

KUNNSKAPSSTATUS OG FORSKNINGSBEHOV MED HENSYN TIL SKREMMEEFFEKTER OG SKADEVIRKNINGER AV SEISMISKE LYDBØLGER PÅ FISK OG SJØPATTEDYR

Rapport til Oljedirektoratet, Fiskeridirektoratet og Statens
Forurensningstilsyn fra spesielt nedsatt forskergruppe

John Dalen¹, Jens Martin Hovem², Hans Erik Karlsen³, Petter H.
Kvadsheim⁴, Svein Løkkeborg¹, Rolf Mjelde⁵, Audun Pedersen⁶ og
Anne Berit Skiftesvik¹

Havforskningsinstituttet¹, Bergen; SINTEF², Trondheim; Universitetet i
Oslo³, Oslo; Forsvarets forskningsinstitutt⁴, Horten; Universitetet i
Bergen⁵, Bergen og Christian Michelsen Research⁶, Bergen

Bergen, 19.12.08

© CGGVeritas



INNHold

INNHold	2
SAMMENDRAG	4
SUMMARY	7
1 INNLEDNING	10
1.1 Mandat	10
1.2 Kort om utført forskning og kunnskapsgrunnlaget	13
2 SEISMISKE UNDERSØKELSER OG LYDFORPLANTNING I HAVET	13
2.1 Innledning	13
2.2 Ulike typer undersøkelser	15
2.3 Generering av seismisk energi med luftkanoner	17
2.3.1 Lydkilde	17
2.3.2 Lydbølger fra luftkanoner	18
2.4 Lydutbredelse av seismisk energi	22
2.4.1 Innledning	22
2.4.2 Situasjonsbeskrivelse	23
2.4.3 Lydabsorpsjon i vannet og geometriske tap	23
2.4.4 Refleksjonstap i havbunnen	24
2.4.5 Refleksjonstap fra overflaten; ”Lloyd mirror”-effekten	26
2.4.6 Oseanografiske forhold og lydshastighetsprofilens betydning	26
2.4.7 Modellering av tids- og frekvensforløp	27
2.5 Nye undersøkelsesmetoder	29
3 HØRSEL HOS FISK OG NOEN MARINE VIRVELLØSE DYR	31
3.1 Lyd som hørselsstimulus for fisk	31
3.2 Fiskens øre	31
3.3 Deteksjon av lydakselerasjon og lydtrykk	32
3.4 Fiskenes audiogram	33
3.5 Andre karakterer ved lydpåvirkning	36
3.5.1 Frekvens- og intensitetsdiskriminering	36
3.5.2 Effekter av bakgrunnsstøy	36
3.5.3 Retningshørsel	36
3.5.4 Adaptering og habituering til lyd	37
3.6 Lydproduksjon og lydkommunikasjon	37
3.7 Hørsel og vibrasjonsfølsomhet hos noen marine virvelløse dyr	38
3.7.1 Innledning	38
3.7.2 Egenskaper hos mysider og copepoder	38
4 EFFEKTER PÅ FISK FRA SEISMISKE UNDERSØKELSER	40
4.1 Atferdspåvirkninger	40

4.1.1	Atferdsreaksjoner under påvirkning av luftkanoner	40
4.1.2	Terskelverdier for lydindusert hurtig fluktatferd hos fisk	40
4.1.3	Fluktatferd utløst av seismikklyd	41
4.1.4	Effekter av seismisk undersøkelser på ulike fiskerier	42
4.2	Skadeeffekter	43
4.2.1	Skader på egg, larver og yngel	43
4.2.2	Skader på større fisk	46
5	EFFEKTER PÅ SJØPATTEDYR FRA SEISMISKE UNDERSØKELSER	47
5.1	Innledning	47
5.2	Hørsel og vokalisering hos sjøpattedyr	47
5.3	Fysiologiske effekter	48
5.4	Atferdseffekter	49
5.5	Maskering	50
6	KUNNSKAPSHULL OG FORSKNINGSBEHOV	51
6.1	Innledning	51
6.2	Kunnskapshull og forskningsbehov	51
7	GEOGRAFISKE AVSTANDER MELLOM SEISMISKE UNDERSØKELSER OG FISKERIAKTIVITET, GYTEFELT OG KONSENTRERTE GYTEVANDRINGSVEIER	57
7.1	Innledning	57
7.2	Kriterier for avstandsvurderinger	57
7.3	Kommentarer til kriteriene	58
8	REFERANSER	60

SAMMENDRAG

Det har vært utført omfattende studier i flere land siden begynnelsen av 1970-årene for å belyse påvirkning og eventuelle effekter av seismiske undersøkelser på marine organismer. Mens man i Norge har hatt sterkt fokus på potensielle effekter av seismiske undersøkelser på fisk og fiskeri, er det potensielle effekter på sjøpattedyrene som har størst oppmerksomhet i de fleste andre land. I Norge ble den første forskningen innen området utført i 1984-86 med videreføring i første halvdel av 90-årene og i 2002-04. Langt det meste av forskningen internasjonalt er utført på sjøpattedyr - spesielt ulike hvalarter, med påviste skremmeeffekter, men uten å ha påvist varige skadeeffekter. Det er likevel sannsynliggjort at enkeltindivider av sjøpattedyr vil kunne komme til skade dersom de befinner seg i umiddelbar nærhet av en seismisk kilde. For fisk har en påvist at skader på enkeltfisk og økt dødelighet fra luftkanonskyting kan forekomme ved avstander mindre enn 5 m fra luftkanonene. De mest hyppige og alvorligste skadene forekommer ved avstander ut til ca. 1,5 m. Da fisk på tidlige livsstadier ikke har særlig stor evne til å svømme bort fra risikovolumene rundt luftkanonene, vil disse være mest utsatt. Det er påvist at voksen fisk skremmes av lydenergien fra seismisk aktivitet. Skremmeeffekten er påvist for noen bunnfiskarter i en radius på opp til ca. 30 km fra lydilden. Det finnes for lite kunnskap til å kunne fastslå når fisk som er blitt skremt av luftkanonskyting, kommer tilbake til områder den har forlatt, eller på annen måte blir like tilgjengelig for fangsting som før seismisk skyting startet opp.

I september 2007 ble det opprettet en arbeidsgruppe med representanter fra Fiskeridirektoratet og Oljedirektoratet for å foreta en gjennomgang av problemstillinger og forslå forbedrings-tiltak knyttet til innsamling av seismikk i forhold til regelverk, praksis og sameksistens mellom fiskeri- og oljenæringen. Arbeidsgruppen leverte sin rapport 1. april 2008.

Senere, i august 2008, besluttet Fiskeridirektøren og Oljedirektøren å iverksette tiltak som ble foreslått i rapporten. De fleste tiltakene var knyttet opp til byråkratiske prosesser, bortsett fra den delen som berører skremmeeffekter på fisk og marine pattedyr. Det ble videre besluttet å opprette en egen styringsgruppe for den videre prosessen bestående av representanter fra Oljedirektoratet, Fiskeridirektoratet og Statens forurensingstilsyn. Styringsgruppen ble gitt et spesifikt mandat til å opprette to faggrupper knyttet til problemstillingen ”skremmeeffekter i forhold til innsamling av seismiske data”.

Den ene faggruppen skulle være en forskergruppe som på oppdrag fra styringsgruppen skulle framskaffe en rapport der en gjorde rede for kunnskapsstatus mht. skremmeeffekter og skadevirkninger av seismiske lydbølger på fisk og marine pattedyr. Videre skulle en definere kunnskapshull og tilhørende forskningsbehov. På bakgrunn av dagens kunnskapsstatus skulle forskergruppen så avgi en vurdering omkring geografisk avstander mellom seismiske undersøkelser, fiskeriaktiviteter og gytefelt og konsentrerte gytevandringsveier.

Den andre faggruppen skulle være en næringsgruppe bestående av representanter fra fiskeriorganisasjonene og petroleumsindustrien. Denne gruppen skal, på basis av

forskergruppens arbeid, praktisk kunnskap og hensyn fra næringsaktørens side, gi sin anbefaling til styringsgruppen om geografiske minsteavstander mellom seismiske undersøkelser og seismisk kildetesting og fiskeriaktiviteter. Næringsgruppen skal så langt som mulig komme med en omforent anbefaling til styringsgruppen.

Idet det har vært begrenset tid for forskergruppen til å hente inn ny litteratur utover hva som allerede har vært kjent inntil de siste par årene, har vi i en viss grad måttet basere oss på nyere oppsummeringsrapporter for å få fram den brede oversikten. Vi har valgt å gi en bredere innføring i vesentlige forhold ved lydforplantning av seismisk energi idet dette er sentrale element i forståelsen av atferdspåvirkning av fisk og sjøpattedyr fra seismiske kilder. På grunnlag av samme type argument har vi valgt å gi både en bredere og dypere innføring i hørsel og lydoppfatning hos fisk og virvelløse organismer og hvilke ytre forhold som kan påvirke dette enn hva som har vært vanlig i denne type rapporter. En forventning til den utvidete presentering fra disse fagområdene er bl.a. for å kunne gjøre det enklere å identifisere områder der det trengs mer forskning.

Vi har oppsummert hvilke effekter seismiske undersøkelser kan ha på fiskeegg, på fisk fra larver til voksen fisk, og på sjøpattedyr. På basis av dette og i forhold til dokumentert og ønsket viten har vi påvist noen vesentlige kunnskapshull der vi ønsker mer kunnskap. Dette danner så utgangspunkt for beskrivelser av viktige forskningsbehov som bør dekkes.

Oppdragsgiverne, Oljedirektoratet, Fiskeridirektoratet og Statens forurensingstilsyn, ønsket en heller bred faglig sammensetning av forskergruppen. Samtlige innspill fra olje- og fiskerinæringen og fra berørte forvaltnings- og forskningsinstitusjoner påpekte at Havforskningsinstituttet burde være en sentral aktør i utførelsen av oppdraget. Dette skulle ikke gå til avgrensning av representasjon fra andre relevante institusjoner. Forskergruppen har bestått av følgende åtte personer som alle har bidratt til rapporten:

John Dalen, Svein Løkkeborg og Anne Berit Skiftesvik, Havforskningsinstituttet, Petter Helgevold Kvadsheim, Forsvarets forskningsinstitutt, Jens Martin Hovem, SINTEF, Hans Erik Karlsen, Universitetet i Oslo, Rolf Mjelde, Universitetet i Bergen og Audun Pedersen, Christian Michelsen Research. Gruppen valgte John Dalen som leder og koordinator for oppdraget.

På oppstartmøtet 6. november 2008 ble forskergruppen overlevert et mandat for oppdraget fra styringsgruppen med uttrykte delmandat og frist for gjennomføring av oppdraget til 19. desember 2008. Ut fra forskergruppens forståelse av oppdraget ble mandatet foreslått redusert noe for sjøpattedyr og utvidet noe for fisk. Under siste del av møtet identifiserte forskergruppen områder og oppgaver som burde bearbejdes og oppgavene ble fordelt på gruppe-medlemmene.

Det videre arbeidet foregikk ved at det enkelte gruppe-medlem forfattet sin tekst som så ble sendt til de andre medlemmene for kommentering og -supplering. Denne sløyfen kunne

gjentas flere ganger. Gruppen hadde et møte 12. desember 2008 der en gikk gjennom utført arbeid og foreslo avkortninger og suppleringer i forhold til rapportdisposisjonen.

Rapporten ble overlevert styringsgruppen 19. desember 2008 på et møte.* På møtet foreslo styringsgruppen noen mindre endringer som er innarbeidet i rapporten.

* Rapporten er planlagt utgitt ved Oljedirektoratet, Stavanger. Formelle krav til dette var ikke oppfylt da rapporten ble overlevert 19. desember 2008 og den skal følgelig trykkes i ettertid. Inntil formell refereringsordning er etablert, skal rapporten refereres til som følgende:

Dalen, J., Hovem, J.M., Karlsen, H.E., Kvadsheim, P.H., Løkkeborg, S., Mjelde, R., Pedersen, A. og Skiftesvik, A.B. 2007. Kunnskapsstatus og forskningsbehov med hensyn til skremmeeffekter og skadevirkninger av seismiske lydbølger på fisk og sjøpattedyr. (Engelsk sammendrag og figurtekster). Rapport til Oljedirektoratet, Fiskeridirektoratet og Statens Forurensningstilsyn fra spesielt nedsatt forskergruppe. Bergen, 19. desember 2008. 69 s.

SUMMARY

A great number of studies have been performed in several countries since the beginning of the 1970's to elucidating impacts and possible effects of seismic explorations on marine organisms. While in Norway the greater focus has been on potential effects of seismic explorations on fish and fisheries, in other countries potential effects on marine mammals have got the greater attention. In Norway the first research activities within the area took place in 1984-86 with continuing activities during the first half part of the 90's and during 2002-04. Most of the international research has been carried out on marine mammals - especially different whale species with demonstrated scaring effects, but with no proved lasting harmful effects. However it is found likely that sea mammal individuals may be injured if they are in the immediate vicinity of a seismic source. It is proved in fish that injuries in single specimen and increased mortality may occur at distances less than 5 m from the airguns. The most frequent and serious injuries occurs at distances out to 1.5 m. While fish at the youngest life stages do not possess the abilities of swimming away from the higher risk volumes around the airguns, they will then be exposed to the airguns. It has been demonstrated that adult fish are scared by sound energy from seismic activities. The scaring effect is proved for some demersal species within a radius out to 30 km from the seismic sound source. We have not enough knowledge to decide when fish being scared away of airgun shooting will return to areas being left, or in other ways become as available for fishing as prior to the airgun shooting.

In September 2007 a working group was established having representatives from the Directorate of Fisheries and the Norwegian Petroleum Directorate to undertake a survey of relevant problems and propose improvement actions linked to the acquisition of seismic data with regards to regulations, practice, and coexistence between the fishing and petroleum industries. The working group delivered their report by 1 April 2008.

Later - in August 2008, the General Directors of the Directorate of Fisheries and the Norwegian Petroleum Directorate decided implementing the proposed actions of the report. Most actions were linked to bureaucratic processes except for the part involving scaring effects in fish and marine mammals. It was decided as well to establish a particular steering committee for the further process with representatives from the Norwegian Petroleum Directorate, the Directorate of Fisheries and the Norwegian Pollution Control Authority. The steering committee was given a specific mandate of establishing two technical groups related to the approach of problems of "scaring effects in relation to seismic data acquisition".

One of the technical groups consisting of researchers whom on mission from the steering committee should provide a report explaining the status of knowledge with regards to scaring and harmful effects from seismic sound waves in fish and marine mammals. Additionally they were to define holes of knowledge and belonging needs of research. Based on the present status of knowledge the group was to deliver an evaluation related to geographic distances

between seismic surveying, fishing activities, spawning areas and routes of concentrated spawning migrations.

The other technical group should be an industry group consisting of representatives from fishers' organizations and the petroleum industry. This group shall on basis of the report from the group of researchers, practical knowledge and motivation from the industry side, give their recommendation to the steering committee of geographical minimum distances between seismic investigations and seismic source testing, and fishing activities. The industry group shall as far as possible present a joint recommendation to the steering committee.

Because of limited time in acquiring new literature exceeding what has been known until the last couple of years, we have to some extension based our work on newer summing up reports in displaying a wide overview. We have chosen giving a wider introduction to essential conditions related to sound propagation of seismic energy while this contains central elements in understanding behaviour impacts from seismic sources on fish and sea mammals. From the same arguments we have chosen presenting both a wider and deeper introduction to hearing and sound reception in fish and invertebrates, along with external factors influencing these capabilities compared to other reports within this field. We expect that the extended presentations from these professional areas will make it more easy identifying areas where more research is needed.

We have summed up which effects seismic investigations may have on fish eggs, on fish from larvae to adults, and on sea mammals. Based on this and in relation to documented and desired knowledge we have presented some essential holes of knowledge where we want more knowledge. From this foundation we describe important research needs to be covered.

The principals: the Norwegian Petroleum Directorate, the Directorate of Fisheries and the Norwegian Pollution Control Authority, asked for a rather wide professional composition of the group of researchers. All input from the petroleum industry, the fishers' organizations, and from affected management and research institutions pointed out that the Institute of Marine Research got to be a central partner in carrying out the task. This should not limit the representation from other relevant institutions. The group of researchers consisted of the following eight persons who all have contributed to the report:

John Dalen, Svein Løkkeborg, and Anne Berit Skiftesvik, Institute of Marine Research, Petter Helgevold Kvadsheim, Forsvarets forskningsinstitutt (Norwegian Defence Research Establishment), Jens Martin Hovem, SINTEF, Hans Erik Karlsen, University of Oslo, Rolf Mjelde, University of Bergen, and Audun Pedersen, Christian Michelsen Research. The members of the group selected John Dalen as the leader and coordinator of the task.

During the kick-off meeting 6 November 2008 the group was handed over the mandate for the task from the steering committee expressing three subtasks and the deadline to be 19 December 2008. From the group's understanding of the task the mandate was proposed reduced to some extent for the sea mammal side while it should be extended for the fish side.

During the last part of the meeting the group identified areas and problems to be worked on and the subtasks were distributed to the group members.

The work was performed so that each group member wrote their text and sent it over to the other members for comments and supplements. This loop could be repeated several times. The group had a meeting during 12 December 2008 going through executed work while proposing reductions and supplements with regards to the framework of the report.

The report was delivered to the steering committee during a meeting at 19 December 2008*. During the meeting the steering committee proposed a few minor changes, which are worked into the report.

* The report is planned to be published at the Norwegian Petroleum Directorate, Stavanger. Formal inquiries to this were not met until the report was delivered 19 December 2008. Therefore the report will be published at a later time. Until the formal arrangement of making reference to the report, it should be referred to as:

Dalen, J., Hovem, J.M., Karlsen, H.E., Kvalsheim, P.H., Løkkeborg, S., Mjelde, R., Pedersen, A. and Skiftesvik, A.B. 2007. Status of knowledge and needs of research with regards to scaring and harmful effects from seismic sound waves in fish and sea mammals. (Kunnskapsstatus og forskningsbehov med hensyn til skremmeeffekter og skadevirkninger av seismiske lydbølger på fisk og sjøpattedyr). (English summary and figure legends). Report to the Norwegian Petroleum Directorate, the Directorate of Fisheries and the Norwegian Pollution Control Authority, from a specially established group of researchers. Bergen, 19 December 2008. 69 p.

1 INNLEDNING

1.1 Mandat for forskergruppens¹ arbeid

Avklaring av forhold mellom den offisielle mandatversjonen og forskergruppens oppfatning av mandatet for det videre arbeidet.

Den offisielle versjonen:

- 1 Redegjøre for kunnskapsstatus mht. skremmeeffekt og andre skadevirkninger av seismiske lydbølger på fisk og marine pattedyr.
- 2 Definere kunnskapshull og eventuelle forskningsbehov.
- 3 På bakgrunn av dagens kunnskapsstatus skal forskningsgruppen avgi en vurdering til styringsgruppen omkring geografisk avstand mellom seismiske undersøkelser og fiskeriaktivitet. Vurderingen skal også ta hensyn til andre forhold av betydning.

Forskergruppens kommentarer:

- 1 Fagområdet ”- - skremmeeffekt og andre skadevirkninger av seismiske lydbølger på marine pattedyr.” er forsknings- og kunnskapsmessig heller omfattende. Idet norsk rådgivning og forvaltning ikke i samme omfang omfatter sjøpattedyr som fisk, vil vi avgrense vår redegjørelse innen dette området.
- 2 Ingen uavklarte forhold.
- 3 Utsagnet ”- - avgi en vurdering til styringsgruppen omkring geografisk avstand mellom seismiske undersøkelser og fiskeriaktivitet.” er for snevert i forhold til dagens reelle rådgivnings- og forvaltningspraksis. Vi mener dette skal omfatte ”- - avgi en vurdering til styringsgruppen omkring geografisk avstand mellom seismiske undersøkelser og fiskeriaktivitet, gyttefelt og konsentrerte gytevandingsveier.” Dette vil også vedgå mandatet til næringsgruppen.

1.2 Kort om utført forskning og kunnskapsgrunnlaget

Fra forskere og fiskerinæringen har det vært hevdet at dagens seismiske undersøkelser kan medføre negative effekter på marine organismer, selv om omfanget av dette er langt mindre enn ved tidlige brukte letemetoder der sprengstoff ble brukt som lydkilde (Coker and Hollis, 1950; Hubbs and Rechnitzer, 1952; Jakosky and Jakosky, 1956; Lovlia *et al.*, 1966; Lavergne, 1970; Falk and Lawrence, 1973; Chelminski, 1974). De negative effektene som blir trukket fram er særlig at fisken blir skremt og trekker seg bort fra opprinnelige oppholds- og fiskeriområder med reduserte fangster som resultat, men det blir også hevdet at indre organer kan påføres skader. I tillegg er det stilt spørsmål ved hvorvidt lyd fra luftkanoner kan ha negative virkninger på marine pattedyr.

¹ Vi vil oppfatte oss som en forskergruppe og ikke en forskningsgruppe, jf. e-post fra Fiskeridirektoratet v/ G. Langedal, ”Seismikk - sammensetning av faggrupper for forskning og næring”, Fdir.saksnr. 08/13914, 20.10.08.

Forskning som belyser effekter på fisk fra lydenergi er ikke like omfattende som tilsvarende på sjøpattedyr, og resultatene er gjerne mer variable (McCauley *et al.*, 2000; Anon., 2004; Hastings and Popper, 2005; Anon., 2006). Det er kjent at hørselssansen til fisk varierer betydelig mellom arter og systematiske grupper, og man kan derfor ikke umiddelbart overføre resultatene for en fiskeart fra et spesielt forsøk med sine forsøksbetingelser til en annen fiskeart (Popper *et al.*, 2004). Likevel hevder fiskefysiologer at fisk med samme hørselsfysiologi og hørsel og som er på samme trofiske nivå, ofte foretar lignende responser på lignende type lydstimuli. De siterte studiene av torsk, hyse og uerarter skulle i en slik sammenheng være representative for et bredt spekter av andre fiskearter. Det er også viktig å påpeke at prinsippene for lydoppfattelse hos fisk er ulikt det en finner hos sjøpattedyr. Dette har vesentlig betydning når en skal forstå og vurdere lydpåvirkning på fisk og sjøpattedyr.

Vi legger til grunn at framlagte vurderinger, fakta og konklusjoner i foreliggende rapport skal kunne forstås uten å ha andre dokumenter tilgjengelige og at rapporten sannsynlig vil ha et bredt interesseområde både inne fiskeri, industri, forvaltning og forskning. Som underlag for rapporten har forskergruppa lagt til grunn det kunnskapstilfanget som finns i aktuelle deler av kjent litteratur. Det har vært begrenset tid til å hente inn ny litteratur utover hva som allerede har vært kjent inntil de siste par årene, f.eks. hva som ble brukt i Anon. (2006) og Dalen *et al.* (2007). Formålet med DNV-rapporten (Dalen *et al.*, 2007) var: ”å lage en sammenstilling av oppdaterte resultater fra vitenskapelige publikasjoner og tekniske fagrapporter som omhandler påvirkning av seismikkskyting på marine organismer.” I forhold til tidsrammen for vårt oppdrag og pkt. 1 i mandatet for foreliggende rapport og som er ganske sammenfallende med nevnte formål, tilrådte forskergruppen på oppstartmøtet, 6. november d.å., at vi i betydelig grad skulle bygge på DNV-rapporten der formål og mandat var overlappende.²

Det har vært og det er framleis ganske ulike oppfatninger omkring horisontal og nær-horisontal utbredelse av seismisk energi fra luftkanonfelt. For å få et bedre fundament for faglige diskusjoner og forståelse av hvordan den seismiske lyden forplanter seg under ulike oseanografiske og topografiske forhold, har vi foretatt en forholdsvis fyldig gjennomgang av dette temaet.

Likeledes er det fundamentalt når vi skal vurdere og forstå atferdspåvirkning på fisk, at vi har en basisk og korrekt forståelse av hørsel og lydoppfatning hos fisk og hvilke ytre forhold som kan påvirke dette. For å oppfylle dette har vi valgt å gi en tilpasset, men fyldig presentasjon av dette emnet.

Når vi skal vurdere skremmepåvirkning og -effekter på fisk og sjøpattedyr under gitte forhold, må dette først og fremst baseres på resultater fra relevant høykvalitets forskning. Hvis slike resultater ikke foreligger, burde vi hatt tilgjengelig dataassisterte simuleringmodeller for

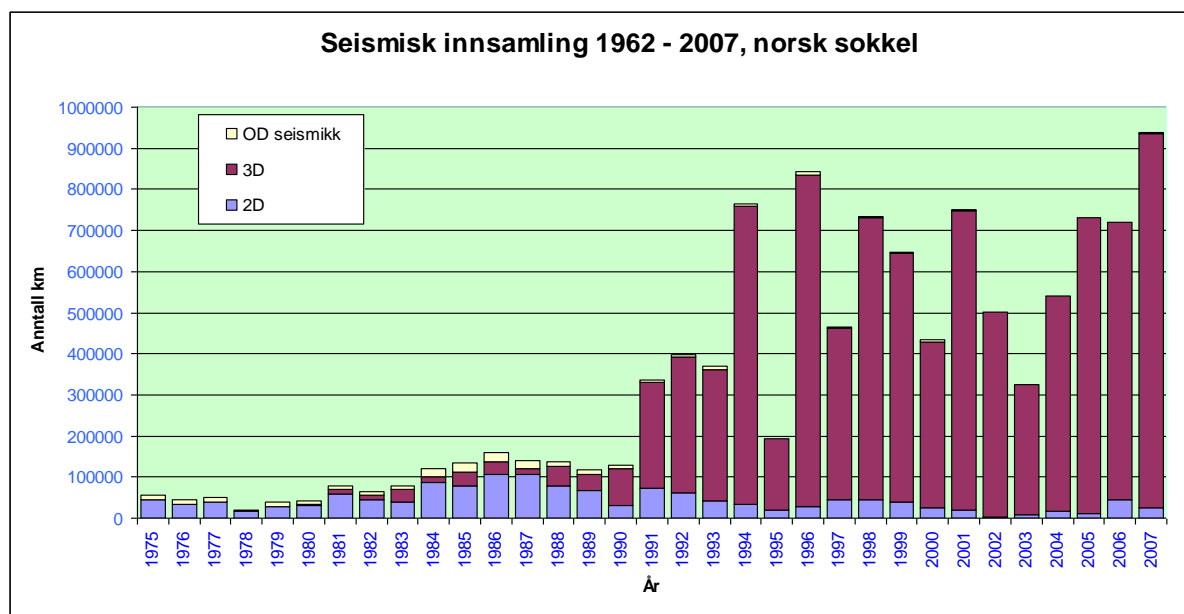
² Denne noe ”utvidete” bruk av rapporten, Dalen *et al.* (2007), er klarert med forfatterne og med Det Norske Veritas AS v/ Steinar Nesse.

lydutbredelse sammen med kunnskaper om hørsel og atferdspåvirkninger hos fisk. Pr. i dag er ikke slike verktøy tilgjengelige. Dette må legges til grunn når vi skal bearbeide kap. 7 om geografiske avstander mellom seismiske undersøkelser og fiskeriaktivitet, gytefelt og konsentrerte gytevandringsveier.

2 SEISMISKE UNDERSØKELSER OG LYDFORPLANTNING I HAVET

2.1 Innledning

Omfanget av seismiske operasjoner på norsk sokkel har variert fra år til år, men viser i gjennomsnitt en økning fra år til år helt siden begynnelsen av 70-årene med visse unntak i periodene 1974 til 1980 og 1987³ til 1990. I årene 1962 til 1974 ble det til sammen skutt 184 400 linjekilometer seismikk i norsk økonomisk sone (NOS) og alt var 2D-seismikk. Først i 1979 ble den første 3D-undersøkelsen gjennomført. Til sammenligning i 2007 var ca. 97 % av all seismikken 3D-seismikk og i 2008 var den ca. 96 %. Fra 1990 har den årlige innsamlingen gått fra ca. 130 000 linjekilometer til 934 584 linjekilometer i 2007 som vist i fig. 2.1. Det kan nevnes at borestedsundersøkelser ikke er tatt med i fig. 2.1. Disse vil ikke utgjøre det store antall linjekilometer eller stor seismisk ”arealbelastning”, men i 2006-08 har de stått for en stor saksmengde tilknyttet rådgivning og forvaltning ved Oljedirektoratet, Fiskeridirektoratet og Havforskningsinstituttet. I 2007 var det ni aktive seismikkoperatører i norsk økonomisk sone. Dette antallet har variert lite de seneste årene.



Figur 2.1. Totalt antall linjekilometer innsamlet seismikk fra 1975 til 2007 fordelt på 2D-, 3D- og OD-utført seismikk (vesentlig 2D-seismikk) (© Oljedirektoratet). (*Total number of acquired line kilometers of seismic data from 1975 to 2007 distributed on 2-D, 3-D, and NPD (mainly 2D seismics) performed seismics.* (© Norwegian Petroleum Directorate)).

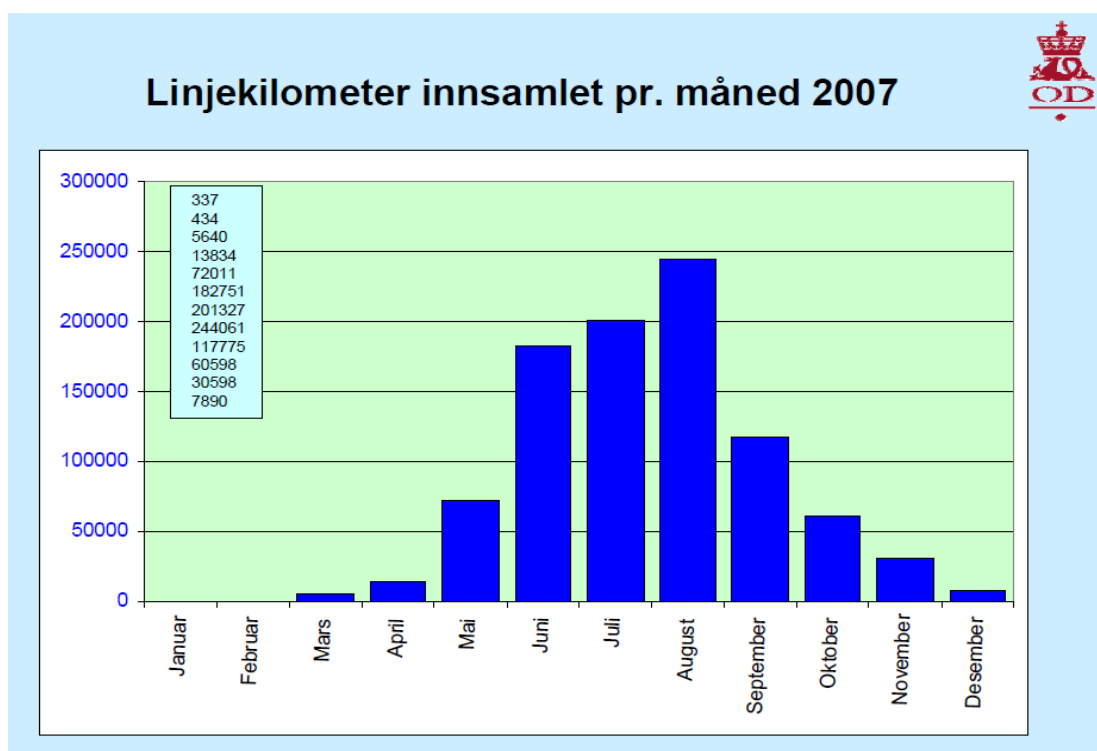
Helt siden oljeletingen startet i Nordsjøen i 60-årene, har det forekommet visse interesse-motsetninger mellom oljeselskaper, seismikkoperatører og fiskere i samtidige aktiviteter på leteområder for olje og gass og på fiskeriområder. I visse situasjoner har det også ført til

³

Etter sterkt oljeprisfall i 1986.

mange brukskonflikter. En slik konflikt var også utgangspunktet for de første forskningsprosjektene Havforskningsinstituttet utførte i 1984-85 for å studere påvirkning og skremmeeffekter fra seismiske aktiviteter på fisk og eventuelle skadeeffekter på egg, larver og yngel (Dalen og Raknes, 1985; Knutsen og Dalen, 1985).

Det er et vesentlig moment når i løpet av året de seismiske undersøkelsene foregår i forhold til de farvann fiskeriene foregår i. Rent prinsipielt ønsker oljeselskapene og seismikkoperatørene å gjennomføre seismiske undersøkelser når værforholdene er akseptable, dvs. for vind frisk bris eller mindre⁴ og signifikant bølgehøyde under 2 m. I fig. 2.2 er vist antall linjekilometer pr. måned for 2007. Lavest var det i januar med 337 linjekilometer til høyest i august med 244 061 linjekilometer. Dette betyr at for vinterfiskeriene i perioden desember-april er den seismiske aktiviteten på det laveste mens det omvendte er tilfelle for sommerfiskeriene.



Figur 2.2. Antall innsamlete linjekilometer seismikk fordelt pr. måned i 2007 (© Oljedirektoratet). (*Number of acquired line kilometers of seismic data distributed per month of 2007 (© Norwegian Petroleum Directorate)*).

Dagens seismiske undersøkelser benytter store spesialbygde skip som sleper luftkanoner og mottakerkabler etter seg. Luftkanonene sender ut trykkluftbaserte sterke lydimpulser (lydbølger) med jevne mellomrom, typisk for hver 25. meter. Lydbølgene reflekteres fra alle overganger mellom de forskjellige geologiske lagene i undergrunnen. De reflekterte signalene registreres av hydrofoner som er grupperte og monterte i spesielle kabler som blir tauet etter skipet. Avstanden mellom hydrofongrupperne kan være 25 m eller kortere. Lengden av kablene og avstanden mellom grupperne av hydrofoner varierer avhengig av formålet med undersøkelsen.

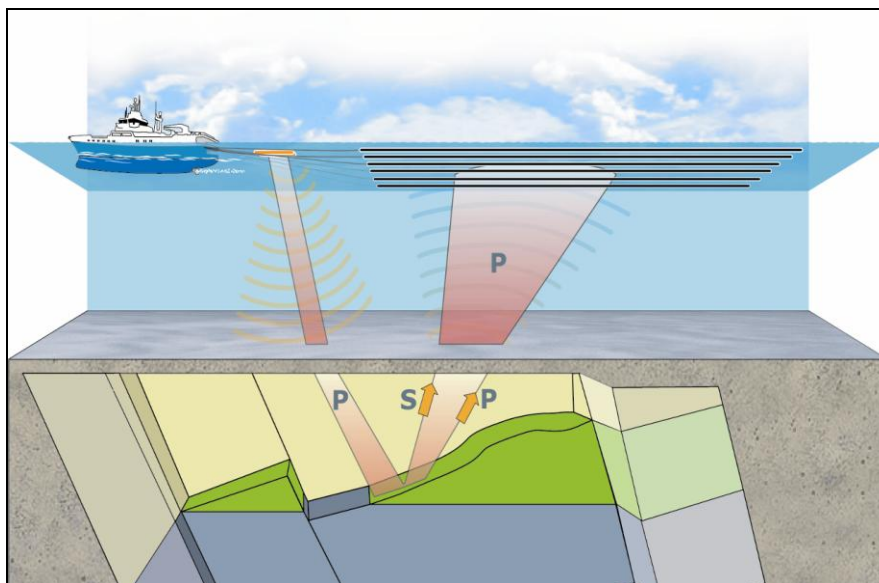
⁴ Frisk bris: Vindstyrke 5 i Beaufort, lik 8,0-10,7 ms⁻¹.

Mottakerkablene kan ha en lengde på fra 3 til 10 km. Ved 3-dimensjonale seismiske undersøkelser benyttes i dag som regel åtte kabler ved siden av hverandre med en innbyrdes avstand på 100 m mens maksimalt antall kabler er kommet opp i 16 med innbyrdes avstand nede i 50 m.⁵ Seismikkfartøyet går normalt med omlag 5 knops fart (ca. 2,5 m/s), langs parallelle linjer.

2.2 Ulike typer undersøkelser

Selv om prinsippene i hovedsak er de samme, eksisterer det flere metoder som benyttes ved seismiske undersøkelser i ulike faser av leting og utvinning av petroleum. De todimensjonale undersøkelsene (2D) benyttes ved store regionale undersøkelser i en tidlig fase før utvinning av ressurser i et område. Fartøyet følger linjer eller et rutenett hvor linjene ligger med relativt lang avstand fra hverandre (1 km eller mer). Det benyttes én lydkilde sammensatt av flere luftkanoner til et luftkanonfelt og én hydrofonkabel. Luftkanonene avfyres normalt hvert 10. sekund som tilsvarer hver 25. meter ved 5 knops fart.

I dag benytter oljeindustrien tredimensjonale undersøkelser (3D) i økende grad fordi disse gir langt mer informasjon om havbunnen og reservoarene, se fig. 2.3. 3D-undersøkelser utføres på de deler av det regionale 2D-undersøkte området oljeselskapene vurderer som spesielt interessante. Ved å benytte flere hydrofonkabler og oftest to lydkilder som avfyres vekselvis ("flip-flop"-operering), dekker undersøkelsene et langt tettere rutenett med rutestørrelse nede i



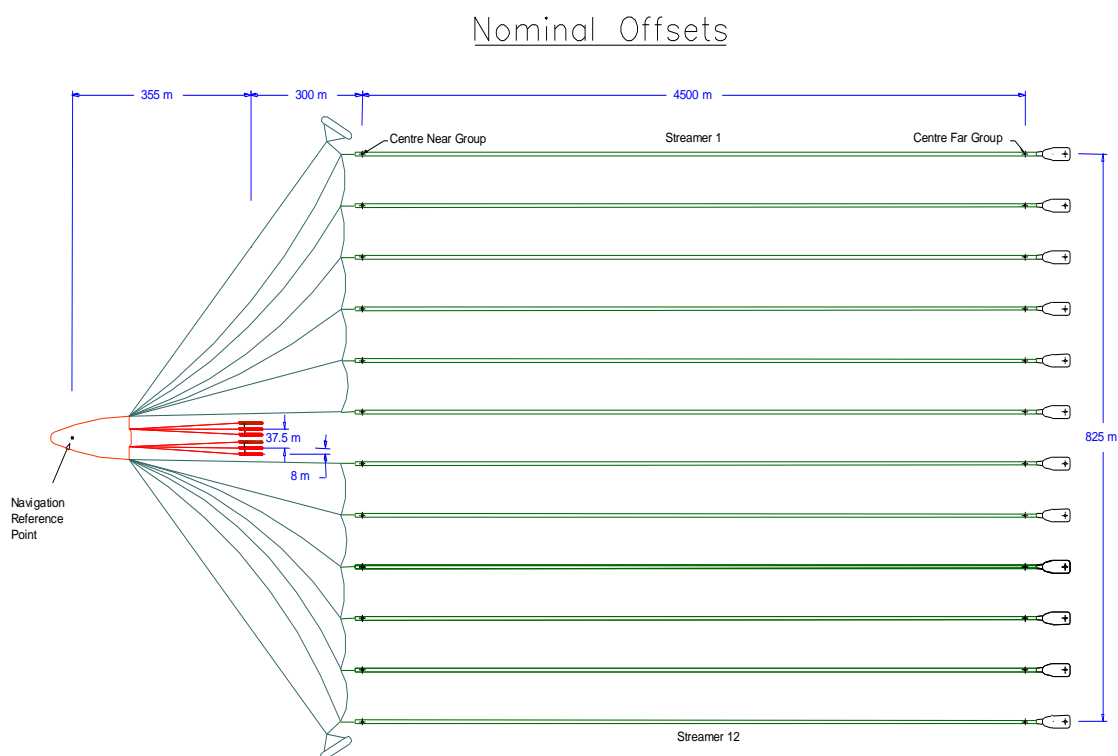
Figur 2.3. Prinsippskisse for 3D-seismikk. Det taues minimum en lydkilde og flere lyttekabler. P: trykkbølger og S: skjærbølger. (© StatoilHydro). (Schematic sketch for 3D seismics. Minimum one sound source and several receiver cables are towed. P: pressure waves and S: shear waves (© StatoilHydro)).

⁵

Opereres av PGS Geophysical AS med fartøy av Ramformklassen.

25 x 25 m. Doble lydkilder og flere kabler fører til at skipet kan kjøre færre linjer for å dekke det samme arealet. Dette fører videre til at mulige forstyrrelser av liv i havet reduseres sammenlignet med tidligere 3D-metoder med færre kabler.

Figur 2.4 viser i fugleperspektiv et seismikkfartøy av Ramformklassen med to luftkanonfelt som avfyres vekselvis og 12 hydrofonkabler. Luftkanonfeltene slepes her 365 m bak fartøyet (fra navigasjonsreferansepunktet) og forkanten av lyttekablene er 665 m bak fartøyet. Lyttekablene her er 4500 m lange, men vi ser også mye brukt kabellengde på 6000 m i 3D-seismikk (ref. PGS Geophysical, CGG Veritas). I 2D-seismikk brukes kabellengder på opp til 10000 m (ref. Fugro Multi Client Services). Med så mye utstyr i sjøen er det lett å forestille seg at snuoperasjonen mellom hver skytekurslinje blir omfattende og tar lang tid.



Figur 2.4. Seismikkfartøy med to utlagte seismiske kilder (to luftkanonfelt) og 12 hydrofonkabler utstyrt for en 3D-undersøkelse (© StatoilHydro). (*Seismic vessel with two seismic sources (two airgun arrays) and 12 hydrophone cables equipped for a 3D investigation (© StatoilHydro)*).

En borestedsundersøkelse (BSU) kan omfatte både en lettseismisk undersøkelse, geoteknisk prøvetaking og topografisk kartlegging av bunnen. Dette utføres i forkant av å plassere en borerigg i ønsket posisjon for boring. Formålene med en BSU er flere:

- HMS⁶-hensyn: Kartlegge eventuell grunne gassforekomster for å hindre utblåsing ved boring. I tillegg til luftkanonutrustning brukes gjerne enkelstråle og multistråle ekkolodd, sidesøkende sonar for topografisk kartlegging av bunnen og kjerneprøvetaker. Informasjonen skal også sikre trygg oppankring.

⁶ HMS: Helse, miljø og sikkerhet.

- Bedre datakvalitet fra bunnen: Bedre geologisk kvalitet av data fra de øvre bunnlagene idet vanlig 3D-seismikk har for dårlig oppløsning.

Den seismiske delen av en BSU kan typisk omfatte et 5x5 km område, kanonene taues på ca. 2-3 m dyp og en bruker gjerne 15-20 timer effektiv skytetid på undersøkelsen. Undersøkelsen krever godt vær, dvs. bølgehøyder mindre enn 1,7 meter. Luftkanonkilden består gjerne av en til fire små luftkanoner med samlet kammervolum fra 0,7 liter (40 k.t.) til 3,4 liter (210 k.t.). Det taues bare én lyttekabel med lengde mellom 600 og 1200 m. Ved flere luftkanoner konfigureres de geometrisk og avfiringen styres slik at en får dannet minimalt med boblepulser og at en vha. skyggepulsen søker maksimal direktivitet.

Sett i forhold til påvirkning på fiskeatferd fra de ulike seismiske undersøkelsene, har lydenergien fra en borestedsundersøkelse betydelig mindre rekkevidde enn fra en 3D-undersøkelse.

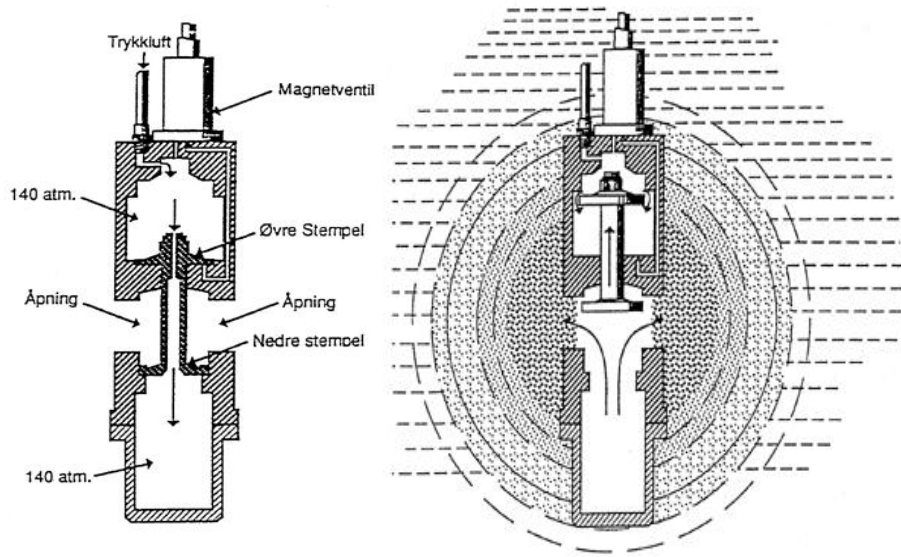
2.3 Generering av seismisk energi med luftkanoner

2.3.1 Lydkilde

Luftkanoner benyttes i overveiende grad i dag som lydkilde, som vist i fig. 2.5. Luft med 13,8 MPa (137,9 bar) trykk (mest vanlig brukt tilførselstrykk) ledes inn i et kammer i hver luftkanon. Konstruksjonsmessig har vi to typer luftkanoner, stempelkanoner (Anon. 1974) og hylsekanoner (Anon. 1989). Når luften raskt frigjøres til vannet gjennom kanonportalene, dannes det en trykkbølge i vannet. Volumet av luftkanoner oppgis i liter ev. i kubikktommer (k.t.) (eng.: "cubic inch" - "cu.in."). Kubikktomme er ikke en godkjent enhet i SI-systemet og bør dermed ikke brukes (Nedwell *et al.*, 1999; Thompson and Taylor, 2008). At vi tar det med som parentesverdier, er for i en viss grad å være imøtekommende ovenfor en konservativ olje- og seismikkindustri. Omregningsfaktorene er 1 kubikktomme = 0,0164 liter og 1 liter = 60,98 kubikktommer. Kammervolum pr. luftkanon ligger mellom 0,4 og 10 liter. Ved å sette sammen flere luftkanoner i rekker som igjen settes sammen til et luftkanonfelt, kan dette ha et samlet kammervolum på opptil ca. 165 liter (10 060 k.t. - lite brukt). De mest brukte kanonfelt i norsk økonomisk sone i dag til 3D-undersøkelser har totale kammervolum mellom 49,2 liter (3 000 k.t.) og 82,0 liter (5 000 k.t.). I 2D-undersøkelser brukes ofte noe større kanonfelt f.eks. opp til 96,1 liter (5 860 k.t.) totalt kammervolum.

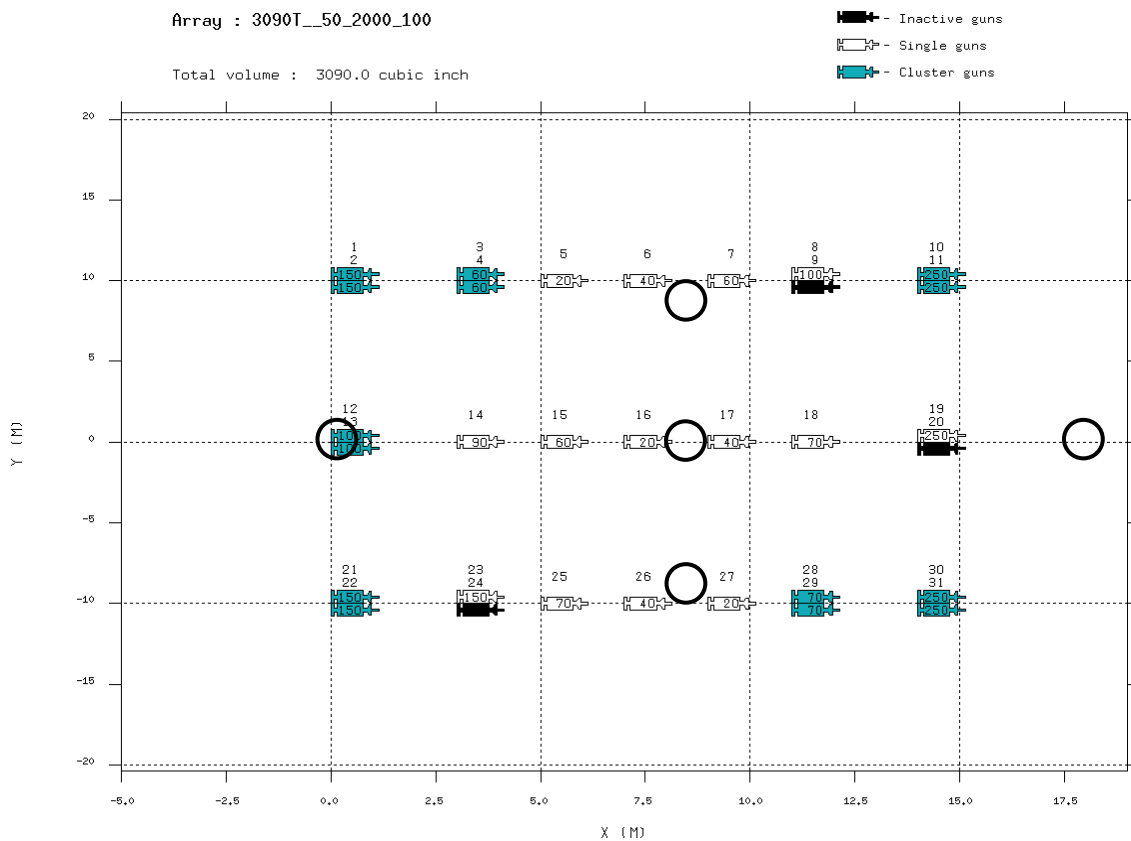
Ved beskrivelse og tolking av resultater av ulike undersøkelser av påvirkning fra seismiske aktivitet på fisk, hadde det vært fordelaktig om det hadde vært utført lydmålinger som del av undersøkelsene. Dette er ofte ikke tilfelle. For å ha et noenlunde entydig mål for generert lydtrykk har vi som oftest oppgitt samlet kammervolum, V_k , av luftkanonen(e) som parameter for utsendt energi idet langt de fleste kanonoppsettene arbeider med et tilførselstrykk på 13,8 MPa (137,9 bar). Dette bygger da også på at det er en presis sammenheng mellom kammer-

volum og generert lydtrykk i fjernfeltet (Nedwell *et al.*, 1999). For en enkel luftkanon er lydtrykket, $p \sim V_k^{0,33}$, og for et luftkanonfelt er $p \sim V_k^{0,385}$ (Malme *et al.*, 1986).



Figur 2.5. Skisse av en stempeltipe Bolt-PAR luftkanon før avfiring (til venstre) og etter avfiring (til høyre). Figur fra <http://www.bolt-technology.com>. (Sketch of a piston Bolt-PAR airgun prior to (left panel) and after (right panel) firing. Figure from <http://www.bolt-technology.com>.)

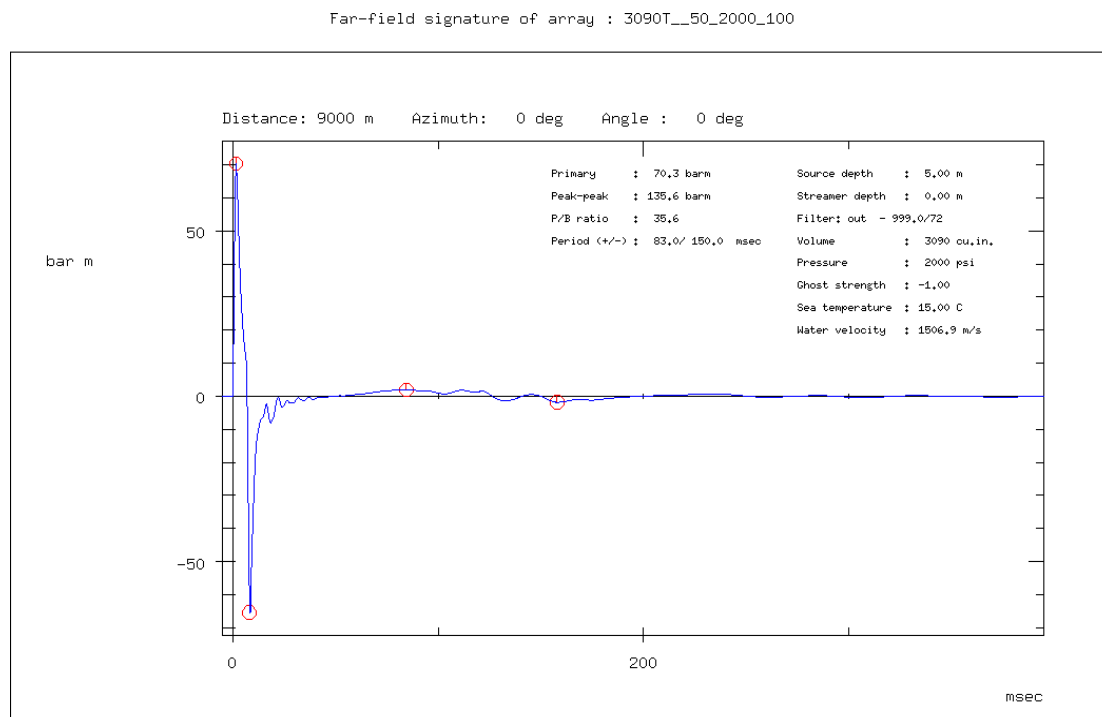
2.3.2 Lydbølger fra luftkanoner



Figur 2.6. Konfigurering av et luftkanonfelt med totalt kammervolum lik 50,7 liter (3 090 k.t.). Positiv y-akse viser til styrbord og negativ x-akse viser forover. Grønt luftkanonsymbol: Kanonklynge (to kanoner), åpent kanonsymbol: Enkel kanon og svart kanonsymbol: Ikke-aktiv kanon. Sirklene markere ulike observasjonspunkt på 60 m dyp brukt i en spesiell modellering av lydfeltet. (© PGS Geophysical). (*Configuration - top view, of an airgun array of total chamber volume 50.7 liters (3 090 cu.in.). Positive y-axis points to starboard and negative x-axis points forward. The circles denote the various points of observation at 60 m depth as used in the modeling (© PGS Geophysical).*)

Trykklufta fra en luftkanon generer først en primærpuls og så boblepulser som oppstår når luftboblen svinger og stiger mot overflaten. Havoverflaten fungerer som en nær perfekt reflektor som reflekterer trykkpulsene med motsatt polaritet. Ankomsttiden til denne såkalte skyggepulsen er en funksjon av dypet av kanonene, og dette velges slik at man oppnår maksimal konstruktiv interferens mellom primærpulsene og skyggepulsen for senterfrekvensene i signalet for vertikalt nedadgående bølger. Horisontalt vil interferensen være destruktiv. Tiden mellom primærpulsene og boblepulsene, bobleperioden, er en funksjon av kammervolumet til luftkanonene. I et såkalt avstemt kanonfelt velges luftkanoner med forskjellig volum. Dette fører til at primærpulsene summeres lineært og gir en tilsvarende stor amplitude, mens boblepulsene summeres destruktivt.

Fig. 2.6 viser geometrien av en typisk luftkanonkilde bestående av 28 aktive luftkanoner i tre

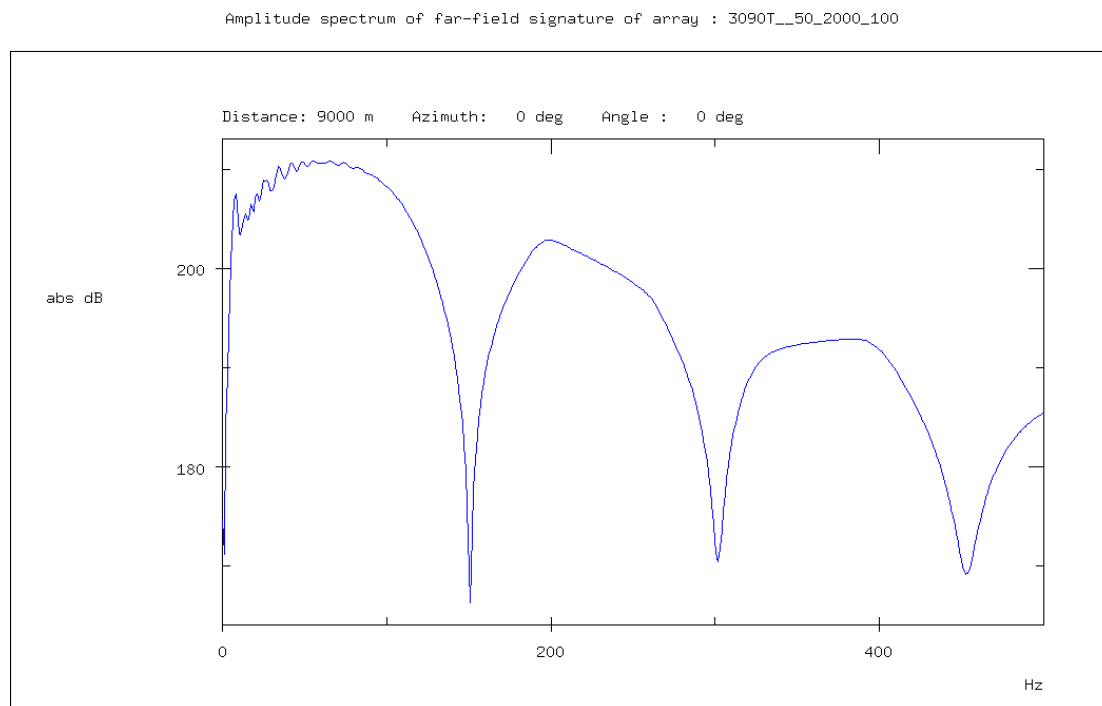


Figur 2.7. Modellert fjernfeltssignatur av lydimpulsen referert til 1 m avstand fra kildesenteret. Fjernfeltsposisjonen er 9000 m vertikalt under kanonfeltet (© PGS Geophysical). (*Modeled farfield pressure signature of the sound pulse referred to 1 m distance from the source centre. The farfield position is 9000 m underneath the array (© PGS Geophysical).*)

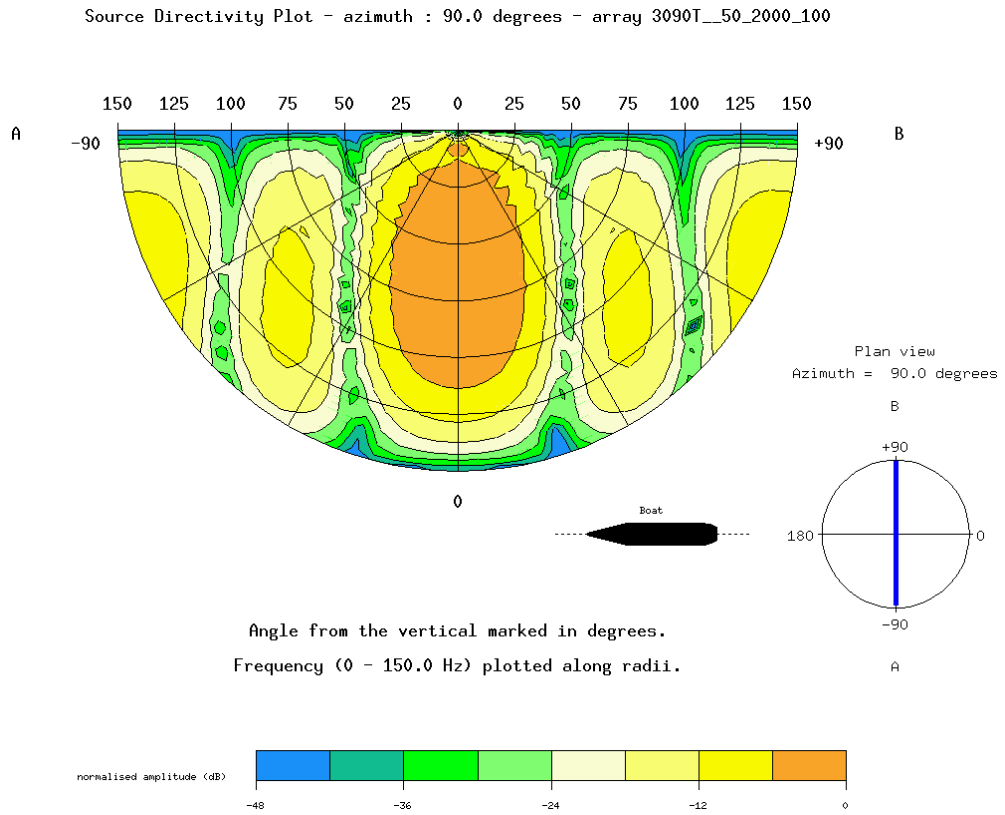
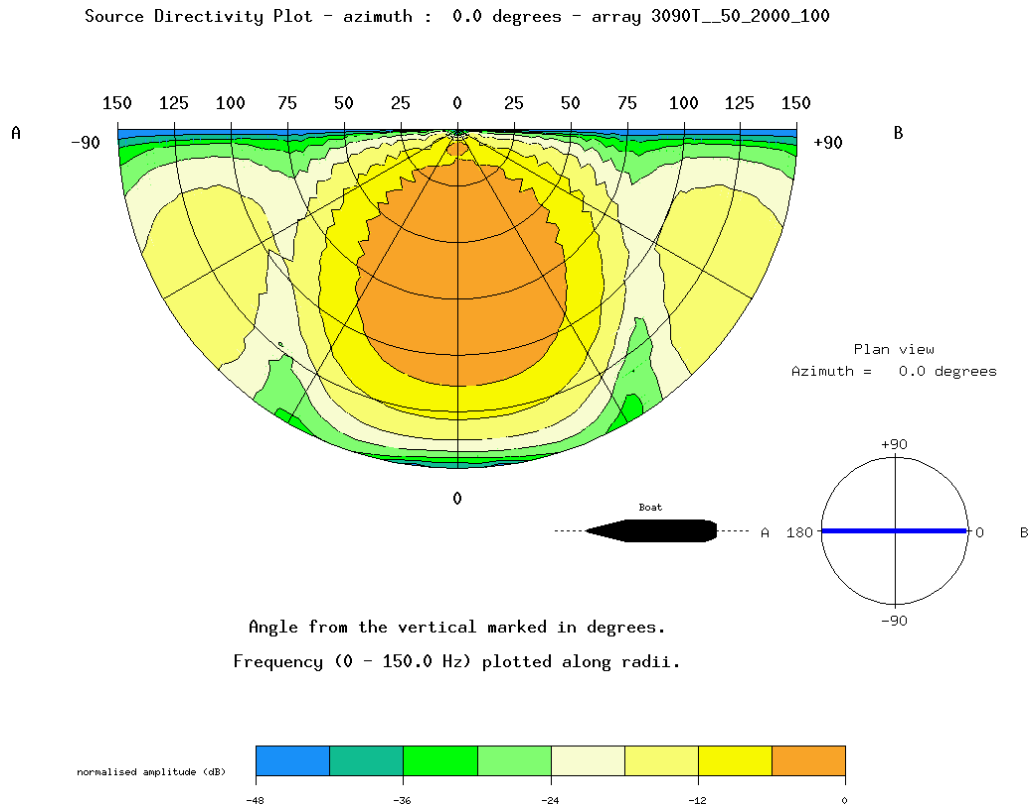
luftkanonrekker. Den har en tverrskipstrekning på 20 m og langskipsutstrekning på 15 m. Kammervolumene av kanonene varierer mellom 0,3 og 4,1 liter. Dette luftkanonfeltet ble brukt av PGS i samarbeid med Havforskningsinstituttet under "Seismikk-tobis"-prosjektet i 2002 (Hassel *et al.*, 2003; 2004). I et historisk perspektiv kan nevnes at under det første prosjektet i 1984 der Havforskningsinstituttet studerte horisontal skremmepåvirkning av fisk i Nordsjøen i samarbeid med Saga Petroleum AS og WesternGeco AS (daværende Geco AS), ble det brukt et såkalt "superbredt luftkanonfelt" (SWAG; "super wide airgun array"). Bredden av kanonfeltet var der 57 m og lengden var 44 m (Dalen and Knutsen, 1987).

I fig. 2.7 vises den tilhørende lydimpulsen fra luftkanonkilden i fig. 2.6. Figuren demonstrerer at bobleimpulsen er så kraftig dempet at vi kan se bort fra den.

Fig. 2.8 viser hvordan trykkimpulsen vist i fig. 2.7 ser ut i frekvensdomenet. Amplituden er størst i området ca. 20-100 Hz. "Hullene" i spekteret, for eksempel ved 150 Hz, skyldes destruktiv interferens mellom primærimpulsen og skyggeimpulsen.



Figur 2.8. Modellert fjernfeltssignatur for lydimpulsens frekvensspektrum. Frekvenser over 1000 Hz er fjernet med et lavpassfilter ved 1000 Hz. Fjernfeltsposisjonen er 9000 m vertikalt under kanonfeltet (© PGS Geophysical).
(Modeled farfield signature of the sound pulse of the frequency spectrum and amplitude spectrum. Frequencies above 1000 Hz are removed by a low pass filter at 1000 Hz. The farfield position is 9000 m vertically underneath the array. (© PGS Geophysical)).



Figur 2.9. Langskips (øvre figur) og tverrskips (nedre figur) direktivitetsplott, basert på modellering fra et 60 m dypt observasjonspunkt (© PGS Geophysical). (*In-line - alongship (upper panel) and crossline - transversal (lower panel) directivity plots, based on modeling from a 60 m deep point of observation (© PGS Geophysical).*)

Når luftkanoner settes sammen med en utstrekning som vist i fig. 2.6, vil kanonfeltet fungere som en akustisk svinger som forsterker det vertikalt nedadgående bølgefeltet i sentrale volum under kanonfeltet. Denne direktiviteten kommer i tillegg til effekten som skyldes skyggepulsen. Fig. 2.9 viser hvordan trykkpulsen dempes for vinkler som avviker fra vertikalen, både langs og på tvers av båtens skyteretning.

Amplituden av det seismiske signalet avtar med kvadratet av avstanden fra kilden ved sfærisk spredning. Andre geometrisk lydspredformer kan forekomme ved ulike lydhastighetsprofiler over dypet. I tillegg vil litt energi forsvinne som varmetap. Denne dempningen er liten i vann for så lave frekvenser som seismisk energi fra luftkanoner har. Det meste av energien som treffer havbunnen vil brytes ned i denne, men en del vil reflekteres tilbake til vannlaget. Styrken på refleksjonen uttrykkes ved refleksjonskoeffisienten, fra 0 til 1 (totalrefleksjon). Refleksjonskoeffisienten i havbunnen (for lydintensitet eller energi) vil typisk være ca. 0,1 for vertikale bølger. Dette innebærer at kun 10 % av den vertikale energien reflekteres ved havbunnen. Kilden vil imidlertid også sende ut lyd i andre retninger og lyd som treffer bunnen med vinkler mindre, det vil si nærmere horisontalplanet, enn den såkalte kritiske vinkelen vil totalreflekteres tilbake til vannet. Dermed vil vannlaget, avgrenset av havoverflaten og bunnen, danne en akustisk bølgeleder der amplituden av det seismiske signalet avtar lineært med avstanden, og ikke med avstanden i kvadrat som i et fritt felt.

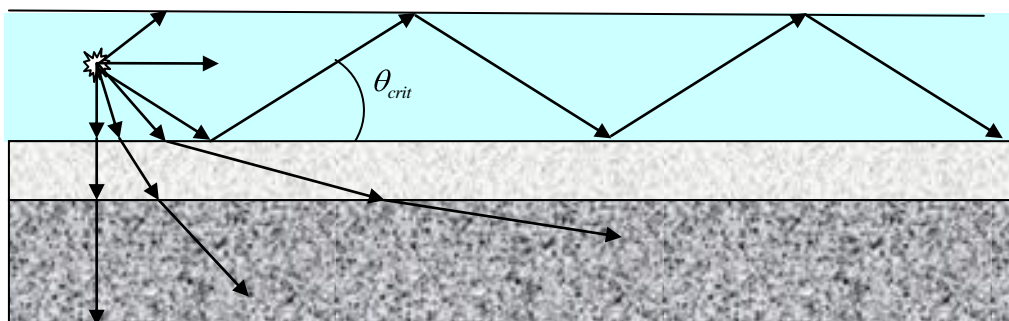
Den kritiske vinkelen er gitt av lydfarten i havbunnen i forhold til lydfarten i vannet. For en løs havbunn er den kritiske vinkelen omkring 20°-30°, for en hardere bunn kan vinklene bli oppimot 60°. Dette betyr at den seismiske støyen gjerne er høyere når havbunnen består av grunnfjell med liten eller ingen sediment overdekning.

2.4 Lydutbredelse av seismiske energi

2.4.1 Innledning

Dette avsnittet omhandler de fysiske prosesser som har innvirkning på utbredelse av akustisk støy fra seismiske kilder i vannlaget. Beregninger av lydutbredelse under forskjellige forhold blir presentert og diskutert, og det vises hvordan de fysiske egenskapene til vannlaget og havbunnen påvirker støyens nivå, frekvens og tidsstruktur. Resultatene som er vist her er i stor utstrekning basert på en akustisk lydforplantningsmodell, PlaneRay, som tar hensyn til lydfartens variasjon i vannlaget, bunntopografien og havbunnens geofysiske egenskaper (Hovem, 2007; 2008; 2009). Foreløpig mangler en tilstrekkelig god beskrivelse eller modell av seismiske kilder og kildegrupper med hensyn på nivå og direktivitet ved høyere frekvenser. Slik informasjon kan bygges inn i lydforplantningsmodellen når den foreligger. Metoden er kvalitetstestet av Smedsrud og Tollefsen (2008) for liknende scenarier som behandles her.

2.4.2 Situasjonsbeskrivelse



Figur 2.10. Grafisk bilde av horisontal lydutbredelse i vannlaget over en lagdelt havbunn. (*Graphic picture of horizontal sound propagation in a water layer over a layered sea bottom.*)

Figur 2.10 viser er enkel prinsippskisse av hvordan lyd forplanter seg i et havområde. En akustisk kilde sender ut lyd i alle retninger som vist med piler i figuren. Noe av lyden går mer eller mindre rett ned, men en betydelig del av lydenergien sprer seg også i andre retninger nærmere horisontalplanet. Lyd reflekteres i havbunnen og i de dypere lagene med amplitude gitt av refleksjonskoeffisienten for grenseflaten mellom vannet og den lagdelte bunnen. For lyd som treffer bunnen med tilnærmet loddrett innfall er refleksjonskoeffisienten liten, og mye av lyden går ned i bunnen. Lyd som treffer bunnen med en vinkel som er mindre enn den kritiske vinkelen (θ_{crit} i figuren) vil derimot totalreflekteres tilbake til vannet. Den kritiske vinkelen er gitt ved c_0 og c_1 som er lydfarten i henholdsvis vannet og i havbunnen. For en lagdelt havbunn gir hvert lag en egen kritisk vinkel. Vannlaget, som er avgrenset av havoverflaten og bunnen, danner en akustisk bølgeleder der lydenergien forplanter seg med mye mindre demping enn lydfeltet fra en kilde i fritt rom. Bølgelederens transmisjonsegenskaper er gitt av havbunnens geologi og hvordan lydfarten varierer med dybde og posisjon.

Lydkilden som brukes i seismikk består gjerne av flere luftkanoner satt sammen i rekker og linjer med mellomrom i størrelsesorden 2–10 meter. Hensikten med denne konstruksjonen er å fokusere lydenergien ned i bunnen, og å redusere de såkalte boblepulsene slik at det seismiske signalet blir veldefinert og skarpt. For de lave frekvensene brukt i seismiske undersøkelser virker dette bra, men akustisk energi som luftkanonene genererer ved høyere frekvenser kan forplante seg i andre retninger også til vannlaget. Seismikkindustrien har arbeidet mye med konstruksjon, modellering og målinger på luftkanoner og kilderekker. Det meste av dette arbeidet gjelder for lave seismiske frekvenser rundt 150 Hz som i behandlet i Hovem (2008), og det kan stilles spørsmål ved om slike målinger er gyldige for høyere frekvenser.

2.4.3 Lydabsorpsjon i vannet og geometriske tap

Intensiteten i et lydsignal avtar med avstanden fra kilden. For lyden som forplanter seg i et vannlag, kan dette transmisjonstapet deles i tre – absorpsjonstap, geometriske tap og

refleksjonstap ved havoverflate og bunn. I det følgende diskuteres disse faktorene hver for seg.

Lydabsorpsjon i havet skyldes viskositet og relaksasjonsfenomener som gjør at noe av lydenergien konverteres til varme og at lyden dermed svekkes. Absorpsjonen er avhengig av vannets temperatur og saltholdighet og lydsignalets frekvens. For seismiske frekvenser, for eksempel under 1000 Hz, spiller absorpsjonen i vannet svært liten rolle, men for høyere frekvenser og for lydutbredelse over lange avstander bør absorpsjonstapet tas med i beregningene.

Som antydnet i fig. 2.10 vil en del av lydenergien treffe bunnen med en vinkel mindre (nærmere horisontalplanet) enn den kritiske vinkelen. For slike vinkler er det totalrefleksjon, slik at lyden reflekteres tilbake til vannet og ikke trenger inn i bunnen.

For lydutbredelse og transmisjonstap betyr dette at nærmest kilden spres lydsignalet sfærisk, hvor lydtrykket avtar med kvadratet av avstanden fra kilden. På lengre avstander, det vil si avstander med lydbaner som treffer bunnen med vinkel mindre enn kritisk vinkel, er det sylindrisk spredning og lydtrykket avtar lineært med avstanden fra kilden. En enkel modell for transmisjonstapet TL kan derfor settes sammen av et sfærisk spredningstap på $20\log(r)$ nærmest lydkilden og et sylindrisk spredningstap på $10\log(r)$ for lengre avstander. Modellen kan uttrykkes ved likningen:

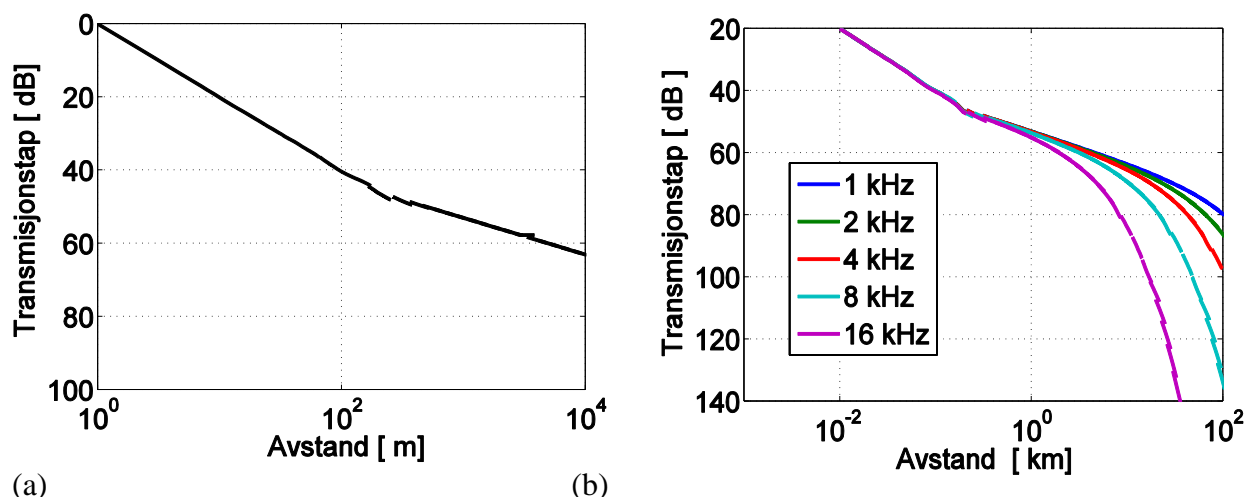
$$\begin{aligned} TL &= 20\log(r), \quad r \leq r_0, \\ TL &= 20\log(r/r_0) + 20\log(r_0), \quad r > r_0, \end{aligned} \quad (1)$$

Horisontalavstanden fra kilde til mottaker er r , og r_0 er avstanden til overgangsområdet mellom sfærisk og sylindrisk lydutbredelse. Det er rimelig å sette r_0 lik 3–4 ganger vann-
dybden.

Fig. 2.11 (a) viser transmisjonstapet beregnet etter likning (1) for 200 m vanddybde og r_0 lik vanddybden. Fig. 2.11 (b) viser transmisjonstapet for noen valgte frekvenser og som funksjon av avstanden mellom sender og mottaker når en har tatt med både absorpsjonstapet og det geometriske tapet (likning (1)).

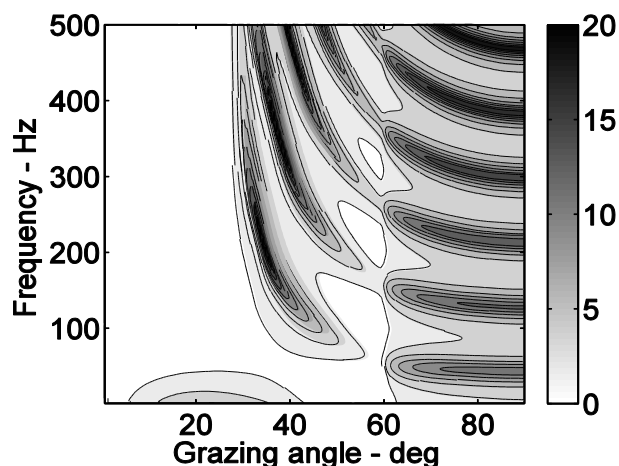
2.4.4 Refleksjonstap i havbunnen

Refleksjonskoeffisienten i havbunnen med sine underliggende lag har meget stor betydning for lydutbredelsen i vannlaget. Når bunnen er homogen, det vil si ikke lagdelt, er refleksjonstapet det samme for alle frekvenser, men med lagdeling i undergrunnen er refleksjonstapet frekvensavhengig.



Figur 2.11. Transmisjonstap som funksjon av avstanden. (a) Beregnet etter likning **Feil! Fant ikke referanseskilden.** med $r_0=200$ m. (b) Med både geometriske tap og absorpsjonstap. (*Transmission loss versus distance. (a) Estimated from eq. (1) with $r_0=200$ m. (b) With both geometric loss and absorption loss.*)

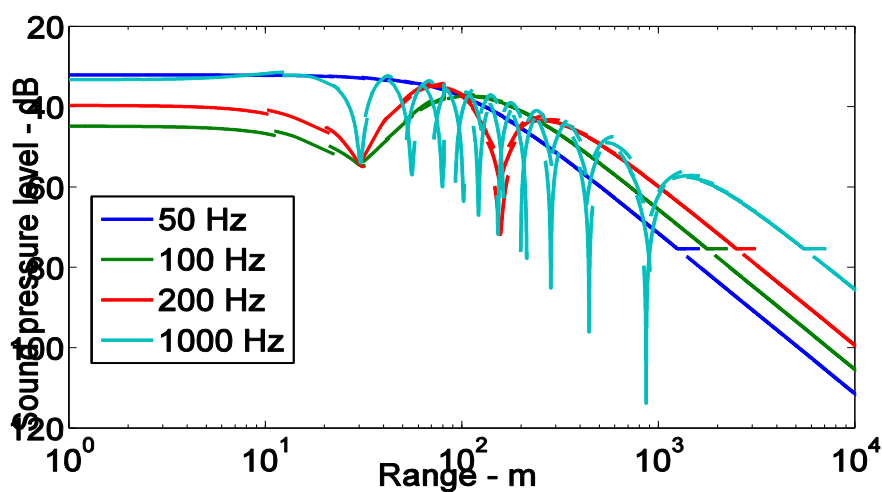
Eksemplet nedenfor tar for seg en lagdelt havbunn med et 10 m tykt sedimentlag over en hard bergart med uendelig utstrekning i dybde. Sedimentlaget har en lydshastighet på 1700 ms^{-1} og tetthet på 1500 kgm^{-3} . Berget har lydshastighet 3000 ms^{-1} , skjærbølgehastighet 750 ms^{-1} og tetthet 2500 kgm^{-3} . Fig. 2.12 viser at lagdelingen i bunnen gjør refleksjonstapet frekvens-avhengig. Ved høye frekvenser er tapet gitt av egenskapene til det øvre sedimentlaget, og er svært lavt for vinkler under den første kritiske vinkelen på 28° . For lave frekvenser, når sedimentlagets tykkelse er mye mindre enn den akustiske bølgelengden, har sedimentlaget ingen eller liten betydning, og refleksjonstapet er lite for frekvenser under den andre kritiske vinkelen (60° i dette eksempelet). I harde bunntyper vil det oppstå skjærbølger i tillegg til trykkbølger, slik at en del av lydenergien konverteres til skjærbølgeenergi. Refleksjonstapet som opptrer ved lave streifvinkler ved frekvenser under 50 Hz skyldes denne skjærbølgekonverteringen.



Figur 2.12. Refleksjonstap (dB - langs høyre ordinataakse) for en lagdelt havbunn som funksjon av frekvens og av streifvinkelen med horisontalplanet av den innfallede lydølgen. (*Reflection loss (dB - along the ordinate axis to the right) for a layered sea bottom as function of frequency and grazing angle with respect to the horizontal plane for the incoming sound wave.*)

2.4.5 Refleksjon fra overflaten; "Lloyd mirror"-effekten

Seismiske luftkanoner blir gjerne avfyrt nær havoverflaten slik at det reflekterte signalet fra overflaten ankommer like etter det direkte signalet fra kilden. Det reflekterte signalet har motsatt polaritet i forhold til det direkte signalet. Fig. 2.13 viser transmisjonstapet for en kilde på 8 m dyp. Det direkte og reflekterte signalet vil for noen avstander adderes konstruktivt og for andre avstander negativt. Transmisjonstapet vil derfor variere med avstand og frekvens som vist i fig. 2.13. For lange horisontale avstander interfererer de to signalene destruktivt og fører til at transmisjonstapet øker med $40\log(r)$ avhengig av de oseanografiske forholdene. I undervannsakustikken kalles dette for "Lloyd mirror"-effekten.

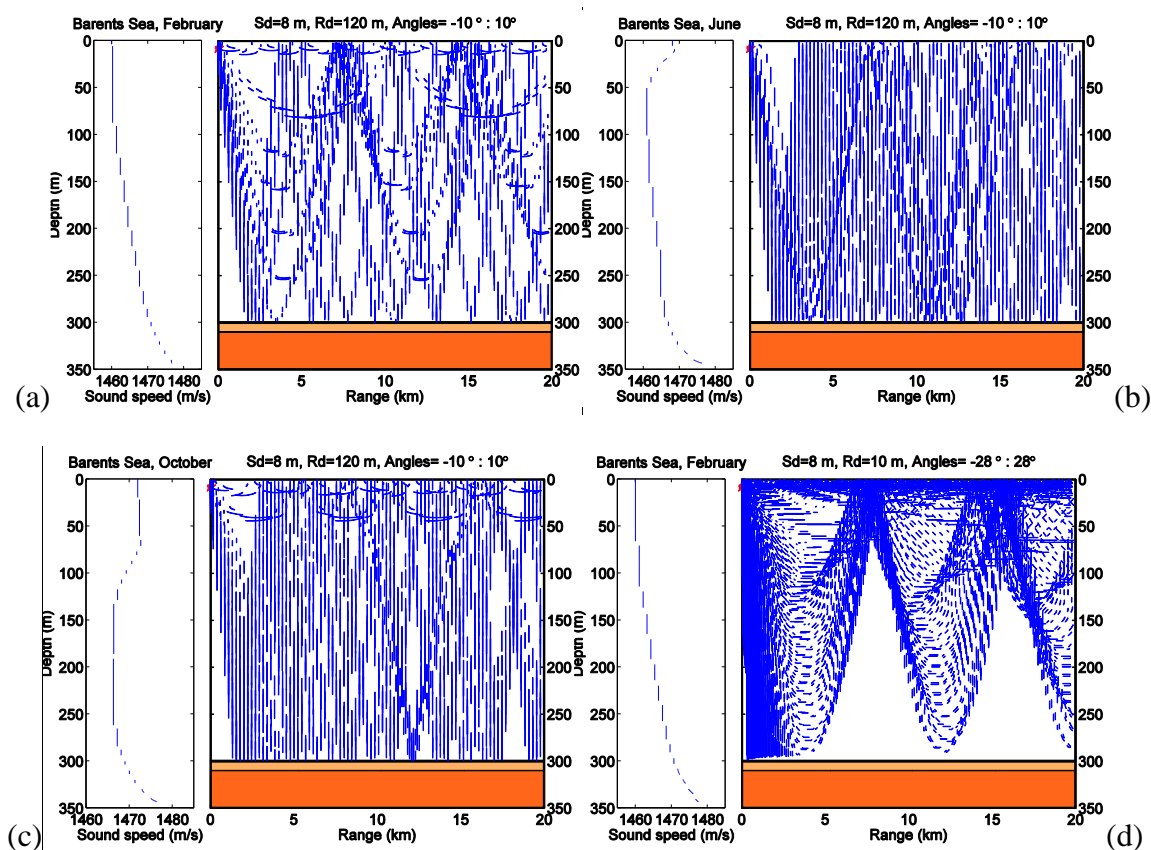


Figur 2.13. Refleksjonstap som følge av speilende refleksjon i havoverflaten; "Lloyd mirror"-effekten.
(Reflection loss due to the mirror reflection from the sea surface: The "Lloyd mirror" effect.)

2.4.6 Oseanografiske forhold og lyd hastighetsprofilens betydning

Lyd farten i sjøvann avhenger av vannets temperatur, saltholdighet og det omgivende trykket, gitt av dybden. Temperaturen og saltholdigheten varierer med de oseanografiske forholdene og lyd farten vil kunne variere betydelig over tid. For et gitt geografisk område er det likevel mulig å trekke ut typiske tilfeller for de forskjellige årstidene. Fig. 2.14 viser eksempler på lydbaner beregnet med lyd hastighetsprofiler målt i Barentshavet i månedene februar, juni og oktober. Disse profilene er typiske for havområdene fra Norskehavet og nordover for henholdsvis vinter, sommer og høst.

Fig. 2.14 (a), (b) og (c) viser lydbaner fra en kilde i dybde 8 m, og med utgangsvinkler fra -10° til $+10^\circ$. Profilen for februar måned er en typisk vinterprofil og har økende lyd hastighet fra overflate til bunn. Dette gir markant lyd kanaleffekt nær havoverflaten der lyden bærer svært langt. En mer detaljert lydbaneberegning er vist i fig. 2.14 (d).



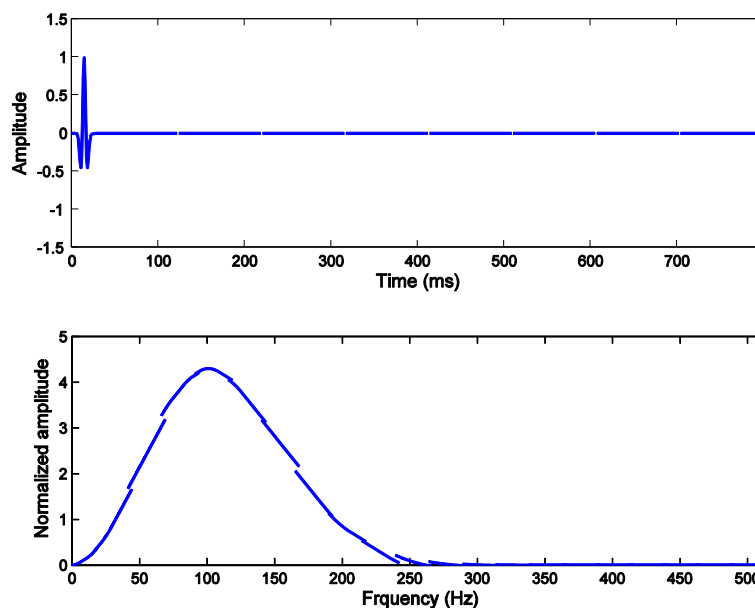
Figur 2.14. Lydfartprofiler (ms^{-1}) som funksjon av dyp i venstre figurdeler i a-c med tilhørende lydbaner i høyre deler av figurdelerne a-c. Representerer forskjellige årstider i Barentshavet beregnet for utgangsvinkler fra -10° til 10° og kildedyp på 8 m. (Sound speed profiles (ms^{-1}) versus depth in the left parts of panels a-c and belonging sound rays in the right parts of panels a-c. Represent different seasons in the Barents Sea as estimated for angles of departure from -10° to 10° and source depth 8 m).

2.4.7 Modellering av tids- og frekvensforløp

De foregående avsnitt har presentert de ulike faktorene som påvirker transmisjonsforholdene hver for seg. Dette avsnittet viser eksempler på akustisk modelleringer hvor alle de nevnte faktorene er tatt med. Modelleringene er gjort med programpakken PlaneRay og viser noen av de mulighetene som moderne akustiske modeller har for å predikere utbredelse av akustiske felter.

De følgende eksempler presenterer både transmisjonstap som funksjon av avstand og frekvens og tidsresponsen mottatt på forskjellige avstander fra kilden. Ved beregning av tidsresponsene har en antatt en rundstrålende kilde med dyp 8 m, som sender ut en kort ”Ricker”-puls på 100 Hz. Fig. 2.15 viser tidsforløp og frekvensspekteret til kildepulsen brukt i simuleringene.

Fig. 2.16 (a) viser et eksempel på beregnet transmisjonstap mellom en lydkilde på 8 meters dyp og en mottaker med dybde 80 m som funksjon av avstanden for noen utvalgte frekvenser. I beregningene er det antatt en lagdelt havbunn med et 10 m tykt sedimentlag over en homogen bergart. Parametrene for sedimentlaget er $c_{p1}=1700 \text{ ms}^{-1}$, $\rho_1=1500 \text{ kgm}^{-3}$ og



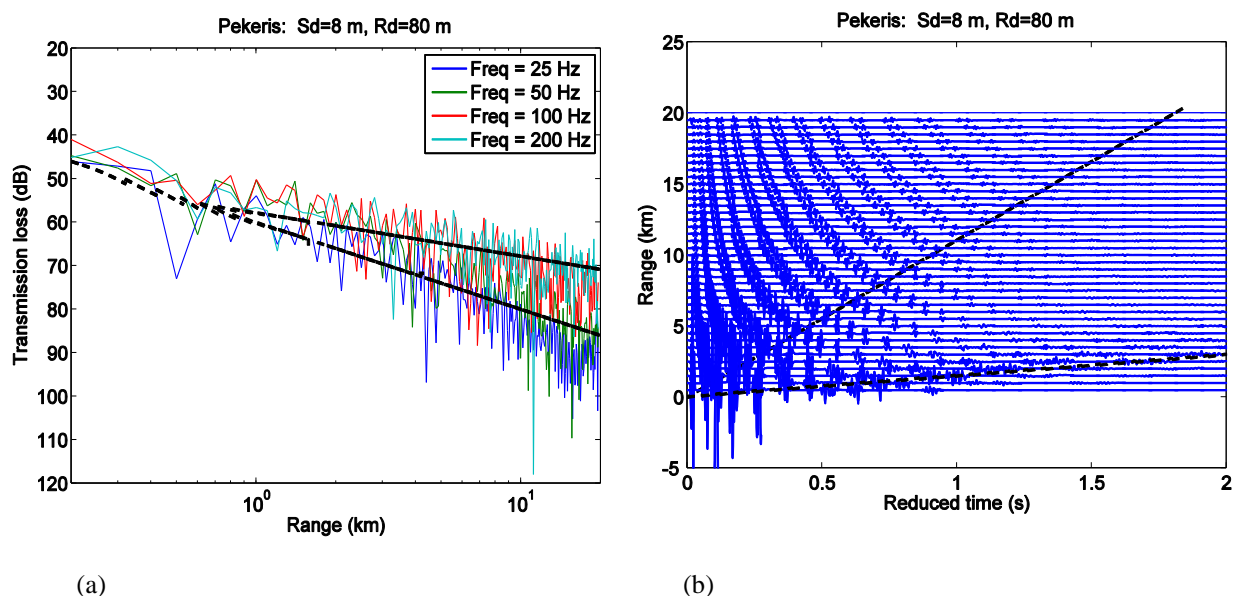
Figur 2.15. ”Ricker”-puls, tidsforløp og frekvensspektrum. (”Ricker” pulse, time signature and frequency spectrum).

undergrunnen har $c_{p2}=3000 \text{ ms}^{-1}$, $c_{s2}=750 \text{ ms}^{-1}$ og $\rho_2=2500 \text{ kgm}^{-3}$. Absorpsjonen er satt til 0,25 dB pr. meter for skjærbølger og 0,5 dB per bølgelengde for de to trykkbølgene i bunnen. Disse verdiene gir det samme refleksjonstapet som er vist i fig. 2.12. De to kritiske vinklene har verdiene 28° og 60° . De to sorte og stiplede linjene viser henholdsvis sfærisk transmisjonstap og transmisjonstapet beregnet med likning (1). For de høyere frekvensene passer transmisjonstapet godt med likning (1), men for lave frekvenser, for eksempel 25 Hz, er transmisjonstapet mye høyere på grunn av ”Lloyd mirror”-effekten.

Figur 2.16 (b) viser lydsignalene mottatt ved en dybde av 80 m, på avstander opptil 20 km. Signalene er plottet som funksjon av redusert tid, det betyr at tiden fram til den første direktelyden er trukket fra. Dette er eksempel på flerveis transmisjon, det vil si at lyd mottas via mange forskjellige baner mellom kilde og mottaker. Figuren viser at antallet av bunn- og overflaterreflekterte signaler øker med avstanden. Den stiplede svarte linjen viser likningen for den kritiske vinkelen. Alle kombinasjoner av tid og avstand over denne linjen svarer til lydbaner som treffer bunnen med vinkler under den kritiske vinkelen. Signaler som går langs disse lydbanene totalreflekteres derfor, og gir et lydfelt som avtar proporsjonelt med avstanden. Punkter under den stiplede linjen svarer til vinkler over den kritiske vinkelen, og lydsignalene som vises her vil derfor reduseres kraftig ved hver bunnrefleksjon. Den direkte lyden fra kilden faller med kvadratet av avstanden. Dette betyr at på lange avstander vil lyden som utbres via refleksjoner mellom bunn og overflate dominere over den direkte lyden fra kilden. Vi ser også at det mottatte signalet ikke bare består av en enkelt puls, men av et helt pulstog. Varigheten av pulstoget kalles etterklangstiden er gitt av den kritiske vinkelen ved:

$$T_{\text{etterklang}} = \frac{r}{c_0} \left(\frac{1}{\cos \theta_{\text{crit}}} - 1 \right). \quad (3)$$

r er avstanden fra lydkilden, og c_0 er nominell eller gjennomsnittlig lydshastighet i vannet. En annen karakter er at etterklngen er spredende (dispersiv) slik at de ulike frekvensene har forskjellige bølgehastigheter. En fisk vil derfor oppfatte etterklngen som en frekvensmodulert tone eller som "uling". Lydpåvirkningen fra hver luftkanonavfyring vil derfor være mye lengre enn bare den korte lydimpulsen. Hvorvidt dette har betydning for skremmeeffekt og atferd ser ikke ut til å være behandlet i litteraturen på området.

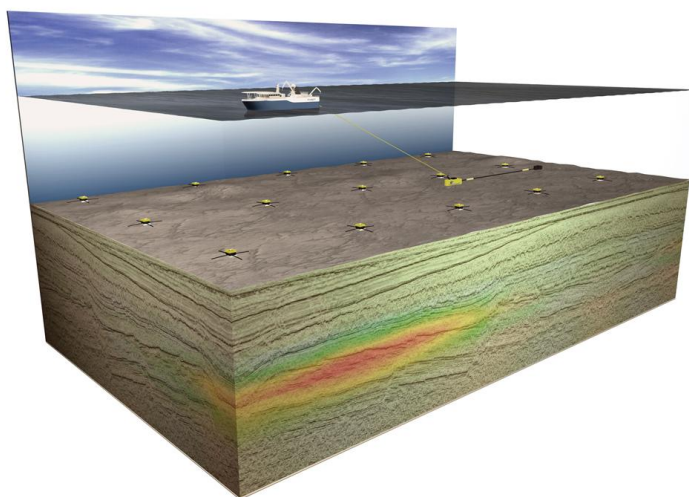


Figur 2.16. Lydutbredelse over en lagdelt havbunn med et 10 m tykt sedimentlag over en konsolidert bergart fra en lydkilde på 8 m dyp. (a) Transmisjonstap (dB) som funksjon av avstanden beregnet for frekvensene 25, 50, 100 og 200 Hz. Stiplet linje viser transmisjonstapet gitt ved likning (1) med $r_0 = 600$ m (øverst) og for sfærisk spredning $[20 \log(r)]$ (nederst). (b) Mottatte signaler som funksjon av redusert tid for avstander inntil 20 km. Stiplet linje viser begrensningene i avstand gitt av de kritiske vinklne. (*Sound propagation over a layered bottom having a 10 m thick sediment layer over consolidated rocks from a sound source at 8 m depth. (a) Transmission loss (dB) versus distance as estimated for the frequencies; 25, 50, 100, and 200 Hz. Broken lines show the transmission loss as estimated from eq. (1) with $r_0 = 600$ m (upper line) and for spherical spreading $[20 \log(r)]$ (lower line). (b) Received signals versus reduced time within 20 km. Broken line shows the limitations in range as determined by the critical angles).*

2.5 Nye undersøkelsesmetoder

Elektromagnetiske undersøkelser er en forholdsvis ny metode som benyttes ved innsamling av geofysiske data for vurdering av olje- og gassforekomster. Selve datainnsamlingen foregår etter at en rekke mottakere er plassert langs linjer på havbunnen med avstander på mellom 500 og 3000 m. Den lavfrekvente elektromagnetiske kilden kan opereres på to ulike måter (to metoder). I den ene metoden taues kilde over mottakerne med ca. 2 knop som vist i fig. 2.17, mens med den andre metoden henger kilden som en lang kabel under fartøyet ned til bunnen. Vanlig utsendt strømstyrke ligger mellom 1250 A og 2500 A. Mottakerne registrerer signaler som har forplantet seg flere kilometer ned i undergrunnen og som blir spredt tilbake.

Alle geologiske medier har elektrisk ledningsevne. Forskjellen i elektrisk ledningsevne mellom skifer, sandstein og kalkstein, som er de vanligste bergartene i sedimentbassenger, er relativt liten. Når sandsteinen eller kalksteinen er fylt med olje, avtar den elektriske ledningsevnen radikalt. Frekvensene som benyttes er mindre enn 1 Hz (0,05 til 10,0 Hz) for å oppnå tilstrekkelig inntrengningsdybde i berggrunnen.



Figur 2.17. Prinsippskisse for en type elektromagnetiske undersøkelser. Fartøyet sleper en lavfrekvent elektromagnetisk kilde ca. 30 m over bunnen. Tilbakespredte signaler fanges opp av mottakere plassert på havbunnen (© StatoilHydro/© EMGS). (*Schematic sketch of a certain type of electromagnetic investigations. The vessel tows a low frequency electromagnetic source ca. 30 m above the bottom. The backscattered signals are picked up by the receivers placed on the bottom (© StatoilHydro/© EMGS).*)

Metoden krever et havdyp på minst 100 m og det har vært utført undersøkelser ned til 3300 m dybde. Reservoaret må heller ikke ligge for dypt, helst ikke dypere enn 3000 m under havbunnen. En operativ fordel ved metoden er at det er mulig å samle inn data innenfor et bredt værvindu.

Det foreligger foreløpig ikke undersøkelser av biologiske effekter av denne typen undersøkelser. Det er imidlertid verdt å merke seg at brusfisk (haier og rokker) er ekstremt følsomme for elektriske felt, og spesielt pigghå kan være en økonomisk viktig art i aktuelle områder. Mulig virkning av svake elektriske og magnetiske felt på marine organismer er tidligere blitt vurdert i en rapport som ble utarbeidet av Statkraft i forbindelse med planlagte, undersjøiske kraftkabler mellom Norge og kontinentet (Poleo *et al.*, 2005).

3 HØRSEL HOS FISK OG NOEN MARINE VIRVELLØSE DYR

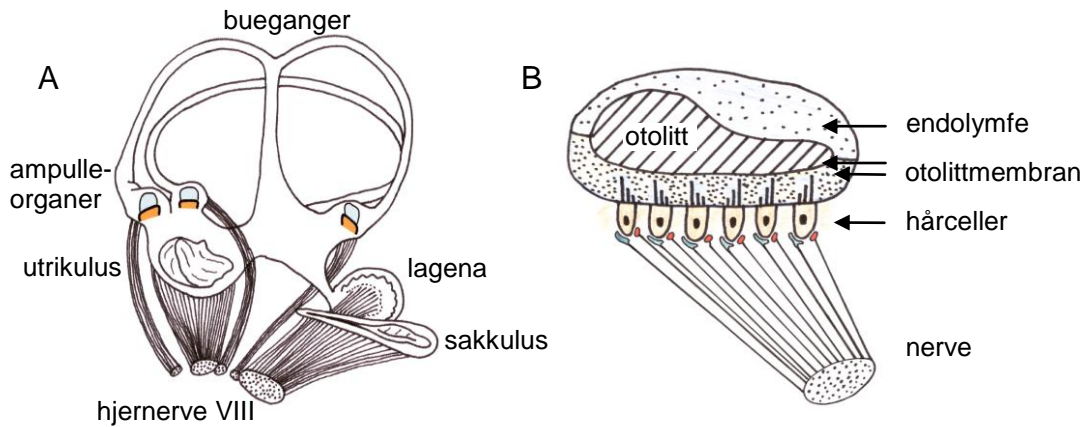
3.1 Lyd som hørselsstimulus for fisk

Lyd i vann omfatter både svingninger av vannmolekyler (lydbevegelse) og trykkvariasjoner (lydtrykk). All fisk er via sine otolittorganer direkte følsomme for den akselerasjon av vannmolekyler som lyden omfatter (lydakselerasjon). Hos en del fisk med en gassfylt svømmeblære, vil otolittorganene i det indre øret i tillegg kunne stimuleres indirekte av lydtrykk. Forholdet mellom lydakselerasjon og lydtrykk er konstant langt fra en lydkilde (lydens fjernfelt). Nærmere en lydkilde enn ca. 1/6 av bølgelengden - i lydets nærfelt, øker imidlertid forholdet sterkt med minkende avstand.

Lydtrykk knyttet til fiskehørsel måles normalt som midlere lydtrykkamplitude; rms-verdi (rms; eng.: "root mean square"), der betegnelsen rms står for midlere amplitude over en definert tid. Lydtryknivå beregnes ut fra målt lydtrykk og angis etter en decibelskala, der antall decibel (dB) er definert som 20 ganger logaritmen av forholdet mellom målt lydtrykk i mikro-Pascal (μPa) og et referansetrykk på 1 mikro-Pascal ($1 \mu\text{Pa} = 10^{-6} \text{ Newtonm}^{-2}$). Et lydtryknivå på 20 dB rel. 1 μPa betyr således at lydtrykket er 10 μPa . Partikkelakselerasjon angis også som midlere amplitudeverdi (rms-verdi) over tid med enheten ms^{-2} . Lydakselerasjon angis også vanligvis som midlere amplitudeverdi over en definert tid (rms-verdi) og i enheten ms^{-2} .

3.2 Fiskens øre

Fisk har to velutviklede indre ører beliggende på hver sin side av bakhjernen. Hvert øreorgan omfatter tre bueganger og tre otolittorganer; utrikulus, sakkulus og lagenasom vist i fig. 3.1. Buegangene med tilhørende ampulleorganer er sanseorganer for deteksjon av rotasjonsbevegelser, mens otolittorganene aktiveres av lineære akselerasjoner og fungerer som både likevektsorganer og hørselsorganer hos fisk (Sand and Karlsen, 2000). Hvert otolittorgan er en blærestruktur som inneholder vevsvæske (endolymfe) og en fast øresten (otolitt) av krystallinsk kalsiumkarbonat (Popper and Fay, 1997). Otolitten er delvis omgitt av og fast forankret til en tynn, gelatinøs otolittmembran som ligger an mot en avgrenset flate av sensoriske hårceller. Hårcellene har på toppen en bunt stive sansehår som stikker opp i små hull i otolittmembranen. Mellom otolittmembranen og hårcelleepitelet er det en tynn film av endolymfe som bidrar til at otolitt og otolittmembran kan bevege seg relativt til hårcelleepitelet. Slike bevegelser fører til at sansehårsbuntene bikker stivt til siden, og derved til at hårcellene aktiveres.



Figur 3.1. (A) Skisse av det indre øret til fisk med tre bueganger og tre otolittorganer: utrikulus, sakkulus og lagena. Illustrasjonen er av øret til en karpefisk. (B) Skjematisk snitt gjennom et otolittorgan. ((A) *Sketch of the inner ear with three semicircular canals and the three otolith organs; the utricle, the saccule, and the lagena. The illustration is from the ear of a carp fish.* (B) *Schematic cut through an otolith organ.*)

3.3 Deteksjon av lydakselerasjon og lydtrykk

En fisk består i all hovedsak av vann, og har dermed samme akustiske impedans som vann. Det betyr at i et lydfelt i vann vil en fisk beveges med samme amplitude, retning og frekvens som de omgiende vannmolekyler. Otolitten vil imidlertid, på grunn av sin betydelig større tetthet (ca. $2,8 \text{ gcm}^{-3}$), få en redusert og faseforsinket bevegelse i forhold til fiskens øvrige bløtvev, herunder de sensoriske hårcellene. Den relative bevegelse mellom otolitt og de sensoriske hårceller, dvs. stimuleringen av det indre øret, er proporsjonal med akselerasjonen av fisken i et lydfelt, og fiskeøret er på denne måten følsomt for lydakselerasjon (Sand and Karlsen, 1986; Karlsen, 1992b).

Variasjoner i lydtrykk vil føre til parallelle forandringer i volumet til av fiskens gassfylte svømmeblære, og slike volumendringer kan forplante seg til fiskens otolittorganer og stimulere disse. En fisk med svømmeblære kan på denne måten indirekte oppfatte lydtrykk, og følsomheten for lydtrykk vil avhenge av hvor effektivt volumendringer i svømmeblæren, eller andre typer gassfylte struktur i fisken, overføres til det indre øret.

Karpe-, malle- og sildefisk har utviklet helt spesielle tilpasninger for lydtrykkfølsomhet, og utgjør det man kaller hørselsspesialister. Hos karpe- og mallefisk er deler av de fremre ryggvirvler omdannet til å utgjøre en 3-4 leddet knokkelkjede (Weberske knokler) som effektivt overfører bevegelser av svømmeblærens overflate til sakkulusorganene i det indre øret. Hos sildefisk går det to tynne kanaler fra svømmeblæren som hver ender i en liten, gassfylt blære (bulla) beliggende tett ved utrikulusorganet i det indre øret. Ytre trykkvariasjoner fører til volumendringer av gassen i de to bullaene og derved til stimulering av det indre øret (Allen *et al.*, 1976; Denton and Blaxter, 1976; Blaxter *et al.*, 1981).

Torskefisk er følsomme for lydtrykk, men denne er betydelig mindre utviklet enn hos hørselsspesialistene. Svømmeblæren av torskefiskene har små, gassfylte utløpere (horn/cornua) i retning det indre øret, men det er ukjent om disse strukturene er involvert i trykkfølsomheten. Det kan også være at overføring av lydenergi fra svømmeblæren til det indre øret skjer direkte via fiskens bløtvev, via ryggspylen eller via andre hittil ukjente mekanismer.

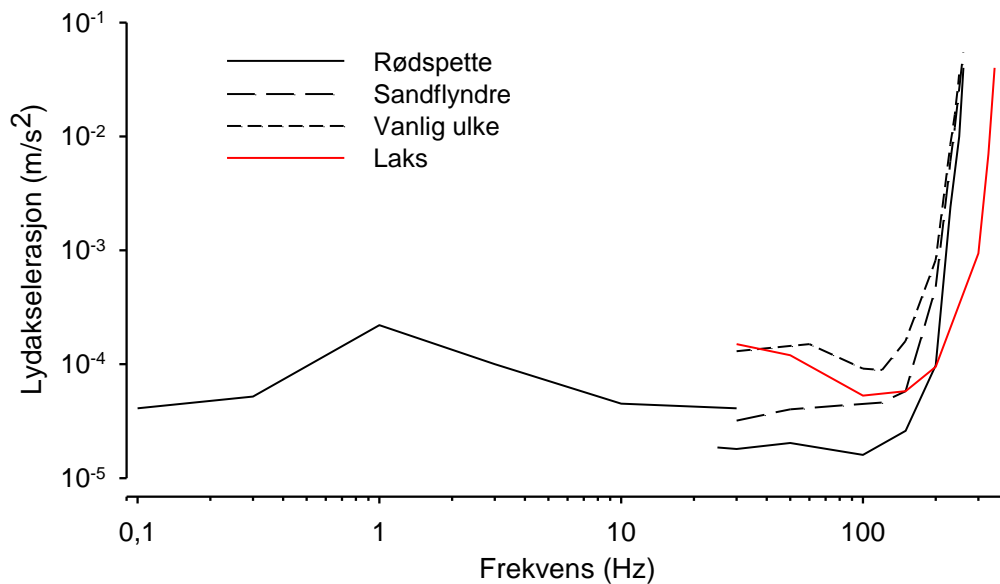
En del fisk har en velutviklet svømmeblære, men er likevel ikke eller kun helt marginalt følsomme for lydtrykk (Hawkins and Johnstone, 1978; Yan *et al.*, 2000). Dette gjelder i våre farvann grupper som laksefisk, leppefisk, stiklingfisk, kutlingfisk, ålefisk mfl. Hos flere grupper fisk er imidlertid hørselssansen fortsatt for mangelfullt undersøkt til å kunne si noe sikkert om lydtrykksfølsomheten.

3.4 Fiskenes audiogram

Den maksimale følsomheten hos fisk for lyd er funnet gjennom atferdstudier med bruk av klassisk negativ betinging. I praksis presenteres fisken for en lydstimulus som umiddelbart følges av en svak elektrisk puls rettet mot fiskens haleregion. Fisken vil raskt assosiere lyden med den elektriske pulsen, og vise en mild fryktrespons i form av en kortvarig, redusert hjerteaktivitet straks den detekterer lyden. Ved å studere fiskens hjerteaktivitet og variere lydets frekvens og nivå, kan man kartlegge fiskens følsomhet for ulike lydfrekvenser (audiogram). Hørselssansen til fisk kan også studeres ved ulike typer elektrofysiologiske metoder. Disse er mindre følsomme enn atferdsstudier, slik at det er viktig å være klar over hvordan et audiogram er målt når dette og terskelverdier vurderes.

Fisk uten svømmeblære og fisk med en svømmeblære som bidrar neglisjerbart til hørselssansen, er kun følsomme for lydakselerasjon. De har audiogram som viser en skarp øvre frekvensgrense for hørsel på 2-300 Hz og en tilnærmet konstant følsomhet på ca: $5 \cdot 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$ for frekvenser $< \text{ca. } 100 \text{ Hz}$, som vist i fig. 3.2. Dette gjelder fiskegrupper som flyndrer (*Pleuronectidae*), tunger (*Soleidae*), var (*Scophthalmidae*), ulker (*Cottidae*), steinbit (*Anarchichadidae*), makrell (*Scombridae*), horngjel (*Belonidae*), sil (*Ammodytidae*), laksefisk (*Salmonidae*), uer (*Sebastes* spp.), ål (*Anguillidae*) mfl. Rødspette (*Pleuronectes platessa*) er følsom for lyd langt inn i infralydområdet ($< 20 \text{ Hz}$), og det er grunn til å anta det samme gjelder svært mange arter fisk (Karlsen, 1992; Sand and Karlsen, 2000). Artene er følsomme for lydakselerasjon, og mot lave frekvenser er følsomheten ca. $5 \cdot 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$. Det hørbare frekvensområde strekker seg trolig betydelig inn i infralydområdet ($< 20 \text{ Hz}$).

En svømmeblære vil kunne bedre hørselsevnen hos fisk for høye frekvenser. Forklaringen er at i en fisk fungerer den gassfylte svømmeblæren som et sterkt dempet svingesystem, der bevegelsene av svømmeblærens overflate er proporsjonal med lydtrykket, og samtidig tilnærmet frekvensuavhengig under resonansfrekvensen til svømmeblærens (Sand and Hawkins, 1973). For et gitt lydtrykk i lydets fjernfelt vil imidlertid bevegelsesamplituden til



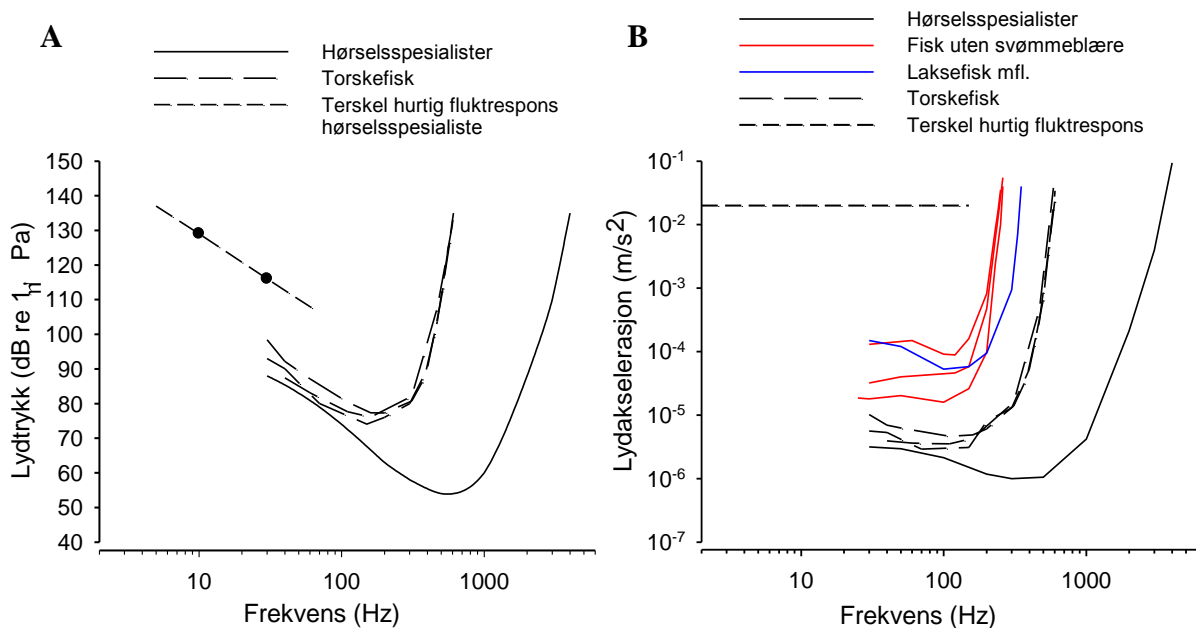
Figur 3.2. Typiske audiogram for fisk uten svømmeblære; rødspette (*Pleuronectes platessa*), sandflyndre (*Limanda limanda*) og vanlig ulke (*Myoxocephalus scorpius*), og for fisk med svømmeblære som i liten grad påvirker hørselssansen (laks - *Salmo salar*). Data fra Chapman and Sand (1974); Hawkins and Johnstone (1978); Pettersen (1980) og Karlsen (1992). (Typical audiogram of fish without swim bladder; plaice (*Pleuronectes platessa*), dab (*Limanda limanda*), and shorthorn sculpin (*Myoxocephalus scorpius*), and for fish with swim bladder which to a small extent affects the hearing system (salmon - *Salmo salar*). Data from Chapman and Sand (1974); Hawkins and Johnstone (1978); Pettersen (1980), and Karlsen (1992)).

vannmolekylene og en fisk avta med økende frekvens, og over en gitt frekvensgrense være mindre enn volumpulseringene av svømmeblæren. Dersom lydtrykkinduserte bevegelser av svømmeblæren effektivt overføres til det indre øret, vil således svømmeblæren kunne bedre fiskens hørselsevne mot høye frekvenser.

Torskefisk som torsk (*Gadus morhua*), hyse (*Melanogrammus aeglefinus*) og lyr (*Pollachius pollachius*) har tilnærmet identisk hørselsevne og oppfatter lyd i frekvensområdet 0,1-450 Hz (Chapman, 1973; Chapman and Hawkins, 1973; Sand and Karlsen, 1986). For lydintensiteter nær terskelverdi er torskefisk følsom for lydtrykk i frekvensområdet 50-450 Hz (Chapman and Hawkins, 1973; Sand and Hawkins, 1973; Sand and Enger, 1973), og for lydakselerasjon for frekvenser < 50 Hz (Chapman and Hawkins, 1973; Sand and Karlsen, 1986). Audiogram for torsk, lyr og hyse er vist i fig. 3.2. For lydintensiteter over terskelverdi vil torskefisk i et betydelig frekvensområde (antydningvis 20-150 Hz) kunne detektere både lydakselerasjon og lydtrykk. For enkeltfrekvenser (f.eks. 112,5 Hz) er det vist at torsk kan detektere forskjeller i intensitet og fase på den direkte stimulering av det indre øre som følge av lydakselerasjon og den indirekte stimulering av det indre øret via svømmeblæren og lydtrykket, samt anvende denne informasjonen til å avgjøre retning til lydkilder i fjern- og nærfeltet og avstand til lydkilder i nærfeltområde (Schuijf, 1975; Buwalda *et al.*, 1983; Schuijf and Hawkins, 1983). Lydtrykkterskler hos torsk, hyse og lyr i frekvensområdet 60-300 Hz ligger i

området 80-90 dB rel. 1 μPa . Omregnet for en fjernfeltsituasjon tilsvarer dette en lydakselerasjon på $2,5\text{-}6,3\cdot 10^{-6}\text{ ms}^{-2}$ i området 60-150 Hz og $1,3\cdot 10^{-5}\text{ ms}^{-2}$ ved 300 Hz.

Karpe-, malle- og sildefisk har en øvre frekvensgrense for hørsel på 1-8 kHz (se Popper *et al.*, 2003). Det optimale frekvensområdet er 0,6-2 kHz avhengig av art. Hørselsspesialister er følsomme for lydtrykk også mot lave frekvenser, og lydinduserte fluktresponser utløses av lydtrykk hos både karpe- og sildefisk av infralyd ned til 5 Hz (Karlsen *et al.*, under bearbeidelse). For hørselsspesialister vil lydtrykk være relevant stimulusparameter i hele det hørbare frekvensområdet. Et representativt audiogram for hørselsspesialister er vist i fig. 3.3.



Figur 3.3. (A) Audiogram som trykksignatur for torsk (torsk, lyr og hyse) sammenlignet med et typisk audiogram for en hørselsspesialist (gullfisk - *Carassius carassius*). Den stiplede linjen angir terskelverdier for å utløse hurtige fluktresponser hos karpefisk (mørt - *Rutilus rutilus* og sebrafisk - *Danio rerio*) og sildefisk (brisling - *Sprattus sprattus*). (B) Audiogram der høretersklene er angitt som lydakselerasjon. Den stiplede linjen ved $2\cdot 10^{-2}\text{ ms}^{-2}$ angir terskelverdier for å utløse hurtige fluktresponser hos fisk kun følsomme for lydakselerasjon. Data fra Chapman, 1973; Chapman and Hawkins (1973); Blaxter *et al.* (1981), Popper *et al.* (2003) og Karlsen *et al.*, (under bearbeidelse). ((A) Audiogram as pressure signature of gadoids (cod, pollack, and haddock) compared to a typical audiogram of a hearing specialist (gold fish - *Carassius carassius*). The broken line indicates threshold values to trigger rapid escape responses in carp fish (roach - *Rutilus rutilus* and zebra fish - *Danio rerio*) and clupeoids (sprat - *Sprattus sprattus*). (B) Audiogram where the hearing thresholds are presented as sound acceleration only. The broken line at $2\cdot 10^{-2}\text{ ms}^{-2}$ indicates threshold value to trigger rapid escape responses of fish only sensitive to sound acceleration. Data from Chapman (1973); Chapman and Hawkins (1973); Blaxter *et al.* (1981); Popper *et al.* (2003), and Karlsen *et al.* (in preparation)).

Hos sildefisk innen underfamilien *Alosinae* er det nylig vist at det indre øret er spesialisert til å oppfatte ultralyd i frekvensområdet 20-120 kHz med terskelverdier i området 150-160 dB rel. 1 μPa for frekvenser i området 80-100 kHz. Følsomheten er tilstrekkelig til at fiskene kan

oppfatte angripende delfiners ultrasoniske klykkelyder, som kan omfatte lydtrykk på opp til 220 dB rel. 1 μ Pa referert til en avstand på 1 m (Mann *et al.*, 2001; Popper *et al.*, 2004). Øvrige grupper sildefisk har ikke ultralydhørsele (Popper *et al.*, 2004).

3.5 Andre karakterer ved lydpåvirkning

3.5.1 Frekvens- og intensitetsdiskriminering

Evnen til frekvensdiskriminering hos fisk er avhengig av fiskens hørselsevne og lydets frekvens. Fisk kun følsomme lydakselerasjon samt torskefisk, såkalte hørselsgeneralister, har en evne til frekvensdiskriminering på 8-20 % i det optimale frekvensområdet, dvs. opp til ca. 100 Hz for fisk uten svømmeblære og ca. 300 Hz for torskefisk (Chapman, 1973; Fay, 1988; 1992). Hørselsspesialister har en bedre evne til frekvensdiskriminering på 4-10 % i frekvensområdet 50-1000 Hz (Fay, 1992). Evnen fisk har til å skille mellom lyd av ulik styrke er lite studert, men er i området 2-4 dB rel. 1 μ Pa for hørselsspesialister i frekvensområdet 0,1-1 kHz, og den antas å være tilnærmet den samme for øvrige fisk (Fay, 1992).

3.5.2 Effekter av bakgrunnsstøy

Studier av den absolutte hørselsevnen til fisk, slik de presenterte atferdsaudiogram viser, utføres ideelt i helt støyfrie omgivelser. I det naturlige miljø vil en fisk imidlertid måtte oppfatte lydsignaler mot en bakgrunnsstøy, som normalt er over fiskens høreterskler. Bakgrunnsstøy vil derfor kunne redusere/maskere terskelverdier for hørselen, og på denne måten redusere mulighetene for lyd- og hørselsbasert atferd. For torskefisk er det vist at terskelverdier for deteksjon av en testlyd (båndbredde 1 Hz) i frekvensområdet 100-300 Hz vil være ca: 20 dB rel. 1 μ Pa over en varierende bakgrunnsstøy med en båndbredde på 300 Hz sentrert omkring testlyden (Chapman, 1973, Chapman and Hawkins, 1973, Hawkins and Chapman, 1975). Et tilnærmet tilsvarende forhold regnes å gjelde for øvrige arter fisk.

3.5.3 Retningshørsele

Otolittorganene i fiskens indre ører inneholder retningsfølsomme hårceller med ulik orientering i forskjellige akseplan. I horisontalplanet er det i tillegg en forskjell på ca. 45° i orientering av de to indre ører. Dette danner grunnlaget for at fisk direkte kan oppfatte lydakselerasjon og dermed lydretning i tre dimensjoner i tillegg til informasjon om lydets frekvensinnhold og styrke. Dersom fisk kun oppfatter lydtrykket (en skalar størrelse), vil direkte deteksjon av lydretning ikke være mulig. Ved plutselige, kraftige lydpuiser med frekvenser < 100 Hz vil fisk (både hørselsgeneralister og hørselsspesialister) i løpet av meget kort tid (8-40 ms avhengig av frekvens og lydnivå) oppfatte lydets retning som retningen på den initielle akselerasjonen av fisken. Fisken vil videre i hovedsak flykte og vike unna i den samme retning som retningen av akselerasjonen den detekterer. Dette er vist ved blant annet studier av lydinduserte hurtige fluktpresponser hos fisk (Blaxter and Hoss, 1981; Blaxter *et al.*,

1981; Karlsen *et al.*, 2004; Karlsen *et al.*, under bearbeidelse). For en mer utdypende beskrivelse av retningshørsel hos fisk henvises til oversiktsartikler av Bleckmann and Sand (2008) og Rodgers and Zeddies (2008).

3.5.4 Adaptering og habituering til lyd

Adaptasjon utgjør generelt det fenomenet at sensorisk respons på et konstant stimulus avtar med eksponeringstiden. Adaptasjonen skjer primært perifert i sanseorganet, men også sentralnervøst. Habituering er et tilsvarende type fenomen som omfatter redusert respons i et sanseorgan og hos organismen til repeterte stimuli. Habituering kan skje raskt eller over lang tid, og omfatter perifere, men i hovedsak sentralnervøse mekanismer. Habituering eller tilvenning over tid skjer primært til gjentatte stimuli som oppfattes som ubetydelige og uten negative konsekvenser. Adaptasjon og habituering hos fisk til ulike kvaliteter lyd er lite studert. Store strømgenererende vindmøller forankret til sjøbunnen kan i sin umiddelbare nærhet forårsake tilnærmet kontinuerlig lavfrekvent lyd over terskelverdi for å utløse hurtige fluktresponser hos fisk kun følsomme for lydakselerasjon (Wahlberg and Westerberg, 2005). Likevel kan store mengder slik fisk oppholde seg helt inntil forankringen av slike vindmøller slik at det må ha skjedd en habituering hos fisken til den lavfrekvente bakgrunnsstøyen.

Seismikklyd er kortvarige, lavfrekvente lydpulser som repeteres hvert 8-10. sekund. Slik pulset lavfrekvent lyd oppfattes av fisk generelt som skremmende og stressende, og habituering til slike lydstimuli vil derfor ventelig skje i liten grad og da trolig bare i avstander fra lydkilden der lydintensiteten er meget lav. Seismikkskyting er vist å påvirke fiskeatferd og redusere fiskefangster over perioder på flere dager (Engås *et al.*, 1996). Studier av hurtige fluktresponser hos fisk utløst av infralyd (< 20 Hz) har vist en meget begrenset til ingen habituering av atferdsresponsene ved stimuleringsintervaller på 5-30 minutter (Karlsen *et al.*, 2004). I en laboratoriestudie av gullfisk (hørselsspesialist) ble det imidlertid funnet at lyd repetert hvert 4. sekund over 3-5 minutter førte til en begrenset, men vedvarende (> 40 minutter) habituering av lydinduserte hurtige fluktresponser (Kawasaki *et al.*, 1996). Habituering av denne type atferd hos fisk er således mulig, men i hvor stor grad dette vil kunne skje i forbindelse med seismikkskyting for fritt svømmende fisk i havet er ukjent.

3.6 Lydproduksjon og lydkommunikasjon

Nesten all fisk produserer lyd i varierende grad i tilknytning til lekatferd og gyting, næringsøk, aggressiv atferd og fluktatferd (Myrberg, 1981; Ladich, 1997). Torskefisk er svært vokale, og produserer en rekke typer lyd via svømmeblæren og lydmuskler og andre hittil ukjente mekanismer (Noreide and Kjellsby, 1999; Midling *et al.*, 2002; Vester *et al.*, 2004). Hovedlydene til torskefisk er kortvarige og lavfrekvente lydpulser, som omtales som grynt- eller boplyder, og der hoveddelen av lydenergien ligger i frekvensområdet 50-500 Hz (Noreide and Kjellsby, 1999; Midling *et al.*, 2002). De lavfrekvente gryntelydene til torskefisk anvendes utenom gytelsesongen av både hunnfisk og hannfisk i intra- og interspesifikk

aggressiv atferd. I gytetiden er det i all hovedsak hannfisk som lager pulset, lavfrekvent lyd for å skremme vekk annen fisk. Til forskjell er kurtise- og gytelyder hos torskefisk lange serier av lyd-pulser som avgis i økende frekvens, og under selve gytungen mest minner om kontinuerlig lavfrekvent lyd – ikke ulik en motorsykkellyd. I aggressiv atferd anvender fisk lavfrekvent pulset lyd, men hvorvidt dette bidrar til at fisk oppfatter pulset lavfrekvent seismikklyd som skremmende er ukjent.

3.7 Hørsel og vibrasjonsfølsomhet hos noen marine virvelløse dyr

3.7.1 Innledning

Marine virvelløse dyr (invertebrater) har likevektsorganer/gravitasjonsdetektorer bygget på intra- eller ekstracellulære krystaller (otoconier/otolitter/statolitter) basert på primært kalsium (Budermann, 1992b). Hos mange former har disse treghtetsbaserte likevektsorganene (statolittorganer) en anatomi og funksjon som minner svært mye om otolittorganer hos fisk. Hos aktive, bevegelige virvelløse dyr responderer statolittorganene på organismens egenbevegelse samt på ytre vannvibrasjoner. Hos enkelte virvelløse dyr, med kroppssegmenter av ulik tetthet, vil hele organismen kunne fungere som en akselerasjonsdetektor. Spesielle nerve-celler og nevralt nettverk for styring av fryktresponser og hurtig fluktatferd er dokumentert hos en rekke invertebrater som nesledyr, leddormer, bløtdyr og krepsdyr. Blant krepsdyrene finnes et stort antall dyreplanktonarter som er viktige fødeorganismer for andre dyreplanktonarter, og for larver og yngel og en del voksenfisk. Enkelte akvatiske virvelløse dyr er vist å være sensitive for lyd, og da for lydets partikkelakselerasjon i nærfeltet.

3.7.2 Egenskaper hos mysider og copepoder

Mysider

Mysider er pelagiske krepsdyr, og utgjør sentrale byttedyr for mange arter av fisk og blekksprut. Gruppen er særdeles formrik blant storkrepsene, og et trettitalt arter forekommer i norske farvann (Sars, 1870). I haleviften har mysider et par store og velutviklede statolittorganer (Espeel, 1985; Ariani *et al.*, 1993), som er sentrale for kroppsorientering og kompensatoriske bevegelser av øyne og antenner (Neil, 1975). Statolittorganene er også sentrale for hurtig fluktatferd. Studier av den littorale mysiden *Praunus flexuosus* har vist at hurtige fluktresponser utløses av lydakselerasjon i frekvensområdet 4-30 Hz (Karlsen, unpubl.). Denne følsomheten er en faktor på nesten 10, dvs. 20 dB lavere enn terskelverdi for å utløse hurtig fluktatferd hos fisk som er følsomme for lydakselerasjon, og kan antyde at mysider utgjør en gruppe krepsdyr som kan påvirkes av seismikkskyting på linje med fisk.

Hoppekreps (copepoder)

Hoppekreps er en meget artsrik og økologisk viktig klasse av krepsdyr med både frittlevende og parasittiske former. Raudåten (*Calanus finmarchicus*) er regnet å være den mest tallrike copepodearten i våre farvann. Det er veldokumentert at hoppekreps spontant reagerer med

hurtig flukt- eller angrepsatferd som respons på små og for dyret lokale vannbevegelser, som påvirker mekanofølsomme sansehår (setae) på kroppen deres og/eller vedheng (Buskey *et al.*, 2002; Wagget and Buskey, 2008). Terskelverdier for slike responser er i området 0,01-1 μm (partikkelutsving) i frekvensområdet 30-3000 Hz (Fields *et al.*, 2002). Det er i tillegg vist at i alle fall enkelte hoppekreps også kan detektere uniforme vannakselerasjoner der hele dyret og de omgivende vannmasser beveges som en enhet, dvs. lyddeteksjon. Det infektive stadiet hos for eksempel den parasittiske hoppekrepsen lakselus (*Lepeophtheirus salmonis*) reagerer med angrepsatferd på denne type vannakselerasjoner i frekvensområdet 1-5 Hz (Heuch and Karlsen, 1997). Dette er nær terskelverdier for å utløse hurtige fluktresponser hos mysider. Det er lite studert om øvrige hoppekreps innen slekter som *Acartia*, *Calanus*, *Pseudocalanus*, *Temora* mfl. på tilsvarende måte kan detektere lineære vannakselerasjoner og derved ha en type lyddeteksjon som lakselus.

4 EFFEKTER PÅ FISK FRA SEISMISKE UNDERSØKELSER

4.1 Atferdspåvirkninger

4.1.1 Atferdsreaksjoner under påvirkning av luftkanoner

Fisk reagerer på menneskeskapt lyd, deriblant lydimpulser fra seismiske luftkanoner, på ulike måter. Den svakeste form for atferdsreaksjon er små forandringer i svømmeaktivitet der fisken endrer retning og øker svømmehastigheten. Forandringer i vertikalfordeling og stimatferd er tydeligere reaksjonsformer, mens den kraftigste formen for atferdsreaksjon på lyd er en hurtig fluktreaksjon der fisken først viser en såkalt "C-start"-respons eller C-startreaksjon. En C-startreaksjon er en stereotyp respons der fiskens kropp bøyes i en C-form bort fra lydilden (Blaxter *et al.*, 1981). Hurtig fluktrespons regnes som den sterkeste spontane fryktrespons en fisk kan vise, og utløses og styres av et nettverk av nerveceller (kalt det nevralt fluktnettverk) i fiskens hjernestamme (Faber *et al.*, 1989; Eaton *et al.*, 2001). Det er vist at det er en sammenheng mellom lydintensitet og type reaksjon der økende lydnivå gir sterkere reaksjonsformer (Booman *et al.*, 1992; Boeger *et al.*, 2005; Pearson *et al.*, 1992; Skaar, 2004).

4.1.2 Terskelverdier for lydindusert hurtig fluktatferd hos fisk

Kontrollerte studier av lydinduserte hurtige fluktresponser i laboratoriesituasjoner har vist at hos hørselsgeneralister utløses disse av lydets partikkelakselerasjon med terskelverdi på ca. $2 \cdot 10^{-2} \text{ ms}^{-2}$ som tilsvarer et fjernfelt lydtrykk ved 10 Hz på 174 dB rel. 1 μPa , og ved 100 Hz på 154 dB rel. 1 μPa (Karlsen *et al.* under bearbeidelse). Felteksperimenter har vist nesten tilsvarende terskelverdier for atlantisk laks (Knudsen *et al.*, 1992, 1994) og for flere arter av stillehavslaks (Knudsen *et al.*, 1997). Det betyr at terskelverdi for å utløse hurtige fluktresponser er ca. 30 dB over den absolutte terskel for hørsel på ca. $5 \cdot 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$. Atferdsforsøk har i tillegg vist at lavfrekvent lyd $< 50 \text{ Hz}$ er betydelig mer effektiv enn høyfrekvent lyd i å utløse fluktresponser hos atlantisk laks (Knudsen *et al.*, 1992). Dette skyldes høyst sannsynlig at angripende predatorfisk i all hovedsak genererer lavfrekvente vannbevegelser ($< 100 \text{ Hz}$) med betydelige komponenter langt ned i infralydområdet (Bleckmann *et al.*, 1991). Det er dermed forventet at fisk har en medfødt og naturlig redsel for lavfrekvent lyd.

Hurtig fluktatferd hos åtte fiskearter fra Nord-Atlanteren er nylig undersøkt for rentone lydstimuli i frekvensområdet 0,1-6 kHz (Kastelein *et al.*, 2008). Forsøkene ble utført med lydildkilder og fisk i små akustiske basseng (7x4x2 m). Kun lydtrykk ble målt, slik at det manglet måling av og eksperimentell kontroll over nærfelteffekter og lydakselerasjon i forsøkene. Dette gjør det vanskelig å tolke resultatene. Lydtrykkterskler for at 50 % av forsøksfisken skulle vise hurtig fluktrespons, var ca. 105-120 dB rel. 1 μPa ved 100 Hz for artene: Havabbor (*Dicentrarchus labrax*), taggmakrell (*Trachurus trachurus*) og skjeggorsk (*Trisopterus luscus*). For artene tykkleppe mulle (*Chelon labrosus*), ål (*Anguilla anguilla*),

torsk, lyr og sild (*Clupea harengus*) viste < 50 % av forsøksfisken hurtig fluktatferd i alle tester utført ved 100 Hz og det maksimalt mulige lydtrykket på 120 dB rel. 1 μPa .

Lydinduserte hurtige fluktresponser hos hørselsspesialister som mort, sebrafisk, gullfisk og brisling er nylig vist å utløses av lydtrykk, og ikke av lydens partikkelakselerasjon, helt ned til 5 Hz (Karlsen *et al.*, under bearbeidelse). Terskelverdi var ca. 130 dB rel. 1 μPa ved 10 Hz og ca. 116 dB rel. 1 μPa ved 30 Hz. Dette tilsvarer 24-30 dB over de absolutte lydtrykks-terskler for hørsel hos disse fiskegruppene. Fluktresponsene var retningsorienterte slik at hørselsspesialistene i tillegg til lydtrykket, registrerte lydens partikkelakselerasjon på ca. $3 \cdot 10^{-3} \text{ ms}^{-2}$. Fluktresponser ble utløst av lydfrekvenser fra 5 Hz opp til 500 Hz, som var den høyeste frekvensen som ble testet. Hørselsspesialister skremmes således av både lavfrekvent og høyfrekvent lyd. I en feltstudie der karpefisk ble skremt av 16 Hz infralyd, ble terskelverdi for unnvikelse estimert til ca. 10^{-3} ms^{-2} , mens lydtrykket ikke ble målt (Sonny *et al.*, 2006).

4.1.3 Fluktatferd utløst av seismikklyd

Lydinduserte C-startreaksjoner utløses av plutselige, kraftige lyder og fører som nevnt til hurtige fluktreaksjoner vekk fra lyd-kilden. Atferden er påvist hos flere arter under påvirkning av seismisk luftkanonskyting som vist i tabell 4.1. Slike reaksjoner er observert hos fisk på avstander opptil 7 km fra lyd-kilden. De fleste av disse undersøkelsene er gjort hos fisk som er holdt innestengt i en merd, og de gir derfor ikke grunnlag for slå fast om det aktuelle lyd-nivået ville utløst en reell fluktreaksjon. En C-startreaksjon er imidlertid en indikasjon på en fluktreaksjon.

Fisk kan vise fluktreaksjoner uten først å foreta en C-startreaksjon ved at fisken øker svømmeaktiviteten og forandrer svømmeretning ved lyd-nivåer som er lavere enn terskel-verdien for C-startreaksjoner (Pearson *et al.*, 1992). Det er også observert at fisk dykker nedover i vannsøylen som en reaksjon på seismisk påvirkning. Dette er påvist hos hvitting

Tabell 4.1. C-startreaksjoner hos noen fiskearter under påvirkning av seismisk skyting for noen luftkanonoppsett. Avstand: Den lengste avstanden, r_m , mellom fiskene og luftkanonene hvor det ble observert reaksjon.

Lydtryknivå: Målt ved fisken ved r_m . (*Startle responses in fish during impact of seismic shooting for some airgun set-ups. Distance: The longest distance, r_m , between the fishes and the airguns where the responses were observed. Sound pressure level: As measured at the fish at r_m).*)

Arter	Lydkilde	Lydtryknivå	Avstand [r_m]	Referanse
<i>Sebastes spp.</i>	Enkel kanon	205-207 dB rel. 1 μPa	11-17 m	Pearson <i>et al.</i> , 1992
Havabbor	Kanonfelt	Ikke målt	2,5 km	Santulli <i>et al.</i> , 1999
Torskefisker	Tre kanoner	195 dB rel. 1 μPa	109 m	Wardle <i>et al.</i> , 2001
Tobis	3D-kanonfelt	Ikke målt	7 km	Hassel <i>et al.</i> , 2004

(Chapman and Hawkins, 1969), hos sild (Dalen, 1973) og hos sei, torsk, hyse og hvitting (Dalen og Raknes, 1985), uerarter av slekten *Sebastes* (Skalski *et al.*, 1992), og kolmule

(Slotte *et al.*, 2004). En annen fluktreaksjon er at fisk svømmer ut av området der det skytes seismikk. Dette er påvist både med fangsting (Løkkeborg and Soldal, 1993; Engås *et al.*, 1996) og med akustisk kartlegging av fiskemengde og fordeling (Dalen and Knutsen, 1987; Engås *et al.*, 1996; Slotte *et al.*, 2004).

4.1.4 Effekter av seismisk undersøkelser på ulike fiskerier

I flere undersøkelser er det påvist betydelige fangstreduksjoner for fiskebåter som opererer i nærheten av fartøyer som driver seismisk datainnsamling (Pearson *et al.*, 1987; Kenchington, 2000). Den mest omfattende undersøkelsen er utført på Nordkappbanken (Barentshavet) hvor en fisket med trål og line etter torsk og hyse (Engås *et al.*, 1996). I denne undersøkelsen ble det fisket innenfor et område på 40 x 40 nautiske mil (nmi) før (7 dager), under (5 dager) og etter (5 dager) den seismiske 3D-undersøkelsen som foregikk i sentrum av dette området. Innenfor det seismiske området (3 x 10 nmi) ble det registrert en reduksjon på 70 % for trålfangstene av torsk og hyse og for linefangstene av hyse, mens reduksjonen for linefangstene av torsk var på 45 %. Det ble påvist fangstreduksjoner helt ut til ytterkanten av det undersøkte området som strekte seg ut til en avstand på 18 nmi fra område der det seismiske fartøyet opererte. Den gjennomsnittlige reduksjonen for hele dette området på 40 x 40 nmi var 50 % for trålfangstene av torsk og hyse og for linefangstene av hyse, mens reduksjonen var 21 % for linefangstene av torsk. Fangstene forble reduserte gjennom perioden på fem dager etter at den seismiske aktiviteten var avsluttet. Disse resultatene støttes av akustiske målinger som viste at mengde fisk i området ble redusert tilsvarende reduksjonen i fangstene.

Resultatene i denne undersøkelsen støttes av andre lignende undersøkelser. I et fiskeri med snik (en line som står vertikalt i sjøen) på kysten av California ble fangstene av uerarter (*Sebastes spp.*) halvert etter at et seismisk fartøy med en luftkanon begynte å operere i området (Skalski *et al.*, 1992). Analyser av fangst dagbøker fra fiskebåter som hadde fisket i området i Barentshavet hvor det foregikk seismiske undersøkelser viste reduksjoner på 55-80 % for linefangster av torsk og 79-83 % for bifangst av torsk i reketral (Løkkeborg, 1991; Løkkeborg and Soldal, 1993). Resultater fra en færøysk studie der en intervjuet 168 fiskeskippere støtter opp om de sist refererte resultatene idet 75 % av fiskeskipperne som opplevde seismisk aktiviteter i nærheten av der de fisket, mente at dette påvirket fangstratene (i Jakupsstovu *et al.*, 2001).

På bakgrunn av resultatene fra disse undersøkelsene kan det konkluderes at seismiske undersøkelser forårsaker betydelige fangstreduksjoner når de utføres i områder der det fiskes etter torsk, hyse og uerlignende arter. Undersøkelsen på Nordkappbanken indikerer at fangstene reduseres ut til en avstand på minst 18 nmi og at fangstene forblir lavere over en periode på minst fem dager etter at den seismiske aktiviteten har opphørt. Disse siste resultatene er imidlertid spesifikke for de rådende forholdene på Nordkappbanken og kan ikke ukritisk overføres til andre fiskerier.

4.2 Skadeeffekter

4.2.1 Skader på egg, larver og yngel

Egg og tidlige stadier av fisk kan få fysiske skader dersom de er nær luftkanonene når de avfyres, og de tidlige livsstadiene er mest utsatt siden de har ingen (egg) eller begrenset mobilitet (larver og yngel), og dermed begrenset mulighet til å unngå ugunstige hendelser (Kostyuchenko 1973; Dalen and Knutsen, 1987; Holliday *et al.*, 1987; Booman *et al.*, 1992; Kosheleva, 1992; Matishov, 1992; Holmstrøm, 1993; Popper *et al.*, 2005). Effektene av luftkanonskyting på disse stadiene blir ofte klassifisert som umiddelbar dødelighet (korttids-effekter), dødelighet over tid (langtidseffekter) og ikke-dødelige skader. Selv om noen skader i seg selv ikke fører til direkte dødelige tilstander av organismene, kan slike effekter indirekte føre til samme fatale tilstander via redusert evne for fødeopptak, redusert antipredatoratferd, eller endret svømmekapasitet eller atferd slik at de vil bli mer utsatte overfor rovfisk.

Havforskningsinstituttet gjennomført i 1991-92 et større prosjekt omkring påvirkning fra luftkanonskyting på tidlige livsstadier hos fem fiskearter (Booman *et al.*, 1996) for å supplere tidligere undersøkelser og belyse hvilke indre skader fiskeegg, larver og yngel kan få under slike forhold. Luftkanonoppsettene som ble brukt tilsvarte deler av vanlig brukte luftkanonfelt i 3D-undersøkelser og skulle være representativt for hva organismene utsettes for. Samme basis er brukt av andre som gjennomfører stasjonære og kontrollerte forsøk (Holliday *et al.*, 1987; Kosheleva, 1992; Popper *et al.*, 2005). I sommerperioden 1991 bestod kilden av en kanonklynge bestående av tre kanoner med samlet kammervolum lik 9,6 liter og to enkle kanoner henholdsvis 4,5 m og 8 m unna klyngen og med kammervolum 4,8 og 2,5 liter. I høstperioden 1991 og i hele 1992 ble bare den nevnte kanonklyngen brukt idet det ble fokusert på å studere næravstandseffekter.

Booman *et al.* (1996) fant at plommeseckklarver av piggvar som var eksponert for lydenergi fra luftkanoner fikk skade på hjerneceller når larvene var ca. 1,6 m fra en luftkanonklynge. Det ble også påvist skader på de frie neuromastene hos plommeseckklarver av piggvar ved fullstendig kutting av alle flimmerhår. Lignende funn ble avdekket for postlarver av torsk. Sidelinjesystemet hos fisk kan være sårbart overfor skader som er forårsaket av lydenergi-påvirkning, spesielt hos larver, der de såkalte frie neuromaster i mange henseende representerer sidelinjesystemet inntil dette er fullt utviklet. Neuromastene er betraktet som et viktig organ i fluktreaksjoner hos mange fiskelarver, og derved i deres evne til å unngå predatorer (Blaxter and Hoss, 1981; Eaton and Hackett, 1984).

Resultatene ble så langt som mulig gruppert og presentert i forhold til utviklingsstadium av den aktuelle arten og i effektiv alder (døgngrader) etter klekking. Utviklingsstadium og effektiv alder (døgngrader) for fisken vist i tabell 4.2, baserer seg på eksempler for torsk (gyter i frie vannmasser) og sild (gyter ved bunnen) under normaltemperaturforhold på gytefelt og i typiske driftområder i norske farvann, dvs. fra temperert og subarktisk sone.

Resultater fra andre farvann og geografiske soner kan avvike fra dette når det gjelder effektiv alder. Følgende utviklingsstadium ble brukt:

Tabell 4.2. Utviklingsstadium og effektiv alder (døgngrader) for forsøksfisken med eksempler for torsk og sild.⁷ (*Development stages and effective age (degree-days) of the fish with examples of cod and haddock*⁶).

Stadium	Effektiv alder
egg	
plommeseckklarver	torsk fra 0 til ca. 35 døgngrader og sild fra 0 til ca. 50 døgngrader,
larver	torsk fra ca. 35 til ca. 335 døgngrader og sild fra ca. 50 til ca. 650 døgngrader
postlarver	torsk fra ca. 335 til ca. 575 døgngrader og sild fra ca. 650 til ca. 890 døgngrader
yngel	omlag tilsvarende som brukt for 0-gruppe stadium ved Havforskningsinstituttet, dvs. fisken er ca. ½ år gammel.

Resultatene av de norske undersøkelsene i 1991-92 bekreftet og utvidet tidligere kunnskaper fra undersøkelser av dødelighet fra luftkanonskyting, se tabell 4.3.

Oppsummering:

- Økte dødelighetsrater for fiskeegg ble påvist ut til ca. 5 m avstand fra luftkanonene.
- For plommeseckklarver, spesielt for piggvar (gjennomgående representant for flyndrefisker) var dødelighetstallene høye, 40 - 50 %, på 2-3 m avstand. Lavere dødelighetstall er blitt vist for plommeseckklarver av ansjos ved samme avstander (Holliday *et al.*, 1987) fra en enkel luftkanon på 5,0 liter. Matishov (1992) påviste betydelige øyeskader (retinalagdeling) hos plommeseckklarver av torsk ved 1 m avstand fra en luftkanonklynge på ca. 8 liter.
- På senere stadier, slik som for larver, postlarver og yngel, fant en for rødspette de høyeste dødelighetstallene, 10 - 20 %, ved 2 m avstand. Tydelig øket dødelighet ble også påvist for torsk på ca. 5 m avstand på larvestadiet.
- Økte dødelighetstall på postlarvestadiet ble påvist ved 1-2 m avstand for flere arter.
- Økt dødelighet ble påvist for torsk på yngelstadiet (ca. 6 mnd) ved 1-2 m avstand.
- En observert videre endringer i flyteevne hos organismene, endringer i evne til å unngå predatorer, og effekter som påvirket den generelle kondisjonen hos larvene og dermed evne til å overleve.

⁷ Alder i antall døgn finnes ved å dividere antall døgngrader med middeltemperatur fisken har oppholdt seg i.

Tabell 4.3. Oppsummerte resultater fra ulike undersøkelser av total dødelig effekt på ulike utviklingsstadium som funksjon av avstand mellom seismisk kilde og organismene. Effektbeskrivelse: SD og ISD - statistisk signifikant og ikke-signifikant dødelighet, MD - markant øket dødelighet, LD - øket, men lav dødelighet. Luftkanonutrustning og kammervolum: ELK - enkel luftkanon, LKK - luftkanonklynge og EVK - enkel vannkanon. (Fra Booman *et al.*, 1996). (*Summarized results from several investigations of total lethal effects at different development stages vs. distance between the seismic source and the organisms. Description of effects: SD and ISD - statistical significant and not significant mortality, MD - pronounced increased mortality, LD - increased, but low mortality. Airgun equipment and chamber volume: ELK - single air gun, LKK - air gun cluster, and EVK - single water gun. (From Booman et al., 1996).*)

Stadium: Forfatter(e)	Avstand (m)					Art	Effekt	Kanonutrust- ning og volum
	0,5-1	1-2	2-3	3-5	>5			
<u>Egg:</u>								
Kostyuchenko (1973)	x			x		Ansjos	MD	ELK: 5,0 l
”					x	”	LD	“
Holliday <i>et al.</i> (1987)			x			Ansjos	SD	ELK: 5,0 l
Kosheleva (1992)	x					Rødspette	MD	ELK: 3,0 l
Booman <i>et al.</i> (1996)	x					Sei	ISD-LD	LKK: 9,6 l
<u>Plommesekkklarver:</u>								
Holliday <i>et al.</i> (1987)			x			Ansjos	SD	ELK: 2 - 5 l
Booman <i>et al.</i> (1996)	x					Torsk	ISD-LD	LKK: 9,6 l
”	x	x	x			Piggvar	SD, MD	“
<u>Larver:</u>								
Kosheleva (1992)	x					Rødspette	MD	ELK: 3,0 l
”	x	x				“	MD	LKK: 5,0 l
Booman <i>et al.</i> (1996)				x		Torsk	SD	LKK: 9,6 l
<u>Postlarver:</u>								
Dalen and Knutsen (1987)	x					Torsk	LD	ELK: 8,6 l
Booman <i>et al.</i> (1996)	x					Torsk	SD	LKK: 9,6 l
”		x				“	LD	“
”		x				Sild	LD	“
”	x	x				Piggvar	ISD-LD	“
”		x				Rødspette	LD	“
<u>Yngel:</u>								
Dalen and Knutsen (1987)*		x					SD	EVK: 8,6 l
Booman <i>et al.</i> (1996)	x	x				Torsk	MD	LKK: 9,6 l

*Vannkanon (Newman, 1978).

Oppsummert kan vi si at forskning utført så langt, og på et visst antall arter, har vist at skader og økt dødelighet fra luftkanonskyting kan forekomme ved avstander opp til 5 m fra luftkanonene. De mest hyppige og alvorligste skader forekommer ved avstander ut til ca. 1,5 m og hos fisk er det de tidlige livsstadiene som er mest utsatt.

4.2.2 Skader på større fisk

For senere livsstadier enn yngelstadiet og for voksen fisk, ser vi på atferdspåvirkende effekter som de viktigste idet fisken vil være i stand til å svømme unna risikovolumet nært luftkanonfeltene og dermed unngå fysiske skader.

Dersom en holder fisken i bur eller merder nært aktive luftkanoner, kan en framprovosere ulike skader. Noen funn av McCauley *et al.* (2003) indikerte skadelige effekter hos voksen fisk. Her ble det påvist alvorlige skader på hørselsensorceller. Fisken ble holdt i bur og det seismiske fartøyet passerte burene langs kurslinjer som gikk fra 400-800 m avstand i starten og inntil 5-15 m fra burene. Disse funnene er for øvrig av samme type som Booman *et al.* (1996) fant for fiskelarver av noen arter.

Holand *et al.* (1993) påviste riveskader og blødninger på og i svømmeblæren hos torsk som ble holdt i bur 6 m fra en luftkanonklynge med kammervolum lik 9,3 liter. Fisken ble holdt på ulike dyp. En påviste også endring i fiskens hørsel ved reduksjon i det mikrofoniske signalet med opptil 3 dB i frekvensområdet 60-180 Hz med størst reduksjon ved 100 og 150 Hz.

Det må igjen understrekes at forsøksfiskene i begge disse forsøkene var så nær luftkanonene, at en kan ikke gjøre disse funnene som representative effekter for voksen, fritt svømmende fisk.

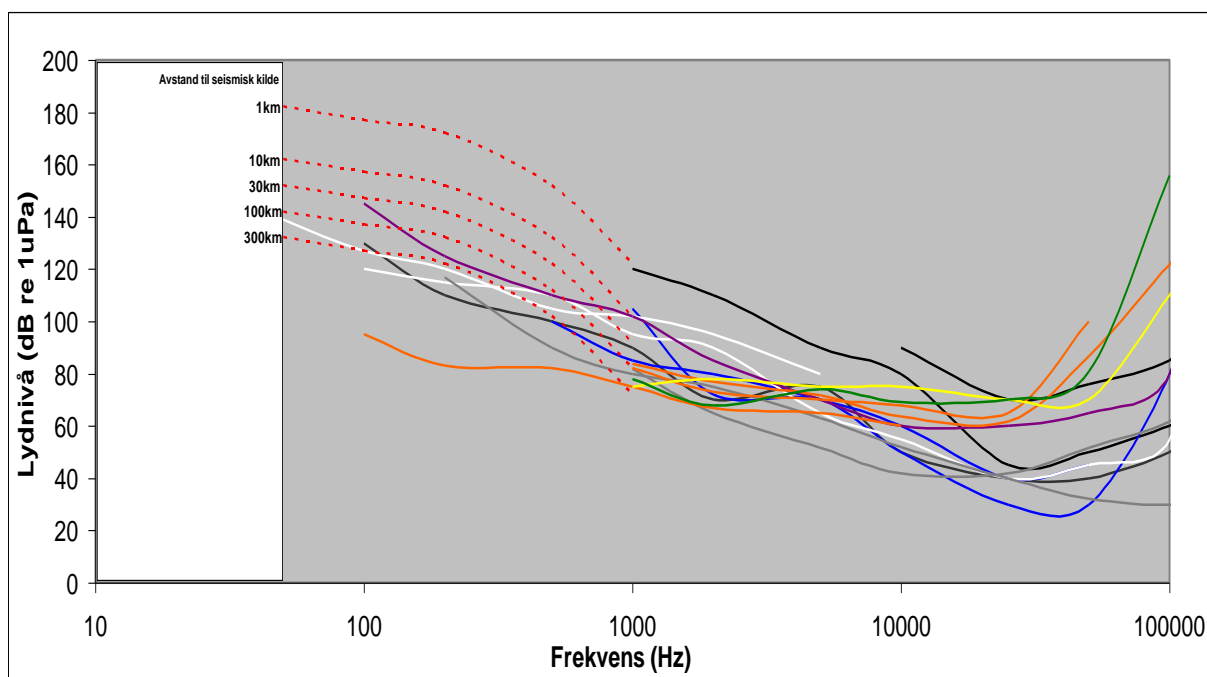
5 EFFEKTER PÅ SJØPATTEDYR FRA SEISMISKE UNDERSØKELSER

5.1 Innledning

Mens man i Norge har hatt en sterkt fokus på potensielle effekter av seismiske undersøkelser på fisk, er det potensielle effekter på sjøpattedyrene som har størst oppmerksomhet i de fleste andre land. Dette skyldes selvsagt at næringsinteressene er svært sterke for fisk i Norge. Vi skal likevel huske på at det finnes næringsinteresser også knyttet til sjøpattedyrene (hvalfangst, selfangst og turisme). Ved siden av næringsaspektet er det i tillegg to forhold man må ta hensyn til. For første er det intensjonen i Naturvernloven at inngrep skal fortas slik at naturens kvalitet ikke forringes. Dette medfører at effekter som for eksempel fører til at bestander desimeres eller bli borte fra bestemte områder kan innebære brudd på Naturvernloven. I tillegg slår Dyrevernavloven fast at dyr ikke skal lide unødige - dette gjelder både fisk og sjøpattedyr. Effekter som medfører direkte eller indirekte skade på dyr, kan derfor innebære brudd på Dyrevernavloven. Potensielle effekter av seismisk datainnsamling på sjøpattedyr kan deles inn i skadeeffekter, atferdseffekter og maskeringseffekter.

5.2 Hørsel og vokalisering hos sjøpattedyr

Vi har 17 arter av hval og 7 arter av sel i farvann hvor Norge har forvaltningsansvar. Disse kan deles i funksjonelle grupper ut fra deres evne til å oppfatte lyd i ulike frekvensområder. Niser er upreget høyfrekvente og oppfatter lyd i frekvensbåndet fra 200 Hz til 200 kHz (Southall *et al.* 2007), mens bardehvalene er utpreget lavfrekvente og man antar at de oppfatter lyd fra noen få Hertz opp til ca 20 kHz (Richardson *et al.*, 1995; Southall *et al.* 2007). I mellom disse to gruppene ligger spermhval, nebbhval, alle delfinartene og selartene som kan oppfatte lyd fra 75-100 Hz opp og til 75kHz for seler og 150-160 kHz for delfiner (Southall *et al.* 2007). Strengt tatt er dette en klassifisering som baserer seg like mye på hvilke frekvensområdet dyrene selv lager lyd i, som på målinger av hørselsevne. Spesielt for de store hvalartene mangler man konkret kunnskap om hørselsevne, men man antar at de har god hørsel i det frekvensområdet de selv vokaliserer i. Figur 5.1 oppsummerer det som finnes i litteraturen av hørselskurver fra arter av sjøpattedyr som opptrer i norske farvann. Seismiske signaler har hovedenergien i frekvensområdet 50-200 Hz, og vi ser av tallene over og figuren under at alle arter av sjøpattedyr i norske farvann, både sel, bardehvaler, delfiner og andre, må i utgangspunktet betraktes som potensielt følsomme for påvirkning av seismiske kilder. Det er en utpreget missforståelse at bare de lavfrekvente spesialistene (bardehvaler og spermhval) er følsomme i dette frekvensbåndet. I frekvenser ned mot 50 Hz vil følsomheten til alle dyr som hører denne type lyd, stort sett være begrenset av nivået av bakgrunnsstøy, og det finnes derfor ikke belegg basert på hørselsevne for at noen arter av sjøpattedyr er mer eller mindre følsomme enn andre for påvirkning fra seismiske kilder.



Figur 5.1. Hørselskurve for ulike arter av sel og tannhvaler i norske farvann. Hørselsterskelen er uttrykt som lydtryknivå i dB_{RMS} rel. $1 \mu\text{Pa}$. Tumler (*Tursiops truncatus*) (svarte linjer), springere (*Lagenorhynchus sp.*) (lilla linje), spekkogger (*Orcinus orca*) (blå linjer), nise (*Phocoena phocoena*) (grå linjer), hvithval (*Delphinapteras leucas*) (hvite linjer), steinkobbe (*Phoca vitulina*) (orange linjer), grønlandssel (*Phoca groenlandica*) (grønn linje) og ringsel (*Phoca hispida*) (gul linje). Røde stiplede linjer viser antatt lydtryknivå av seismiske signaler på ulike avstander fra en seismisk kilde med antatt kildenivå på $260 \text{ dB}_{\text{s-s}}$ rel. $1 \mu\text{Pa}$ ref. 1m. (*Hearing curves of different species of seal and toothed whales in Norwegian waters. The hearing threshold is expressed as sound pressure level in dB_{rms} re $1 \mu\text{Pa}$. Bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) (black lines), white-beaked dolphins (*Lagenorhynchus sp.*) (violet lines), killer whale (*Orcinus orca*) (blue lines), harbour porpoise (*Phocoena phocoena*) (grey lines), beluga whale (*Delphinapteras leucas*) (white lines), harbor seal (*Phoca vitulina*) (orange lines), harp seal (*Phoca groenlandica*) (green line) and ringed seal (*Phoca hispida*) (yellow line). Red broken lines indicate assumed sound pressure level of seismic signals at different ranges from a seismic source having a source level of $260 \text{ dB}_{\text{s-s}}$ re $1 \mu\text{Pa}$ ref. 1m).*)

Frekvensavhengigheten av hørselskurvene er basert på energispekteret for et seismisk signal målt i fjernfeltet. Transmisjonstapet er antatt å være sfærisk ($20\log(r)$) uten å ta hensyn til avbøying av lydbaner, refleksjoner og absorpsjon. En omregningsfaktor på -18 dB er brukt for å konvertere fra spiss-til-spiss-lydnivå til rms-lydnivå.

5.3 Fysiologiske effekter

Med fysiologiske effekter eller fysiske skader er det først og fremst hørselsorganet som betraktes som spesielt sårbart. Øret hos sjøpattedyr, som hos oss, er utviklet for å registrere akustisk energi, og kan derfor skades av lydpulser som seismiske signaler dersom de er kraftige nok. Studier hos både sel og delfiner har vist at utvikling av såkalte temporære

hørselskader, som er en reversibel nedsettelse av hørselsevnen, er avhengig av lydimpulsens nivå og varighet (Finneran *et al.*, 2002; 2003; 2005; Schlundt *et al.*, 2000). Basert på disse studiene er det foreslått kriterier for når hørselsskade kan oppstå hos sjøpattedyr. For seismiske signaler innebærer dette at de fleste arter av sjøpattedyr vil kunne påføres kroniske hørselskader ved lydnivåer over 224 dB_{s-s} rel. 1 µPa (Southall *et al.* 2007). Dette innebærer at dyret må befinne seg nærmere den seismiske kilden enn 100 m for å bli skadd.

Muligheten for fysiologiske skader på sjøpattedyr, utover hørselskader er svært begrenset. Resonanseffekter kan potensielt skade lukkede beinstrukturer som kraniet (hjernen) og luftfylte strukturer som lunger og sinuser. Det kreves derimot veldig høye nivåer over tid for at slike skader skal oppstå, og seismiske signaler er sannsynligvis altfor kortvarige til å utgjøre noen fare.

Det foreligger en hypotese som forklarer massestrandinger av nebbhval i forbindelse med bruk av militære sonarer, med at dyrene utvikler en form for dykkersyke som følge av eksponeringen mot sonarsignalene (Jepson *et al.*, 2003). Dykkersyke innebærer at det dannes små gassbobler av nitrogen i kroppsvæsken, og disse kan blokkere blodsirkulasjonen og skape blødninger. Seismiske signaler avviker fra sonarsignaler i både frekvensinnhold og varighet, men tilsvarende strandinger har forekommet også i forbindelse seismiske undersøkelser. Mulige årsakssammenhenger er enten at hvalene skremmes av de akustiske signalene til å endre sin dykkatferd, og at denne atferdsendringen innebærer høyere risiko for dykkersyke, eller at selve signalet (fra sonar eller seismikk) direkte påvirker dannelsen av nitrogenbobler. Denne hypotesen har fått lite støtte gjennom eksperimentelle og teoretiske undersøkelser, men kan ikke avfeies med det kunnskapsnivået vi har i dag.

5.4 Atferdseffekter

Det er vanskelig å si noe generelt om atferdsmessige reaksjon hos sjøpattedyr når de utsettes for seismiske signaler. Relativt få arter har vært undersøkt og resultatene varierer fra art til art. Noen arter reagerer med unnvikelse og noen reagerer ikke, i hvert fall ikke før den seismiske kilden er svært nær. Under visse betingelser vil også enkelte arter kunne tiltrekkes av seismiske lydkilder, fordi de er nysgjerrige og ønsker å orientere seg om hva som foregår. Dette vil kunne føre til at dyrene kommer svært nære den seismiske kilden og vil da kunne ta skade. Den biologiske relevansen dersom dyr reagerer på seismiske signaler, er først og fremst knyttet til unnvikelsesreaksjoner. Dersom dyr unnviker seismiske signaler ved moderate nivåer, vil dette kunne medføre redusert matinntak og endring av vandringsmønsteret. Undersøkelser på spermhval viser for eksempel at de ikke reagerer på seismiske kilder på en viss avstand (> 20 km) (Madsen *et al.*, 2002), men de reagerer med å redusere beiteatferden når den seismiske kilden kommer nærmere (Dr. P. Miller, personlig komm.). Seismiske undersøkelser kan foregå over lang tid i et området, og dersom dette er kritiske habitater for næringssøk eller forplantning, kan den biologiske effekten av slike forstyrrelser bli betydelige. Det er derfor viktig å foreta kontrollerte eksponering av sjøpattedyr hvor man

observerer hvordan de reagerer på ulike nivåer av lydeksponering. Siden sjøpattedyr nesten utelukkende oppholder seg under vann, må slike eksperimenter foregå ved at dyrene påsettes sensorer som registrerer deres atferd også under vann. Det er også sært viktig at slike eksperimenter designes slik at resultatene kan brukes i en sammenheng hvor man kan si noe om biologisk betydning av eventuelle reaksjoner.

5.5 Maskering

Når den menneskeskapt lyden er i det samme frekvensområdet som frekvensene sjøpattedyr benytter selv, kan dette redusere mulighetene for bl.a. kommunikasjon mellom individer og ekkolokalisering. En slik påvirkning kalles gjerne for maskering. Et dyr som befinner seg nær en lydkilde, vil bare kunne oppfatte dyr som befinner seg i nærområdet. Sjøpattedyr bruker lyd til både sosial kontakt og aktivitet og til ekkolokalisering; det vil si at de sender ut lyd og benytter ekkoet fra omgivelsene og byttedyr til å orientere seg og å fange mat. De fleste arter som ekkolokaliserer, benytter lyder i frekvensområdet langt over 1 kHz og seismiske signaler vil ikke utgjøre et stort problem for disse. Bardehvalene benytter derimot svært lavfrekvente lyder til å kommunisere over store avstander, og seismiske signaler vil definitivt kunne maskere disse signalene og vanskeliggjøre slik kommunikasjon. Den biologiske relevansen vil da være at dyrene for eksempel ikke finner hverandre i forbindelse med parring, og de må derfor bruke mer energi på å lete etter partner eller på å øke lydnivået på sine egne kalle-signaler. Problemet med maskering vil være avhengig av varigheten av støyutsendelsen, og støyens evne til å forplante seg over betydelige avstander. Seismiske signaler forplanter seg over enorme avstander, og at det foregår seismiske undersøkelser i et området over lange perioder om gangen. Maskeringseffekten kan derfor være betydelig for bestanden av bardehvaler, men dette er vanskelig å studere og å dokumentere.

6 KUNNSKAPSHULL OG FORSKNINGSBEHOV

6.1 Innledning

I Norge har det vært utført forskning⁸, dvs. feltarbeid, dataanalyse og dokumentering, innen ”seismikk-fiskområdet” i tre perioder; 1984-86, 1991-96 og 2002-04.⁹ De fleste prosjektene er utført med Havforskningsinstituttet som prosjektansvarlig institusjon. Resultatene av forskningen er både nasjonalt og internasjonalt anerkjent. Dette sammen med resultater fra forskning i andre land er med og danner kunnskapsbasen for rådgivning omkring seismiske aktiviteter i forhold til fiskeri og ressursbiologiske forhold overfor departement, direktorater og private aktører innenfor bruk av seismiske metoder i tilknytning til olje- og gassleting (Dalen *et al.*, 1996).

Er markant trekk i norsk forskning på miljøeffekter av seismisk aktiviteter er at i Norge har forsknings- og forvaltningsinstitusjoner drevet fram et meget sterkt fokus på potensielle effekter på fisk og fiskeri, mens i de fleste andre land har miljøvernorganisasjonene drevet fram et like sterkt og ensidig fokus på eventuelle skadeeffekter på sjøpattedyr. Ut fra et helhetlig vitenskapelig ståsted er det vanskelig å forsvare slike ensidige prioriteringer. Norske forskningsmiljøer har vært verdensledende når det gjelder forståelse av hvordan seismisk aktivitet kan påvirke fisk, men har bidratt med svært lite for å kartlegge eventuelle effekter på sjøpattedyr.

Allerede etter det første prosjektet i 1984-86 uttrykte Havforskningsinstituttet at det var behov for ytterligere forskning for å øke kunnskapene omkring påvirkning på fisk fra seismiske aktiviteter. Dette ble gjentatt etter de senere forskningsperiodene. Det utløsende moment for de prosjektene som ble igangsatt i 1991, var to episoder i Altafjorden sommeren 1989. Den første etter gjennomføring av en refraksjonsseismisk måling innerst i fjorden samtidig med stor dødelighet av oppdrettstorsk i et nærliggende anlegg og videre etter undervannsavfyring av et betydelig antall landminer ytterst i fjorden også med samtidig økt dødelighet av laks i oppdrettsanlegg i området. Daværende Norges fiskeriforskningsråd (NFFR) ble i 1991 gitt mandat til formelt å organisere den videre forskningen gjennom programmet ”Selektive redskaper/fysiske skader på fisk” med både offentlige og private finansieringskilder.

Overfor Fiskeri- og kystdepartementet (FKD), (daværende Fiskeridepartementet) ble den første formelle henvendelse fra Havforskningsinstituttet om midler til nye prosjekter etter den store feltinnsatsen i 1991-93 gjort i februar 1994. Utgangspunktet var spesielle funn fra gjennomførte feltaktiviteter og ønsket om kontinuitet i seismikk-fiskforskningen ved

⁸ Forskningsprosjektene ble ofte identifisert og formulert grovt sett med to utgangspunkt: A: vitenskapelig baserte behov og ønsker for økte kunnskaper og B: etter ”uheldige” hendinger (”konfliktsituasjoner”) mellom seismiske aktiviteter og fiskeriaktiviteter. Utgangspunkt B var ofte fulgt opp av omfattende mediaoppslag.

⁹ Enda tidligere ble det utført studier ved SINTEF, avd. for teknisk kybernetikk (nå SINTEF IKT)/NTH (nå NTNU) omkring atferdspåvirkning på sild ved bruk av seismiske kilder i 1972-73 (Dalen og Torsen, 1973; Dalen, 1973).

Havforskningsinstituttet. FKDs svar på dette var at en ikke ønsket å støtte videre feltforskning før bl.a. tidligere prosjekt var ”fulldokumenterte”. Denne betingelsen var oppfylt i 1996, men nye prosjekt ble ikke initiert pga. manglende støtte fra FKD.

Seismiske undersøkelser i havet påvirker i all hovedsak fisk via deres hørselssans. Ved Universitetet i Oslo har fiskenes hørselsevne vært studert gjennom en årrekke og forskningsmiljøet er ledende i internasjonal sammenheng i forhold til kunnskap om hvordan fisk oppfatter lyd og hvordan ulike typer lyd og lydnivåer påvirker atferden av fisken. Selv om kunnskapen om hørselssansen til fisk er betydelig, er det fortsatt påfallende kunnskapshull. Dette gjelder ikke minst i forhold til de kommersielt viktige torskefiskene. Hørselssansen hos torskefisk er kompleks og omfatter både deteksjon av lydakselerasjon og lydtrykk, men det er pr. i dag uklart hvilke typer lyd og lydnivåer som utløser frykt- og fluktatferd hos torskefisk. Kunnskap om hvordan fisk oppfatter lyd, og hvilke aspekter ved seismisk lyd som gir flukt- og unnvikelsesatferd hos ulike arter og grupper av fisk, er nødvendig for å forstå den storskala påvirkning seismikklyd har på frittsvømmende fisk i havet.

Seismiske undersøkelser innebærer en reell fare for at sjøpattedyr påføres fysisk skade i form av hørselskader dersom de kommer nærme lydkilden enn 100 m. Dersom vi i norsk økonomisk sone, skal ha et rådgivnings- og forvaltningsregime for sjøpattedyr i forhold til seismiske aktiviteter, anbefales det for eksempel at den fiskerikyndige personen (ev. egen hvalobservatør) ombord på seismikkfartøy får i oppdrag å speide etter sjøpattedyr og dersom dyrene kommer nærmere en for eksempel 200 m skal lydutsendingen stanses til dyret er utenfor denne sikkerhetssonen. Lignende regler er allerede innført i australske farvann (Anon., 2007).

Under seismiske undersøkelser i dårlig vær eller ved redusert sikt vil en eventuell visuell kontroll av sikkerhetssonen rundt fartøyet ikke kunne utføres på en tilfredsstillende måte. Undersøkelser utført av Kongsberg Simrad har vist at vanlige fiskerisonarer kan brukes til å detektere hval innenfor 1000-2000 m. Selv om ytterligere validering av denne teknikken trengs, anbefaler vi at man etter en slik validering vurderer om det skal settes krav til at fartøy som skal drive seismiske undersøkelser i mørket og i områder hvor det forventes høy tetthet av sjøpattedyr, skal ha tilgang på denne type teknologi.

6.2 Kunnskapshull og forskningsbehov

Hørselsevnen hos fisk

Torskefisk har en kompleks hørsel som omfatter deteksjon av lydtrykk og lydakselerasjon over et stort frekvensområde. Man har lenge antatt at lavfrekvent lyd er mer skremmende for fisk enn høyfrekvent lyd, men dette er resultater som skriver seg fra studier av fisk (laks) som ikke er følsomme for lydtrykk. Fisk som er hørselsspesialister, og derved meget følsomme for lydtrykk, skremmes imidlertid effektivt av både lav- og høyfrekvent lyd. For å kunne avgjøre skremmeavstander og sikkerhetsavstander for seismisk lyd i forhold til påvirkning av

torskefisk, er det nødvendig med utvidet kunnskap om hvordan lydakselerasjon og lydtrykk av ulike frekvenser påvirker og styrer frykt- og fluktatferd hos denne fiskegruppen. Et ytterligere sentralt aspekt som bør kartlegges er også i hvilken grad ulike hørselsgrupper av fisk venner seg til seismikklyd.

Påvirkning på gytefelt og i konsentrerte gytevandringsveier

På gytefelt eller under vandring til gytefelt vil fisk unngå seismisk lyd i tilnærmet samme grad som fisk i andre stadier idet voksen fisk av en art har samme hørselsevne og tilnærmet samme fluktresponserskel (Blaxter *et al.*, 1981; Blaxter and Hoss, 1981). Dersom vi f.eks. legger resultatene fra forsøkene på seismikk og fangsttilgjengelighet til grunn (Engås *et al.*, 1996), kan vi forvente at gytemoden torskefisk vil kunne påvirkes atferdsmessig ut til minst 33 km avstand fra et 3D-luftkanonfelt under liknende lydforplantningsforhold.

Dersom en ved seismisk påvirkning skulle komme til å forflytte deler av en fiskefordeling f.eks. 30 km eller mer, er det urimelig å betegne en slik lokal forflytning av fisk som skadelig på bestandsnivå. Når fisken er på selve gytefeltet, eller er på vandring til gytefeltet, kan imidlertid forflytninger av størrelsesorden 30 km få betydning for selve gytingen, eller for fordelingen av egg på gytefeltet. Dette vil være avhengig av om fisken gyter egg som flyter pelagisk, som hos torsk, hyse, sei og mange andre arter, eller om gytingen foregår på eller over et spesielt bunnsstrat der eggene klebes til substratet, som for sild og lodde. Eventuelle påførte forflytninger vil sannsynligvis også ha større betydning når gytebestanden er lav, og gytefeltet begrenset til et mindre, men optimalt område, enn når gytebestanden er høy. Den direkte effekten av en forstyrret eller forflyttet gyting vil i praksis ikke være mulig å måle på larvenivå, ettersom en ikke har noe direkte sammenligningsgrunnlag og fordi de naturlige variasjonene i tallrikhet fra år til år kan være store.

Vi har i dag avgrenset kunnskap om hvordan gytevandringene kan påvirkes av seismiske aktiviteter og ingen direkte observasjoner om hvordan slike kan påvirke selve gyteprosessen. I forskning innen dette området må vi inkludere flere arter idet fisk av ulike familiegupper kan ha ganske ulike atferdsreaksjoner på samme type stimuli. For eksempel har sildefisker helt andre reaksjonsmønstre enn torskefisker. Ut fra økologisk viktighet og kommersiell betydning vil vi tilrå at en bør arbeide med tre arter; sild, torsk og lodde.

Regenerering og svekking av gyteprosesser

Når det gjelder gytefisk, bør en gjennomføre en studie som belyser om gytefisk kan hoppe over en gyting og reabsorbere eggene igjen, ev. at de reduserer antall gyteporsjoner (for porsjonsgytere) dersom de blir utsatt for betydelige stresspåvirkninger som for eksempel fra seismisk påvirkning. Vi ser for eksempel på leppefisk at dersom de blir stresset, gyter de ikke selv om de er gyteklar og har velutviklede gonader. Hos kveite i oppdrett har en også erfart at en får ikke så mange gyteporsjoner som i naturen.

Skremmeeffekter på pelagisk fisk

Vi har ikke tilstrekkelige kunnskaper om hvordan stimer eller tette forekomster av pelagisk fisk vil påvirkes av seismiske undersøkelser. To undersøkelser har vist at kolmule er følsom for påvirkning fra seismisk skyting (Dalen and Knutsen, 1987; Slotte *et al.*, 2003). Hørselen hos for eksempel sild er bedre enn for torsk, og fisk i stim reagerer ofte mer markant på svakere ytre stimuli enn enkeltfisk (Blaxter *et al.*, 1981).

Skremmeeffekter på fisk uten svømmeblære

Disse artene har dårligere hørsel enn fisk med svømmeblære. Eksisterende forskning dekker ikke disse artene. Eksempler er makrell, alle flatfiskarter og bruskfisk (haifisker). I forhold til norske fiskerier er det makrell som er spesielt interessant.

Effekter av seismiske aktiviteter på atferd og fangstrater av tobis

Gjentatte meldinger fra tobisfiskerne over flere år uttrykker at trålfangstene reduseres betydelig med en gang det kommer seismikkfartøy i nærheten av tobisfeltene. Kommer seismikkfartøyet tilstrekkelig nært, forlater fiskerne fiskefeltet. For å skaffe seg kunnskaper om hvordan dette skjer, må en studere skremmeeffekt og fangstpåvirkning fra seismisk skyting ved å kartlegge tobisen akustisk og å måle trålfangstene før, under og etter seismikk-skytingen på samme måte som i Nordkappbankprosjektet i 1992.

Effekter av seismiske aktiviteter på atferd og fangstrater av utvalgte bunnfiskarter

I forbindelse med Oljedirektoratets seismiske undersøkelser 2008 i Lofoten-Vesterålen ble det gjennomført spesielle forvaltningstiltak for å skille seismisk aktivitet og fiske etter blåkveite. Tiltaket var ikke basert på noe vitenskapelig fundament idet vi ikke har kunnskap om hvordan seismisk aktivitet påvirker atferden av blåkveite.

Under samme seismiske undersøkelser ble det hevdet fra fiskerhold at seismikken hadde påvirket fordeling og mengde av sei over store områder i forhold til tidligere år. I Nordsjøen er det fra samme hold hevdet at gjentatte seismiske undersøkelser over flere år i Tampen-området har påvirket mengde gytende sei i negativ retning. Ut over en enkelt undersøkelse i et grunt skjærgårdsområde der sei var en av artene (Wardle *et al.*, 2001), har vi ingen kunnskaper om hvordan sei blir påvirket av seismisk aktivitet under tilhavsforhold.

For å skaffe seg kunnskaper om hvordan dette skjer for de nevnte artene og andre, må en studere skremmeeffekt og fangstpåvirkning fra seismisk skyting ved å kartlegge arten akustisk (hvis dette er mulig) og å måle fangstrater før, under og etter seismikk-skytingen på lignende måter som i Nordkappbankprosjektet i 1992.

Når det gjelder å forstå og tolke ulike resultater for skremmeavstander, må vi alltid presisere hvilke arter dette gjelder for, under hvilke forhold forsøkene er utført og hvilken biologisk tilstand arten(e) er i. Snevert uttrykt kan en si at resultatene fra Nordkappbankforsøket gjelder berre der og da, men de gjøres ofte gjeldende for mer generelle forhold. For å få en bredere

kunnskapsbase bør gjerne slike ”viktige” forsøk etterprøves ved å gjentas under andre forhold (sesong og fiskefelt).

Opprettholding av skremmeeffekt etter seismisk skyting

Det finnes for lite kunnskap til å kunne fastslå når fisk som er blitt skremt av luftkanon-skyting, kommer tilbake til et område den har forlatt, eller på annen måte blir like tilgjengelig for fangsting som før den seismiske påvirkningen startet. Felles for de få undersøkelsene som er utført, er at en har hatt for korte observasjons- og fisketider eller at seismikkskytingen var avsluttet (Dalen og Raknes, 1985; Engås *et al.*, 1996). Dette bør belyses bedre og mer systematisk ved kommende forskning.

Lydmaskering hos fisk og forstyrning av lydkommunikasjon

Det er mulig at seismisk lyd kan forstyrre fisk i lydkommunikasjon, i deteksjon av predatorer og føde og i navigering gjennom såkalte maskeringseffekter. Det er også brakt fram teorier om at atferdsendringer pga. lydpåvirkning og eventuelt påførte hørselsskader medfører at fisken slutter å produsere lyd selv. Dersom fisken får hørselsskader, er det forventet at dette også kan gå ut over de først nevnte egenskaper. Det har ikke vært utført forskning for å studere noen av disse mulige effektene.

Stresspåvirkning og endring i atferdsmønstre hos mindre fisk og yngel

Framkomne resultater kan tyde på at mindre fisk reagerer på seismiske undersøkelser i en annen grad enn større fisk. Stresspåvirkningsforsøk må gjøres under kontrollerte forhold mens storskala atferdsstudier kan gjøres under frittfeltforhold til havs.

Virkning av seismiske aktiviteter på overleving og atferd av byttedyr (plankton)

De siste årene har det vært en del oppmerksomhet omkring mulige påvirkninger på plankton-organismer fra den utstrakte seismiske aktiviteten i Nordsjøen. Det har vært utført avgrenset forskning innen dette området og resultatene varierer fra ingen til små effekter. Fra litteraturen kjenner vi bare til noen få eksperimenter med luftkanoner på dyreplankton (Kosheleva, 1992; Pearson *et al.*, 1994; Christian *et al.* 2003; Pie *et al.*, 2008). Ut fra den høye verdi dyreplankton har i næringskjeden som føde for arter på samme trofiske nivå og som føde for larver, yngel og voksen fisk, bør mer forskning gjennomføres.

Feltundersøkelser og validere bruk av aktive sonarer i hvalovervåking

Som nevnt har Kongsberg Simrad utført undersøkelser som har vist at vanlige fiskerisonarer kan brukes til å detektere hval innenfor 1000-2000 m. Flere observasjoner og ytterligere validering av denne teknikken trengs. Vi anbefaler at en gjennomfører flere eksperimenter til havs for å gi grunnlag for om det skal settes krav til at seismikkfartøy skal utstyres med anbefalte¹⁰ aktive sonarer for hvalovervåking.

Atferdsstudier av hval ved eksponering av fullskala seismiske kilder

Det er gjort få observasjoner av eventuell påvirkning fra seismiske undersøkelser på ”norske”

¹⁰ Anbefalingene bør hovedsakelig omhandle optimalt frekvensområde og tilstrekkelig utsendt effekt.

hvalarter. Vågehval bør være en høyt prioriter art idet den er svært vanlig i norske farvann og fordi det er næringsinteresser knyttet til den. Forsøkene bør gjennomføres under så kontrollerte betingelser som mulig for å undersøke hvordan hvalen(e) reagerer atferdsmessig ved lydeksponeringer fra seismiske kilder. Slike kontrollerte eksponeringer krever at dyrene påsettes sensorer som registrerer deres atferd også under vann.

Studere utviklingen av dykkersyke hos sjøpattedyr ved eksponering av seismiske signaler

Det foreligger en hypotese som forklarer massestrandinger av nebbhval i forbindelse med bruk av militære sonarer med at dyrene utvikler dykkersyke som følge av eksponeringen av sonarsignalene. Seismiske signaler avviker fra sonarsignaler i både frekvensinnhold og varighet, men tilsvarende strandinger har forekommet også i forbindelse seismiske undersøkelser. Denne hypotesen har fått lite støtte gjennom eksperimentelle og teoretiske undersøkelser, men den kan ikke avfeies med det kunnskapsnivået vi har i dag.

7 GEOGRAFISKE AVSTANDER MELLOM SEISMISKE UNDERSØKELSER OG FISKERIAKTIVITET, GYTEFELT OG KONSENTRERTE GYTEVANDRINGSVEIER

7.1 Innledning

Vi har tidligere nevnt med støtte i kjent dokumentert forskning som gitt i Dalen *et al.* (2007) at de eksperimenter som er utførte for å studere skremmeeffekter hos fisk i forhold til seismiske kilder, viser stor spredning for påvirkningsavstander. De vesentligste årsakene til dette er at forsøkene har vært utført under ulike forsøksbetingelser så som på ulike arter, for ulike livsstadier, med ulike kildesammensetninger, ved ulike dybdeforhold og ulike oseanografiske forhold mfl. Konklusjonen på dette er at en ikke kan angi noen generelle, entydige påvirkningsavstander basert på observasjonsdata for atferdspåvirkninger.

7.2 Kriterier for avstandsvurderinger

Når vi likevel skal vurdere og estimere horisontale påvirkningsavstander fra seismiske aktiviteter i forhold til fiskefelt og gytefelt og konsentrerte gytevandringsveier, må dette gjøres med basis i relevante forskningsresultater av høy kvalitet. Dette betyr at vi må definere kriterier for hvilke type forskningsresultater som kan legges til grunn. Dersom en ikke har relevante observasjoner for påvirkningsavstander, er neste trinn å basere seg på simulering av lydutbredelse i representative farvann sammen med kunnskaper og fiskehørsel og reaksjoner på lydstimuli.

Kriterium 1

Idet vi snakker om horisontale avstander mellom seismisk fartøy eventuelt et seismikkområde og f.eks. fiskeaktiviteter, er det bare resultater fra undersøkelser som viser atferdspåvirkninger i horisontalplanet av fritt svømmende fisk som kan brukes.

Kriterium 2

Matematisk-akustisk simuleringsmodeller for lydintensitetsutbredelse i horisontalplanet kan sammen med kunnskaper om hørsel og atferdspåvirkninger hos fisk brukes for å framskaffe estimater for påvirkningsavstander.

Kriterium 3

Dersom en skal tolke oppnådde resultater for en art til å gjelde for en annen art, må dette bare gjøres på grunnlag av stringente kunnskaper om hørselsegenskaper og atferdsmønstre hos de aktuelle artene. Dette må bygges på en føre-var-tilnærming, som bør basere seg på middels-tilfelle-situasjoner og ikke en værste-tilfelle-situasjoner.

7.3 Kommentarer til kriteriene

Til kriterium 1 er det pr. 2008 bare én undersøkelse og ett sett med resultater som fullt ut oppfyller dette kriteriet, nemlig det som er gjennomført og presentert av Engås *et al.* (1996).

Til kriterium 2 kan vi si: Slike modeller er basert på et teoretisk matematisk-akustisk grunnlag og er i varierende grad avstemte mot måledata. Inntil nylig har det vært en erkjennelse blant marine geofysikere og akustikere at eksisterende modeller har betydelige avgrensninger for å være lokalt anvendbare og dermed ikke er gode nok for å omfatte aktuelle parametere og forhold som kan påvirke lydintensitetsutbredelsen. Internasjonalt er det i gang noen prosjekter som har som mål å bedre denne situasjonen, bl.a. finansiert av The International Association of Oil and Gas Producers (OGP) gjennom Exploration and Production Sound and Marine Life Program - Joint Industry Program (E&P Sound and Marine Life Program - JIP) (<http://www.soundandmarinelife.org/>). Når resultatene foreligger, vil disse bl.a. bli brukt for å forbedre eksisterende lydforplantningsmodeller.

Til kriterium 3: Da vi har data fra svært få arter som oppfyller kriterium 1, er dette ofte arbeidsmåten som følges når en skal vurdere geografiske avstander mellom seismiske undersøkelser og gytefelt og konsentrerte gytevandingsveier (Bjørke *et al.*, 1991; Dalen *et al.*, 1996). Dette må gjøres under forutsetning av at følgende krav oppfylles:

- forskningsresultater av høy kvalitet er tilgjengelige og legges til grunn,
- kunnskaper om hørselsegenskaper og atferdsmønstre hos aktuelle arter,
- kunnskaper om utsendt lydintensitet for aktuelle luftkanonsammensetninger,
- kunnskaper om aktuelle dybdeforhold, bunntyper og oseanografiske forhold, dvs. lydforplantningsforhold.

Oppsummert:

Bunnfiskarter:

Inntil nye forskningsresultater foreligger, konkluderer vi med at ved 3D-undersøkelser har vi en effektiv skremmeavstand for torsk og hyse (torskefisk) til minst 18 nautiske mil (ca. 33 km) i forhold til en fiskeforekomst. Sannsynlig kan skremmeavstanden være større for disse artene idet en ikke kunne konstatere at effekten tok slutt ved 18 nautiske mil.

Ved 2D-seismikk kan en ha samme skremmeavstander som for 3D, men over kortere tid. Bakgrunnen for dette er at 2D-undersøkelser ofte går over større områder enn 3D-undersøkelser og dermed blir det ikke like intens områdebelastning og sammenhengende ”nærvirkning” på fisken som ved 3D-undersøkelser.

For borestedsundersøkelser blir den effektive skremmeavstanden mindre. En enkel vurdering basert på lydtrykkmålinger i forhold til høre- og responsterskler for bunnfisk fra et 3D-liket kanonoppsett og et BSU-liket kanonoppsett utført av Malme *et al.* (1986) og Pearson *et al.* (1987), tilsa at en ved en typisk borestedsundersøkelse kunne utløse skremmeatferd på ca. ¼

av avstanden som ved en 3D-undersøkelse (Dalen, 2008). Det bør presiseres av påvirkningsdosen¹¹ blir vesentlig mindre ved en BSU enn ved en 3D-undersøkelse idet en BSU har kort varighet.

Pelagiske arter:

Som nevnt har vi ikke tilstrekkelige kunnskaper om hvordan stimer eller tette forekomster av pelagisk fisk vil påvirkes av seismiske undersøkelser. Sildefisker (clupeider) er hørsels-spesialister med en bedre hørsel enn torskefisker (gadoider) samt at de ligger på et lavere trofisk nivå. Dette vil forventet medføre større skremmeavstander for sild enn for torskefisk. Inntil vi har gjennomført målrettede studier på atferdspåvirkning på sild i forhold til seismikklyd, kan vi ikke angi noen konkret skremmeavstand.

Makrell mangler svømmeblære og har en mer begrenset hørselssans enn torske- og sildefisk. Vi har ikke atferdsdata i forhold til seismisk skyting for denne arten, men den direkte effektive skremmeavstand vil forventet være klart mindre enn for torskefisk. Indirekte vil atferd og forekomster av makrell kunne bli påvirket over større avtander via effekter av seismikklyd på makrellens byttfiskearter.

Bergen, 19. desember 2008

John Dalen (sign.)	Jens Martin Hovem (sign.)
Hans Erik Karlsen (sign.)	Petter H. Kvalsheim (sign.)
Svein Løkkeborg (sign.)	Rolf Mjelde (sign.)
Audun Pedersen (sign.)	Anne Berit Skiftesvik (sign.)

¹¹ Dose er lik påvirkningintensitet integrert over tid.

8 REFERANSER

- Allen, J.M, Blaxter, J.H.S and Denton, E.J. 1976. The functional anatomy and development of the swimbladder-inner ear-lateral line system in herring and sprat. *Journal of the Marine Biological Association of the UK*. 56, 471-486.
- Anon. 1974. BOLT PAR Air Gun. Manual. Bolt Associates, Inc., Norwalk Conn. USA.
- Anon. 1989. Sleeve gun. Manual. Haliburton Geophysical Services, Inc. Houston, Texas, USA.
- Anon. 2004. Review of Scientific Information on Impacts of Seismic Sound on Fish, Invertebrates, Marine Turtles and Marine Mammals. DFO Canadian Science Advisory Secretariat. Habitat Status Report 2004/002. 14 s.
- Anon. 2006. Preliminary Comprehensive Overview of the Impacts of Anthropogenic Underwater Sound in the Marine Environment. OSPAR Convention for the Protection of the Marine Environment of the North-East Atlantic. Working Group on the Environmental Impact of Human Activities (EIHA). Galway, Ireland: 7–9 November 2006. 73 s.
- Anon. 2007. <http://www.dosit.org/animals/effects/e1a-b.htm>
- Anon. 2008. <http://www.bolt-technology.com>
- Ariani, A.P., Wittman, K.J. and Franco, E. 1993. A comparative study of static bodies in mysid Crustaceans: Evolutionary implications of crystallographic characteristics. *The Biological Bulletin*. 185: 393-404.
- Bjørke, H., Dalen, J., Bakkeplass, K., Hansen K. og Rey, L. 1991. Tilgjengelighet av seismiske aktiviteter i forhold til sårbare fiskeressurser. Havforskningsinstituttet, *HELP-rapport* nr. 38, 1991.
- Blaxter, J.H.S., Gray, J.A.B., and Denton, E.J. 1981. Sound and startle response in herring shoals. *Journal of the Marine Biological Association of the UK*. 61: 851-869.
- Blaxter, J.H.S. and Hoss, D.E. 1981. Startle response in herring: The effect of sound stimulus frequency, size of fish og selective interference with the acoustic-Lateralis system. *Journal of the Marine Biological Association of the UK*. 61: 871-879.
- Bleckman, H., Breithaupt, T., Blickhan, R. & Tautz, J. 1991. The time course and frequency content of hydrodynamic events caused by moving fish, frogs, and crustaceans. *Journal of Comparative Physiology*. 168: 749-757.
- Bleckmann, H. and Sand, O. 2008. Orientation to auditory and lateral line stimuli. In Webb, J.T., Popper, A.N., and Fay, R.R. (eds.) *Fish Bioacoustics*. New York, Springer Verlag: 183-233.
- Boeger, W.A., Pie, M.R., Ostrensky, A., and Cardoso, M.F. 2005. The effect of exposure to seismic prospecting on coral reef fishes. *Brazilian Journal of Oceanography*, 54(4): 235-239.

- Booman, C., Leivestad, H., and Dalen, J. 1992. Effects of Air-gun Discharges on the Early Life Stages of Marine Fish. *Scandinavian OIL-GAS Magazine*, Vol. 20 – No 1/2 1992.
- Booman, C., Dalen, J., Leivestad, H., Levsen, A., van der Meeren, T. og Toklum, K. 1996. Effekter av luftkanonskyting på egg, larver og yngel. Undersøkelser ved Havforskningsinstituttet og Zoologisk Laboratorium, UiB. (Engelsk sammendrag og figurtekster). Havforskningsinstituttet, Bergen. *Fisken og Havet*, nr. 3 (1996). 83 s.
- Budelmann, B.U. 1976. Equilibrium receptor systems in molluscs. In Mill, P.J. (ed.) *Structure and function of proprioceptors in invertebrates*. Chapman and Hall, London: 529-566.
- Budelmann, B.U. 1992. Hearing in nonarthropod invertebrates. In Webster, D.B., Fay, R.R., and Popper, A.N. (eds.) *Evolutionary Biology of Hearing*: 141-160.
- Buskey, E.J., Lenz, P.H. and Hartline, D.K 2002. Escape behaviour of planktonic copepods in response to hydrodynamic disturbances: high speed video analysis. *Marine Ecology Progress Series*. 235: 135-146.
- Buwalda, R.J.A., Schuijf, A. and Hawkins, A.D 1983. Discrimination by cod of sounds from opposing directions. *Journal of Comparative Physiology*. 150: 175-184.
- Chapman, C.J. 1973. Field studies of hearing in teleost fish. *Helgol. Wiss. Meeres*. 24: 371-390.
- Chapman, C.J. and Hawkins, A.D. 1969. The importance of sound in fish behaviour in relation to capture by trawls. *FAO Fisheries Report*. 62(3): 717-729.
- Chapman, C.J. and Hawkins, A.D. 1973. A field study of hearing in the cod, *Gadus morhua* L. *Journal of Comparative Physiology*. 85: 147-167.
- Chapman, C.J. and Sand, O. 1974. Field studies of hearing in two species of flatfish *Pleuronectes platessa* (L.) and *Limanda limanda* (L.) (Family *Pleuronectidae*). *Comparative Biochemistry and Physiology*: 47A: 371-385.
- Chelminski, P. 1974. The effect of dynamite and PAR AIR GUNS on marine Life. Leaflet from Bolt Associates, Inc., Connecticut, USA. 2 s.
- Christian, J.R., Mathieu, A., Thomson, D.H., White, D., and Buchanan, R.A. 2003. Effects of Seismic Energy on Snow Crab (*Chionoecetes opilio*). Report from LGL Ltd. and Oceans Ltd. for the National Energy Board, File No.: CAL-1-00364, 11 April 2003. 91 s.
- Coker, C.M. and Hollis, E.H. 1950. Fish mortality caused by a series of heavy explosions in Chesapeake Bay. *Journal of Wildlife Management*. 14 (4): 435-444.
- Dalen, J. 1973. Stimulering av sildestimer. Forsøk i Hopavågen og Imsterfjorden/ Verrafjorden 1973. Rapport for NTNF. NTH, nr. 73-143-T, Trondheim. 36 s.

- Dalen, J. og Torsen, H.O. 1973. Stimulering av sildestimer. Eksperimenter i Hopavågen. Rapport for NTNf, nr. 73-19-T. Institutt for teknisk kybernetikk, NTH, Trondheim. 82 s.
- Dalen, J. og Raknes, A. 1985. Skremmeeffektar på fisk frå 3-dimensjonale seismiske undersøkingar. Havforskningsinstituttet, rapport nr. FO 8504, Bergen. 22 s.
- Dalen, J., and Knutsen, G. M. 1987. Scaring effects in fish and harmful effects on eggs, larvae and fry by offshore seismic explorations. In Merklinger, H.M. (ed.) *Progress in Underwater Acoustics*. Plenum Publishing Corporation: 93-102.
- Dalen, J., Ona, E., Vold Soldal, A. og Sætre, R. 1996. Seismiske undersøkeleser til havs: En vurdering av konsekvenser for fisk og fiskerier. *Fisken og Havet*, nr. 9 – 1996. 26 s.
- Dalen, J., Dragsund, E., Næss, A. og Sand, O. 2007. Effekter av seismiske undersøkelser på fisk, fiskefangster og sjøpattedyr. Rapport til Samarbeidsgruppe Fiskerinæring og Oljeindustri. Report no.: 2006-1921, Rev. 02. Det Norske Veritas AS, 06.02.07. Høvik. 29 s.
- Dalen, J. 2008. Fisk og seismikk - forsvarlig avstand i relasjon til skremmeeffekt. Brev til Fiskeridirektoratet. Havforskningsinstituttet, ref. 2008/9, 407/2008, Bergen, 23.01.08. 2 s.
- Denton, E.J. and Blaxter, J.H.S. 1976. The mechanical relationships between the clupeid swimbladder, inner ear and lateral line. *Journal of the Marine Biological Association of the UK*. 56: 787-807.
- Eaton, R.C. and Hackett, J.T. 1984. The role of the Mauthner cell in fast starts involving escape in teleost fishes. In: Eaton, R.C. (ed.) *Neural mechanisms of startle behaviour*. Plenum Press, New York and London. 377 s.
- Eaton, R.C., Lee, R.K.K. and Foreman, M.B. 2001. The Mauthner cell and other identified neurons of the brainstem escape network of fish. *Progress in Neurobiology*. 63: 467-485.
- Espeel, D.M. 1985. The fine structure of the statocyst sensilla of the mysid shrimp *Neomysis integer* (Leach, 1814) (Crustacea, Mysidacea). *Journal of Morphology*. 186: 149-165.
- Engås, A., Løkkeborg, S., Ona, E., og Soldal, A.V. 1993. Effekter av seismisk skyting på fangst og fangsttilgjengelighet av torsk og hyse. *Fisken og Havet*, nr. 3 – 1993. 111 s.
- Engås, A., Løkkeborg, S., Ona, E., and Soldal, A.V. 1996. Effects of seismic shooting on local abundance og catch rates of cod (*Gadus morhua*) og haddock (*Melanogrammus aeglefinus*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 53(10): 2238-2249.

- Faber, D.S., Fetcho, J.R., and Korn, H. 1989. Neural networks underlying the escape response in goldfish. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 563: 11-33.
- Falk, M.R. and Lawrence, M.J. 1973. Seismic Exploration: Its nature and Effects on Fish. *Canadian Fisheries and Marine Service Technical Report CEN/T-73-9*: 51 s.
- Fay, R.R. 1988. Hearing in vertebrates: *A Psychophysics Databook*. Winnetka, IL: Hill-Fay Associates.
- Fay, R.R. 1992. Structure and function in sound discrimination among vertebrates. In Webster, D. B., Fay, R. R., and Popper, A.N. (eds.) *The Evolutionary Biology of Hearing*. New York: Springer Verlag: 229-263.
- Fields, D.M., Shaffer, D.S. and Wiessburg, M.J. 2002. Mechanical and neural response from the mechanosensory hairs on the antennule of *Gaussia princeps*. *Marine Ecology Progress Series*. 227: 173-186.
- Finneran, J. J., Schlundt, C. E., Dear, R., Carder, D. A. and Ridgway, S. H. 2002. Temporary shift in masked hearing thresholds in odontocetes after exposure to single underwater impulses from a seismic watergun. *Journal of the Acoustic Society of America*. 111(6): 2929-2940.
- Finneran, J.J., Dear, R., Carder, D.A., and Ridgway, S.A. 2003. Auditory and behavioral responses of California sea lions to single underwater impulses from an arc-gap transducer. *Journal of the Acoustic Society of America*. 114: 1667-1677.
- Finneran, J.J., Carder, D.A., Schlundt, C.E., and Ridgway, S.H. 2005. Temporary threshold shift in bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) exposed to mid-frequency tones. *Journal of the Acoustic Society of America*. 118: 2696-2704.
- Hassel, A., Knutsen, T., Dalen, J., Løkkeborg, S., Skaar, K., Østensen, Ø., Haugland, E.K., Fonn, M., Høines, Å. and Misund, O.A. 2003. Reaction of sandeel to seismic shooting: A field experiment and fishery statistics study. *Fisken og Havet*, nr. 4 - 2003. 63 s.
- Hassel, A., Knutsen, T., Dalen, J., Skaar, K., Løkkeborg, S., Misund, O.A., Østensen, Ø., Fonn, M., and Haugland, E.K. 2004. Influence of seismic shooting on the lesser sandeel (*Ammodytes marinus*). *ICES Journal of Marine Science*. 61: 1165-1173.
- Hastings, M. C. and Popper, A. N. 2005. Effects of sound on fish. Report to California Department of Transportation Contract No. 43A0139, Task order 1, http://www.dot.ca.gov/hq/env/bio/files/Effects_of_Sound_on_Fish23Aug05.pdf
- Hawkins, A.D. and Chapman, C.J. 1975. Masked auditory thresholds in cod *Gadus morhua*. *Journal of Comparative Physiology*. 103: 209-226.
- Hawkins, A.D. and Johnstone, A.D.F. 1978. The hearing of the Atlantic salmon, *Salmo salar*. *Journal of Fish Biology*. 13: 655-673.

- Heuch, P.A. and Karlsen, H.E. 1997. Detection of infrasonic water oscillations by copepodids of *Lepeophtherus salmonis* (Copepoda: Caligida). *Journal of Plankton Research*. 19: 735-747.
- Holand, B., Walsø, Ø. og Berg, T. 1993. Seismiske eksperimenter i våg. Rapport til Norges Fiskeriforskningsråd. SINTEF rapport STF23 A93005, Trondheim, 29.03.93. 13 s.
- Holliday, D.V., Pieper, R.E., Clarke, M.E. and Greenlaw, C.F. 1987. Effects of airgun energy releases on the northern anchovy. API Publ. No 4453, American Petr. Inst. Health and Environmental Sciences Dept., Washington DC. 108 s.
- Holmstrøm, S. 1993. Effekter av luftkanonseismikk på larver og yngel - modellering og simulering. SINTEF Rapport STF48 A93007, Trondheim. 70 s.
- Hovem, J.M. 2007. PlaneRay: An acoustic underwater propagation model based on ray tracing and plane wave reflection coefficients. Invited paper at the 8th International Conference on Theoretical and Computational Acoustics ICTCA 2007, Heraklion, Crete, Greece, 2-5 July 2007.
- Hovem, J. M. 2008. PlaneRay: An acoustic underwater propagation model based on ray tracing and plane-wave reflection coefficients. Forsvarets forskningsinstitutt (Norwegian Defence Research Establishment). FFI-rapport 08/00610, March 2008.
- Hovem, J.M. 2009. *Marine Acoustics. The Physics of Sound in Underwater Environments*. Text book to be published with Applied Research Laboratories, the University of Texas at Austin and Peninsula Publishing, Los Altos, Ca, USA (submitted).
- Hubbs, C.L. and Rehnitz, A.B. 1952. Report on experiments designed to determine effects of underwater explosions on fish life. *California Fish and Game* 38: 333-365.
- i Jakupsstovu, S.H., Olsen, D., and Zachariassen, K. 2001. Effects of Seismic Activities on the Fisheries at the Faroe Islands. Fiskerirannsóknastovan Report, Tórshavn, Faroe Islands. 92 s.
- Jakosky, J.J. and Jakosky, J.Jr. 1956. Characteristics of explosives for marine seismic exploration. *Geophysics*. 21: 969-991.
- Jepson, P.D., Arbelo, M., Deaville R., Patterson, I.A.P., Castro, P., Baker, J.R., Degollada, E., Ross, H.M., Herraiz, P., Pocknell, A.M., Rodriguez, F., Howie, F.E., Espinosa A., Reid, R.J., Jaber, J.R., Martin, V., Cunningham, A.A., and Fernandez, A. 2003. Was sonar responsible for a spate of whale death after an Atlantic military exercise? *Nature*. 425: 575-576.
- Karlsen, H.E. 1992a. Infrasound Sensitivity in the Plaice (*Pleuronectes platessa*). *Journal of Experimental Biology*. 171: 173-187.
- Karlsen, H.E. 1992b. The inner ear is responsible for detection of infrasound in the perch (*Perca fluviatilis*). *Journal of Experimental Biology*. 171: 163-172.

- Kastelein, R.A., Van der Heul., S., Verboom, W.C., Jennings., N. Van der Veen., J., and De Haan, D. 2008. Startle responses of captive North Sea fish species to underwater tones between 0,1-6,4 kHz. *Marine Environmental Research*. 65: 369-377.
- Kawasaki, K., Morita, M., Maejima, T. and Oda Y. 1996. Long lasting habituation of Mauthner cell-initiated escape response of goldfish. *Neuroscience Research*. 25: 244.
- Kenchington, T.J. 2000. Impacts of Seismic Surveys on Fish Behaviour and Fisheries Catch Rates on Georges Bank. Report prepared for Norigs 2000 for submission to the Georges Bank Review Panel, Halifax, Nova Scotia - 28 January 1999.
- Knudsen, F.R., Enger P.S., and Sand, O. 1992. Awareness reactions and avoidance responses to sound in juvenile Atlantic salmon, *Salmo salar* L. *Journal of Fish Biology*. 40:523-534.
- Knudsen. F.R., Enger, P.S., and Sand, O. 1994. Avoidance responses to low frequency sound in downstream migrating Atlantic salmon smolt, *Salmo salar* L. *Journal of Fish Biology*. 45:227-233.
- Knudsen, F.R., Schreck, C.B., Knapp, S.M., Enger, P.S., and Sand, O. 1997. Infrasound produces flight and avoidance responses in Pacific juvenile salmonids. *Journal of Fish Biology*. 51:824-829.
- Knutsen, G.M. og Dalen, J. 1985. Skadeeffekter på egg, larver og yngel fra seismiske undersøkelser. Havforskningsinstituttet, Rapport nr. FO8505, Bergen. 26 s.
- Kosheleva, V. 1992. The impact of air guns used in marine seismic explorations on organisms living in the Barents Sea. Contr. Petro Piscis II `92 Conference F-5, Bergen, 6-8 April, 1992. 6 s.
- Kostyuchenko, L.P. 1973. Effects of elastic waves generated in marine seismic prospecting of fish eggs in the Black Sea. *Hydrobiological Journal*. 9 (5): 45-48.
- Ladich, F. 1997. Agonistic behaviour and significance of sound in vocalizing fish. *Marine and Freshwater Physiology and Behaviour*. 29: 1285-1288.
- Lavergne, M. 1970. Emission by underwater explosion. *Geophysics*. 35 (3): 419-435.
- Lovlia, S.A., Kaplan, B.L., Maidrov, V.V., and Koupalov-Yaropolk, I.K. 1966. Explosives for Experimental Geophysics. *Nedra*, Moscow, Russia.
- Løkkeborg, S. 1991. Effects of a geophysical survey on catching success in longline fishing. ICES, C.M. 1991/B:40. 9 s.
- Løkkeborg, S. and Soldal A.V. 1993. The influence of seismic exploration with air guns on cod (*Gadus morhua*) behaviour and catch rates. *ICES Marine Science Symposium*. 196: 62-67.
- Madsen, P.T., Mohl, B., Neilsen, B.K. and Wahlberg, M. 2002. Male sperm whale behavior during exposure to distant seismic survey pulses. *Aquatic Mammals*. 28(3): 231-240.

- Malme, C.I., Smith, P.W., and Miles, P.R. 1986. Study of the Effects of Offshore Geophysical Acoustic Survey Operations On Important Commercial Fisheries in California. Technical Report No. 1, Report No. 6125. Contract No. MMS 14-12-0001-30273. Prepared by BBN Laboratories Inc., Cambridge, Mass., for Battelle, Ventura Office, CA, USA. 92 s.
- Mann, D. A., Higgs D. M., Tavalga W. N., Souza M. J., and Popper A. N. (2001). Ultrasound detection by clupeiform fishes. *Journal of the Acoustic Society of America*. 109: 3048 – 3054.
- Matishov, G.G. 1992. The reaction of bottom-fish larvae to airgun pulses in the context of the vulnerable Barents Sea ecosystem. Contr. Petro Piscis II '92 F-5, Bergen, Norway, 6-8 April, 1992. 2 s.
- McCauley, R. D., Fewtrell, J., Duncan, A.J., Jenner, C., Jenner, M-N., Penrose, J.D., Prince, R.I.T., Adhitya, A., Murdoch, J., and McCabe, K.. 2000. Marine seismic surveys – a study of environmental implications. *APPEA JOURNAL* 2000: 692-708.
- McCauley, R.D., Fewtrell, J., and Popper, A.N. 2003. High intensity anthropogenic sound damages fish ears. *Journal of the Acoustic Society of America*. 113, 638-642.
- Midling, K., Soldal, A.V., Fosseidengen, J.E., and Øverdal, J.T. 2002. Calls of Atlantic cod: does captivity restrict their vocal repertoire? *Bioacustics*. 12, 233-235.
- Myrberg, Jr, A.A. 1981. Sound communication and interception in fishes. In Tavalga, W.N., Popper, A.N. and Fay, R.R. (eds.) *Hearing and Sound Communication in Fishes*. New York: Springer Verlag: 395-426.
- Nedwell, J. R., Needham, K., Turnpenny, A. W. H., and Thompson, D. 1999. Measurement of sound during a 3D seismic survey in blocks 14/14a of the North Sea. Subacoustech report 356R0108, Hants, UK. 54 s.
- Neil, D.M. 1974. The mechanism of statocyst operation in the mysid shrimp *Praunus flexuosus*. *Journal of Experimental Biology*. 62: 685-700.
- Newman, P. 1978. Water gun fills marine seismic gap. *The Oil and Gas Journal*, Aug. 1978: 138-150.
- Noreide, J.T. and Kjellsby, E. (1999). Sound from spawning cod at their spawning grounds. *ICES Journal of Marine Science*. 56: 326-332
- Pearson, W.H, Skalski, J.R., and Malme, C.I. 1987. Effects of Sounds from a Geophysical Survey Device on Fishing Success. OCS Study MMS-86-0032. Prepared by BBN Laboratories Inc., Cambridge, Mass., og Battelle, Marine Research Laboratory, Washington, contract No. 14-12-0001-30273, to the Department of the Interior, Mineral Management Service, Pacific Outer Continental Shelf Region, Los Angeles, California. 293 s.
- Pearson, W.H., Skalski, J.R., and Malme, C.I. 1992. Effects of sounds from a geophysical survey device on behavior of captive rockfish (*Sebastes* spp). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 49(7): 1343-1356.

- Pearson, W.H., Skalski, J.R., Sulkin, S.D., and Malme, C.I. 1994. Effects of Seismic Releases on the Survival og Development of Zoeal Larvae of Dungeness Crab (*Cancer magister*). *Marine Environmental Research*. 38: 93-113.
- Pettersen, L. 1980. Frekvensdiskriminering hos ulke (*Cottus scorpius*), en fisk uten svømmeblære. Hovedfagsoppgave, Universitetet i Oslo.
- Pie, M.R., Boeger, W.A., Ostrensky, A., Vianna, R.T., and Cardoso, M.F. 2008. Does seismic prospecting impact zooplankton? *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. (submitted).
- Poléo, A.B.S., Johannessen, H.F., and Harboe, M. 2001. High voltage direct current (HVDC) sea cables and sea electrodes: effects on marine life. 1st revision of the literature study. University of Oslo, Report, 50 s.
- Popper, A.N. and Fay, R.R. 1997. The auditory periphery in Fishes. In Fay, R.R. and Popper, A.N. (eds.) *Comparative Hearing: Fish and Amphibians*. New York, Springer Verlag: 43-100.
- Popper, A.N., Fay., R.R., Platt, C., and Sand, O. 2003. Sound detection Mechanisms and capabilities of teleost fishes. In Collin, S. P. and Marshall, N.J. (eds.) *Sensory Processing in Aquatic Environments*. New York, Springer Verlag: 1-38.
- Popper, A.N., Plachta, D.T.T., Mann, D.A., and Higgs, D. 2004. Response of clupeid fish to ultrasound: a review. *ICES Journal of Marine Science*. 61(7): 1057-1061.
- Popper, A.N., Smith, M.E., Cott, P.A., Hanna, B.W., MacGillivray, A.O., Austin, M.E., and Mann, D.A. 2005. Effects of exposure to seismic airgun use on hearing of three fish species. *Journal of the Acoustic Society of America*. 117 (6): 3958-3971.
- Rodgers, P.H. and Zeddies, D.G. 2008. Multipole mechanisms for directional hearing in fish. In Webb, J.T., Popper, A.N. and Fay, R.R. (eds.) *Fish Bioacoustics*. New York, Springer Verlag: 233-253.
- Richardson, W.J., Greene, C.R.J., Malme, C.I., and Thomson, D.H. 1995. *Marine Mammals and Noise*. San Diego. Academic Press.
- Sand, O. and Enger, P.S. 1973. Evidence for an auditory function of the swimbladder in the cod. *Journal of Experimental Biology*. 59: 405-414.
- Sand, O. and Hawkins, A.D. 1973. Acoustic properties of the cod swimbladder. *Journal of Experimental Biology*. 58: 797-820.
- Sand, O. and Karlsen, H. E. 1986. Detection of infrasound by the Atlantic cod. *Journal of Experimental Biology*. 125: 197-204.
- Sand, O. and Karlsen, H. E. 2000. Detection of infrasound and linear acceleration in fish. *Philosophical Transactions of the Royal Society, London B* 355: 1295-1298.

- Santulli, A., Modica, A., Messina, C., Deffa, L., Curatolo, A., Rivas, G. Fabi, G., and D'Amello, V. 1999. Biochemical responses of European sea bass (*Dicentrarchus labrax* L.) to the stress induced by offshore experimental seismic prospecting. *Marine Pollution Bulletin*. 36(12): 1105-1114.
- Sars, G.O. 1870. Carcinologiske bidrag til Norges fauna. De ved Norges kyster forekommende mysider. Bind I-III. Christiania, Brøgger og Christie's bogtrykkeri.
- Schlundt, C.E., Finneran, J.J., Carder, D.A., and Ridgway, S.H. 2000. Temporary shift in masked hearing thresholds of bottlenose dolphins and white whales after exposure to intense tones. *Journal of the Acoustic Society of America*. 107: 3496-3508.
- Schuijf, A. 1975. Directional hearing of cod under approximate free field conditions. *Journal of Comparative Physiology*. 98: 307-332.
- Skalski, J.R., Pearson, W.H., and Malme, C.I. 1992. Effects of sound from a geophysical survey device on catch-per-unit-effort in a hook-and-line fishery for rockfish (*Sebastes* spp.). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 49(7): 1357-1365.
- Slotte, A., Hansen, K., Dalen, J., and Ona, E. 2004. Acoustic mapping of pelagic fish distribution og abundance in relation to a seismic shooting area off the Norwegian west coast. *Fisheries Research*. 67 (2004): 143–150.
- Skaar, K.L. 2004. Effects of seismic shooting on the lesser sandeel (*Ammodytes marinus* Raitt) - a field study with grab sampling and *in situ* video observations. Cand. Scient. thesis. Biologisk Institutt, Universitetet i Bergen, Desember 2004.
- Smedsrud, M., and Tollefsen, D. 2007. Test of PlaneRay propagation model for selected low-frequency scenarios. Forsvarets forskningsinstitutt (Norwegian Defence Research Establishment), FFI-notat 2007/00921, March 2007.
- Sonny, D., Knudsen, F.R., Enger, P.S., Kvernstuen, T., and Sand, O. 2006. Reactions of cyprinids to infrasound in a lake and at the cooling water inlet of a nuclear power plant. *Journal of Fish Biology*. 69:735-748
- Southall, B.L., Bowles, A.E., Ellison, W.T., Finneran, J.J., Gentry, R.L., Greene Jr., C.R., Kastak, D., Ketten, D.R., Miller, J.H., Nachtigall, P.E., Richardson, W.J., Thomas, J.A., and Tyack, P.L. 2007. Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Initial Scientific Recommendations. *Aquatic Mammals*. 33(4): 427-436.
- Thompson, A. and Taylor, B.N. 2008. Guide for the Use of the International System of Units (SI). NIST Special Publication 811. 2008 Edition. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899, US. 89 s.
- Thurnpenny, A.W.H. and Nedwell, J.R. 1994. The Effects on Marine Fish, Diving Mammals and Birds of Underwater Sound Generated by Seismic Surveys. Subacoustec Ltd. report FCR 089/94. Fawley aquatic research laboratories Ltd. UK. 50 s.
- Vester, H.I., Folkow, L.P. and Blix, A.S. 2004. Click sounds produced by cod (*Gadus morhua*). *Journal of the Acoustic Society of America*. 115: 914-919.

- Waggett, R.J. and Buskey, E.J. 2008. Escape reaction performance of myelinated and non-myelinated calanoid copepods. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 361: 111-118.
- Wahlberg, M. and Westerberg, H. 2005. Hearing in fish and their reactions to sounds from offshore wind farms. *Marine Ecology Progress Series*. 288: 295-309.
- Wardle, C.S., Carter, T.J., Urquhart, G.G., Johnstone, A.D.F., Ziolkowski, A.M., Hampson, G. og Mackie, D. 2001. Effects of seismic air guns on marine fish. *Continental Shelf Research*. 0 (2001): 1-23.
- Yan, H.Y., Fine, M.L., Horn, N.S. and Colon, W.E. 2000. Variability in the role of the gasbladder in fish audition. *Journal of Comparative Physiology*. 186: 435-445.