

# Seismiske undersøkelser og mulige effekter på laks i havmerder

**KUNNSKAPSSTATUS 2021**

---

Frank Reier Knudsen | Maria Gaasø  
**KONGSBERG MARITIME | SALMAR OCEAN**



**KONGSBERG**





# Sammendrag

SalMar Ocean, et selskap i SalMar konsernet, har søkt om klarering av lokalitet til en havmerd i Norskehavet utenfor Midt-Norge. I dette havområdet kan det også forekomme leting etter petroleumsforekomster med seismikk. I den forbindelse er det blitt gjennomført en litteraturstudie på seismiske undersøkelser og mulige effekter på laks. Resultater fra studier blir gjennomgått og det gis en anbefaling/konklusjon rundt hvilke effekter seismikkskyting vil ha på laks og dens atferd i havmerder.

Laks hører frekvenser fra <10 Hz og opp til 400 Hz, hvor de frekvenser de hører best er rundt 150 Hz. Laks hører dårligere enn arter som torsk og sild. Et luftkanonskudd vil inneholde frekvenser i området <10-400 Hz med dominerende lydtrykk rundt 50-100 Hz. Laks vil høre luftkanonskudd over store avstander, og det kan utløse stressreaksjoner hos laks i merd. Slike reaksjoner kan være forsinket i forhold til den seismiske undersøkelsen og i verste fall føre til død, sykdomsutbrudd og redusert vekst.

Laks ser imidlertid ut til ikke å vise særlige atferdsreaksjoner eller skade på lydstimulering og viser svært rask tilvenning til kraftig lydeksposering. Gradvis økning i lydintensitet (ramp-up) er et vanlig forebyggende tiltak under seismiske undersøkelser som kan være relevant for laks i havmerder.

For fisk generelt vil skade ikke opptre på avstander > 5 m fra luftkanon. På kloss hold (<5 m) kan skader på svømmeblære og organer i kontakt med svømmeblæren forekomme. Skader på høreorganet kan også forekomme, men vil være forbigående.

I henhold til foreslåtte retningslinjer vil atferdsendringer med stor sannsynlighet forekomme innenfor noen titalls meter fra en seismisk kilde, med moderat sannsynlighet innenfor noen hundre meters avstand og med liten sannsynlighet om avstanden blir noen tusen meter.

Det anbefales at det gjøres lydmålinger på lokaliteter hvor havmerder planlegges når det skytes seismikk i nærheten. Havmerder bør utrustes med hydrofon for måling av lydtrykk og ekkolodd og kamera for overvåking av fiskens atferd i forbindelse med seismiske undersøkelser og annen påvirkning.

# INNHOOLD

<b>1. Innledning</b>	<b>5</b>
<b>2. Rådgivning og ansvar</b>	<b>6</b>
<b>3. Planlagte merder og geografisk lokalisering</b>	<b>6</b>
<b>4. Scenarier for seismiske undersøkelser i området</b>	<b>7</b>
<b>5. Lyd i vann og fiskehørsel</b>	<b>8</b>
<b>6. Seismikkskyting og lydpulser - definisjoner</b>	<b>10</b>
<b>7. Luftkanonskudd og effekter på laks</b>	<b>11</b>
<b>8. Luftkanonskudd og effekter på villfisk</b>	<b>12</b>
<b>9. Retningslinjer for lydeksponering av fisk</b>	<b>12</b>
9.1. Skade og død	14
9.2. Atferdsendring	14
<b>10. Forebyggende tiltak på havmerda</b>	<b>14</b>
<b>11. Måling av støy på OF1 og hørsel hos laks</b>	<b>15</b>
<b>12. Konklusjon</b>	<b>15</b>
<b>Referanseliste</b>	<b>17</b>

# 1. Innledning

I Norge har petroleumsindustrien og fiskerinæringen sameksistert i flere tiår. Et tema som har hatt mye oppmerksomhet er seismikkskyting og effekter på fisk og fiskeriene. Både skadeeffekter på fiskeyngel og skremmeeffekter på fiskestimer er rapportert (Dalen et al., 2008), men med god dialog og planlegging av innbyrdes aktiviteter mellom næringene, har de fleste konflikter latt seg løse.

Nå planlegges det store oppdrettsanlegg for laks til havs, i nærheten av områder hvor det kan forekomme skyting av seismikk. Laks er tidligere ikke undersøkt i forhold til seismikkskyting og det at laksen holdes i merd og ikke kan forflytte seg, er nye forhold som krever en vurdering.

Denne rapporten vil gi en oversikt over kunnskapsstatus på dette området, en vurdering av mulige effekter av seismikkskyting på laks i merd, og forslag til tiltak og undersøkelser som bør utføres for å sikre et fortsatt godt samspill mellom petroleumsindustrien og fiskerinæringen.

## 2. Rådgivning og ansvar

Havforskningsinstituttet (HI) er rådgivende organ for Oljedirektoratet for alle operasjoner til havs, som involverer bruk av lydilder som kan påvirke fisk inkludert seismikk. Rapporten «Havforskningsinstituttets rådgiving for menneskeskapt støy i havet» beskriver detaljer i denne rådgivingen og oppdateres med ny kunnskap hvert år (Sivle et al., 2021).

Alle seismiske undersøkelser på norsk sokkel skal meldes til Oljedirektoratet, som sender saker på høring til Havforsk-

ningsinstituttet og Fiskeridirektoratet. Havforskningsinstituttet gir råd om seismikkens påvirkning på havets økosystem, mens Fiskeridirektoratet gir råd knyttet til konflikter med fiskeriaktivitet. Havforskningsinstituttets råd skal beskytte spesifikke perioder og områder som når fisk gyter og gytevandrer.

Rådgivingen gjelder bare villfisk og omfatter per i dag ikke kommersielt oppdrett av fisk i merd.

## 3. Planlagte merder og geografisk lokalisering

I «søknad om klarering av lokalitet til Smart Fish Farm (SFF) i Norskehavet» søker SalMar Ocean om å legge lokaliteten mot den sørvestlige grensen av undersøkelsesområde 11 i Fiskeridirektoratets områderapport. Omsøkt lokalitet ligger i betydelig avstand fra de ytre grensene for dagens produk-

sjonsområder, og området har en dybde rundt 360 m. SFF vil ha en produksjonskapasitet på inntil 19 000 tonn biomasse, med et produksjonsvolum på 760 000 m<sup>3</sup>. Dette tilsvarer rundt 24 konvensjonelle tillatelser.



Figur 1: Geografisk lokalisering av område 11 Frøyabanken nord, som ligger 30 til 70 nautiske mil fra grunnlinjen. Frøyabanken nord ligger rett vest for produksjonsområde 6 Nordmøre og Sør-Trøndelag (Fiskeridirektoratet 2019).

## 4. Scenarier for seismiske undersøkelser i området

Som vist i Figur 2 er det gjennomført seismiske undersøkelser i søkt område til SFF (blå sirkel). NDP FactMaps viser at det ikke er planlagt noen undersøkelser i valgt område for SFF. De undersøkelsene som var planlagt, men nå kansellert, var ikke lagt i området for SFF.

Det nye området som ble anbefalt fra Oljedirektoratet er som nevnt ikke interessant for leting (rød sirkel, Figur 2). Det har blitt gjort undersøkelser i områder rundt nytt anbefalt område.



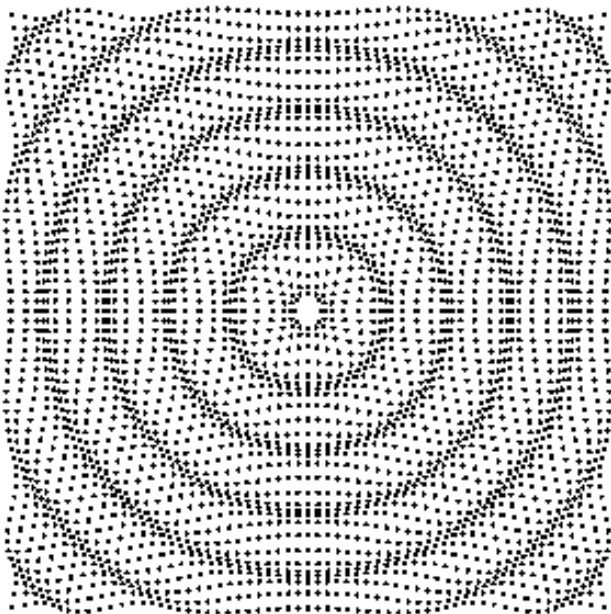
Figur 2: Oversikt over gjennomførte (blått) seismiske undersøkelser rundt planlagt lokasjon til SFF. Blå sirkel markerer planlagt lokasjon til SFF, og rød sirkel marker nytt anbefalt område for lokasjon til SFF. Utklipp fra: [https://factmaps.npd.no/factmaps/3\\_0/?run=ShowFisheryAndSeismicThemes](https://factmaps.npd.no/factmaps/3_0/?run=ShowFisheryAndSeismicThemes)

Seismiske undersøkelser er den mest kjente metoden av geofysiske undersøkelser brukt til å lokalisere potensielle olje og gass forekomster. Marine seismiske undersøkelser som brukes av industrien er 2D (dimensjonal) undersøkelser, 3D og 4D undersøkelser, havbunn seismikk (ocean bottom seismic - OBS) og 3C og 4C OBS (IAGC). Ved 2D undersøkelser blir dataen samlet opp av en enkelt sensor kabel. Dette gir en relativt lav oppløsningsgrad på bildet av undergrunnen, og blir brukt ved sondering av terreng i nye

undersøkelsesområder. Ved 3D undersøkelser blir dataen samlet inn ved flere parallelle sensorkabler. Dette gir et tre-dimensjonalt og mer detaljert bilde av underoverflaten. Denne typen blir brukt ved petroleumslating/vurderingsfasen. 4D undersøkelsen består av repeterende 3D undersøkelser av det samme området for å kunne oppdage om det har skjedd forandringer i reservoaret som følge av produksjon og/eller injeksjon over tid. 4D blir brukt på områder hvor det er produksjon (Norskpetroleum, 2019).

## 5. Lyd i vann og fiskehørsel

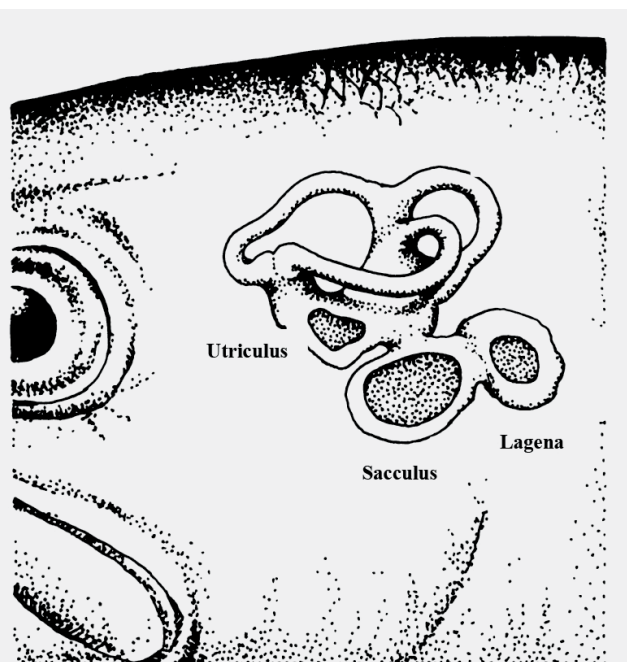
For en mer grundig forklaring av lyd i vann og fiskehørsel, samt effekter av lyd på fisk, se litteratur av Popper et al., 2003, Popper et al., 2014, Popper and Hawkins, 2015; 2019. I det følgende kapitlet vil det gis en forenklet beskrivelse. Lyd har to komponenter; partikkelbevegelse og lydtrykk. Når en lydkilde vibrerer i vann, vil vannpartiklene vekselvis bli trykket sammen og trukket fra hverandre. Når vannpartiklene trykkes sammen øker trykket og når de trekkes fra hverandre synker trykket (Figur 3). Dette resulterer i en lydølge som sprer seg gjennom vannet med lydets hastighet (1500 m/s). Partikkelbevegelsen er vannpartiklene som svinger fram og tilbake om sitt likevektspunkt. Antall svingninger per sekund er lydets frekvens og måles i hertz (Hz). Lydens styrke bestemmes av utsvingsamplituden på vannpartiklene. I vurderingen av effekter av lyd på fisk er særlig frekvensinnhold og lydstyrke på lydpulser som er relevant. Støy defineres som uønsket lyd som er ubehagelig og maskerer biologisk viktige lyder (Hawkins and Popper, 2017).



Figur 3: Illustrasjon av lydutbredelse fra en lydkilde i senter av figuren og lydets to komponenter, partikkelbevegelse og lydtrykk. Når vannpartiklene vibrerer fram og tilbake forplanter dette seg som en trykkølge gjennom vannet med soner bestående av høyt og lavt trykk ([www.acs.psu.edu/drussell/demos.html](http://www.acs.psu.edu/drussell/demos.html))

Partikkelbevegelsen er en vektor med både størrelse og retning uttrykt ved amplitude (m), hastighet (m/s) og akselerasjon (m/s<sup>2</sup>). Trykket er en skalar med bare størrelse og måles som kraft/areal (N/m<sup>2</sup> eller Pa).

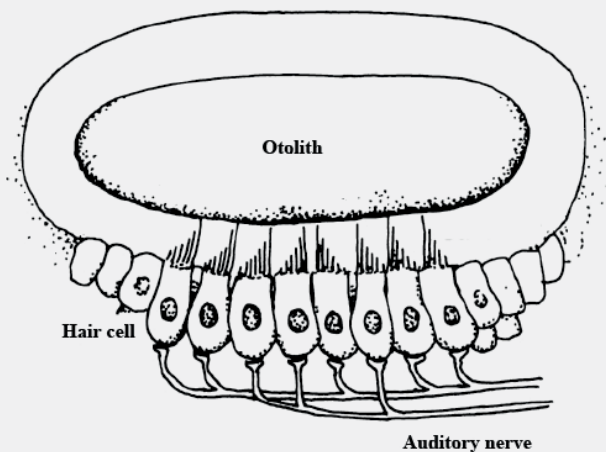
Fiskens indre øre er den primære sensoren for lydoppfattelse hos fisk (Figur 4).



Figur 4: Det indre øret hos fisk med balanseorgan (3 bueganger) og tre ørestener (otolither; utriculus, sacculus og lagena). Det er sacculus otolithen som primært er knyttet til lydoppfattelse hos fisk. Illustrasjonen: Olav Sand, UiO.

Enkelt forklart består det indre øret av en sten (otolith) av kalsiumkarbonat som hviler på et teppe av syltynne sansehår (Figur 5). Fiskekroppen har noen lunde samme tetthet (akustiske impedans) som vann og vil i et lydfelt svinge i takt med partikkelbevegelsen, mens ørestenen er tyngre enn vann og vil henge litt tilbake. Dette fører til en relativ bevegelse mellom ørestenen og fisken slik at sansehårene avbøyes og nervesignaler avfyres i hørenerven. Dette er grunnlaget for lydoppfattelse hos fisk. Mens menneskeøret har en membran (trommehinne) som registrerer trykkenaldringer, har fisken et indre øre som ikke vil stimuleres av trykk, men av lydets partikkelbevegelse. Hos fisk er hårceller og ørestener sinnrikt orientert slik at fisk registrerer ikke bare lydets frekvens og amplitude, men også retning i tre dimensjoner. På denne måten er det indre øret hos fisk et 3D-akselerometer, en egenskap menneskeøret ikke har (Sand, 1974). Fisk hører godt lave frekvenser av lyd, mens mennesket hører høyere frekvenser av lyd (20 Hz - 20.000 Hz).

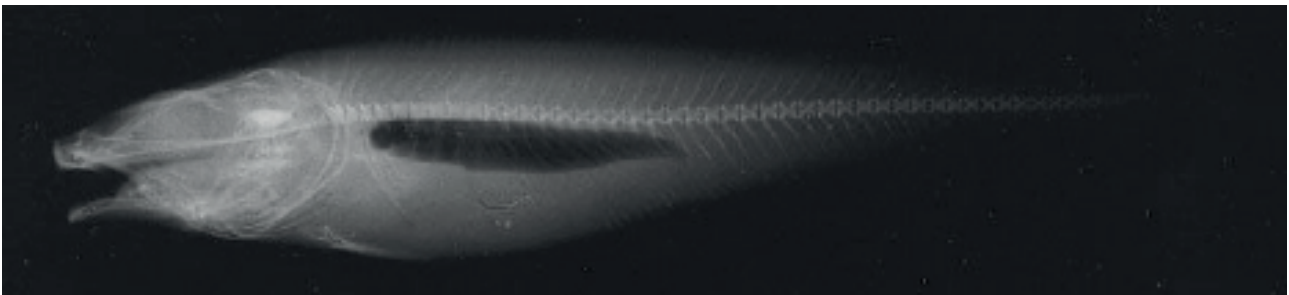




Figur 5: Ørestenen (otolith) hviler på et lag av hårceller som er koblet til høreneerven. Illustrasjon: Olav Sand, UiO.

For fisk som har svømmeblære vil lydets trykkomponent føre til at den pulserer (vibrerer). Siden gass er lettere å trykke sammen enn vann, vil vibrasjonene av svømmeblæren være forsterket i forhold til vibrasjonene rundt fisken. Disse vibrasjonene kan forplante seg til fiskens indre øre og indirekte forbedre hørselen, spesielt mot høyere frekvenser av lyd (Sand and Hawkins, 1973).

Svømmeblæren kan således føre til at fisk hører lyd over et bredere frekvensområde og på større avstander og samtidig gjøre fisken mer følsom for seismikkskyting (Popper et al., 2014). Figur 6 viser hvordan ørestenen (sacculus) er lokalisert i forhold til svømmeblæren hos torsk.



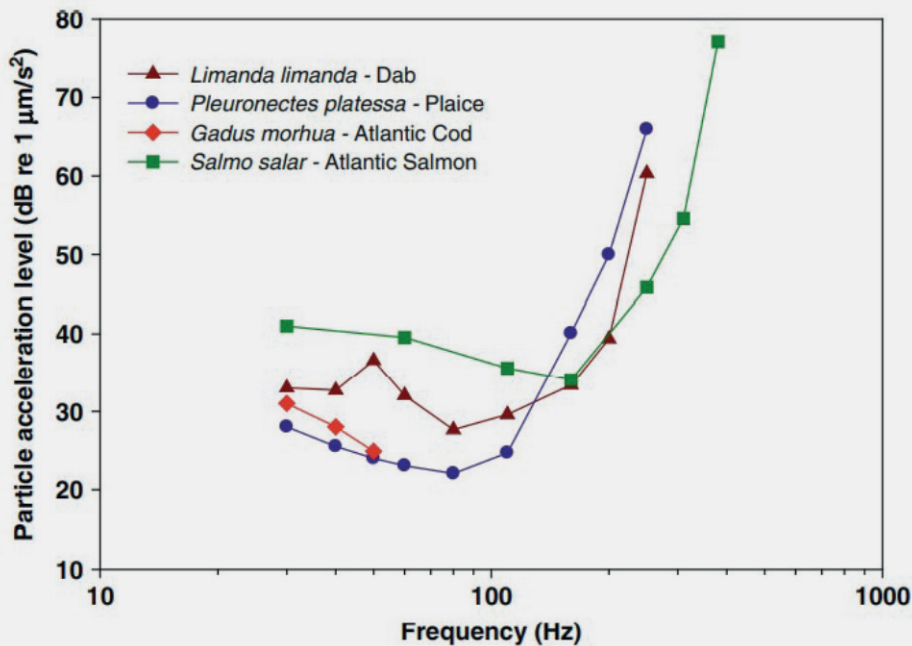
Figur 6: Røntgenbilde av torsk som viser ørestenen som den hvite skyggen inne i hodet på torsken og svømmeblæren som den mørke skyggen under ryggspylen. Bildet: John Horne, Univ. of Washington.

Alle fisk hører frekvenser av lyd fra <math><10</math> hertz (Hz) og opp til noen hundre Hz (se Popper et al., 2014). Noen fisk har fysiske forbindelser fra svømmeblæren til det indre øret. Dette kan være utposninger av svømmeblæreveggen som danner en kanal til det indre øret (Popper et al., 2003). Sild er eksempler på en slik art og kan oppfatte frekvenser av lyd opp til flere kilohertz (kHz) (Enger, 1967).

Laks har svømmeblære som er åpen med en kanal til svelget (fysostom), og det regnes ikke med at svømmeblæren spiller noen rolle for laksens hørsel (Hawkins and Johnstone, 1978). Svømmeblærens primære rolle er naturligvis oppdriftsregulering, men hos noen arter som torsk er svømmeblæren viktig i lydproduksjon og kommunikasjon mellom fisk (Hawkins, 1986).

Laks er bare følsom for lydets partikkelbevegelse (Hawkins and Johnstone, 1978) og hører frekvenser av lyd fra <math><10</math> Hz men med kraftig reduksjon i følsomhet oppover mot 400 Hz. De frekvenser av lyd laks hører best ligger rundt 150 Hz. Terskel for lydoppfattelse avhengig av frekvens kalles et audiogram. Figur 7 presenterer audiogrammer for noen fiskearter hvor laks er den som hører dårligst, i hvert fall for frekvenser under 100 Hz. En høyere høreterskel for laks betyr at de er mindre følsomme for luftkanonskudd enn eksempelvis torsk.

Selv om svømmeblæren ikke er knyttet til hørsel hos laks, kan den allikevel påføre laksen skade under lydeksponering, særlig i umiddelbar nærhet av en kilde hvor trykkendringene er så store at svømmeblæren eksploderer (Halvorsen et al., 2012).



Figur 7: Audiogrammer for fire arter hvor de er følsomme for lydets partikkelbevegelse (Popper et al., 2014,) laks (*Salmo salar*, Hawkins and Johnstone 1978); rødspette (*Pleuronectes platessa*, Chapman and Sand 1974); sandflyndre (*Limanda limanda*, Chapman and Sand 1974); torsk (*Gadus morhua*, Chapman and Hawkins 1973).

Svømmeblæren får rivningsskader og andre organer som er i kontakt med svømmeblæren kan bli skadet (Halvorsen et al., 2012; Popper et al., 2014). Ekstremversjonen av dette observeres ved dynamittekspløsjoner under vann. Hvor død fisk flyter ofte til overflaten med svømmeblæren ut av munnen. Laks har en åpen forbindelse fra svømmeblæren til svelget (fysostom), som kan fungere som en sikkerhetsventil under slike forhold. Torsk har lukket svømmeblære (fysoklist) uten mulighet til akutt (rask) trykkkompensasjon.

I forhold til vurdering av skadeeffekter som resultat av lyd-stimulering er temporære og kroniske hørselstap ofte brukt.

Begrepene som brukes er «temporary threshold shift» (TTS) og «permanent threshold shift» (PTS). Dette er hørselstap som i første rekke oppstår når hårcellene i det indre øret rives over (Enger, 1981). Hårcellene repareres over tid (Lombarte et al., 1993) og derfor er kronisk hørselstap (PTS) ikke rapportert (Kvadsheim et al., 2017; 2020). TTS er imidlertid rapportert etter eksplosjoner med sprengstoff, men er mindre vanlig i forbindelse med luftkanoner annet enn på kloss hold (Kvadsheim et al., 2017; 2020).

## 6. Seismikkskyting og lydimpulser – definisjoner

I forbindelse med effekter av lyd på fisk oppgis lydets kildetrykk (SPL-Sound Pressure Level), som er lydtrykket en lydkilde vil ha på 1 m avstand med benevnelse dB re 1 $\mu$ Pa<sup>2</sup> 1m. SPL oppgis som peak eller rms (root mean square). SPL<sub>peak</sub> er maksimaltrykket i en lydimpuls, men SPL<sub>rms</sub> er et gjennomsnitt. For seismikkskyting er SPL bare teoretisk fordi det er samvirket mellom flere luftkanoner arrangert i rekker (array) som lager den akustiske pulsen. Nært slike rekker er lydbildet komplekst (nærfelt) før det på en viss avstand bygges opp en plan bølgefront (fjernfelt). Overgangen fra nærfelt til fjernfelt kan være flere titalls meter. Hensikten med å arrangere luftkanoner i rekker er å lage en direktiv lydkilde hvor som mye som mulig av lydenergien sendes rett ned mot bunn og ikke sløses ut til sidene. Dette illustrerer at SPL for en rekke av luftkanoner er et teoretisk nivå hvor det faktiske lydtrykket i nærfeltet er lavere enn det teoretiske.

Dette er et forhold som kan bety mye for effekten av seismikkskyting på nært hold. Mottatt lydtrykksnivå (RL-received level) er et målt lydtrykk på en viss avstand fra kilden og har benevnelse dB re 1 $\mu$ Pa.

I forhold til effekter av luftkanonskudd på fisk vil ikke bare SPL og RL, men også varigheten av skuddet per tidsenhet (duty cycle) være viktig. Et mål på dette er lydeksponeringsnivået (SEL-Sound Exposure Level). Dette sier noe om den totale lydenergien fisken utsettes for, og SEL er mere relevant enn SPL når effekter på fisken skal vurderes. Siden en seismisk undersøkelse foregår over tid, vil fisk utsettes for mange repeterte luftkanonskudd. Dette omtales som et kumulativt lydeksponeringsnivå (SEL<sub>cum</sub>) hvor SEL<sub>cum</sub> er summen av SEL over perioden av interesse. SEL og SEL<sub>cum</sub> har benevnelse dB re 1  $\mu$ Pa<sup>2</sup>·s (Popper et al., 2014).

## 7. Luftkanonskudd og effekter på laks

Et luftkanonskudd vil inneholde frekvenser i området <10-400 Hz, med dominerende lydtrykk rundt 50-100 Hz (Green and Richardson, 1988). Noe som er overlappende med høreområdet for laks (<10-400 Hz). Kildetrykk vil variere avhengig av forhold som kildens størrelse og konfigurasjon, men nivåer på 220-240 dB re 1 $\mu$ Pa er ikke uvanlig. Laks vil utvilsomt høre luftkanonskudd over store avstander, men når det gjelder dødelighet, skade og atferdsendringer på laks i merd, er mye usikkert.

Å bruke kildetrykk som utgangspunkt for beregning av lydtrykk på ulike avstander fra et seismikkfartøy er forbundet med stor usikkerhet. I vurdering av effekter på marint liv er reelle målinger av lydtrykk på kjente avstander fra seismikkfartøyet på aktuelle lokaliteter er det beste. I ett tilfelle ble lydnivået fra et luftkanonarray på 3590 in<sup>3</sup> (59 liter) ble målt til 177 dB re  $\mu$ Pa<sup>2</sup>s SEL ved avstand 760 m vanddypp foran kilden og ved 63 m avstand i horisontal retning (Tashmukhambetov et al., 2007). Årsaken til denne forskjellen er fordi den seismiske kilden er direktiv og retter mesteparten av energien mot havbunnen (ref. Kap. 6). Lyd som sendes til siden kan betraktes som uønsket lekkasje. Når vannet er dypt ved en laksemerd vil det i hovedsak være denne sideveis lekkasjen laksen vil bli eksponert for. På grunt vann (<200 m) vil imidlertid lydimpulsen reflekteres fra bunnen med høy intensitet og fortsette og reflekteres mellom overflate og bunn til den dør ut. Lydtrykksnivå i nærliggende merder er da vanskelig å forutsi. Lyden vil også i større grad undergå et sylindrisk heller enn et geometrisk spredningstap på grunt vann fordi lyden tvinges mellom overflate og bunn og får ikke spre seg fritt. Dette betyr at lydenergien tapes mindre med avstand enn i fritt felt. Bunntopografi og bunntype vil også påvirke lydets refleksjon og spredningstap. Forplantning av lyd gjennom grunnen er også et forhold å ta med i vurderingen av effekt av seismikkskyting på laks i merd. Hva som vil være tilfellet på lokaliteten havmerden ønskes lagt vites ikke før det gjøres en grundig utredning gjennom modellering og reelle feltmålinger. Siden laks ikke er følsom for lydets trykkkomponent, men partikkelbevegelsen er det også denne som bør måles lokalt i merda. Hawkins and Popper (2017) diskuterer årsaker til avvik mellom modeller og reelle feltmålinger når det gjelder både partikkelbevegelse og lydtrykk og kompleksiteten ved å beregne partikkelbevegelse fra lydtrykket. Måling av partikkelbevegelse i denne forbindelse er imidlertid ikke så vanlig som hydrofonmålinger og kommersielle løsninger er ikke lett tilgjengelige. Måling av partikkelbevegelse i bioakustiske studier er heller ikke trivielt (Gray et al., 2016a). Prinsippet for en slik sensor er beskrevet i Sigray and Anderson (2011), og Sivle et al., (2017) bygget en autonom utgave av Sigray and Anderson (2011) til egne feltstudier hvor de målte partikkelakselerasjon i merder under seismikkskyting. På tross av usikkerheter med hydrofonmålinger i vurderingen av effekt av seismikkskyting på laks vil uansett målinger med hydrofonbøyer installert på de aktuelle lokalitetene for havmerder når det gjøres seismiske undersøkelser i nærheten, være av verdi.

Veldig lite er kjent når det gjelder seismikkskyting og laks i merd bortsett fra et nyere feltstudium fra Havforskningsinstituttet (Sivle et al., 2017) hvor de simulerte et seismisk survey. Undersøkelsen var primært rettet mot makrell, men det ble også gjort observasjoner av laks og ørret i nærliggende merder. Makrell i merd ble studert ved hjelp av ekkolodd og videoovervåkning mens den ble eksponert for gradvis økende lyd fra en luftkanon som ble tauet etter et fartøy som kjørte mot merden. Lydnivå inne i merden i form av trykk og partikkelakselerasjon ble målt med hydrofoner og en partikkelakselerasjonssensor. Fiskens atferd ble analysert i form av svømmehastighet, vertikal fordeling i merden, samt gruppedynamikk og stimadferd. Nærliggende kommersielle merder med laks og ørret i avstander på 2-3 km (1-1.5 nmi) ble også undersøkt med tanke på atferdsendringer. Lydpulser ble presentert med 10 s repetisjonsrate etter hvert som båten nærmet seg fra 7000 til 330 m. RL og SEL<sub>cum</sub> i makrellmerden varierte fra henholdsvis 146 to 171 dB re 1 $\mu$ Pa og 123 - 149 dB re  $\mu$ Pa<sup>2</sup>s. Partikkelakselerasjonen var 0.02 og 0.15 m/s<sup>2</sup> på henholdsvis 7000 og 330 m. Frekvensinnholdet i de motatte pulsene varierte noe med avstand, men var 10-200 Hz på 330 m. Det er viktig å presisere at i dette studiet ble det brukt en liten luftkanon som er mye svakere enn de array som brukes i ordinære seismiske undersøkelser. Om man tar utgangspunkt i de målte verdiene inne i makrellmerden vil dette ifølge Handegard et al., (2012) tilsvare en avstand på om lag 10-15 km fra et array av typisk størrelse for en ordinær seismisk undersøkelse.

Hovedkonklusjonen på arbeidet til Handegard et al., (2012) var ingen dødelighet, skade eller atferdsreaksjoner ble observert verken på makrellen eller i de nærliggende lakse- og ørretmerdene. Lydnivå ble ikke målt i laksemerdene.

Effekt av undervannseksplisjon på laks ble studert i laboratorietanker (Sverdrup et al., 1992). Voksen laks ble utsatt for sprengning på kloss hold ved bruk av fenghetter avsatt 10 ganger over 70 minutter. Lydtrykket i tankene ble målt til over 240 dB re 1  $\mu$ Pa. Bortsett fra en umiddelbar reduksjon i svømmehastighet, ble ingen atferdsendringer som fluktreaksjon observert. Det var heller ingen dødelighet verken umiddelbart eller i løpet av 7 dager etter eksplosjonene, eller økning i stresshormoner i blodet. Noen forbigående endringer i blodkar ble imidlertid funnet. Fysisk skade på blodkar forventes ikke etter skudd med luftkanon. Fenghetter inneholder svært raskt omsettelig sprengstoff hvor energi per tidsenhet (stigetid) og spisstrykk under en eksplosjon er mye høyere enn i et luftkanonskudd. Stigetid og spisstrykk er viktig for den skade som kan oppstå etter undervannseksplisjoner (se Popper et al., 2014). At forskene ble gjennomført i laboratorietanker og ikke i fritt felt, kan ha betydning for resultatene (Gray et al., 2016b).

Terskel for atferdsreaksjoner relatert til høreterskelen hos laks, er etablert av Knudsen et al., 1992; 1994. På 10 Hz, som er i nedre del av frekvensområdet for luftkanon-

skudd, var terskel for atferds reaksjon  $10\text{-}2\text{ m/s}^2$ , mens for frekvenser som dominerer i et luftkanonskudd (150 Hz) ble ingen atferds reaksjon observert selv ved nivåer av partikkelakselerasjoner på  $4\text{ m/s}^2$ . Dette er omtrent 114 dB over

høreterskel for denne frekvensen (Hawkins and Johnstone, 1978). Fravær av atferds reaksjon selv ved ganske høye partikkelakselerasjoner er i samsvar med resultatene til Sivle et al., 2017.

## 8. Luftkanonskudd og effekter på villfisk

En norsk ekspertgruppe oppsummerte nylig i rapport til Miljødirektoratet kunnskapsstatus på effekter på fisk og konkluderte med at seismikk kan skade fisk, men skade er begrenset til nærområdet rundt luftkanonene (<5 m avstand) og risiko for bestandeffekter er dermed ekstremt liten. I forhold til atferd vises det til at fisk viser endret adferd og kan unngå området hvor det foregår seismiske undersøkelser, samt stoppe viktig atferd som matsøk (Kvadsheim et al., 2017; 2020).

Sild og makrell er de to viktigste kommersielle pelagiske artene i Norge. Effekter av seismikk på sild har vært studert ved to anledninger; under gytevandring på våren (Slotte et al., 2004) og under beiting på sommerstid (Pena et al., 2012). Ingen av disse studiene fant noen klar atferdsendring hos sild, verken i form av horisontal eller vertikal forflytning (Slotte et al., 2004) eller i stimens struktur og størrelse (Pena et al., 2012).

Engås et al., (1996) fant en signifikant nedgang av torsk og hyse under og etter en seismisk undersøkelse sammen-

liknet med før undersøkelsen startet på Nordkappbanken i Barentshavet. Undersøkelser med ekkolodd og fangst av fisk viste en betydelig nedgang så langt som 18 nmi (33 km) fra skyteområdet, og denne nedgangen vedvarte i minst 5 døgn i etterkant av den seismiske undersøkelsen. Under en seismisk undersøkelse i Vesterålen i 2009, ble det gjort tilsvarende akustisk dekning med ekkolodd av hele området før, under og etter den seismiske undersøkelsen, men her fant en ikke noen endring i mengde bunnfisk før, under og etter undersøkelsen (Løkkeborg et al., 2012). Det ble imidlertid rapportert at seismikk kan forstyrre beiting hos fisk (Løkkeborg et al., 2012).

Havforskningsinstituttet fraråder pr 2021, seismikkundersøkelser i viktige gyteområder, samt i en sone rundt gyteområdet på 20 nmi for ordinære undersøkelser og 5 nmi for mindre undersøkelser. I tillegg frarådes undersøkelser langs viktige vandringsruter inn mot gyteområdene (Sivle et al., 2021).

## 9. Retningslinjer for lydeksponering av fisk

En internasjonal arbeidsgruppe utarbeidet i 2014 en rapport på retningslinjer for lydeksponering for fisk og havskilpadder (Popper et al., 2014) hvor resultatene ble presentert som et sett av tabeller. Tabell 1 viser oversikt over seismiske luftkanoner. I tabellen defineres laks som fisk hvor svømmeblæren ikke er involvert i hørsel. Terskel for dødelighet og potensiell dødelig skade ligger på  $210\text{ dB re }1\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s SEL}_{\text{cum}}$ , mens skadeeffekter i form av midlertidig hørselstap ikke

forekommer ved et  $186\text{ dB re }1\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s SEL}_{\text{cum}}$ . Dette bør svare til noen hundre meters avstand fra et seismikkfartøy. En terskelverdi for atferdsendringer er ikke etablert, men ifølge retningslinjene vil atferdsendringer forekomme på noen tusen meters avstand med lav sannsynlighet, på noen hundre meter med moderat sannsynlighet og på noen titals med høy sannsynlighet. Retningslinjer må naturligvis være på den sikre siden, noe som innebærer at de er konservative.

Tabell 1: Oppsummering av kunnskapsstatus på effekt av seismiske luftkanoner på fisk og havskilpadder. Laks faller i kategori fisk hvor svømmeblæren ikke er involvert i hørsel. I siste rad i tabellen vises det til atferdsendringer hvor (N-near) svarer til noen titals meter fra et seismikkfartøy, (I-intermediate) til noen hundre meter, og (F-far) til noen tusen meter.

**Table 7.4 Seismic airguns.** Data on mortality and recoverable injury from Halvorsen et al. (2011, 2012a, c) based on 960 sound events at 1.2 s intervals. TTS based on Popper et al. (2005). See text for details. Note that the same peak levels are used both for mortality and recoverable injury since the same SEL<sub>ss</sub> was used throughout the pile driving studies. Thus, the same peak level was derived (Halvorsen et al. 2011).

Type of Animal	Mortality and potential mortal injury	Impairment			Behavior
		Recoverable injury	TTS	Masking	
Fish: no swim bladder (particle motion detection)	>219 dB SEL <sub>cum</sub> or >213 dB peak	>216 dB SEL <sub>cum</sub> or >213 dB peak	>>186 dB SEL <sub>cum</sub>	(N) Low (I) Low (F) Low	(N) High (I) Moderate (F) Low
Fish: swim bladder is not involved in hearing (particle motion detection)	210 dB SEL <sub>cum</sub> or >207 dB peak	203 dB SEL <sub>cum</sub> or >207 dB peak	>>186 dB SEL <sub>cum</sub>	(N) Low (I) Low (F) Low	(N) High (I) Moderate (F) Low
Fish: swim bladder involved in hearing (primarily pressure detection)	207 dB SEL <sub>cum</sub> or >207 dB peak	203 dB SEL <sub>cum</sub> or >207 dB peak	186 dB SEL <sub>cum</sub>	(N) Low (I) Low (F) Moderate	(N) High (I) High (F) Moderate
Sea turtles	210 dB SEL <sub>cum</sub> or >207 dB peak	(N) High (I) Low (F) Low	(N) High (I) Low (F) Low	(N) Low (I) Low (F) Low	(N) High (I) Moderate (F) Low
Eggs and larvae	>210 dB SEL <sub>cum</sub> or >207 dB peak	(N) Moderate (I) Low (F) Low	(N) Moderate (I) Low (F) Low	(N) Low (I) Low (F) Low	(N) Moderate (I) Low (F) Low

Notes: peak and rms sound pressure levels dB re 1 μPa; SEL dB re 1 μPa<sup>2</sup>-s. All criteria are presented as sound pressure even for fish without swim bladders since no data for particle motion exist. Relative risk (high, moderate, low) is given for animals at three distances from the source defined in relative terms as near (N), intermediate (I), and far (F).

### 9.1. Skade og død

Skadeeffekter på fisk i forhold til seismikkskyting er i første rekke knyttet til høreorganet, med unntak av på kloss hold hvor skader kan oppstå på svømmeblæren selv og organer som er koblet til svømmeblæren. I tabellen må lydtrykket være 207 dB re 1  $\mu$ Pa ( $SEL_{cum}=210$  dB re 1  $\mu$ Pa<sup>2</sup>-s) for å forårsake umiddelbar skade eller død. Slike nivåer vil bare opptre rett ved seismikkfartøyet og er i samsvar med oppsummeringen til Kvadsheim et al., (2017) som viser til at skade er begrenset til avstander <5 m fra luftkanon. I arbeidet til Sverdrup et al., (1992) som detonerte fenghetter på kloss hold av laks i laboratorietanker ble ingen død funnet verken umiddelbart eller i løpet av 7 dager etter eksponeringen selv ved lydtrykk >240 dB. Noen kortvarige endringer i blodkar ble rapportert.

Terskel for midlertidig hørselstap (TTS-temporary threshold shift) er satt til nivåer godt over 186 dB re 1  $\mu$ Pa. I et feltstudium ble noe redusert hørsel funnet hos torsk som ble utsatt for 20 luftkanonskudd på 20 m avstand (Knudsen and Karlsen, 1992). Lydtrykket ble målt til 224 dB re 1  $\mu$ Pa. Varigheten av hørselstapet ble ikke undersøkt. Siden laks hører dårligere enn torsk og det at svømmeblæren ikke er koblet til hørselen, tilsier at effekten på laks i et tilsvarende forsøk ville vært mindre.

### 9.2. Atferdsendring

I henhold til retningslinjene til Popper et al., (2014) vil atferdsendringer med stor sannsynlighet forekomme innenfor noen titalls meter fra kilden, med moderat sannsynlighet innenfor noen hundre meters avstand og med liten sannsynlighet om avstanden blir noen tusen meter. I forhold til Sivle et al., (2017) og Knudsen et al., (1992; 1994), som ikke påviste atferdsreaksjoner hos laks selv ved ganske høye nivåer av lyd, er retningslinjene til Popper et al., (2014) konservative.

Om fisk i merd blir skremt, kan dette i verste fall utløse panikk og stressreaksjoner som gjør at fisk dør. Dødelighet av stress kan være forsinket og opptre etter at den seismiske undersøkelsen er over. En sammenheng kan da være vanskelig å påvise. Laks viste imidlertid en svært rask tilvenning til lyd som ved første gangs presentasjon utløste kraftige fryktreaksjoner (Knudsen et al., 1992; 1994). Ramp-up kan være et tiltak som reduserer sjansene for at panikk og stress hos laks i merd oppstår som resultat av seismikkskyting. Dette diskuteres også av Sivle et al., (2017) som mulig forklaring på fravær av atferdsreaksjon på makrell i merd som ble utsatt for et gradvis økende nivå av luftkanonskudd. Hvordan laks reagerer på lyd kan imidlertid variere fra panikkartet svømming til ingen reaksjon på samme stimulus under helt like forsøksbetingelser uten noen åpenbar forklaring (Knudsen et al., 1994; 1997). Dette kan også gjelde laks i merd, noe som gjør det vanskelig å generalisere enkeltobservasjoner av atferd.

Ikke dødelige effekter kan være at fisk mister appetitten og i perioder under og etter seismikkskyting spiser mindre. Slike effekter er rapportert på villfisk etter seismikkskyting (Løkkeborg et al., 2012). I sjøvannsfasen er laksen fra 1-6 kilo. Hvorvidt laks i løpet av sjøvannsfasen vil reagere ulikt på støy fra seismikkskyting vites ikke. Lydens utbredelse fra seismikkfartøyet vil påvirkes av temperaturgradienter og en årstidsvariasjon av støyinnivå i merda bør belyses.

Det nærmeste vi kommer en forståelse av hvordan laks i merd vil reagere på seismikkskyting er studiet til Sivle et al., (2017) som dokumenterte at laks og ørret i kommersielle merder ikke viste noen atferdsendring på seismikkskyting i en avstand av 2-3 km (1-1,5 nmi) fra luftkanonskudd. Dette var eksponering til en liten luftkanon og ikke et array av luftkanoner normalt for seismiske undersøkelser. Hovedfokus i Sivle et al., (2017) var makrell og et tilsvarende arbeide bør gjøres på laks.

## 10. Forebyggende tiltak på havmerda

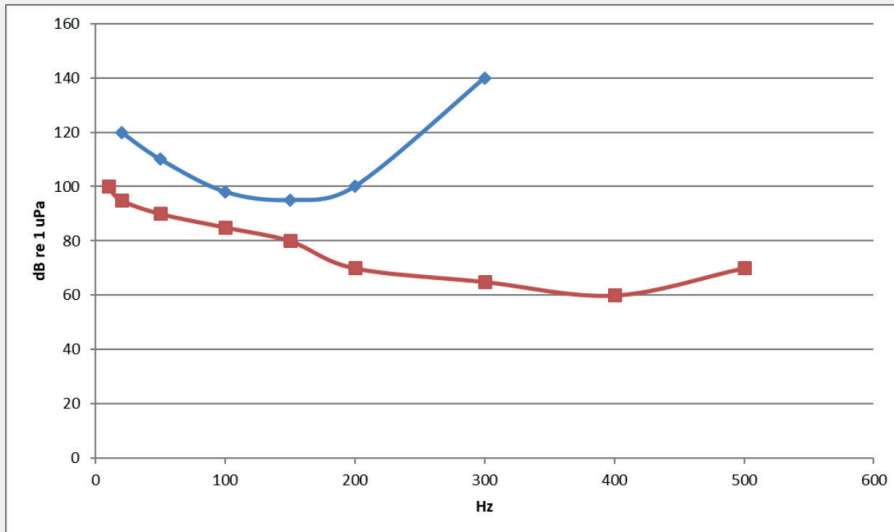
For å undersøke eventuelle effekter på laksen av seismiske undersøkelser (eller andre begivenheter) vil kamera og ekkolodd kontinuerlig overvåke atferden til laksen på havmerda. I tillegg vil en hydrofon kontinuerlig måle støyinnivået i merda med vektlegging av de frekvenser som laks kan høre slik at en eventuell sammenheng mellom støy og fiskeatferd kan dokumenteres. Ekkolodd og hydrofon som instrumenter i studier av fisk er beskrevet i Mann et al., (2008).

For å redusere risikoen for utilsiktet kontakt med fremmede fartøy, er det ønskelig med en sikkerhetssone rundt anlegget (SFF). I oljevirkosomheten på norsk sokkel har installasjoner en sikkerhetssone rundt og over som typisk er på 500 m (Rammeforskriften (Petroleumsvirkosomheten) 2011, Kap. VIII. Sikkerhetssoner til havs). Noe som også vil være en naturlig størrelse på en sikkerhetssone for havbruk i åpent hav.

# 11. Måling av støy på OF1 og hørsel hos laks

På Ocean Farm 1 (OF1) ble støy i merda målt og relatert til høreterskel hos laks (Hawkins and Johnstone, 1978). En hydrofon (OceanSonics, icListen) ble festet til kamerariggen og målte lydnivået i merda i frekvensområdet 10 til 500 Hz. Laks hører i dette området med en begrensning oppad

i frekvens til om lag 400 Hz. Hensikten i første omgang var å måle bakgrunnsstøy i merda og relatere dette til hva laks kan høre (Figur 8). Senere vil dette brukes til å se på støy knyttet til ulike operasjoner/aktiviteter og om dette fører til atferdsendring hos laksen (observert på kamera og ekkolodd).



Figur 8: Figuren viser det målte lydnivået i merda (rød) og laksens høreterskel (blå).

Lydnivået i merda ligger på nivå med forventet bakgrunnsstøy i havet (Wenz, 1962) og må derfor vurderes som lavt. Lydnivået ligger til dels langt under hva laksen kan høre, men over høreterskel for torsk og sild (Popper and Hawkins, 2019). Målingene ble gjort på en dag med rolig og pent vær,

og uten båtanløp eller andre operasjoner i merda. I dårlig vær med regn og vind forventes det at støyen i merda vil øke til over høreterskelen for laks og maskere lydoppfattelsen. Hvordan støynivået endres under seismikkskyting og andre operasjon, gjenstår å se.

## 12. Konklusjon

- Direkte skade og akutt død på laks i havmerder som resultat av seismiske undersøkelser er lite sannsynlig selv om seismikkfartøyet nærmest er på kloss hold.
- Ifølge foreslåtte retningslinjer vil atferdsendringer med høy sannsynlighet forekomme om seismikkfartøyet er noen titalls meter fra merda, med moderat sannsynlighet om avstanden er noen hundre meter, og med liten sannsynlighet om avstanden er noen kilometer.
- I et feltstudium utført av HI, ble det ikke observert noen atferdsendring på laks og ørret i nærliggende merder når det ble skutt seismikk.
- Det bør rettes oppmerksomhet mot panikk og stressreaksjoner hos laks i merd som resultat av seismiske undersøkelser.
- I forkant av at havmerder installeres bør relevant måleinstrumentering installeres på de aktuelle lokalitetene og måle lydnivå når seismiske undersøkelser gjennomføres i nærheten.
- Som et forebyggende tiltak bør havmerder utrustes med ekkolodd og kamera for overvåking av fisken og hydrofon for måling av lydnivå under seismiske undersøkelser.
- Det anbefales at det gjennomføres et feltstudium av effekter av luftkanonskyting på laks i merd under realistiske forhold.





# Referanseliste

- Chapman, C. J., & Hawkins, A. D. (1973). A field study of hearing in the cod, *Gadus morhua* L. *Journal of comparative physiology*, 85(2), 147-167.
- Chapman, C. J., & 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 Part A: Physiology*, 47(1), 371-385.
- Dalen, J., Hovem, J. M., Karlsen, H. E., Kvadsheim, P. H., Løkkeborg, S., Mjelde, R., ... & Skiftesvik, A. B. (2008). 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.
- Enger, P. S. (1981). Frequency Discrimination in Teleost – Central or Peripheral? Pp 243-245 in Tavolga, W. N.; Popper, N. A.; Fay, R. R. (eds). "Hearing and sound communication in fishes", Springer-Verlag, New York, Heidelberg, Berlin.
- Engås, A., Løkkeborg, S., Ona, E., & Soldal, A. V. (1996). Effects of seismic shooting on local abundance and catch rates of cod (*Gadus morhua*) and haddock (*Melanogrammus aeglefinus*). *Canadian journal of fisheries and aquatic sciences*, 53(10), 2238-2249.
- Fiskeridirektoratet. (2019). Kartlegging og identifisering av områder egnet for havbruk til havs. Rapport. Arkivsaksnummer 18/141.
- Gray, M., Rogers, P.T. and Zeddies, D.G. (2016a). Acoustic particle motion measurement for bioacousticians: principles and pitfalls. *Proc. Mtgs. Acoust.*, 27, 010022.
- Gray, M. D., Rogers, P. H., Popper, A. N., Hawkins, A. D., and Fay, R. R. (2016b). Large" tank acoustics: how big is big enough? In *The Effects of Noise on Aquatic Life, II*. Ed. by A. N. Popper and A. D. Hawkins. Springer, New York.
- Greene, C. R. & Richardson, W. J. (1988). Characteristics of marine seismic survey sounds in the Beaufort Sea. *J. Acoust. Soc. Am.* 83, 2246, 2246-2254.
- Halvorsen, M. B., Zeddies, D. G., Ellison, W. T., Chicoine, D. R., & Popper, A. N. (2012). Effects of mid-frequency active sonar on hearing in fish. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(1), 599-607.
- Handegard, N. O., Tronstad, T. V. & Hovem, J. (2012) Evaluating the effect of seismic surveys on fish – the efficiency of different exposure metrics to explain disturbance. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 70: 1271-1277
- Hawkins, A. D. (1986). Underwater Sound and Fish Behaviour. In *The Behaviour of Teleost Fishes*, pp. 114-151. Ed. by T. J. Pitcher. Springer US, Boston, MA.
- Hawkins, A. D., & Johnstone, A. D. F. (1978). The hearing of the Atlantic salmon, *Salmo salar*. *Journal of Fish Biology*, 13(6), 655-673.
- Hawkins, A. D., Pembroke, A. E., & Popper, A. N. (2015). Information gaps in understanding the effects of noise on fishes and invertebrates. *Reviews in fish biology and fisheries*, 25(1), 39-64.
- Hawkins, A. D., & Popper, A. N. (2017). A sound approach to assessing the impact of underwater noise on marine fishes and invertebrates. *ICES Journal of Marine Science*, 74(3), 635-651.
- IAGC. Geophysical Surveys. Lastet ned 18.02.2021 fra <https://iagc.org/our-industry/geophysical-surveys/>
- Knudsen, F. R., Enger, P. S., & Sand, O. (1992). Awareness reactions and avoidance responses to sound in juvenile Atlantic salmon, *Salmo salar* L. *Journal of fish biology*, 40(4), 523-534.
- Knudsen, F. R., Enger, P. S., & Sand, O. (1994). Avoidance responses to low frequency sound in downstream migrating Atlantic salmon smolt, *Salmo salar*. *Journal of fish biology*, 45(2), 227-233.
- Knudsen, F. R., Schreck, C. B., Knapp, S. M., Enger, P. S., & Sand, O. (1997). Infrasound produces flight and avoidance responses in Pacific juvenile salmonids. *Journal of Fish Biology*, 51(4), 824-829.
- Kvadsheim P. H., Sivle L. D., Hansen R. R., Karlsen, H. E. (2017). FFI-rapport 17/00075. Effekter av menneskeskapt støy på havmiljø. Rapport til Miljødirektoratet om kunnskapsstatus.

- Kvadsheim P. H., Forland T. N., de Jong K., Nyqvist D., Grimsbø E., Sivle L. D. (2020). FFI-rapport 20/01015. Effekter av støyforurensning på havmiljø – kunnskapsstatus og forvaltningsrådgiving. Rapport til Miljødirektoratet om kunnskapsstatus.
- Lombarte, A., Yan, H. Y., Popper, A. N., Chang, J. S., & Platt, C. (1993). Damage and regeneration of hair cell ciliary bundles in a fish ear following treatment with gentamicin. *Hearing research*, 64(2), 166-174.
- Løkkeborg, S., Ona, E., Vold, A., & Salthaug, A. (2012). Sounds from seismic air guns: gear-and species-specific effects on catch rates and fish distribution. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 69(8), 1278-1291.
- Mann, D. A., Hawkins, A. D., & Jech, J. M. (2008). Active and passive acoustics to locate and study fish. In *Fish bioacoustics* (pp. 279-309). Springer, New York, NY.
- Martin, B., Zeddies, D. G., Gaudet, B., and Richard, J. (2016). Evaluation of three sensor types for particle motion measurement. In *The Effects of Noise on Aquatic Life II*, pp. 679-686. Ed. by A.N. Popper, and A. D. Hawkins. Springer, New York.
- Norskpetroleum (10.04.2019). Seismikk. Lastet ned 18.03.2021 fra <https://www.norskpetroleum.no/leting/seismikk/>
- Peña, H., Røttingen, J., Skaret, G., Utne, K. R., & Nøttestad, L. (2012). Cruise report on northeast Atlantic mackerel (*Scomber scombrus*) abundance and distribution in the North Sea and west of the British Isles from 1st to 20th of October 2012.
- Popper, A. N., Fay, R. R., Platt, C., & Sand, O. (2003). Sound detection mechanisms and capabilities of teleost fishes. In S. P. Collin & N. J. Marshall (Eds.), *Sensory processing in aquatic environments* (pp. 3-38). New York, NY: Springer-Verlag.
- Popper, A. N., Hawkins, A. D., Fay, R. R., Mann, D. A., Bartol, S., & Carlson, T. J. (2014). Sound exposure guidelines for fishes and sea turtles (No. ASA S3/SC1. 4 TR-2014).
- Popper, A. N. & Hawkins, A. D. (2019). An overview of fish bioacoustics and the impacts of anthropogenic sounds on fishes. *J. Fish. Biol.* 94, 692-713.
- Rammeforskriften (Pretroleumsvirksomheten) (2011) Forskrift om helse, miljø og sikkerhet i petroleumsvirksomheten og på enkelte landanlegg (rammeforskriften). Tilgjengelig fra: [https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2010-02-12-158#KAPITTEL\\_8](https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2010-02-12-158#KAPITTEL_8) (Hentet: 09. mars 2021).
- SalMar, (2021). Søknad om klarering av lokalitet i Norskehavet for Smart Fish Farm pilotprosjekt. Tilgjengelig fra: [https://www.fiskeridir.no/Akvakultur/Tema/Havbruk-til-havs/kunngjoring-soknad-om-klarering-av-lokalitet-for-akvakultur-i-norskehavet/\\_attachment/download/a7b5fd31-d0ab-4aee-89d0-e47eb33f35ef:16d8934c6924e66970ceba68718c-653fa1278d9/soknad-klarering-lokalitet-Norskehavet-040121.pdf](https://www.fiskeridir.no/Akvakultur/Tema/Havbruk-til-havs/kunngjoring-soknad-om-klarering-av-lokalitet-for-akvakultur-i-norskehavet/_attachment/download/a7b5fd31-d0ab-4aee-89d0-e47eb33f35ef:16d8934c6924e66970ceba68718c-653fa1278d9/soknad-klarering-lokalitet-Norskehavet-040121.pdf)
- Sand, O. (1974). Directional sensitivity of microphonic potentials from the inner ear of perch. *J. Exp. Biol.* 60, 881-989.
- Sand, O., & Hawkins, A. D. (1973). Acoustic properties of the cod swimbladder. *Journal of Experimental Biology*, 58(3), 797-820.
- Sigray, Peter, and Mathias H. Andersson. "Particle motion measured at an operational wind turbine in relation to hearing sensitivity in fish." *The Journal of the Acoustical Society of America* 130.1 (2011): 200-207.
- Sivle, L. D., Forland, T. N., Hansen, R. R., Andersson, M., Grimsbø, E., Linne, M., & Karlsen, H. E. (2017). Behavioural effects of seismic dose escalation exposure on captive mackerel (*Scomber scombrus*). Rapport fra havforskningen.
- Sivle, L. D., Forland, T. N., de Jong, K., Kutti, T., Zhang, G., Wehde, H., & Grimsbø, E. (2021). Havforskningsinstituttets rådgiving for menneskeskapt støy i havet-Kunnskapsgrunnlag, vurderinger og råd for 2021. Rapport fra havforskningen.
- Slotte, A., Hansen, K., Dalen, J., & Ona, E. (2004). Acoustic mapping of pelagic fish distribution and abundance in relation to a seismic shooting area off the Norwegian west coast. *Fisheries Research*, 67(2), 143-150.
- Sverdrup, A. Kjellsby, E., Krüger, P. G., Fløysand, R., Knudsen, F. R., Enger, P. S., Serck-Hanssen, G., Helle, K. B. (1994). Effects of experimental seismic shock on vasoactivity of arteries, integrity of the vascular endothelium and on primary stress hormones of the Atlantic salmon. *J. Fish. Biol.* 45(6), 973-995.
- Wenz, G. M. (1962). Acoustic ambient noise in the ocean: Spectra and sources. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 34(12), 1936-1956.





KONGSBERG

