



Figur 1. Skisse av svømmeblærens posisjon, størrelse og form hos atlantisk laks. System for regulering av svømmeblærevolum er også vist. Den stiplede bakre delen av svømmeblæren ekspanderer mest når volumet økes. Prikket linje viser definisjon av tilt = 0°. [Figure 1. The position, size and form of the swimbladder of Atlantic salmon (*Salmo salar*). System for manipulating swimbladdervolume is also shown. The rear part of the swimbladder expands mostly when swimbladdervolume increase. Dotted line indicates definition of tilt angle = 0°.]



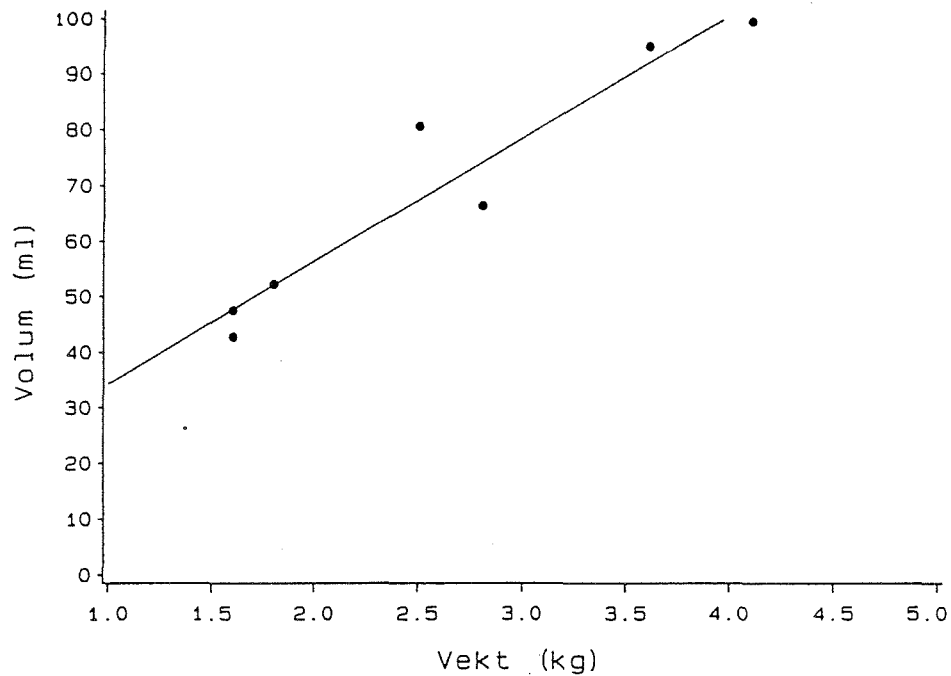
Figur 2. Relativ volumendring (%) som funksjon av dyp (trykk). [Figure 2. Relative change of gas volume (%) with increased depth (pressure).]

for luft og senket til 1,5 m dyp. Ved gradvis å fylle svømmeblæren ble det etablert et referansevolum (V_n) som gjorde at fisken hadde nøytral oppdrift på 1 m dyp. Det ble visuelt kontrollert at det ikke forekom luftlekkasjer ved trykkendringene. Denne volumkontrollen har begrenset nøyaktighet, men Figur 3 viser at det var en signifikant ($r^2 = 0,91$, $p < 0.001$) sammenheng mellom fiskevekt og V_n . Regresjonsligningen indikerte at rundt 80-90% av gassen i svømmeblæren kunne suges ut på denne måten ($V(\text{ml}) = 22,18 W(\text{kg}) + 12,1$). Fisken ble deretter montert på akustisk akse med et oppheng som gjorde det mulig å kontrollere fiskens tiltvinkel (Figur 4). Fiskens tiltvinkel var definert i forhold til en horisontal linje trukket fra snute og til midt på sporden (se Figur 1). Tiltvinkelen ble kontrollert ved bruk av et oppheng med vater og transportør og dobbeltsjekk med undervannskamera og loddsnor. Med denne metoden kunne endring i både svømmedyp og tiltvinkel simuleres. Det akustiske tverrsnittet av fisken i ulike tilstander ble beregnet ved direkte sammenligning med det akustiske tverrsnittet for kalibreringskula:

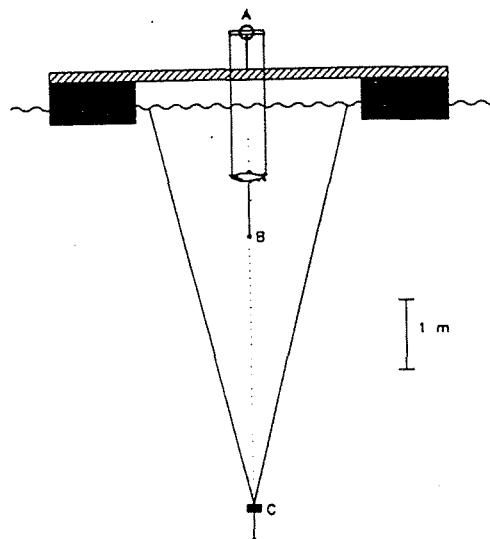
$$\sigma_f = (E_f/E_k) \cdot \sigma_k$$

der E er den observerte ekkointegral. Det gjennomsnittlige akustiske tverrsnittet ($\overline{\sigma_f}$) av 100 observasjoner (ping) og deretter målstyrke (TS) ble så beregnet. Etter at måleseriene var utført ble fisken åpnet for å kontrollere at svømmeblæren var intakt og effekten av å tømme og pumpe opp svømmeblæren ble observert visuelt.

Det ble utført målinger på sju individer (1,6 - 4,1 kg). Effekten av endring i svømmeblærevolum ble observert med en tiltvinkel på 0° . Svømmeblæren ble først tømt og deretter gradvis fylt opp til V_n og deretter tømt igjen. Antall målepunkt fra tom til full svømmeblære varierte fra tre til sju avhengig av størrelsen på fisken. Prosedyren ble gjentatt to ganger med samme fisk. Effekten av endring i tiltvinkel på målstyrke ble utført på de samme individene. Fisken ble tiltet fra -15° (hodet ned) til $+15^\circ$ i intervaller på $1-2^\circ$. Målingene ble utført både med svømmeblærevolum V_n og $V_n/2$.



Figur 3. Gassvolum (ml) ved nøytral oppdrift på 1 m dyp som funksjon av fiskevekt (kg).
 [Figure 3. Measured gas volume for neutral buoyancy of the experimental fish at 1 m depth.]



Figur 4. Montering av laks ved målstyrkemåling. (A) System for tiltvinkelkontroll, (B) blylodd for å stabilisere fisken, (C) akustisk svinger. [Figure 4. Rig for experimental target strength measurements. (A) Tilting system, (B) leadweight to stabilise the fish, and (C) acoustic transducer.]

Svømmeatferd

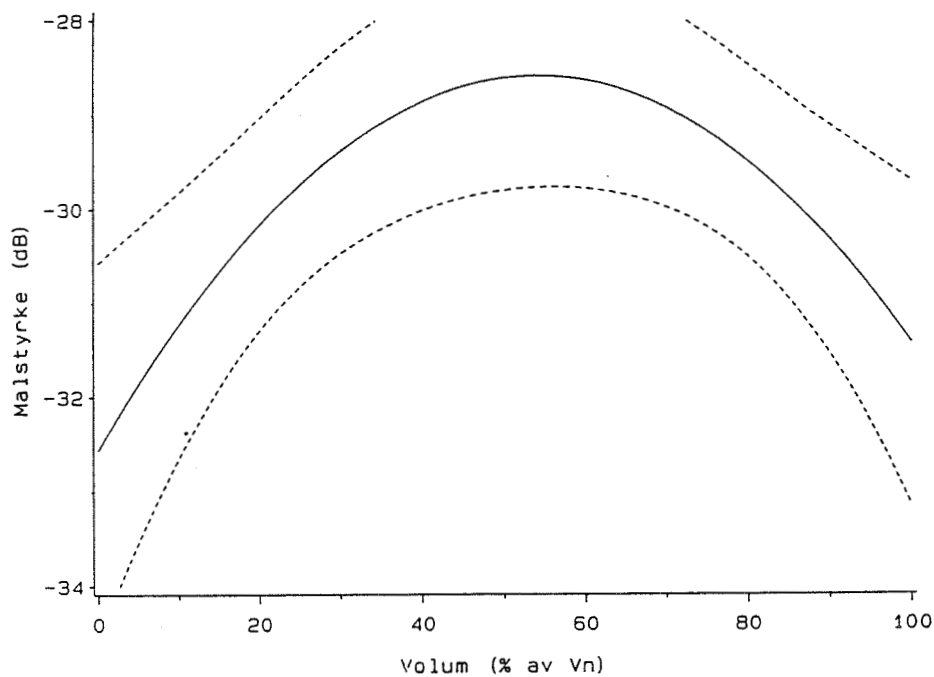
Detaljert kunnskap om effekten av tiltvinkel og svømmedyp på akustisk målstyrke blir først relevant for akustisk biomassemåling hvis den sammenholdes med kunnskap om laksens "naturlige" svømmeatferd i merd. Spesielt viktig vil det være å forstå om laksen utfører en aktiv regulering av svømmeblærevolum i forbindelse med endringer i svømmedyp. En slik regulering skulle komme til uttrykk ved systematiske variasjoner i overflateaktivitet (rull og hopp) i forbindelse med endringer i svømmedyp. Det ble derfor utført en detaljert tre-døgns (29.08. - 02.09.94) studie av svømmeatferd hos en gruppe laks (n = 1617, ca. 2,3 kg) i en 5 m dyp merd med overflateareal 12 x 12 m. Fiskens vertikale fordeling ble observert med "Merdøye" med svingeren hengt opp midt under merden på 15,5 m dyp. Gjennomsnittlig svømmedyp ble satt lik dybeintervall med høyest ekkorefleksjon. Overflateaktivitet ble visuelt registrert som antall hopp og rull i 5 minutters periode i samsvar med prosedyrer og definisjoner gitt i Furevik m.fl. (1993). Fiskens tiltvinkel ved skumring, natt og daggry ble registrert hvert 5. minutt ved stillbildefotografering med Photosea 1000 undervannskamera tilkoblet en Osprey OE4010 blitz og en Photosea 1000T timer. Kamerautstyret var plassert på 1,5 m dyp. Fiskens tiltvinkel ble digitalisert fra bildene ved en spesiell AUTOCAD prosedyre (se Huse m.fl. 1994). Gjennomsnittlig lysintensitet ($\mu\text{Einstein m}^{-2} \text{s}^{-1}$) i 10 minutters perioder ved overflaten ble registrert med en Licor LI-1000 datalogger.

RESULTATER OG DISKUSJON

Akustisk målstyrke

Det ble observert betydelige endringer i målstyrke ved å endre svømmeblærevolumet. Tendensen var at målstyrken økte med svømmeblærevolum opp til ca. $V_n/2$ for så å avta (Figur 5). Hvis man antar at fisken har en tilt på 0° og er i nøytral oppdrift på 1 m dyp, indikerer dette at målstyrken øker når laksen dykker inntil den når 10-12 m dyp og så avtar igjen hvis svømmedypet økes ytterligere (se Figur 2). Dette resultatet kan forklares ved å

observere endringer i svømmeblærens fasong når volumet avtar. Ved V_n er undersiden av svømmeblæren utspilt med en betydelig konveks krumming. Etterhvert som volumet reduseres vil svømmeblæreveggen gradvis flate ut. Dette vil sannsynligvis øke svømmeblærens akustiske tverrsnitt. Ytterligere reduksjoner vil gi svømmeblæreveggen en konkav krumming samtidig som det totale arealet reduseres, noe som vil føre til at det akustiske tverrsnittet avtar igjen. Dette er et fenomen som antagelig bare gjelder for målstyrken fra buksiden, siden svømmeblæreveggen på ryggsiden er avstivet mot bukuletaket.



Figur 5. Akustisk målstyrke (dB) hos atlantisk laks som funksjon av relativt svømmeblære-volum (%). Kvadratisk regresjon med 95% konfidensintervall ($TS = 0,15 \cdot V - 0,0014 \cdot v^2 - 32,56$.) er vist. [Figure 5. Acoustic target strength (dB) of Atlantic salmon at different swimbladder volumes. Quadratic regression with 95% confidens intervalls is shown ($TS = 0.15 \cdot V - 00.0014 \cdot V^2 - 32.56$.)]

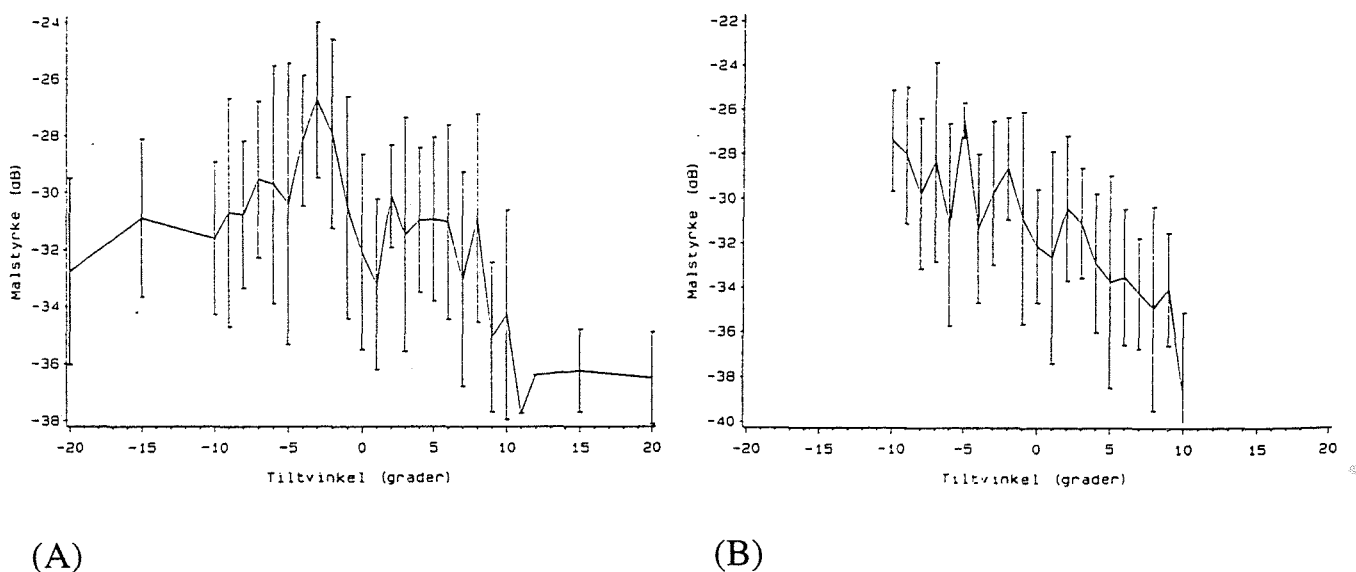
Tiltvinkel hadde også en betydelig effekt på målstyrken. Endringer på bare 1° i tiltvinkel kunne føre til store endringer i målstyrke. Det var også tildels store forskjeller mellom individenes tilt/målstyrke kurver (se Appendix Figurer 1-7). Disse resultatene er i samsvar med tilsvarende målinger på andre arter som konkluderer med at variasjonene skyldes interferensfenomener (MacLennan og Simmonds 1992) og individuelle variasjoner i

svømmeblærens overflate (Ona 1982; Foote 1985). I akustisk mengdemåling er det derfor vanlig å anvende gjennomsnittlige målstyrkeverdier. Figur 6 viser den gjennomsnittlige målstyrken for alle individene som funksjon av tiltvinkel. Innenfor det aktuelle vinkelområdet tyder målingene på en maksimumsverdi rundt $-2 - -4^{\circ}$ ved V_n . Ved $V_n/2$ indikerte målingene ikke noe slikt klart maksimum, men heller en gradvis reduksjon av målstyrke fra $-10 - +10^{\circ}$ (Figur 6). Dette kan skyldes at tiltingen av fisken førte til forflytning av luftvolumet inne i svømmeblæren (Ona pers. med.). Følgende relasjoner mellom målstyrke ($-10 - +10^{\circ}$) og lengde/vekt ble funnet ved volum = V_n :

$$TS = 24,2 \cdot \log(L) - 72,0$$

$$TS = 9,4 \cdot \log(V) - 60,6$$

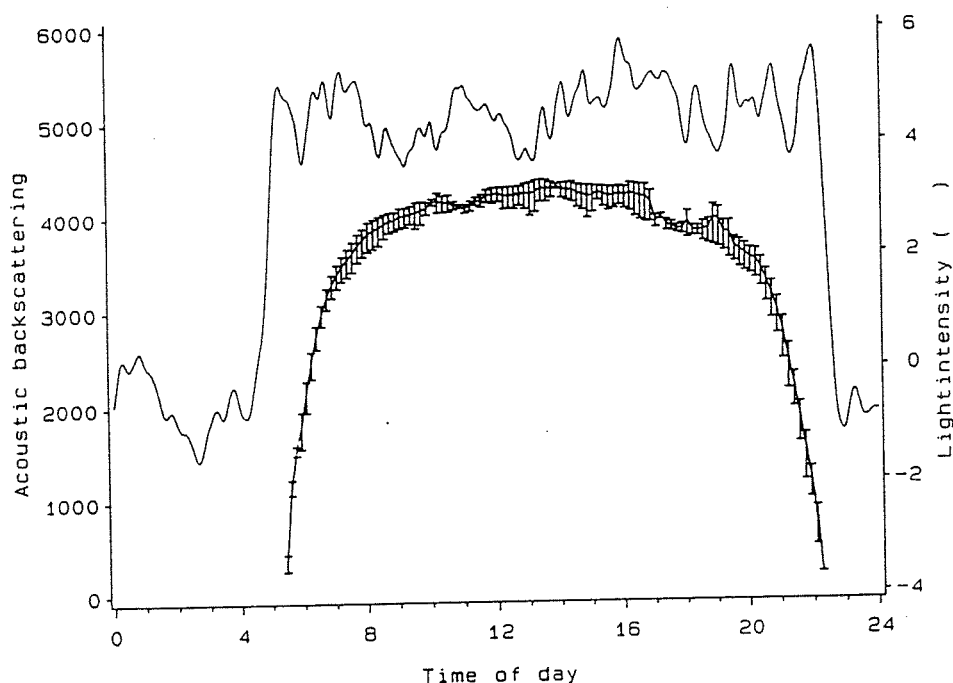
der L er lengde i cm og V er vekt i gram.



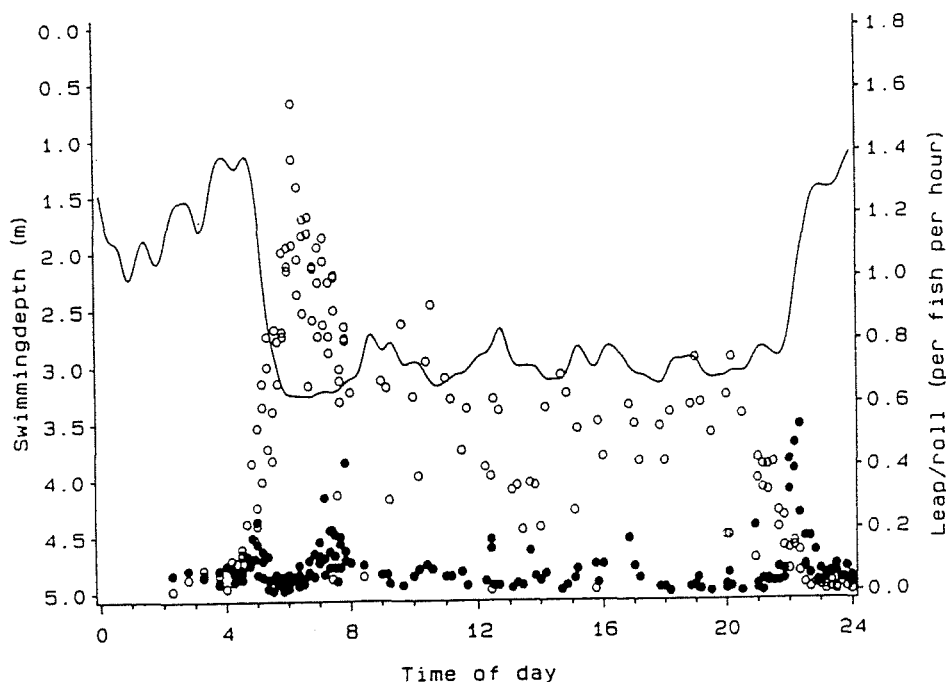
Figur 6. Akustisk målstyrke (dB) hos atlantisk laks som funksjon av tiltvinkel. (A): svømmeblærevolum = V_n (fisk nøytral oppdrift på 1 m dyp), (B) svømmeblærevolum = $V_n/2$. Figuren viser middelerdi og standardfeil ($n=7$). [Figure 6. Acoustic target strength in dB (mean and standard error) of Atlantic salmon at different tiltangles. (A) Svimbladder volume = V_n (neutral buoyancy at 1 m depth), and (B) swimbladder volume = $V_n/2$.]

Svømmeatferd

Det var en klar døgnvariasjon både i laksens atferd og akustisk refleksjon fra merden som var relatert til variasjon i lysintensitet (Figur 7). Atferdsvariasjonen kan beskrives som en typisk "dagatferd" og "nattatferd" med korte overgangsperioder ved daggry og skumring. Laksens midlere svømmedyp om natten ble registrert til ca. 1,5 m. Ved daggry dykket laksen og svømmedypet økte til ca. 3 m for så å avta igjen i skumringen (Figur 8). Mesteparten av endringen i svømmedyp skjedde i løpet av ca. 30 minutter. Endringen i svømmedyp skjedde imidlertid ved lysintensiteter som var så lave at det ikke lot seg registrere med den aktuelle lysmåleren. Resultatene er i samsvar med tidligere studier av svømmedyp (Juell og Westerberg 1993) og vertikalfordeling hos laks i merd (Huse og Holm 1993; Juell m.fl. 1995; Fernö m.fl. 1995)

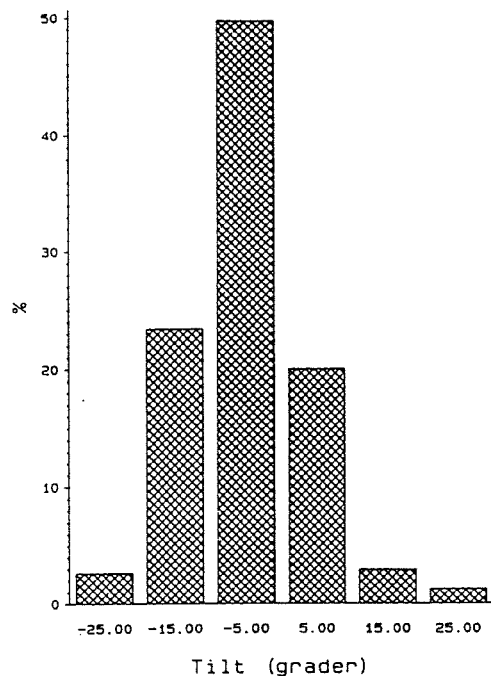


Figur 7. Døgnvariasjon i lysintensitet ($\mu\text{Einstein m}^{-2} \text{s}^{-1}$) og akustisk refleksjon fra merd med ca 3,7 tonn laks (2,3 kg). Gjennomsnittverdier for perioden 29.08. - 02.09.94. Tidsaksen refererer seg til norsk sommertid. [Figure 7. Diel variation in light intensity ($\mu\text{Einstein m}^{-2} \text{s}^{-1}$) and acoustic backscattering from a sea cage with 3.7 tons of Atlantic salmon (2.3 kg). Average values for a 3 day period (29 August - 2 September 1995). Time scale is GMT+1.]



Figur 8. Endring i midlere svømmedyp (—) og overflateaktivitet (○: hopp, •: rull) i en merd med 1617 laks på ca. 2,3 kg. [Figure 8. Diel variation in swimming depth (—), leaping frequency (○) and rolling frequency (•) in a sea cage with 1617 Atlantic salmon (2.3 kg).]

Fiskens overflateaktivitet var også klart relatert til endring i svømmedyp og lysintensitet. Hoppfrekvensen var lav ($0,05 - 0,1$ hopp fisk⁻¹ time⁻¹) om natten, men økte betydelig ved daggry i forbindelse med økning i svømmedyp (Figur 8). Det var en klar topp i hoppfrekvens om morgenen med maksimalverdier rundt $1,4 - 1,6$ hopp fisk⁻¹ time⁻¹. Hoppingen avtok imidlertid i løpet av et par timer til et "dagnivå" rundt $0,5$ som er forholdsvis likt den hoppfrekvens som ble observert av Furevik m.fl. (1993). I skumringen ble hoppfrekvensen gradvis redusert til nattnivået ettersom lysintensiteten avtok. I samsvar med Furevik m. fl. (1993) var rullfrekvensen betydelig lavere enn hoppfrekvensen om dagen, og det var ingen betydelig forskjell mellom dag og natt (Figur 8). Det var imidlertid en markant økning i rullfrekvens i en kort periode i skumringen i forbindelse med endring i svømmedyp. Fiskens gjennomsnittlige tiltvinkel om natten var $-5,1^{\circ} \pm 0,6^{\circ}$ (Figur 9). Det var ingen klare forskjeller på laksens tilt ved skumring, natt og daggry, men det var en svak tendens til redusert tilt (mer negativ) ved daggry. Dette kan skyldes at en fast kameraposisjonen gjør at en får et selektivt utvalg ved skumring og daggry når populasjonen vertikalvandrer. Tiltvinkelfordelingen i Figur 9 er derfor sannsynligvis representativ for "nattatferd".



Figur 9. Tiltvinkelfordeling for oppdrettslaks på 1,5 m dyp i "nattsituasjon" (n = 625). [Figure 9. Tilt angle distribution of caged Atlantic salmon at 1.5 m depth during night time (n = 625).]

Sett under ett er det altså en betydelig forskjell på laksens atferd om dagen og natten på grunn av lysforholdene. Tidligere studier har vist at laks i merd normalt svømmer med høy hastighet (Juell og Westerberg 1993) i en sirkelformet stim (polarisert fisk) om dagen (Sutterlin m. fl. 1979; Fernö m.fl. 1988). Ved lysintensiteter under et visst nivå bryter stimstrukturen sammen (Fernö m.fl. 1988; Juell og Bjordal 1988), sannsynligvis på grunn av manglende visuell kontakt med annen fisk. I denne perioden går fisken mot overflaten, svømmehastigheten avtar og stimen løses opp og fisken står mer utspredd både i horisontal- og vertikalplanet.

Den klare økning i rullfrekvens observert ved overgang fra dagatferd til nattatferd indikerer at laksen utfører en aktiv justering av sin oppdrift i denne perioden. At laksens hovedsakelig hadde en negativ midlere tiltvinkel om natten kan derfor indikere at den har positiv oppdrift under den inaktive nattperioden. En høy overflateaktivitet ved daggry i forbindelse med at laksen gjenopptar stimatferden og øker svømmedypet kan indikere at laksen aktivt regulerte svømmeblærevolumet for å oppnå ønsket oppdrift på "dagdypet". I tidligere undersøkelser har det vært fokusert på rullatferd i forbindelse med regulering av svømmeblærevolum, mens

hoppaktivitet har vært oppfattet som en "stressindikator" knyttet til luseangrep o.l. (se Furevik m.fl. 1993). Det kan imidlertid ikke utelukkes at laksen kan svelge mye luft under et hopp hvor den tross alt er i kontakt med luft i en lengere periode enn under et rull.

Det totale ekkonivået fra merden viste en døgnvariasjon som var klart relatert til overgang fra dagatferd til nattatferd (se Figur 7). Ekkonivået var omtrent dobbelt så høyt om dagen som om natten. Denne økningen kan være forårsaket av flere faktorer eller samvirkning mellom dem. Hvis laksen har nøytral eller positiv oppdrift om natten (jfr. tiltvinkel), vil den utspilte svømmeblæren være årsak til en lav målstyrke som gradvis øker når svømmedypet øker. Fiskens tilt om natten var mer negativ enn den vinkelen som ga maksimal akustisk refleksjon. Tiltvinkel ble ikke målt på dagtid, men tatt i betraktning at laksen da normalt svømmer polarisert og med relativt høy hastighet, er det sannsynlig at fiskens tilt er tilnærmet lik 0° , noe som også vil gi en målstyrke lavere enn maksimum. Dette bør imidlertid bekreftes av ytterligere tiltmålinger på dagtid. En tredje faktor som kunne ha bidratt til en lavere akustisk refleksjon om natten er hvis en betydelig andel av fisken står i den akustiske dødsonen nær overflaten og dermed ikke er observerbare. Resultatene antyder altså ulike forklaringer, men ytterligere observasjoner trengs for å konkludere.

Akustisk mengdemåling av oppdrettslaks

Resultatene i denne rapporten viser at biomassemåling av laks i merd basert på ekkointegrasjonsmetoden er en kompleks utfordring. Hvis en skal oppnå konsistente og presise målinger gjennom en hel produksjonsperiode kreves det at man utvikler en modell for anvendelse av metoden som er spesialtilpasset kommersielt lakseoppdrett i merd. En slik modell bør spesifisere kriterier for observasjonsperiode og observasjonsvolum. Videre bør den inneholde matematiske funksjoner som korrigerer for variasjoner i laksens akustiske refleksjonsegenskaper (målstyrke).

En stor fordel ved akustisk mengdemåling av fisk i merd sammenlignet med akustiske survey av ville fiskebestander, er at tid ikke er en begrensende faktor. Biomasseestimatet kan baseres på et meget høyt antall observasjoner, noe som vil øke presisjonen i estimatet. De

systematiske døgnvariasjonene i akustisk tilbakespredning fra en merd indikerer imidlertid at det er meget viktig å standardisere samplingsperiode i forhold til lysnivået. I motsetning til akustiske survey hvor en bestand mengdemåles 1-2 ganger pr. år, ønsker oppdretteren ideelt å kunne oppdatere biomassen kontinuerlig. Produksjonstiden for oppdrettlaks i merd varierer fra ca. 0,75 – 2 år, og det blir viktig å justere tid for mengdemåling etter endring i lysnivå. Her må man også ta i betraktning at det i stadig flere matfiskanlegg anvendes kunstig lys om natten. I tillegg til lys vil også temperaturskiftninger og strømforhold kunne påvirke fiskens fordeling. Mengdemåling bør antagelig heller ikke utføres i forbindelse med foring eller andre driftsoperasjoner som kan påvirke fiskens atferd.

Atferdstudier av laksens vertikale og horisontale fordeling i merd viser at det kan være store døgn- og årstidsvariasjoner og at laksen bare unntaksvis er jevnt fordelt i merden. Man må derfor anvende en samplingsstrategi som kompenserer for dette. Ekkointegrasjonsmetoden gir fisketetthet i ulike dyp i observasjonsvolumet, men for å estimere den totale biomassen må man også kjenne fiskens horisontale og vertikale utbredelse. For å dekke en representativ del av merdens volum og estimere fiskens utnyttelse av merdvolumet, har det i tidligere forsøk på akustisk mengdemåling av fisk i merd vært anvendt en kombinasjon av sonar og ekkolodd (Furusawa m.fl. 1983, 1992) eller flere smalstrålede svingere (Burczynski m.fl. 1990). Dette lar seg nok gjennomføre eksperimentelt, men kostnadene ved og den praktiske utførelse av disse metodene vil imidlertid være vanskelig å kombinere med driften ved oppdrettsanlegg. Hvis en skal anvende enkel svingerteknologi, f.eks. en bredstrålet svinger, bør denne henges under merden i et gyro-oppheng og sende lydimpulser mot overflaten. En vil da kunne oppnå et betydelig større observasjonsvolum enn hvis svingeren skulle monteres ved overflaten. Ved at oppdretteren gir systemet opplysninger om merdens geometri (dyp, overflate) og dyp under merden, kan en beregne det svingerdypet som gir størst mulig observasjonsvolum. Vertikalutstrekningen på observasjonsvolumet kan for eksempel være fra overflaten til ca. 1 m over merdbunnen for å unngå akustisk "støy" fra merdbunn og eventuell død fisk.

Et stort observasjonsvolum vil bidra til å minske variansen i målingene. Det er likevel sjelden at fisken er ideelt fordelt for akustisk mengdemåling. Om natten er den sannsynligvis relativt jevnt fordelt i horisontalplanet mens den typiske ringformede stimstrukturen om dagen

normalt vil skape lave fisketettheter i sentrale deler av merden. Dette skulle indikere at biomassemåling burde utføres om natten. Et problem forbundet med nattmålinger kan imidlertid være at mye av fisken står i den akustiske dødsonen ved overflaten. Hvis en skal mengdemåle på dagtid bør svingerens akustiske akse ikke sammenfalle med sentrum av merden, men forskyves mot periferien for å skape en jevnere fisketetthet. Dette vil også ha den funksjonen at fisken svømmer gjennom sentrum av lydstrålen istedenfor langs periferien. En slik strategi vil imidlertid redusere det maksimale observasjonsvolumet en kunne oppnå.

For å oppnå et presist biomasse-estimat må laksens målstyrke under målingen være kjent. Hvis en kompenserer atferdsmessige endringer (tiltvinkel, svømmedyp) i målstyrke ved å standardisere observasjonsperiode i forhold til miljøforhold, bør en kunne kompensere endring i fiskestørrelse ved å anvende en målstyrke/lengde relasjon på formen $TS = a \cdot \log(L) + b$. Når en skal beregne den totale biomassen bør en også kompensere for laksen kondisjonsfaktor. Simulering av variasjon i akustisk refleksjon for fisk av lik vekt men ulik kondisjon, indikerer at korreksjon er spesielt viktig for fisk over 1 kg. Ved høye fisketettheter kan lydrefleksjonen fra fisk nær svingeren utgjøre en så stor del av den utsendte lydenergien at denne er betydelig redusert når den treffer fisk fjernt fra svingeren. Lydrefleksjonen fra en fisk blir da avstandsavhengig. Dette medfører at det ikke lenger er en lineær sammenheng mellom fiskemengde og akustisk refleksjon. Denne skyggeeffekten er avhengig av fisketetthet og vertikalutstrekning på stimen (Foote m.fl. 1992). For å korrigere for dette fenomenet må man utføre en avstandsbasert korreksjon (ekstinksjonskoeffisient). For å detektere og korrigere for en slik effekt må en imidlertid ha et referansemål. Ved kvantifisering av tette sildestimer er bunnen anvendt som referanse (Toresen m.fl. 1991). Ved målinger i merd er overflaten et mulig referansemål.

Hydroakustisk overvåking av lakseproduksjon er en metode som kan anvendes for en rekke nyttige formål. Akustisk biomassemåling bør kunne bli et av disse formålene i fremtidens overvåking av merdproduksjon av laks. Arbeidet som er rapportert her har gitt viktige bakgrunnsdata for å anvende en slik metode og skisserer hvilke problemer en står overfor og hvilke områder en bør arbeide videre med for å realisere dette potensialet.

TAKK

Arbeidet er i hovedsak finansiert gjennom et Ny-teknologi stipend fra Norges Forskningsråd. Per Jensen og Kent Olav Mikkelsen har på en utmerket måte bidratt til opparbeiding og analyse av lys- og tiltvinkeldata. Videre har Torfinn Lindem, Egil Ona og Ingvar Huse gitt verdifull støtte og forslag til gjennomføring av arbeidet. Takk også til Mons O. Hauge (Sildolje- og Sildemelindustriens Forskningsinstitutt) som velvillig stilte deler av forsøksfisken til disposisjon.

REFERANSER

- Bjordal, Å., Floen, S., Fosseidengen, J.E., Totland, B., Øvredal, J.T., Fernö, A. og Huse, I. 1986. Monitoring biological and environmental parameters in aquaculture. Modeling, Identification and Control 7: 209-218.
- Bjordal, Å., Juell, J.E., Lindem, T. og Fernö, A. 1993. Hydroacoustic monitoring and feeding control in cage rearing of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.), s. 203-208. I: H. Reinertsen, L.A. Dahle, L. Jørgensen og K. Tvinnereim (red.), Fish Farming Technology. Rotterdam: Balkema.
- Burczynski, J.J., Johnson, R.L., Kreiberg, H. og Kirchner, W.B. 1990. Acoustic estimation of dense aggregations of fish in sea pens. Rapp. P.-v. Réun. Cons. int. Explor. Mer. 189: 54-64.
- Dunn, M. og Dalland, K. 1993. Observing behaviour and growth using the Simrad FCM 160 fish cage monitoring system, s. 269-275. I: H. Reinertsen, L.A. Dahle, L. Jørgensen og K. Tvinnereim (red.), Fish Farming Technology. Rotterdam: Balkema.
- Fernö A., Furevik, D., Huse, I. og Bjordal, Å. 1988. A multiple approach to behaviour studies of salmon reared in marine net pens. ICES C.M. 1988/F:15.

Fernö, A., Huse, I., Juell, J.E. og Bjordal, Å. 1995. The vertical distribution of Atlantic salmon in net pens: trade-off between surface light avoidance and food attraction. *Aquaculture* 132: 285-296.

Foote, K.G. 1980. Importance of the swimbladder in acoustic scattering by fish: a comparison of gadoid and mackerel target strength. *J. Acoust. Soc. Am.* 67: 2084-2089.

Foote K.G. 1985. Rather high frequency sound scattering by swimbladdered fish. *J. Acoust. Soc. Am.* 78: 688-700.

Foote K.G. 1990. Spheres for calibrating an 11-frequency acoustic measurement system. *J. Cons. perm. int. Explor. Mer.* 46: 284-286.

Foote, K.G. 1991. Summary of methods for determining fish target strength at ultrasonic frequencies. *ICES. J. mar. Sci.* 48: 211-217.

Foote, K.G., Ona, E. og Toresen, T. 1992. Determining the extinction cross section of aggregating fish. *J. Acoust. Soc. Am.* 91 (4): 1983-1990.

Furevik, D.M., Bjordal, Å., Huse, I. og Fernö, A. 1993. Surface activity of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) in net pens. *Aquaculture* 110: 119-128.

Furusawa, M., Ishii, K., Miyanoohana, Y. og Maniwa, Y. 1983. Experimental investigation of an acoustic method to estimate fish abundance using culture nets. *Jpn. J. Appl. Phys.* 23 (S23-1): 101-103

Furusawa, M., Ishii, K. og Miyanoohana, Y. 1992. Attenuation of sound by schooling fish. *J. Acoust. Soc. Am.* 92 (2): 987-994.

Huse, I. og Holm, J.C. (1993). Vertical distribution of Atlantic salmon (*Salmo salar*) as a function of illumination. *J. Fish Biol.* 43 (Supplement A)d: 147-156.

Huse, I. Foote, K., Ona, E. og Røttingen, I. 1994. Angular distribution of overwintering norwegian spring spawning herring. ICES C.M. 1994/B:19.

Juell, J.E. 1991. Hydroacoustic detection of food waste - a method to estimate food intake of fish populations in sea cages. *Aquacultural Engineering* 10: 207-217.

Juell, J.E. 1993. Managing the behaviour and growth of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) in sea cages. Dr. scient. thesis, Inst. for fiskeri- og marinbiologi, Universitet i Bergen.

Juell, J.E. og Westerberg, H. 1993. An ultrasonic telemetric system for automatic positioning of individual fish used to track salmon (*Salmo salar* L.) in a sea cage. *Aquacultural Engineering* 12: 1-18.

Juell, J.E., Furevik, D. og Bjordal, Å. 1993. Demand feeding in salmon farming by hydroacoustic food detection. *Aquacultural Engineering* 12: 155-167.

Juell, J.E., Fernö, A., Furevik, D. og Huse, I. 1994a. Influence of hunger level and food availability on the the spatial distribution of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) in sea cages. *Aquaculture and Fisheries Management* 25: 439-451.

Juell, J.E., Lindem, T. Fosseidengen, J.E., Al Houari, D. og Bjordal, Å. 1995. Hydroakustisk overvåkning og styring av lakseproduksjon. *FiskenHav*. 1995(10), 27s.

Kils, U. 1989. Some aspects of schooling for aquaculture. ICES C.M. 1989/F:12.

MacLennan, D.N., Magurran, A.E., Pitcher, T.J. og Hollingworth, C.E. 1990. Behavioural determinants of fish target strength. *Rapp. P.-v. Réun. Cons. int. Explor. Mer.* 189: 245-253.

MacLennan D.N. og Simmonds E.J. 1992. *Fisheries Acoustics*. Chapman and Hall, London, 325 s.

Ona, E. 1982. Kartlegging av svømmeblærens form og formstabilitet for teoretiske beregninger av akustisk refleksjon fra fisk. Cand. real. oppgave, Inst. for fiskeribiologi, Universitetet i Bergen, 230 s.

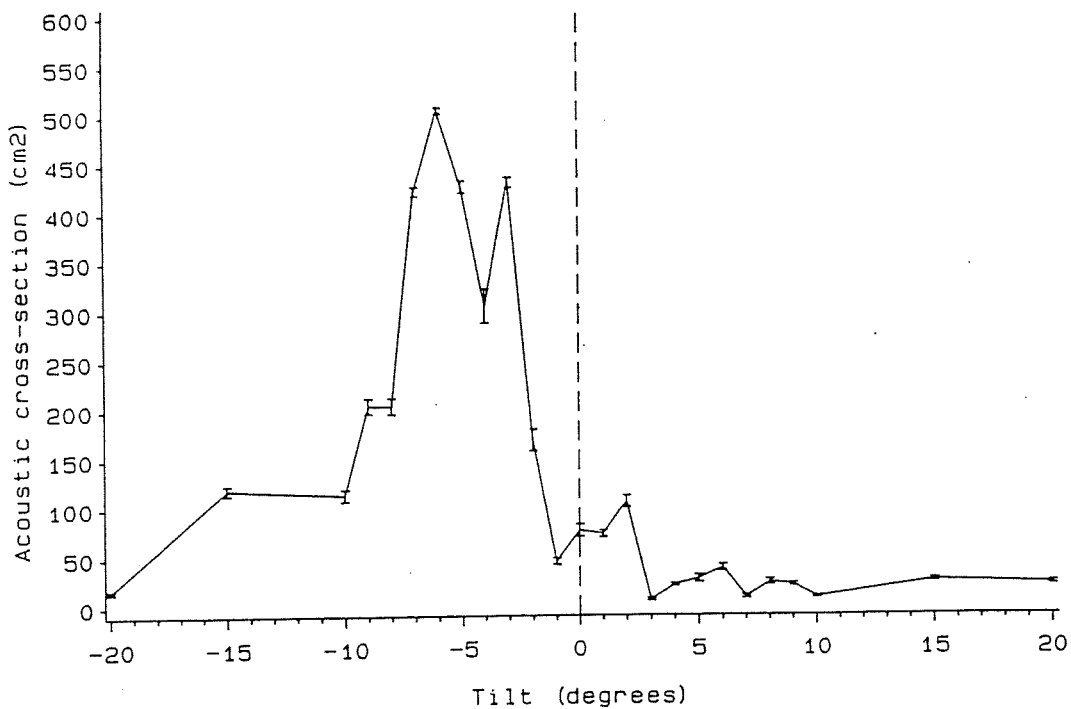
Ona, E. 1990. Physiological factors causing natural variations in acoustic target strength of fish. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.* 70: 107-127.

Toresen, R. 1991. Absorbtion of acoustic energy in dense herriong schools studied by the attenuation in the bottom echo signal. *Fish. Res.* 10: 317-327.

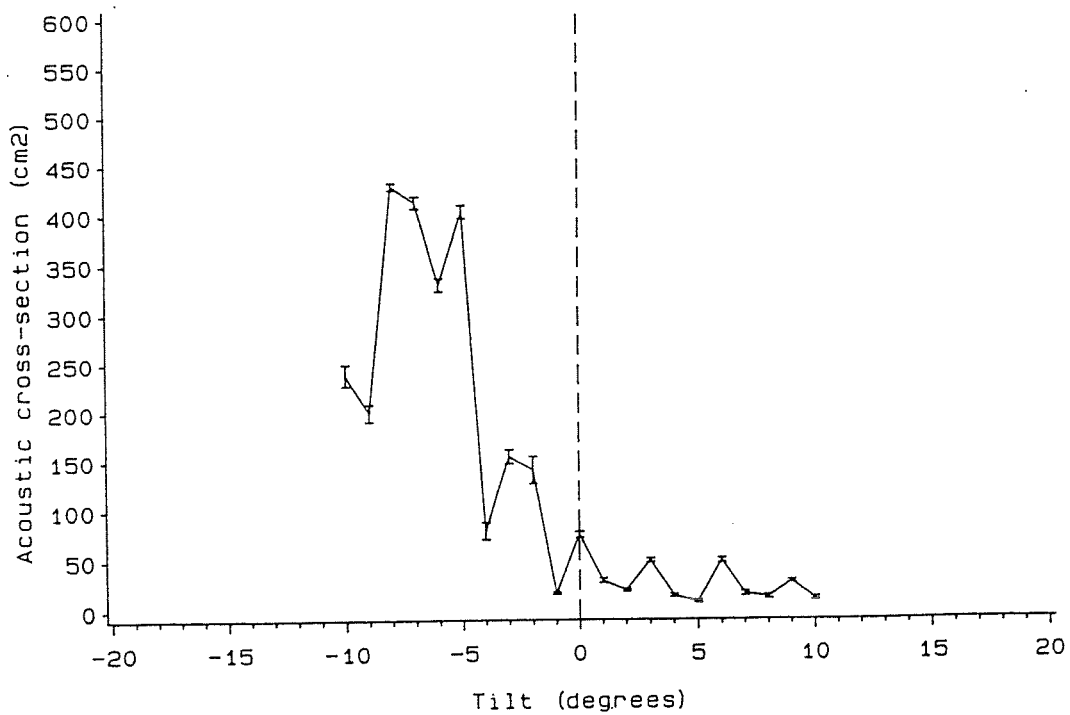
APPENDIX

Figurene 1-7 viser tiltvinkel/målstyrke funksjoner for sju laks med svømmeblærevolum V_n (nøytral oppdrift ved 1m dyp) og $V_n/2$. Vekt og lengde er gitt i figur. [*Figures 1-7. Acoustic cross-section (cm^2) as a function of tiltangle in seven Atlantic salmon at neutral boyancy at 1 m (V_n) and $V_n/2$.*]

Appendix Figur 1/Appendix Figure 1

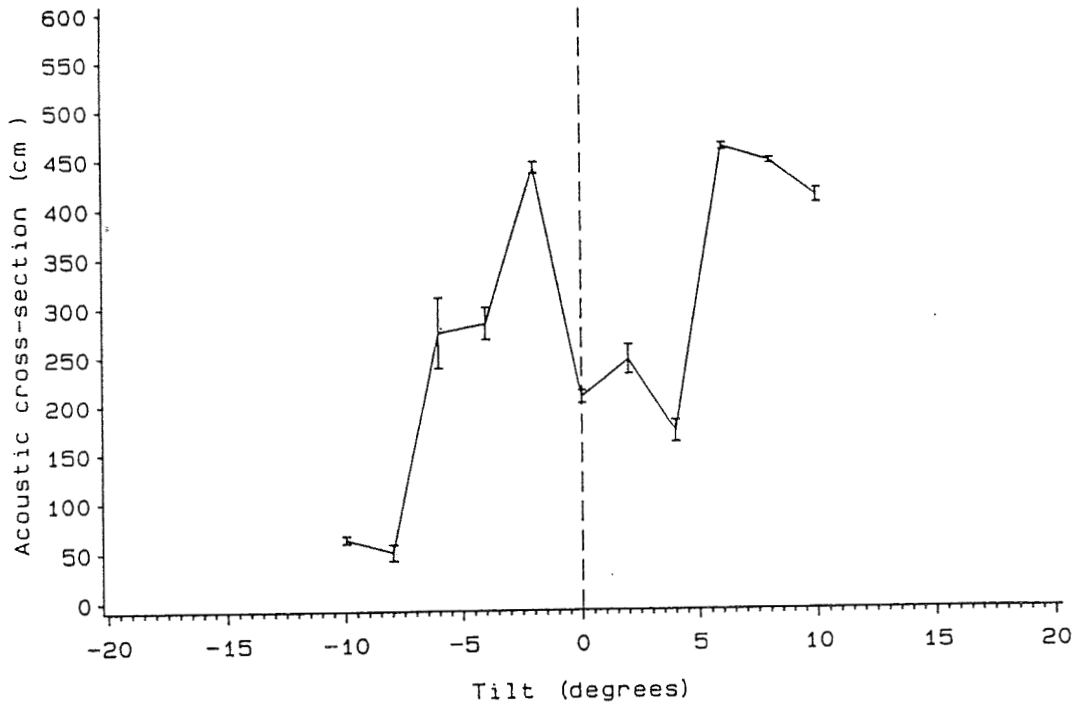


L=69 cm. W=4.1 kg V=Vn

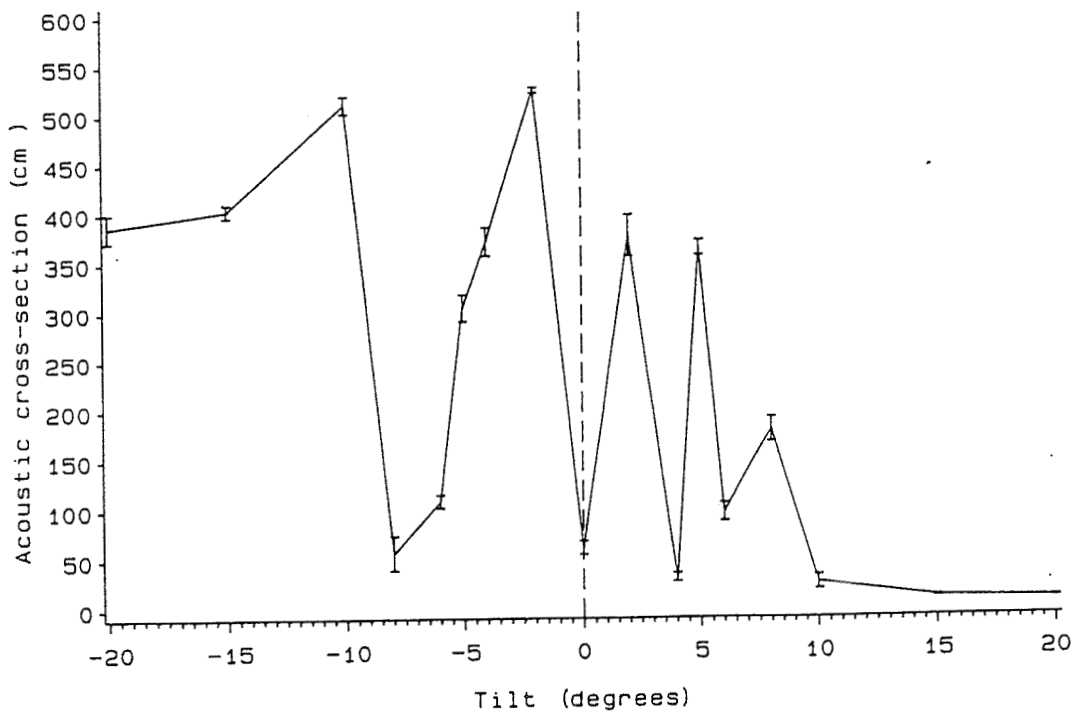


L=69 cm. W=4.1 kg V=Vn/2

Appendix Figur 2/Appendix Figure 2

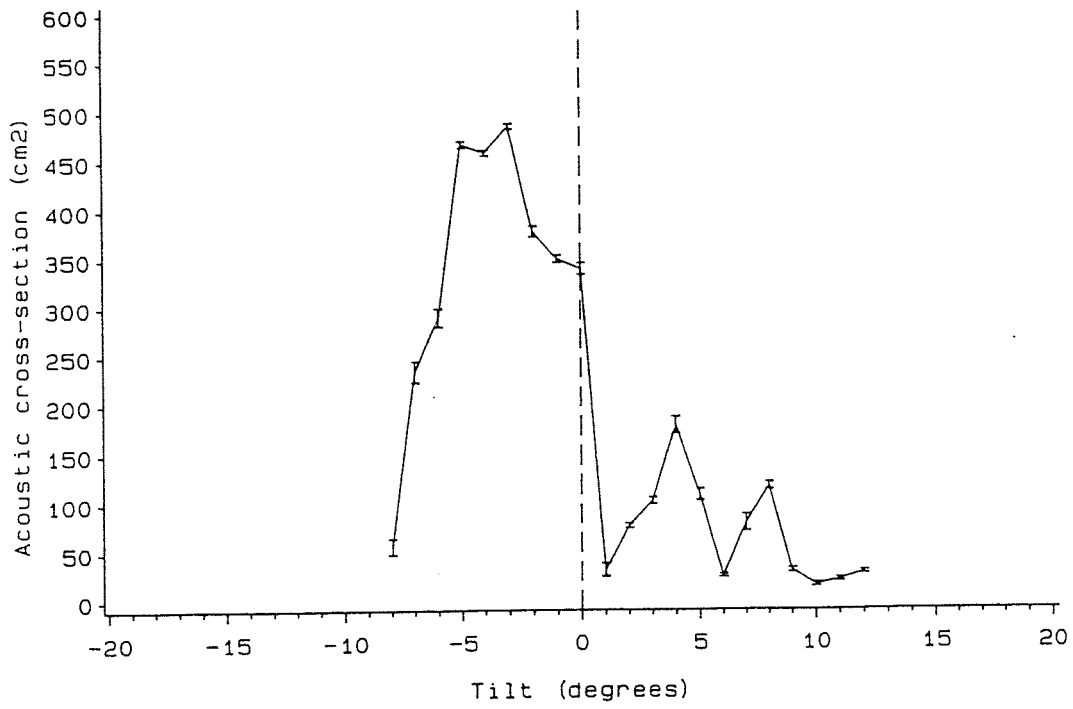


L=66 cm, W=3.6 kg V=Vn

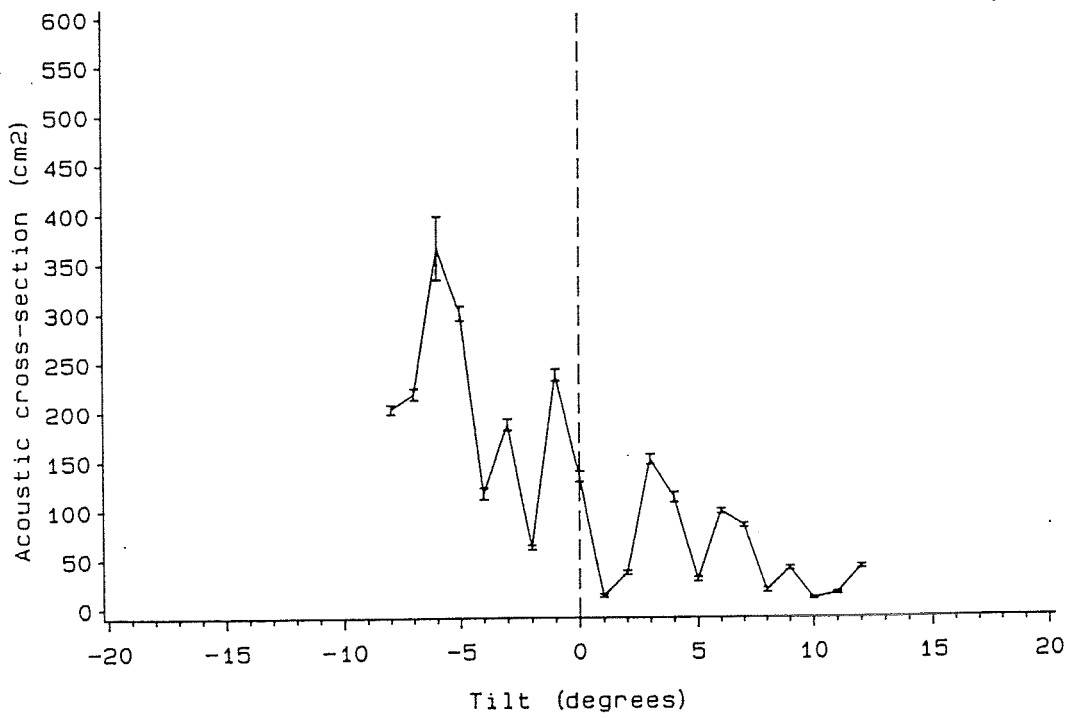


L=66 cm, W=3.6 kg V=Vn/2

Appendix Figur 3/Appendix Figure 3

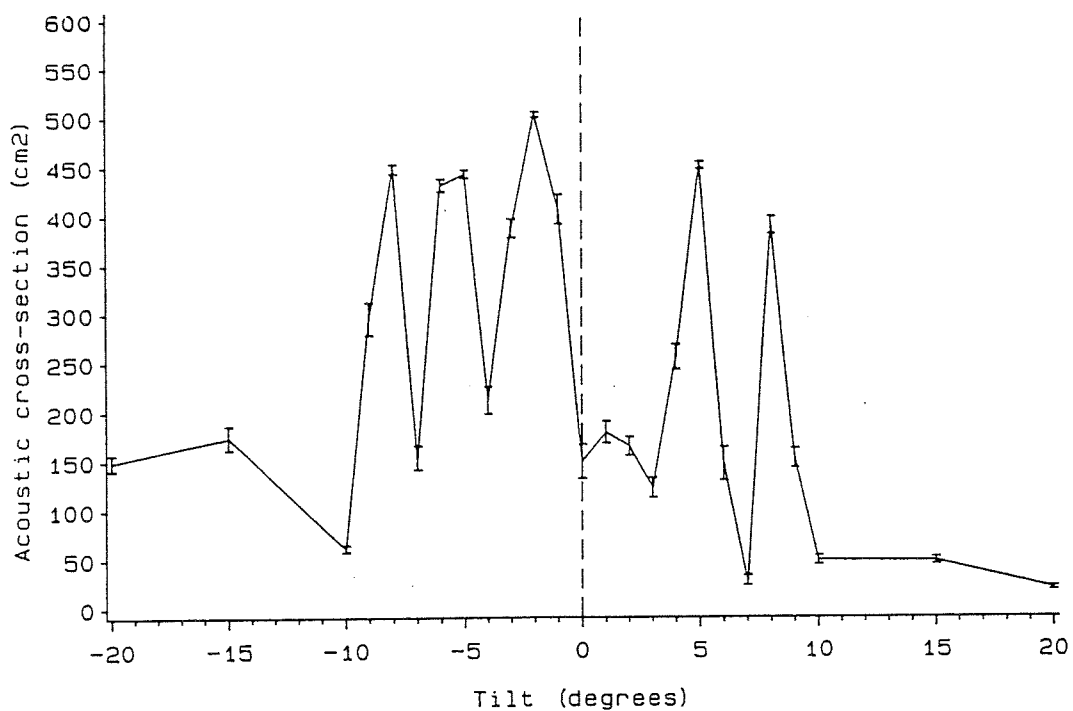


L=61 cm, W=2.8 kg V=Vn

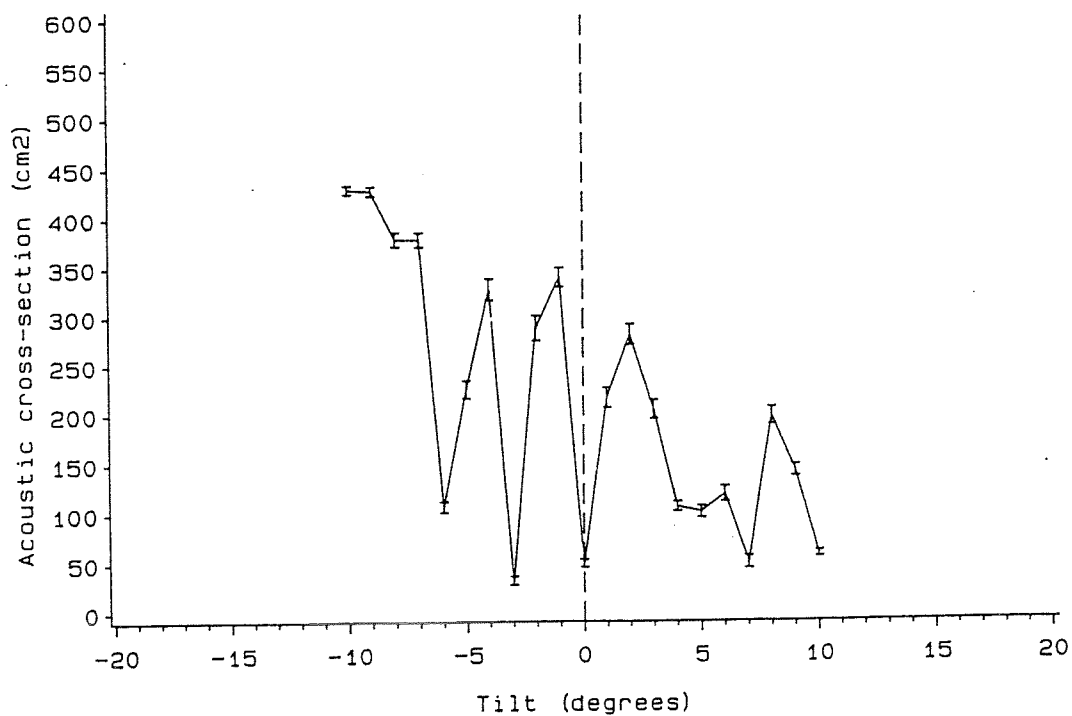


L=61 cm, W=2.8 kg V=Vn/2

Appendix Figur 4/Appendix Figure 4

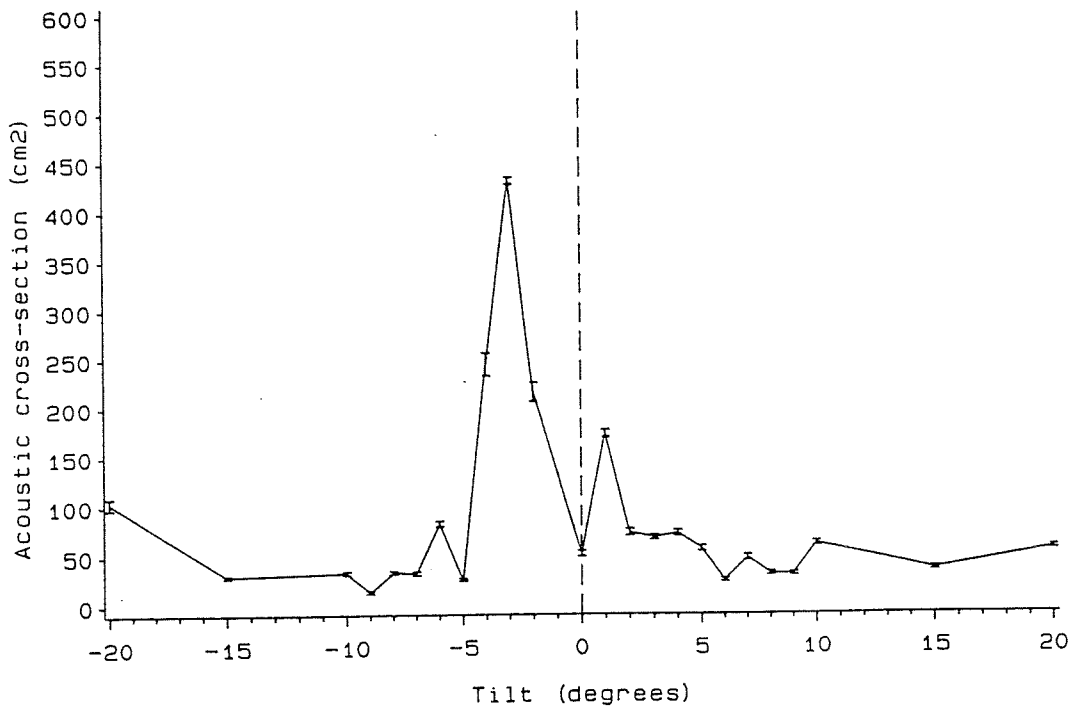


L=61 cm, W=2.5 kg V=Vn

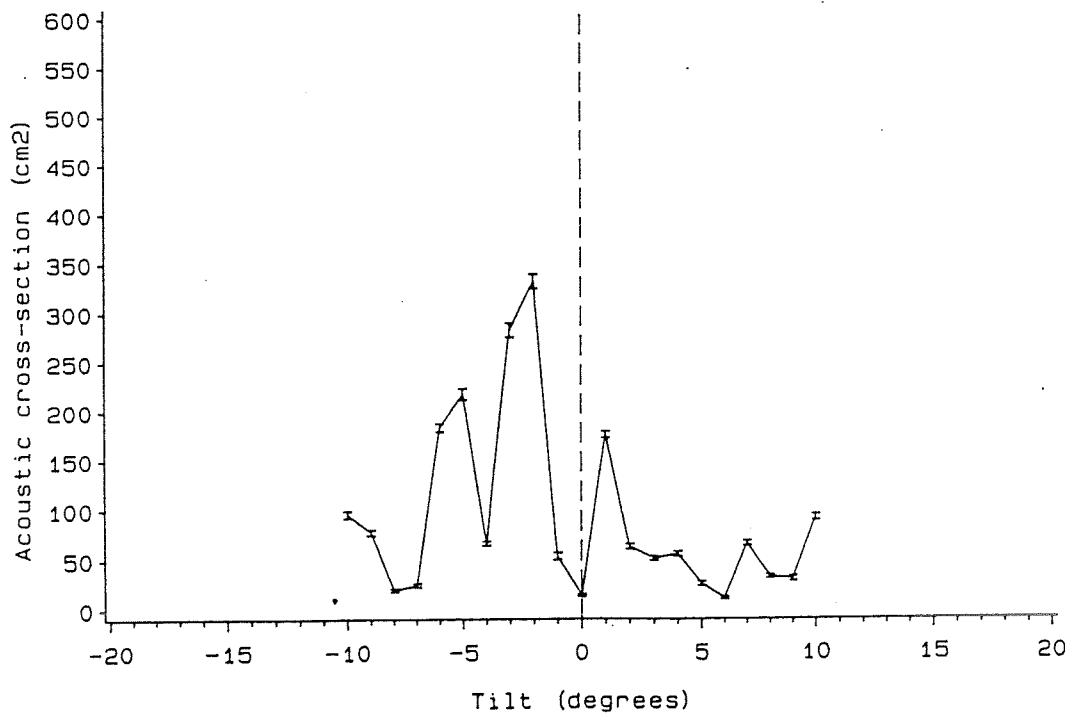


L=61 cm, W=2.5 kg V=Vn/2

Appendix Figure 5/Appendix Figure 5

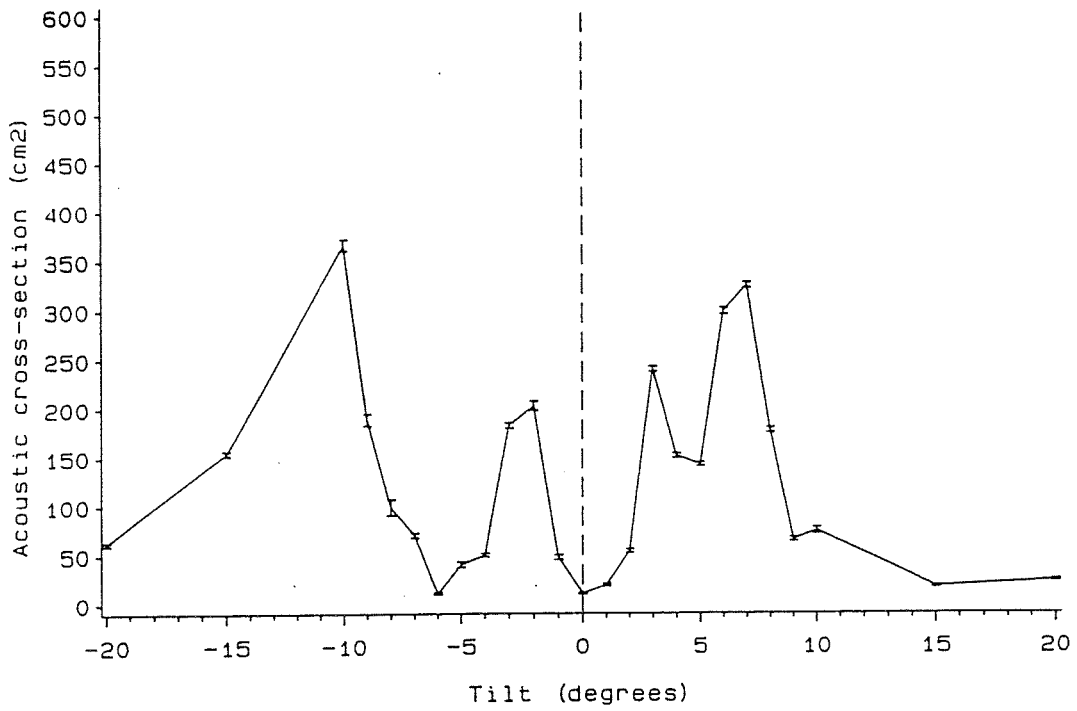


L=53 cm, W=1.6 kg V=Vn

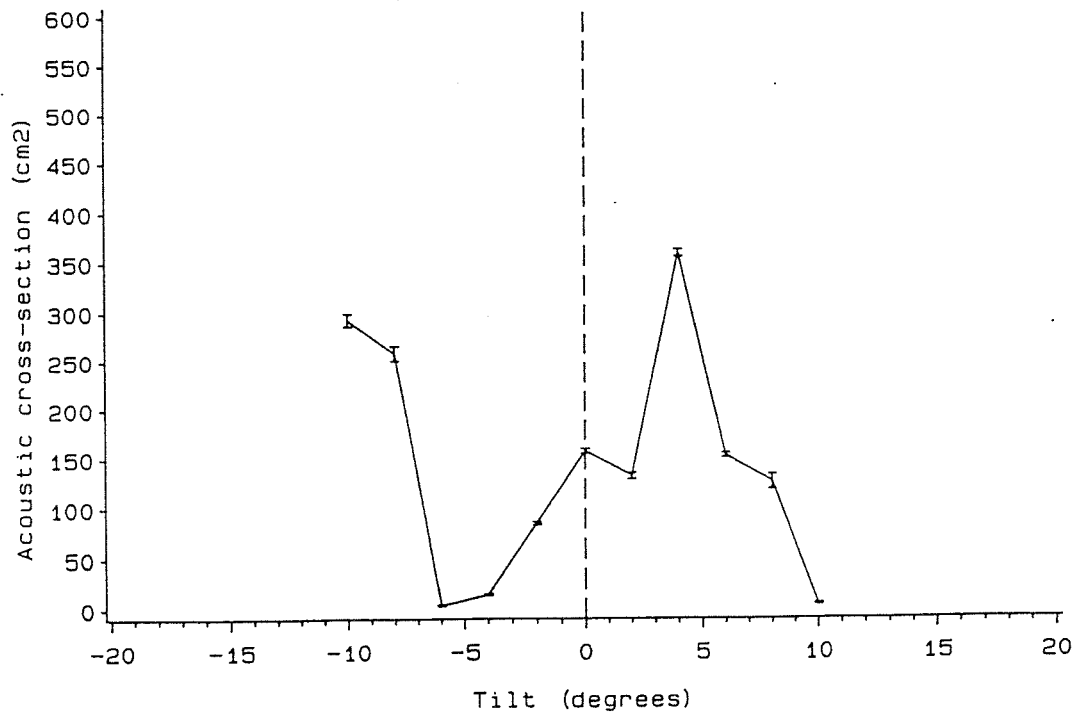


L=53 cm, W=1.6 kg V=Vn/2

Appendix Figur 6/Appendix Figure 6

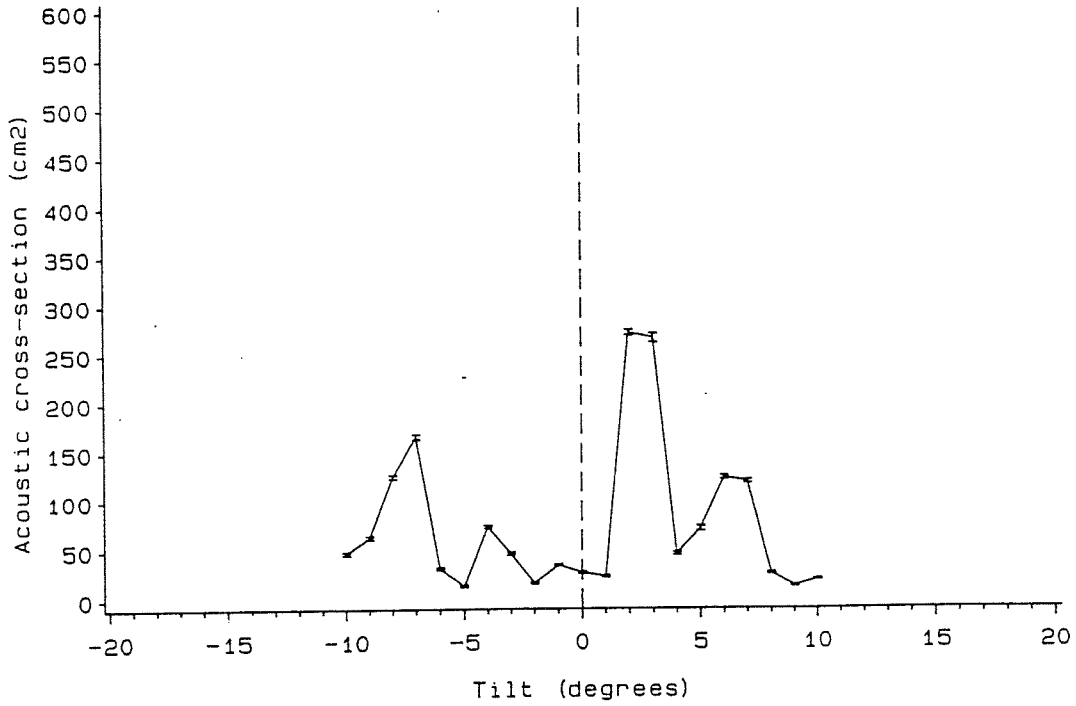


L=52 cm, W=1.8 kg V=Vn

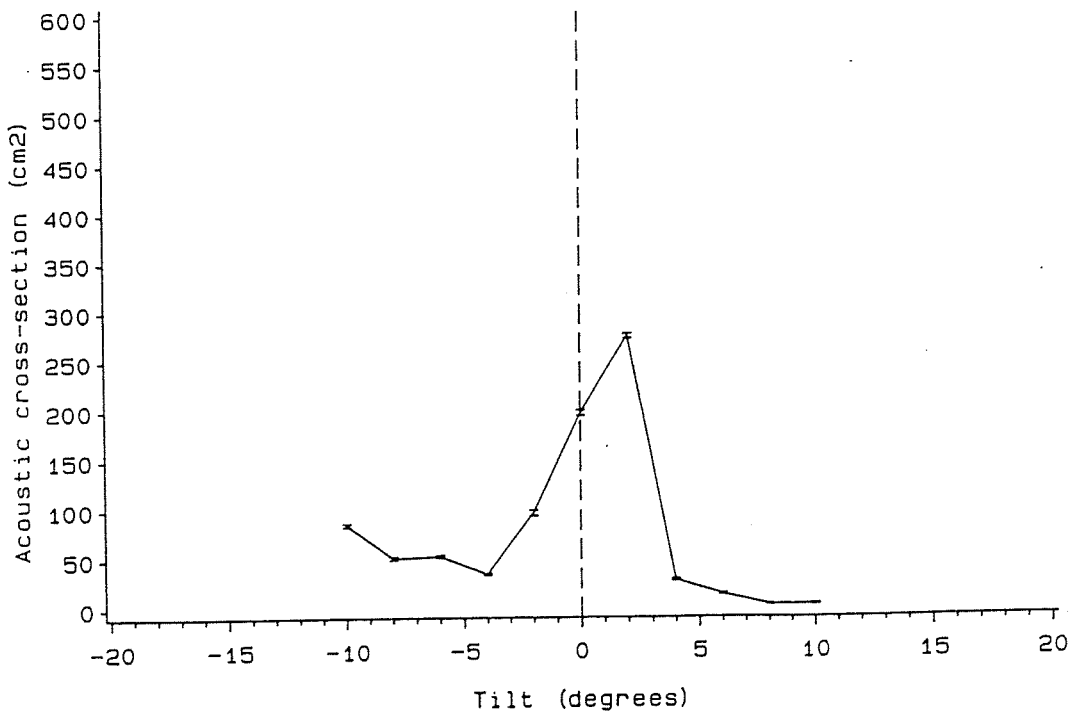


L=52 cm, W=1.8 kg V=Vn/2

Appendix Figur 7/Appendix Figure 7



L=53 cm, W=1.6 kg V=Vn



L=53 cm, W=1.6 kg V=Vn/2

