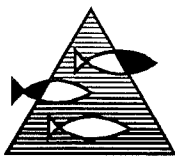


PROSJEKTRAPPORT



ISSN 0071-5638

HAVFORSKNINGSINSTITUTTET

MILJØ - RESSURS - HAVBRUK

Postboks 1870 5024 Bergen

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

Forskningsstasjonen

Flødevigen

4817 His

Tlf.: 37 01 05 80

Fax: 37 01 05 15

Austevoll

Havbruksstasjon

5392 Storebø

Tlf.: 56 18 03 42

Fax: 56 18 03 98

Matre

Havbruksstasjon

5198 Matredal

Tlf.: 56 36 60 40

Fax: 56 36 61 43

Distribusjon:

ÅPEN

HI-prosjektnr.:

10.06.1

Oppdragsgiver(e):

Fiskeridepartementet

HI

Oppdragsgivers referanse:

Rapport:

FISKEN OG HAVET

NR. 8 - 1996

Tittel:

SEISMISKE UNDERSØKELSER OG SKADER PÅ FISKEEGG
OG -LARVER.

En vurdering av mulige effekter på bestandsnivå.

Senter:

Marint miljø

Seksjon:

Fysisk oseanografi og akustikk

Forfatter(e):

Roald Sætre og Egil Ona

Antall sider, vedlegg inkl.:

25 inkl. vedlegg

Dato:

19.04.1996

Sammendrag:

Denne rapporten belyser i hvilken grad skader på egg- og larvestadiet av seismiske undersøkelser vil kunne gi målbare effekter på bestandsnivå hos fisk. Ut fra en verste tilfelle betraktning vil en typisk seismisk undersøkelse maksimalt kunne drepe ned 0.45 % av en larvebestand. Det er også beregnet en "realistisk forventningsverdi" for mulige skader. Denne reflekterer det man i gjennomsnitt ville forvente ble neddrept. I en slik vurdering finner en at 0,3 promille av larvebestanden vil kunne dø som følge av en typisk 3D seismisk undersøkelse. De forventede dødelighetsratene en larvebestand kan påføres av en seismisk undersøkelse, er så lave i forhold til de naturlige, at virkningen på bestandsnivå må anees som ubetydelig. Det er derfor ingen grunn til å legge restriksjoner på seismiske undersøkelser ut fra hensyn til skader på fiskeegg, - larver og yngel.

Emneord - norsk:

1. Seismisk skyting
2. Fiskeegg og -larver
3. Rekruttering

Emneord - engelsk:

1. Seismic surveys
2. Fish eggs and larvae
3. Recruitment

Prosjektleder

Senterleder

R 4408

INNHold

	Side
SUMMARY	3
SAMMENDRAG	4
1. INNLEDNING	5
2. EFFEKTER AV SEISMISKE UNDERSØKELSER PÅ BESTANDSNIVÅ	7
2.1 Metodikk	7
2.2 Arealmessig belastningsgrad (p_1)	8
2.3 Kanonfeltets dekningsgrad (p_2)	11
2.4 Overlappingsarealet mellom larver og seismikk (p_3)	13
2.5 Vertikal overlapping (p_4)	15
2.6 Oppsummering	16
2.7 Konklusjon	17
3. REFERANSER	18
4. VEDLEGG 1. Formelverk for beregning av den andel av kanonfeltets risikovolum som må karakteriseres som dødelighetsvolum (p_2)	

SUMMARY

Since the early 1960s seismic surveying has been carried out on the Norwegian continental shelf in relation to oil and gas exploration. Seismic surveys may have a harmful effect on the early life stages of fish when their capacity to escape is limited. It has been demonstrated that in the near zone around a single airgun or a group of airguns, significant quantities of fish eggs and larvae may be killed. It is still not quite clear whether such damage on an individual level has any impact on the recruitment to the fish stocks.

It is difficult to assess the consequences of seismic surveying on a fish population level based on an accurate description of risk distribution. The basic knowledge for such an assessment is too weak. This report is therefore mainly based on a "worst-case" scenario.

The fraction, M , of the total larval population which may die as a result of a seismic survey may be expressed by the following equation:

$$M = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4$$

where

- p_1 = area impact, i.e. the proportion of the seismic survey area which is classified as a risk area for fish larvae.
- p_2 = the proportion of the risk volume of the airgun array which is characterised as a damage/death volume.
- p_3 = the proportion of the total larvae distribution area affected by the seismic survey.
- p_4 = the degree of overlap between the risk volume and the larval vertical distribution.

From the assessment made in this report it is concluded that the ratios p_1 to p_4 will vary within the following limits:

$$\begin{aligned} 0.1 < p_1 < 0.3 \\ 0.1 < p_2 < 0.3 \\ 0 \leq p_3 < 0.1 \\ 0.2 < p_4 < 0.5 \end{aligned}$$

The basic assumptions are the following:

The lethal radius for each airgun is 2 m and the distance between the seismic survey tracklines is 100 m. By applying the maximum values for each of the involved parameters, $M = 0.0045$. This means that a seismic survey may under unfavourable conditions kill 0.45 % of the total larval population.

In addition to such a worst case-scenario, the report makes an attempt to calculate a realistic expectation value for each of the ratios p_1 to p_4 . This may be more representative of what may be killed on average. From this assessment only 0.3 % of the larval population may die as the result of a typical 3D seismic survey.

The expected daily mortality rates caused by a seismic survey are so low compared to the natural mortality rates that the impact of a seismic survey on recruitment to a fish stock must be regarded as insignificant. Therefore, there appears to be no reason to impose regulations on seismic surveying with respect to the possible harmful effects they may have on fish eggs and larvae alone.

SAMMENDRAG

Siden tidlig på 60-tallet har det vært utført seismisk skyting på den norske kontinentalsokkelen for å kartlegge olje- og gassressursene. Seismiske undersøkelser kan skade de unge stadiene i fiskens liv hvor organismene har begrensede muligheter for å flykte unna. Undersøkelser har dokumentert at i nærheten rundt en luftkanon kan en drepe ned vesentlige mengder av egg, larver og yngel. Det er likevel fortsatt uklart om slike skader på individnivå har noen betydning for en rekruttering til bestanden. Hensikten med denne rapporten er derfor å belyse i hvilken grad skader på egg- og larvestadiet av seismiske undersøkelser vil kunne gi målbare effekter på bestandsnivå hos fisk. I en etterfølgende rapport vil det bli gjort en mer fullstendig konsekvensvurdering når det gjelder effekten av seismiske undersøkelser på fisk og fiskerier.

Det er vanskelig å foreta en konsekvensvurdering av seismiske undersøkelser på bestandsnivå basert på en nøyaktig beskrivelse av skaderisikofordelingen. Til det er det for store mangler i de basiskunnskaper som må inngå. Denne rapporten tar derfor utgangspunkt i en verste tilfelle betraktning, der vi prøver å tallfeste hvor stor andel av en larvebestand som i verste tilfelle kan bli drept av en typisk 3D seismisk undersøkelse.

Videre er det forsøkt å anslå en mer realistisk verdi for hvor stor andel av bestanden som i middel kan bli drept av en seismisk undersøkelse.

Den andelen M av en total larvepopulasjon som vil dø, som følge av en seismisk undersøkelse kan uttrykkes ved hjelp av følgende enkle ligning:

$$M = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4$$

hvor

- p_1 = arealmessig belastningsgrad dvs. den andel av det seismiske undersøkelsesarealet som klassifiseres som risikoareal for fiskelarver.
- p_2 = andel av kanonfeltets risikovolum som må karakteriseres som død/skadevolum.
- p_3 = andel av fiskelarvenes totale utbredelsesareal som berøres av de seismiske undersøkelsene.
- p_4 = graden av overlapping mellom risikovolum og fiskelarvenes vertikalfordeling.

Ut fra de vurderinger som er gjort i denne rapporten vil de enkelte forholdene p_1 til p_4 ha følgende sannsynlige variasjonsområder:

$$\begin{aligned} 0.1 < p_1 < 0.3 \\ 0.1 < p_2 < 0.3 \\ 0 \leq p_3 < 0.1 \\ 0.2 < p_4 < 0.5 \end{aligned}$$

Her har vi lagt til grunn følgende antagelser: Dødelighetsradius for luftkanonene, $r = 2$ m, avstanden mellom kurslinjene i den seismiske undersøkelsen, $L = 100$ m, og dødelighetsvolumet er sylindrisk til overflaten. Bruker man de maksimale tallene for de enkelte forholdene får en at $M = 0.0045$. Dette betyr at en typisk seismisk undersøkelse maksimalt kan

drepe ned 0.45% av en larvepopulasjon under ugunstige omstendigheter.

I tillegg til en slikt verste tilfelle verdi forsøker rapporten også å gi en "realistisk forventningsverdi" til hver enkel av parametrene p_1 til p_4 . Dette vil reflektere det vi i gjennomsnitt ville forvente ble neddrept av en seismisk undersøkelse. Ut fra en slik vurdering vil 0.3 promille av larvepopulasjonen kunne dø som følge av en typisk 3D seismisk undersøkelse.

De forventede daglige dødelighetsrater som kan påføres av en seismisk undersøkelse er så lave i forhold til de naturlige dødelighetsrater i en larvepopulasjon, at virkningen på bestandsnivå må ansees som ubetydelig. Det er derfor ingen grunn til å legge restriksjoner på seismiske undersøkelser ut fra hensyn til skader på fiskeegg, -larver og yngel

1. INNLEDNING

Siden tidlig på 60-tallet har det vært utført seismisk skyting med luftkanoner på den norske kontinentalsokkelen for å kartlegge olje- og gassressursene. Omfanget av denne aktiviteten har vært sterkt økende. I 1974 ble det «skutt» ca. 40.000 linjekilometer mens en i de siste årene har vært oppe i over 300.000. I tillegg til at innsatsen på de tradisjonelle leteområdene i Nordsjøen har økt, er letearealet betydelig utvidet i og med at områdene nord for 62° N i sterkere grad er kommet med. Når leteområdene utvides og leteintensiteten økes, blir stadig flere av våre viktigste fiskefelt utsatt for seismiske undersøkelser, og skytevirksomheten kommer ofte i konflikt med fisket.

Seismiske undersøkelser kan virke inn på enkelt-fisk, bestander og fiskerier enten gjennom direkte fysiologiske effekter eller gjennom adferdsendringer. De fysiologiske effektene gjør seg først og fremst gjeldende på de unge stadiene i fiskens liv som egg, larver og yngel som har begrensede muligheter for å flykte unna. Man deler ofte disse effektene opp i

- øyeblikkelig dødelighet
- dødelighet over tid
- ikke dødelige skader

En seismisk undersøkelse til havs kan utføres som en 3-dimensjonal undersøkelse (3D) med meget kort avstand mellom kurslinjene eller som en 2-dimensjonal undersøkelse (2D) med mindre tette kurslinjer. Et seismikkfartøy som utfører 3D undersøkelser, sleper etter seg et luftkanonfelt som består av 20 - 60 luftkanoner av ulike størrelser, og en eller flere hydrofonkabler. Fartøyets kurslinjer kan ha en typisk avstand på 50 til 500 m, farten er 4-5 knop, og kanonene avfyres med tidsintervaller mellom 7 til 20 s. Ved 2D undersøkelser er kurslinjeavstandene større, mellom 0,5 og 10 km, mens de øvrige parametre kan være som for 3D-undersøkelser (DALEN 1994).

Antall linjekilometer skutt kan imidlertid være like i de to kartleggingsmåtene, mens belastning pr. arealenhet er vesentlig lavere for 2D undersøkelser. Dersom utbredelsesområdet for larver er lite vil en 3D undersøkelse med høy arealmessig belastningsgrad, kunne være mer skadelig for larvebestanden. Vi har derfor benyttet en slik undersøkelse som bakgrunn for denne vurderingen.

Siden slutten av 80-årene har det vært en utvikling mot såkalte dobbelkildeoppsett og fra 1992 har også trippelkildeoppsett vært i bruk. Et dobbelkildeoppsett består av et fartøy som har to luftkanonfelt; ett på hver side av fartøyets lengdemidtlinje. Et trippelkildeoppsett er et fartøy som har tre luftkanonfelt; ett langs fartøyets lengdemidtlinje og ett på hver side av denne. Ved flerkildeoppsett vil disse bli avfyrt vekselvis (DALEN 1994).

Ved avfiring av en luftkanon vil høykomprimert luft i kanonkammeret strømme raskt ut. Endel av den lagrede energien blir da omdannet til en lydølge hvor den første delen av trykkpuls er positiv, dvs. at trykket øker. Denne pulsen blir umiddelbart fulgt av en negativ trykkdel hvor trykket blir lavere enn omgivelsestrykket. Fisk som utsettes for en positiv trykkpuls vil få en sammentrykking av alle organer. I den negative trykkfasen av pulsen vil disse organene utvides. Hvis trykkforskjellen er stor og utvikles raskt nok vil indre organer, særlig svømmeblæren, kunne rives i stykker og fisken vil kunne dø (Booman *et al.* 1996).

Når luften fra kanonkammeret strømmer ut vil det resultere i oppstigende luftbobler i stor fart over kanonoppsettet. Larver og yngel som befinner seg i volumet over luftkanonene kan da bli raskt ført til overflaten sammen med luftboblene. Den raske oppstigningen kan føre til at svømmeblæren sprenses eller at den nøytrale likevekten forstyrres slik at larvene flyter opp til overflaten og lettere blir tilgjengelig som bytte for fugl.

I juli 1989 ble det observert stor dødelighet på torsk i oppdrett i Altafjorden etter bruk av sprengstoff. Dette gjorde at det ble stor oppmerksomhet omkring mulige skadeeffekter på fisk til havs fra seismiske undersøkelser. I perioden 1991-1993 ble det så fra Oljeindustriens Landsforening, Nærings- og energidepartementet, Oljedirektoratet, Forsvarsdepartementet og Samferdseldepartementet bevilget midler til endel forsknings-prosjekter innen problemområdet seismikk/fisk. Midlene ble kanalisert gjennom det daværende Norges Fiskeriforskningsråd (NFFR). Havforskningsinstituttet utførte prosjekter på to områder:

- Effekter av støy fra luftkanoner på fangst og fangsttilgjengelighet av fisk (LØKKEBORG og SOLDAL 1993, ENGAS *et al.* 1993).
- Effekter av luftkanonskyting på fiskeegg,-larver og -yngel på individnivå. (HOLMSTRØM 1993, BOOMAN *et al.* 1996).

Seismiske undersøkelser kan virke inn på fisk og fiskeriene ved at

- de dreper ned egg, larver og yngel
- de skremmer fisken vekk fra fangstfeltene
- de kan forstyrre gytevandringen og gyteprosessen.

Denne rapporten vil kun behandle effekter som er knyttet til det første av disse tre punktene. I en etterfølgende rapport vil det bli gjort en mer fullstendig konsekvensvurdering når det gjelder effekten av seismiske undersøkelser for fisk og fiskerier. Det er dokumentert at seismiske undersøkelser kan føre til død og skader på individnivå hos fiskeegg, -larver og yngel. Det er likevel fortsatt uklart om dette har noen vesentlig betydning for rekruttering til bestanden. Hensikten med denne rapporten er derfor å belyse i hvilken grad skader på egg- og larvestadiet av seismiske undersøkelser vil kunne gi målbare effekter på bestandsnivå hos fisk. Den har forvaltning og næring som målgrupper. For å gjøre den mest mulig leservennlig er de fleste litteraturreferanser i den senere teksten utelatt. Referanselister, som også omfatter utenlandske undersøkelser, finnes imidlertid i de rapportene som er referert ovenfor. All informasjon om fordeling i tid og rom av fiskeegg, larver og yngel er i det vesentligste hentet fra rapportene fra Havforskningsinstituttets egg og larveprogram (HELP). Fullstendig liste over disse finnes i avslutningsrapporten for programmet (FOSSUM og ØIESTAD (redaktører) 1992).

2. EFFEKTER AV SEISMISKE UNDERSØKELSER PÅ BESTANDSNIVÅ

2.1 Metodikk

Energien fra luftkanonoppsettet avtar med økende avstand fra kilden. Skal seismisk aktivitet kunne ha noen virkning på fisk, må denne befinne seg innenfor et område rundt kanonfeltet hvor fisken kan registrere den akustiske energien fra dette, dvs. innen influenssonen (Fig. 1). Når fisk blir påvirket av et kraftig akustisk signal i det hørbare frekvensområdet, så er unnvikelse den første reaksjonen. Fisk over en viss størrelse vil flykte unna og derved ikke komme inn i risikosonen. Fiskelarver og -yngel derimot, har liten kapasitet til å svømme vekk.

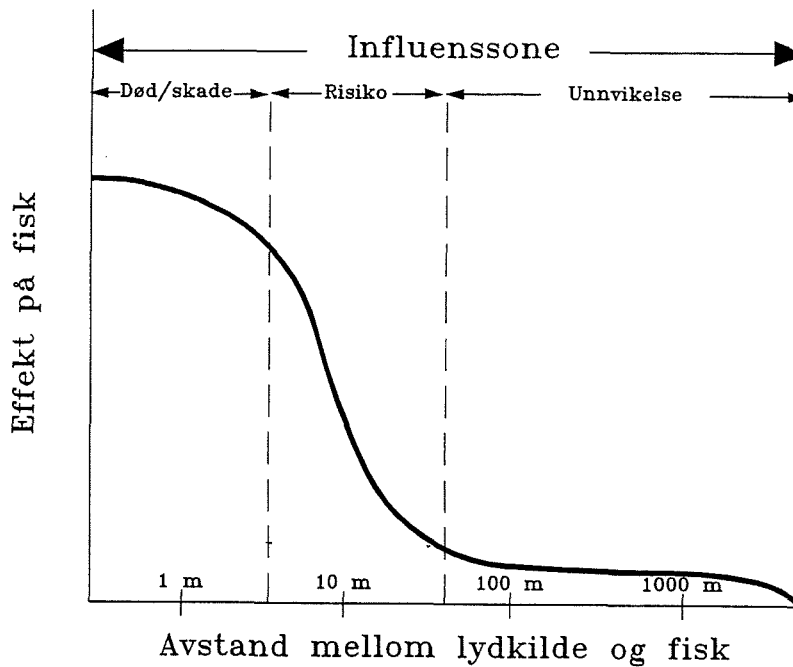


Fig. 1. De ulike påvirkningssonene for fisk omkring et luftkanonoppsett.
(The different impact zones for fish around an airgun array)

I død/skadesonen vil fiskelarver og -yngel enten bli drept umiddelbart eller få så store skader at sannsynligheten for overleving er liten. Andre skader kan være av en slik art at fisken har mulighet for å overleve. I denne rapporten har vi valgt også å legge disse inn i død/skadesonen. Dette betyr at for de beregninger som gjøres her vil alle larver hvor en kan registrere fysiologiske skader av seismisk skyting bli regnet som tapt for larveproduksjonen.

Størrelsen av død/skadesonen rundt luftkanonen er avhengig av art og stadium på egg og larver. Resultatene i BOOMAN *et al.* (1996) og fra utenlandske forsøk viser at hovedtyngden av skadeeffektene er begrenset til en radius på omlag 2 meter fra luftkanonene. Selv om mindre effekter også er rapportert utover denne avstanden, har vi her definert 2 m som dødelighetsradius og forutsatt 100 % dødelighet innenfor denne avstanden. Dersom dødelighetsradius skulle økes utover 2 m ville en samtidig måtte redusere dødeligheten til vesentlig under 100 %. Ved å anta full dødelighet innenfor 2 m regnes derfor også skader utenfor denne avstanden som inkludert.

Det er vanskelig å foreta en konsekvensvurdering av seismiske undersøkelser på bestandsnivå basert på en nøyaktig beskrivelse av skaderisikofordelingen. Dette skyldes at det er store mangler i de basiskunnskaper som må inngå i slike beregninger. Vi vil derfor ta som utgangspunkt i denne vurderingen det verst tenkelige tilfellet og så nyansere dette ut fra sannsynlighets- og rimelighetsbetraktninger.

Utgangspunktet for denne konsekvensvurderingen er en typisk tredimensjonal seismisk undersøkelse på 500 km². Det seismiske fartøyet tauer da et kanonoppsett som kan være utformet som en enkel, dobbel eller trippel energikilde samt en eller flere hydrofonkabler. Antall kilder og hydrofonkabler bestemmer hvor mange samtidige registreringslinjer eller seismiske linjer langs fartøyets kurs man har. Vanligvis er dette 4 til 6 og avstanden mellom dem 25 m. Jo flere registreringslinjer en har, jo større avstand vil det være mellom fartøyets kurslinjer. Når bare en lydkilde brukes, avfyres kanonoppsettet vanligvis hvert 10. sekund dvs. hver 25 m langs fartøyets kurslinje når fartøyet holder en fart på 5 knop. Belastningen er størst ved en tredimensjonal seismisk undersøkelse ved bruk av bare en lydkilde og en kabel når avstanden mellom de seismiske linjene er konstant.

Den andelen M av en total larvepopulasjon som vil dø som følge av en seismisk undersøkelse, kan uttrykkes ved hjelp av følgende enkle ligning:

$$M = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \quad (1)$$

hvor

p_1 = arealmessig belastningsgrad, dvs. den andel av det seismiske undersøkelsesarealet som klassifiseres som risikoareal for fiskelarver.

p_2 = andel av kanonfeltets risikovolum som må karakteriseres som død/skadevolum.

p_3 = andel av fiskelarvenes totale utbredelsesareal som berøres av de seismiske undersøkelsene.

p_4 = graden av overlapping mellom risikovolum og fiskelarvens vertikalfordeling.

Vi vil nå ta for oss hver av disse fire forholdene for å vurdere rimelige og sannsynlige verdier av disse.

2.2 Arealmessig belastningsgrad (p_1)

I en seismisk undersøkelse vil det innenfor undersøkelsesarealet bare være en del av vannvolumet som belastes med så høyt lydnivå at det kan skade fiskelarver. Vi vil først beregne en typisk arealmessig belastningsgrad ved å beregne hvor stor andel av det totale undersøkelsesarealet som blir dekket av skudd fra kanonfeltet. Som typisk størrelse for arealet i en seismisk undersøkelse har vi benyttet 500 km².

Kanonfeltet betraktes først som et enkelt, rektangulært areal som slepes med konstant fart gjennom undersøkelsesområdet, og feltet avfyres til faste tidsintervaller. Arealet som totalt dekkes av feltet, utvidet med en gitt dødelighetsradius, r, betegnes som risikoarealet. Dette kan beregnes når typiske verdier for feltstørrelse, linjetetthet, skuddtakt og slepefart er gitt. Arealmessig belastningsgrad beregnes som forholdet mellom det totale risikoarealet, A_r , og undersøkelsesarealet, A_u :

$$p_1 = \frac{A_r}{A_u}$$

Avhengig av operatørselskap og undersøkelsestype benyttes ulike oppbygginger av luftkanonfeltet. Noen eksempler er gitt i BOOMAN *et al.* (1996). Et felt med mange enkle kanoner med begrenset utstrekning gir størst arealmessig belastning inne i feltet. Vi har benyttet et kanonfelt fra Geco-Prakla, (ENGÅS *et al.* 1993) i vårt eksempel (Fig.2). Kanonfeltet har en bredde på 20 m og en lengde på 18.5 meter, med 18 separate kanoner i tre rekker med totalt kammervolum på 82.1 liter. I beregningene er det brukt 20 x 20 m som størrelse på kanonfeltet.

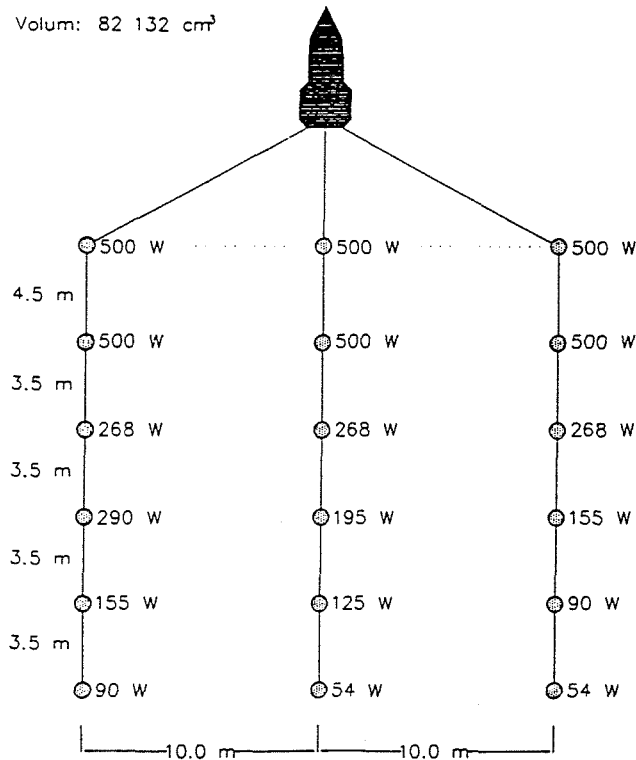


Fig. 2. Rigging av luftkanonfelt på seismikkfartøyet "Akademik Shatskiy" (ENGÅS *et al.* 1993).
*(The airgun array used by the seismic vessel "Akademik Shatskiy", ENGÅS *et al.* 1993).*

Ved å ta hensyn til en gitt dødelighetsradius for hver enkelt kanon i feltet, utvides feltets risikoareal pr. skudd, (A_f), med 2 ganger dødelighetsradius i hver retning, slik at :

$$A_f = (20 + 2r)(20 + 2r)$$

Slepefarten benyttet i ENGÅS *et al.* (1993) var 4.8 knop, og det ble skutt hvert 10. sekund, d.v.s. hver 25 meter. Linjeavstanden i dette forsøket var 125 meter.

Både skuddtakt og linjeavstand varierer fra undersøkelse til undersøkelse og vil være avhengig av om det slepes ett eller flere felt, og om det slepes en eller flere lyttekabler. Imidlertid er vi interessert i en maksimal dekningsgrad under 3D undersøkelser. Med ett felt vil den gitte skuddtaket og slepefarten, i følge Geco-Prakla, Stavanger (LARS JENSEN, pers. medd.) gi maksimal dekningsgrad dersom linjeavstanden er 100 meter. Når en i mer moderne oppsett

sleper to tilsvarende kanonfelt parallelt benyttes ofte en feltavstand på 50 meter, men feltene avfyres da vekselvis, dvs. med 50 meters skuddavstand langs enkeltfeltets kurs. Dette gir derfor en tilsvarende total arealmessig belastning som vårt eksempel dersom linjeavstanden er den samme. Med doble felt slepes i dag imidlertid ofte opptil 6 lyttekabler, slik at linjeavstanden kan økes til 250 - 300 meter.

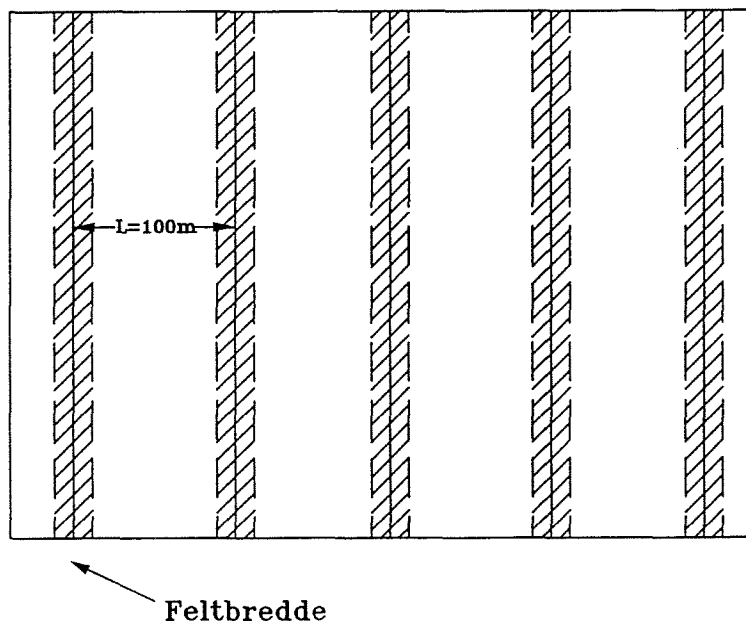


Fig. 3. Arealmessig dekningsgrad av et seismisk skytefelt som funksjon av feltbredden, $20 + 2r$, og avstanden mellom kurslinjene, L .
(Ratio of area coverage for a seismic survey area as a function of the width of the airgun array, $20 + 2r$, and the distance between the survey tracks, L).

Med en skuddtakt som gir tilnærmet full overlapping langs kurslinjen, som i vårt eksempel, vil dekningsgraden bare bli avhengig av feltbredden og linjeavstanden (Fig. 3) dvs:

$$p_1 = \frac{20 + 2r}{L}$$

Dette betyr at den maksimalt forventede arealmessige dekningsgraden når vi bruker dødelighetsradius på 2 meter er 0.24, eller 24% av undersøkelsesarealet. Med et mer moderne oppsett med flere lyttekabler og 250 m linjeavstand vil p_1 reduseres til omlag 0.1, eller 10% av undersøkelsesarealet.

Dette tallet angir nå i første omgang hvor stor andel av larvene som utsettes for en gitt risiko ved at de befinner seg inne i arealet dekket av kanonfeltet. For at larvene skal bli skadet må de imidlertid befinne seg inne i nærområdet til selve luftkanonene, og vi skal derfor videre beregne hvor stor andel av risikovolumet som kan betraktes som dødelighetsvolum.

2.3 Kanonfeltets dekningsgrad (p_2)

Luftkanonene i feltet slepes normalt i 5 - 8 meters dyp og det er kun et gitt vannvolum rundt de enkelte kanonene som utgjør dødelighetsvolumet for fiskelarver og yngel. I beregningen av den arealmessige belastningsgrad, p_1 , brukte vi et risikoareal pr. skudd på $(20+2r)(20+2r)$, som ved å utvides i dybderetningen til å dekke 10 meters dyp kan defineres som et risikovolum:

$$V_f = (20 + 2r) \cdot (20 + 2r) \cdot 10$$

Kanonfeltets dekningsgrad angir hvor stor andel av risikovolumet som må betraktes som dødelighetsvolum for fiskelarver. Vi må derfor beregne dødelighetsvolumet for hver enkelt kanon og summere dette opp for antall kanoner i feltet.

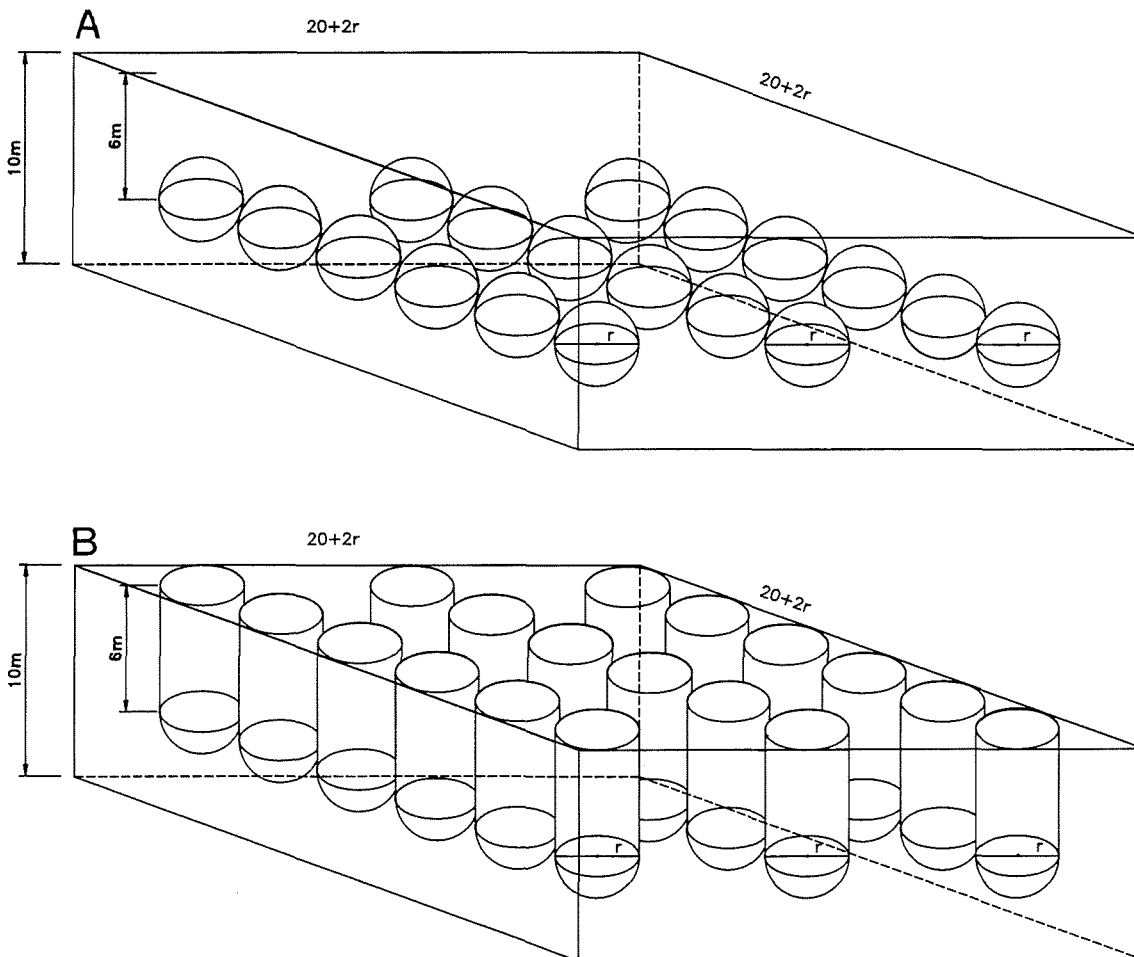


Fig. 4. Volummessig dekningsgrad, dvs. andel av risikovolumet som er dødelighetsvolum ved A) kuleformet dødelighetsvolum. B) sylindrerformet dødelighetsvolum. (Volumetric ratio of coverage, i.e. the ratio of the risk volume to be regarded as mortality volume for A) spherical mortality volume. B) cylindrical mortality volume).

For kanonfeltet benyttet i ENGÅS *et al.* (1993), som ble slept i 6 m dyp, er totalt dødelighetsvolum og dekningsgrad for feltet beregnet som funksjon av dødelighetsradius, r , med to ulike modeller for formen på dødelighetsvolumet (Fig. 4).

- A: Dødelighetsvolumet er kuleformet med radius r rundt kanonen.
- B: Dødelighetsvolumet er kuleformet under kanonen og som en sylinder over kanonen
Radius i begge er r .

Utvidelsen av dødelighetsvolumet fra en ren kulemodell til en kombinert kule- og sylindermode ll er gjort fordi det ikke er klart i hvilken grad den voldsomme turbulensen som skapes av luften frigitt fra kanonene under skyting vil skade fiskelarver. En rask transport av larver fra 6 meters dyp til overflaten i luftstrømmen fra kanonen vil potensielt kunne skade svømmeblæren og larvens flyteevne. I enkle forsøk på å dokumentere en slik effekt for postlarver, utført i BOOMAN *et al.* (1996), observerte en økt dødelighet i eksponerte grupper. Det var imidlertid vanskelig å trekke noen entydig konklusjon fra forsøkene fordi larvene ikke fordelte seg jevnt i forhold til kanonen under skyting. I en verste tilfelle betraktning velger vi derfor å inkludere vannvolumet over kanonene som et mulig dødsvolum.

Formelverket for beregning av dødelighetsvolum og dekningsgrad er gitt i VEDLEGG 1, og resultatene fra beregningene oppsummert i Tabell 1. For det gitte kanonfeltet får vi overlapping mellom dødelighetsvolumene når dødelighetsradius er større enn 2 meter. Dette er det tatt hensyn til under beregningen.

Tabell 1. Beregnet dekningsgrad, p_2 , for kanonfeltet som funksjon av dødelighetsradius, r , for hhv.kuleformet, V_k , og sylindereformet, V_s , dødelighetsvolum. V_f = risikovolum for kanonfeltet, 0-10 m dyp.

(Calculated ratio of coverage, p_2 , for the airgun array as a function of the mortality radius, r , for a spherical, V_k and a cylindrical, V_s , mortality volum. V_f = risk volume for the airgun array, 0-10 m depth).

r (m)	V_k (m ³)	V_s (m ³)	V_f (m ³)	p_2 -kule	p_2 -sylinder
0.5	9	86	4410	0.002	0.019
1.0	72	360	4840	0.015	0.074
1.5	243	851	5290	0.046	0.161
2.0	576	1584	5760	0.100	0.275
2.5	1073	2377	6250	0.172	0.380
3.0	1704	3210	6750	0.252	0.475
3.5	2480	4120	7290	0.340	0.565
4.0	3408	5119	7840	0.434	0.652

Av Tabell 1 fremgår det at ved en gitt dødelighetsradius, $r = 2$ m, der kanonen blir betraktet som en punktkilde, så er dødelighetsvolumet inne i kanonfeltet 10 - 27% av feltets risikovolum avhengig av hvilken form en gir dødelighetsvolumet. Først ved dødelighetsradius på 5-6 m vil en oppnå en tilnærmet full dekning av risikovolumet, dvs. at $p_2 = 1$.

2.4 Overlappingsarealet mellom larver og seismikk (p₃)

For at en larvebestand skal bli skadet må en seismisk undersøkelse dekke en vesentlig del av utbredelsesområdet for bestanden. Størrelsen for en typisk seismisk 3 D undersøkelse er satt til 500 km², og p₃ skal utrykke hvor stor andel av en larvebestand som i verste tilfelle kan bli berørt av en slik undersøkelse.

Evnen til å unngå risikovolumet rundt luftkanonfeltet øker med økende alder og dermed lengden av fisken. Den vitenskapelige litteraturen indikerer at når fisken er 40 - 50 mm lang har de fleste arter tilstrekkelig unngåelsesevne men usikkerheten på dette punktet er stor. I vår vurdering har vi derfor antatt at larver og yngel ikke har kapasitet til å unngå risikovolumet.

Sild og lodde legger eggene sine på bunnen hvor de i middel vil klekkes etter henholdsvis 20 og 45 dager. De øvrige kommersielle arter gyter pelagisk bortsett fra ueren som føder levende unger. Gyte- og klekkeforløpet skjer vanligvis i løpet av 1 - 2 måneder.

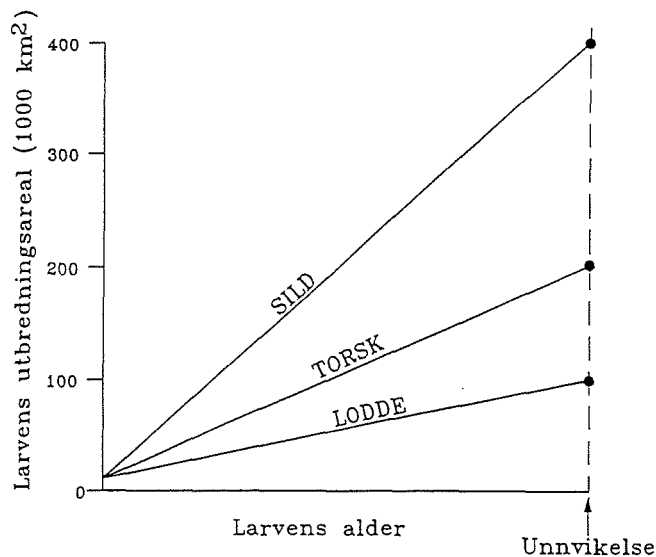


Fig. 5. Typiske utbredelsesareal for fiskelarver som funksjon av art og alder.
(Characteristic distribution areas for fish larvae according to species and age).

Etter gyting og klekking vil eggene og fiskelarvene bli transportert og spredt av strøm og vind samtidig som deres utbredelsesareal øker (Fig. 5). Arealet av gytefeltene for artene torsk, sild og lodde vil være i størrelsesorden 1000 - 10 000 km². Det maksimale utbredelsesområdet av larvene i den perioden hvor de er sårbare for seismisk aktivitet, ligger sannsynligvis i størrelsesområdet 100 000- 400 000 km².

Larvefordelingen er imidlertid karakterisert ved en flekkvis utbredelse. Typiske dimensjoner på slike konsentrasjonsområder vil være 1-1000 km². Strømforholdene langs norskekysten styres i stor grad av bunntopografien. Over bankområder etableres ofte mere eller mindre stasjonære virvler hvor det kan finne sted en oppsamling av marine organismer inkludert fiskelarver. Eksempler på slike områder for sildelarver er Buagrunden og Haltenbanken. Tromsøflaket virker som et stort oppsamlingsområde for torskelarver og -yngel i juni - juli. Opptil 90 % av bestanden kan være samlet over dette området som er på størrelse med Danmark. Slike såkalte retensjonsområder vil derfor i de aktuelle periodene være mere sårbare for seismisk aktivitet enn det øvrige utbredelsesarealet for larvene. Langs grenseflaten mellom Atlantisk vann og

Kystvann dannes ofte vandrende virvler av kortvarig karakter med typiske dimensjoner 10 - 100 km i diameter. Også i slike kan vi få en oppkonsentrering av fiskelarver. Når en gytebestand er liten vil også gyteproduktene være konsentrert i tid og rom. I slike tilfeller vil bestandens sårbarhet overfor seismisk aktivitet kunne være større enn ellers.

I forbindelse med eventuelle skadelige effekter av seismisk aktivitet på de tidlige stadier i fiskens liv er det rimelig å se på naturlige dødsrater på disse stadiene. For de vanlige fiskeslagene som torsk, sild og lodde ligger verdiene på 5 - 15 % dødelighet pr. dag for egg og larvestadiet hvorefter den daglige dødelighet reduseres til 1 - 3 % frem til 0-gruppestadiet hvor fisken er omlag et halvt år gammel. For torsk har vi en typisk reduksjon i antallet fra egg til postlarver (2 - 4 cm) fra 10^{13} til 10^9 . Dette betyr at kun ett av 10 000 egg fører frem til en postlarve.

I løpet av perioden 1965 - 1990 var variasjonen i tallrikhet på 0-gruppestadiet for torsk beregnet til 1:275 mens variasjonen for 3-åringer i samme periode hadde en variasjonsfaktor på 1:18. Dette betyr at dødeligheten etter 0-gruppestadiet bidrar til en utjevning mellom årsklassene. Årsaken er sannsynligvis tetthetsavhengig dødelighet som særlig virker inn på de årsklassene som er tallrike på 0-gruppestadiet.

Klekkingen av fiskelarvene har en spredning både i tid og rom. Det har vært reist spørsmål om hvorvidt larver fra visse tidspunkt eller områder danner ryggraden i en ny årsklasse. Er det kun larver fra et lite "vindu" i tid og rom som rekrutterer til bestanden? Dersom dette er tilfelle, vil det også få betydning for risikovurderingen av seismisk aktivitet. Undersøkelser fra sild tyder på at man noen år kan ha et slikt "vindu" mens en andre år har en jevnere overleving fra hele klekkeperioden.

Det er klart at det verste tilfelle for skadelige effekter på larvebestanden ville være at $p_3 = 1$, dvs. at skytearealet er fullstendig overlappende med fiskelarvenes utbredelsesareal. Sannsynligheten for at dette skal skje, vurderes som omtrent null selv ved et meget lite gytefelt:

Vi tenker oss et meget lite gytefelt for sild på 1 km². Herfra skjer det en kontinuerlig klekking av fiskelarver. Ved en midlere strømhastighet på 0.5 knop gjennom feltet vil larvene herfra etter ett døgn fra utslippstart ha et utbredelsesareal på omkring 100 km². Et seismisk fartøy som driver 3-D seismiske undersøkelser slik som tidligere beskrevet, vil ha en dekningskapasitet på 20 km²/døgn, dvs. omkring 20% av utbredelsesarealet etter ett døgn. I den mest intense klekkeperioden utgjør den døgnlige larveproduksjonen 2-3% av totalproduksjonen. Dette betyr at selv i løpet av første døgnnet ved dette lille gytefeltet vil den andel av den totale larveproduksjonen herfra som vil kunne berøres av den seismiske undersøkelsen maksimalt være 0.5% av totalproduksjonen. I de etterfølgende døgnene vil larvenes utbredelsesareal fortsette å ekspandere slik at en stadig mindre larveandel vil kunne berøres. Hvis vi likevel bruket tallet ovenfor som representativt for andelen av larveproduksjonen som kan influeres pr. døgn, så vil en typisk seismisk undersøkelse på 20-25 døgn maksimalt kunne påvirke 10% av larvenes utbredelsesareal.

Fra omkring 30 døgn etter start av gyting/klekking viser både observasjoner og numeriske modeller en ekspansjonsrate av larvefordelingsarealet på 1000-5000 km²/døgn avhengig av fiskeslag og varierende hydrografiske og meteorologiske forhold. Typiske størrelser på larvearealet på denne tiden vil være 30.000 - 100.000 km². På denne tiden, under selve ekspansjonen av larvefordelingen, vil en seismisk undersøkelse bare kunne dekke 0.5-2 % av den daglige ekspansjonsraten. Dekningsgraden i forhold til hele larvefordelingen er følgelig langt lavere enn 2%.

En seismisk påvirkning forflytter seg innenfor et larvefelt som er dynamisk. Larvene transporteres både inn og ut av området i løpet av undersøkelsesperioden. Denne relative

bevegelse mellom larvefeltet og det seismiske undersøkelsesfeltet vil umuliggjøre en fullstendig overlapping mellom disse.

La oss anskueliggjøre dette ved et enkelt eksempel:

Et 30 km bredt "larvetog" i kyststrømmen beveger seg nordover med en transporthastighet på 25 cm/s eller 20 km/døgn. I løpet av et døgn passerer altså et larveareal på 600 km² et fast punkt på kysten. Et seismisk fartøy vil kun kunne dekke 1/30 av dette arealet med 3-D seismikk i løpet av det samme døgnet.

Det som er sagt ovenfor gjelder først og fremst for norskekysten nord for 62° N. I Nordsjøen kan forholdene være noe annerledes. Norsk økonomisk sone utgjør her omkring 20% av hele Nordsjøens areal inkludert Skagerrak og Kattegat. For de fleste fiskeslagene vil kun en mindre del av gytefeltene eller utbredelsesfeltet for larver strekke seg inn i norsk sone. Seismiske undersøkelser i norsk sone vil derfor kun i liten grad kunne overlappe med utbredelsesarealet for de fleste typer fiskelarver.

Gytefeltene for de viktigste artene i Nordsjøen er mer spredt enn lengre nord, og gytingen foregår over et lengre tidsrom. Dette, sammen med det generelle sirkulasjonsmønsteret i området gjør at kun en mindre del av larvene transporteres inn i norsk sone. Utbredelsesområdene for larver i Nordsjøen er normalt større enn 10.000 km². En typisk seismisk undersøkelse på 500 km² vil her derfor dekke mindre enn 5 % av larvenes utbredelsesareal.

Ut fra de betraktningene som er gjort ovenfor finner vi det sannsynliggjort at p₃ maksimalt kan være 0.1 dvs. at maksimum 10% av et utbredelsesareal for larver vil kunne påvirkes av en vanlig 3 dimensjonal seismisk undersøkelse.

2.5 Vertikal overlapping (p₄)

p₄ angir hvor stor del av den totale larvebestanden som til enhver tid befinner seg i de øvre 10 m, dvs. i risikovolumet.

Vertikalfordelingen av fiskelarver bestemmes av flere faktorer. En av de viktigste av disse er lysforholdene. Disse gjør også at fiskelarvene har en døgnlig vertikalvandring; de er høyt oppe i vannsøylen om natten og dypere nede om dagen. For arter som legger eggene sine på bunnen, som f.eks. hos sild, vil larvene ha en tendens til å fordele seg nærmere overflaten jo eldre de blir. Fordelingen av næringspartikler virker også inn på larvenes vertikalfordeling. Fysiske faktorer som skaper omrøring eller turbulens er også av betydning for fiskelarvenes plass i vannsøylen. Slike kan være varierende strømforhold pga. tidevann og direkte eller indirekte vindeffekter som bølgeindusert vertikalblanding og vindgenerert oppstrømning.

Undersøkelsene over vertikalfordelingen av fiskelarver gir klare indikasjoner på forskjeller mellom arter og mellom utviklingsstadier. Når det gjelder sild f.eks. vil i de tidlige larvestadiene omkring 50 % av larvene befinne seg i de øvre 30 m. På yngelstadiet synes silda å være enda mere konsentrert i de øverste vannlag. Observasjoner har vist at opptil 60% av sildeyngelen kan befinne seg i de øvre 10 m. For torskelarver i tidlig stadium vil hovedvekten av larvene finnes i 15-25 m dyp. Kun 10-15% av larvene finnes i de øvre 10 m. For større torskeyngel, derimot, ser det også ut for at vi har det samme som for sild, dvs. opptil 60% kan befinne seg i de øvre 10 m. I de tidlige larvestadiene, hvor sårbarheten for seismisk skyting er stor, vil langt mindre enn 50% av larvepopulasjonen befinne seg i de øvre 10 m. På yngelstadiet, hvor sårbarheten for seismisk skyting er mindre, vil opptil 60% av yngelen kunne finnes i de øvre 10 m. For beregningene av det verste tilfelle synes det derfor å være rimelig å

anta at halvparten av larvene/ungelen vil finnes i de øvre 10 m, dvs. at p_4 maksimalt kan være 0.5.

2.6 Oppsummering

Utgangspunktet for denne vurderingen var å anslå mulige effekter av seismisk aktivitet på populasjon/bestandsnivå hos fisk. Andelen av den totale larve-produksjonen som vil kunne dø som følge av en seismisk undersøkelse vil da kunne uttrykkes slik:

$$M = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4$$

Her gir p_1 andelen av det seismiske dekningsarealet som defineres som risikoareal, p_2 gir andelen av kanonfeltets risikovolum som må karakteriseres som død/skadevolum, p_3 uttrykker den arealmessige overlappingen mellom larvenes utbredelsesområde og det seismiske dekningsområdet og p_4 overlappingen mellom larvenes vertikalfordeling og risikovolumet for de seismiske undersøkelsene.

Vi fant at det var vanskelig å foreta en konsekvensvurdering av seismisk aktivitet på bestandsnivå basert på en nøyaktig beskrivelse av skaderisikofordelingen. Vi tok derfor som utgangspunkt å beregne det verste tilfelle (worst case) hvor den absolutt største verdien av hver av de ovenstående forholdene ble forsøkt estimert. Ut fra de vurderinger som er gjort i denne rapporten vil de enkelte forholdene p_1 til p_4 ha følgende sannsynlige variasjonsområder.

$$\begin{aligned} 0.1 < p_1 < 0.3 \\ 0.1 < p_2 < 0.3 \\ 0 \leq p_3 < 0.1 \\ 0.2 < p_4 < 0.5 \end{aligned}$$

Her har vi lagt til grunn følgende antagelser: Dødelighetsradius $r = 2$ m, avstanden mellom kurslinjene $L = 100$ m og dødelighetsvolumet er sylindrisk til overflaten. Bruker man de maksimale tallene for de enkelte forholdene får en at $M = 0.0045$. Dette betyr at en seismisk undersøkelse maksimalt kan drepe ned 0.45% av en larvepopulasjon under ugunstige omstendigheter.

Det forholdet som er mest utslagsgivende i beregningen av M er sannsynligvis p_3 , dvs. andelen av fiskelarvens totale utbredelsesareal som berøres av de seismiske undersøkelsene. Dette er det eneste av de aktuelle forholdene som vil kunne bli 0 og det vil i de aller fleste tilfeller være mye mindre enn 0.1.

Den indikerte andelen av en larvepopulasjon som blir drept i verste tilfelle betraktningen vil kun skje dersom antagelsene gitt i betraktningen er gyldige. Det kan i tillegg til en verste tilfelle betraktning være grunn til å prøve å grovt angi en "realistisk forventningsverdi" til hver enkelt parameter, som mer vil gjenspeile det vi i gjennomsnitt ville forvente ble neddrept av en seismisk undersøkelse. I verste tilfelle betraktningen ble p_1 , andelen av det seismiske arealet som defineres som risikoareal, satt til 0.3. Denne verdien kan komme ned imot 0.1 dersom antallet lyttekabler øker, og derved linjeavstanden økes til 250 - 300 m. Vi setter forventet verdi til 0.2 idet mesteparten av undersøkelsene i dag foregår med flere lyttekabler.

Andelen av kanonfeltets risikovolum som karakteriseres som død/skadevolum er beregnet til 0.3 i verste tilfelle. Vi har da antatt at dødelighetsavstanden er 2 meter, dødelighetsvolumet er sylinderformet mot overflaten, og at alle larver inne i volumet dør under skyting. Vi har ikke full dekning eksperimentelt for å inkludere vannvolumet over kanonene i dødelighetsvolumet, og forventet verdi for volumet ligger trolig nærmere kulemodellen enn sylindermodellen,

dvs. at p_2 ligger nærmere 0.1 enn 0.27 med dødelighetsradius 2 meter. (Tabell 1). Vi har videre antatt at vi får 100% dødelighet for larver inne i dødelighetsvolumet. Eksperimentene viser derimot økt, men aldri 100% dødelighet. Faktisk er maksimalt påvist akkumulert dødelighet over tid i eksperimentgruppene lavere enn 50% når det tas hensyn til dødelighet i kontrollgruppene. Dette betyr at selv innenfor det vi har definert som dødelighetsradius vil over 50% av larvene overleve. Dersom disse to forholdene legges inn i p_2 , er forventningsverdien til denne omlag 0.1 eller lavere.

Arealmessig overlapping mellom larvenes utbredelsesområde og det seismiske undersøkelsesområdet er satt til 0.1 i verste tilfelle. Dette er den parameteren som har størst variasjonsbredde, og vil i de aller fleste tilfeller være mye mindre enn 0.1. For ikke å utelate de minste, og mest stasjonære larvefordelingene kan vi la p_3 være halvparten av verste tilfelle verdi, 0.05, selv om forventet middelvei ligger langt lavere.

Tilsvarende for p_4 , som angir hvor stor andel av larvene som befinner seg i de øverste 10 m, ligger verste tilfelle verdien på 0.5, mens den forventede verdien ligger noe lavere, på 0.2 - 0.3, eller med 20 - 30% av larvene i de øverste 10 meter i middel over hele døgnet.

Et forsøk på å angi en realistisk forventningsverdi er da gitt ved:

$$M = 0.2 \cdot 0.1 \cdot 0.05 \cdot 0.3 = 0.0003$$

eller at 0.3 promille av larvepopulasjonen vil kunne dø som følge av en typisk 3D seismisk undersøkelse. Ettersom p_3 ikke er fullt ut redusert ned imot forventningsverdi er dette også sannsynligvis et overestimat av andelen som blir drept.

2.7 Konklusjon

Det er utført en verste tilfelle beregning av andelen av larver i en populasjon som ville kunne bli drept av en typisk seismisk 3D undersøkelse på 500 km². Det ble funnet at maksimalt 0.45% av larvepopulasjonen vil kunne bli drept av undersøkelsen. Det er også gjort forsøk på å angi en forventningsverdi som mer representerer det en i gjennomsnitt for mange undersøkelser ville forvente ble drept i populasjonen. Denne er angitt som omlag 0.3 promille av populasjonen.

Ettersom dekningsgraden i en 3D seismisk undersøkelse er omlag 20 km² / døgn, tar det 25 døgn å dekke et typisk område på 500 km². De daglige dødelighetsrater under den seismiske undersøkelsen er derved 1/25 av andelen drept av undersøkelsen, eller 0.18 promille/døgn i verste tilfelle, og 0.012 promille/døgn i gjennomsnitt. Sett i relasjon til daglige naturlige dødelighetsrater på egg og larvestadiet, 5-15% /døgn, og senere på 1-3% /døgn frem til 0-gruppe stadiet er dette så lave dødelighetsrater, selv under verste tilfelle betraktningen, at de kan regnes som ubetydelige. Dette gjelder også dersom samme larvepopulasjon utsettes for flere seismiske undersøkelser.

Ut fra det overstående er det ikke grunn til å legge restriksjoner på seismiske undersøkelser av hensyn til skader av fiskeegg, yngel og larver.

3. REFERANSER

- BOOMAN, C., DALEN, J., LEIVESTAD, H., LEVSEN, A., VAN DER MEHREN, T. og TOKLUM, K. 1996. Effekter av luftkanonskyting på egg, larver og yngel. Undersøkelser ved Havforskningsinstituttet og Zoologisk Laboratorium, Universitetet i Bergen. *Fisken og Havet*, 3 (1996):
- DALEN, J. 1994. Impact of seismic impulsive energy on marine organisms. S. 60 - 75 in O'Toole, M.J. red. *Workshop on Offshore Oil Activities and Fisheries Interactions*, Swakopmund, Namibia.
- 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*, 3 (1993): 111 s.
- FOSSUM, P. og ØIESTAD, V. (Redaktører). 1992. De tidlige livsstadiene hos fisk i møte med trusselen fra petroleumsvirksomheten. Sluttrapport fra Havforskningsinstituttets egg- og larveprogram - HELP (1985-1991).
- HOLMSTRØM, S. 1993. Effekter av luftkanonseismikk på larver og yngel til havs - modellering og simulering. *SINTEF Reguleringssteknik*, rapp. nr. STF48 A93007, Trondheim, 70 s.
- LØKKEBORG, S. and SOLDAL, A.V. 1993. The influence of seismic exploration with airguns on cod (*Gadus morhua*) behaviour and catch rates. *ICES mar. Sci. Symp.*, 196: 62-67.

VEDLEGG 1

Formelverk for beregning av den andelen av kanonfeltets risikovolum som må karakteriseres som dødelighetsvolum (p_2).

Utover det formelverket som skal benyttes til beregning av mulige effekter på en larvepopulasjon, er det nødvendig med en mer nyansert beregning av dødelighetsvolumet inne i kanonfeltet.

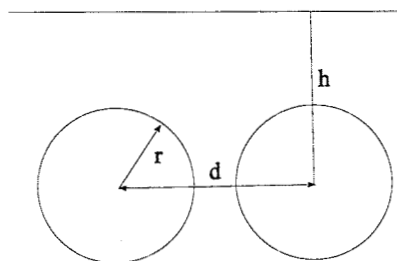
I beregningene av p_1 har vi antatt full dekning inne i kanonfeltet, noe som ikke er tilfelle før dødelighetsradius for kanonene er stor, dvs. > 6 m. Ved kortere dødelighetsradius er dødelighetsvolumet vesentlig mindre enn risikovolumet.

Vi har brukt et enkelt kanonfelt som modell, tilsvarende det som ble brukt i Engås et al. (1993) av Geko-Prakla på "R/V Academic Shatskiy". Dette feltet er 18.5×20 meter, og består av 18 kanoner på tre rekker med totalt kammervolum på 82.1 liter. Vi har for dette beregnet dødelighetsvolum som funksjon av dødelighetsradius, r , for larver og yngel i forhold til feltets totale dekningsvolum eller risikovolum per skudd.

Vi har først forenklet feltet litt ved å sette avstanden mellom kanonene fast til 4 m, og har ikke tatt hensyn til kanonenes fysiske størrelse. Dødelighetsradius er derfor beregnet som fra en punktkilde. For videre å forenkle formelverket, som lett blir komplisert under gradvis overlapp mellom volumer, har vi benyttet tilnærmingen $\pi=3$. Dette gir ved beregning av dødelighetsvolumer en nøyaktighet på bedre enn 95%, noe som er tilstrekkelig for dette formålet. De nevnte forenklinger kan korrigeres for, men har ingen betydning for den senere vurderingen.

Vi har antatt to mulige dødelighetsvolum:

A: Dødelighetsvolumet er kuleformet. Kanondyp 6 m, dødelighetsradius 0-4 m.



A: Kuleformet dødelighetsvolum. Overlapping skjer når
 $2r > d$

Beregninger, kulemodell:

Volum uten overlapp:

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3$$

Overlappvolum, to kulekalotter: ($d < 2r$)

$$VO = 2\pi\left(\frac{2r^3}{3} + \frac{d^2}{24} - \frac{1}{2}r^2d\right)$$

i): Totalt dødelighetsvolum uten overlapp ($0 < r < 2$): (gitt forenkling $\pi=3$):

$$VT = 18\frac{4}{3}\pi r^3 = 72r^3$$

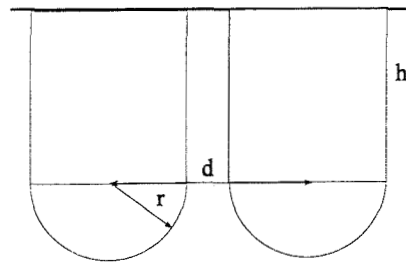
ii): Enkel overlapp ($2 < r < 4$)

$$VT = 18\frac{4}{3}\pi r^3 - 15\left(2\pi\left(\frac{2r^3}{3} + \frac{64}{24} - 2r^2\right)\right) = 72r^3 - (60r^3 + 240 - 180r^2) = 12r^3 + 180r^2 - 240$$

Dette volumet er i det videre kalt dekningsvolum, kulemodell, V_k , og gitt som funksjon av dødelighetsavstand i Tabell 1.

B: Dødelighetsvolum, sylindermmodell:

Dødelighetsvolumet er kuleformet rundt kanonen, men er utvidet også sylindrisk over kulevolumet. Begrunnelse for dette er gitt i selve rapporten.



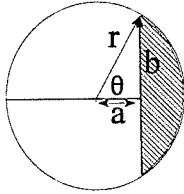
B: Sylindermformet dødelighetsvolum. Overlapping skjer når $2r > d$

Beregninger:

Dødelighetsvolum:

$$V = \pi r^2 h + \frac{2}{3} \pi r^3$$

Når dødelighetsradius, r , øker, får vi overlapp mellom dødelighetsvolumene.



Overlappingsareal blir sammensatt av to "sirkelkalotter",

Areal av kalott, ($0 \leq a \leq r$):

$$A = 2 \int_a^r \sqrt{r^2 - x^2} dx$$

$$A = r^2 \arccos\left(\frac{a}{r}\right) - a\sqrt{r^2 - a^2}$$

Og for kulekalott:

$$V = \int_a^r \pi(r^2 - x^2) dx = \pi\left(\frac{2r^3}{3} + \frac{a^3}{3} - r^2 a\right)$$

Og vi kan gå videre å beregne overlappende dødvolum:

Overlappende dødsvolum: ($2a = d < 2r$)

Sylinder:

$$OVS = 2h \left[r^2 \arccos\left(\frac{d}{2r}\right) - \frac{d}{2} \sqrt{r^2 - \frac{d^2}{4}} \right]$$

Halvkule:

$$OVS = 2 \frac{1}{2} \pi \left[\frac{2r^3}{3} + \frac{d^3}{24} - \frac{1}{2} r^2 d \right]$$

Totalt overlappvolum:

$$VOT = 2hr^2 \arccos\left(\frac{d}{2r}\right) - dh \sqrt{r^2 - \frac{d^2}{4}} + \pi \left[\frac{2r^3}{3} + \frac{d^3}{24} - \frac{1}{2} r^2 d \right]$$

Nå, videre med forenklingen $\pi = 3$, beregner vi totalt dødsvolum for det gitte feltet med 18 kanoner på tre rekker. Avstanden mellom kanonene i rekken er 4 meter og avstanden mellom rekkene er 10 m.

i) i avstander ($0 \leq r \leq 2$)

$$V = 18 \left[\pi r^2 \cdot 6 + \frac{2}{3} \pi r^3 \right] = 324r^2 + 36r^3$$

ii) i avstander ($2 \leq r \leq 4$)

$$V = 18 \left(\pi r^2 \cdot 6 + \frac{2}{3} \pi r^3 \right) - 15 \left[\left(2hr^2 \arccos\left(\frac{2}{r}\right) - 24 \sqrt{r^2 - 4} + \pi \left(\frac{2r^3}{3} + \frac{64}{24} - 2r^2 \right) \right) \right]$$

som blir:

$$V = 324r^2 + 36r^3 - 180r^2 \arccos\left(\frac{2}{r}\right) + 360\sqrt{r^2 - 4} - 30r^3 - 120 + 90r^2$$

Dette kan videre trekkes sammen til:

$$V = 6r^3 + 414r^2 - 120 + 360\sqrt{r^2 - 4} - 180r^2 \arccos\left(\frac{2}{r}\right)$$

Dette er betegnet som dekningsvolum, sylindermødel, V_s , og gitt som funksjon av dødelighetsradius i Tabell 1.

Vi har nå kommet fram til et uttrykk for dødelighetsvolum som funksjon av dødelighetsradius, r , fra kanonene inne i feltet, både for avstander mindre enn 2 meter, ingen overlapp, og for avstander fra 2 til 4 meter, med overlapping. Vi har ikke funnet det nødvendig å beregne dekning for dødelighetsradius større enn 4 meter.

Når vi videre skal beregne volummessig dekningsgrad per skudd inne i kanonfeltet, har vi brukt et risikovolum for hele kanonfeltet på:

$$V_f = (20 + 2r) \cdot (20 + 2r) \cdot 10$$

og angitt dekningsgradene i Tabell 1 for henholdsvis kuleformet dødelighetsvolum og sylindermødel dødelighetsvolum.

Tabell 1. Beregnet dekningsgrad, p_2 , pr. skudd inne i kanonfeltet som funksjon av dødelighetsradius, r , for kuleformet, V_k , og sylinderformet, V_s , dødelighetsvolum.
 V_f - Kontrollvolum eller risikovolum, hele feltet, 0-10 m dyp.

r (m)	V_k (m ³)	V_s (m ³)	V_f	p_2 (kule)	p_2 (sylinder)
0.5	9	86	4410	0.002	0.019
1.0	72	360	4840	0.015	0.074
1.5	243	851	5290	0.046	0.161
2.0	576	1584	5760	0.100	0.275
2.5	1073	2377	6250	0.172	0.380
3.0	1704	3210	6750	0.252	0.475
3.5	2480	4120	7290	0.340	0.565
4.0	3408	5119	7840	0.434	0.652

Av tabellen fremgår det at dersom dødelighetsradius blir satt til eksempelvis 2.0 meter ut i fra kanonen, der kanonen blir betraktet som en punktkilde, så er dødelighetsvolumet inne i feltet ca. 10 - 27% av feltets risikovolum, avhengig av dødelighetsvolumets form. Først når dødelighetsradius er 5 - 6 meter vil en oppnå full dekning av feltet.