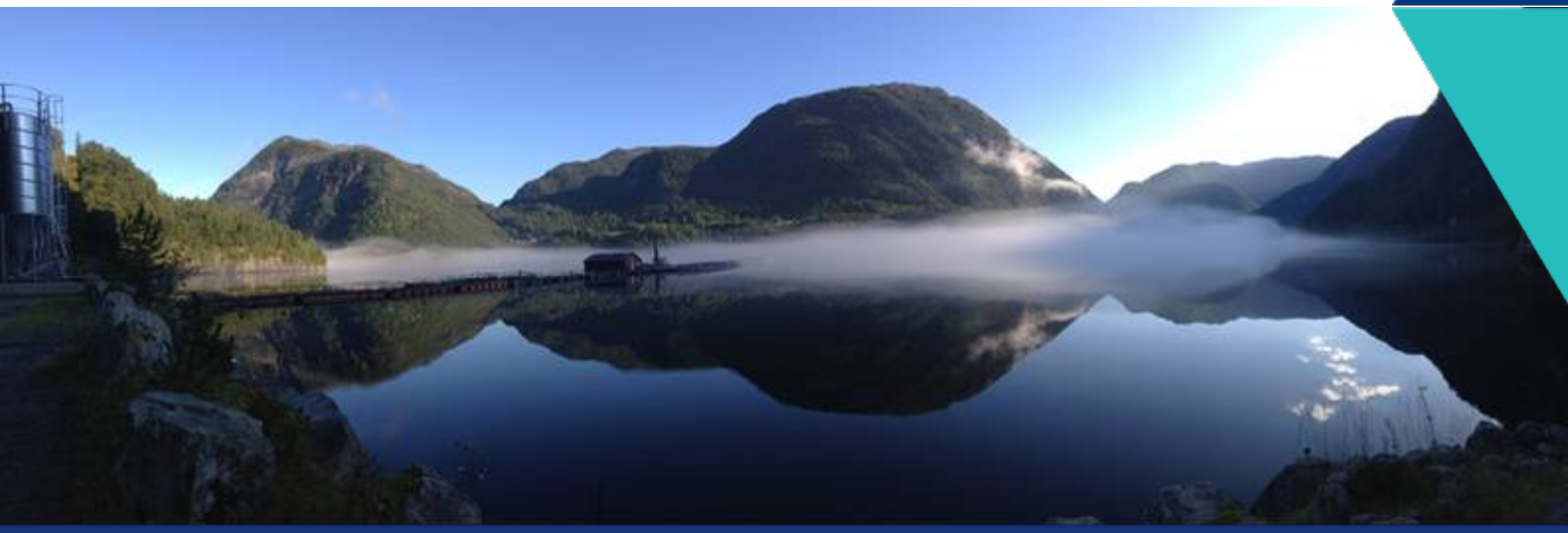
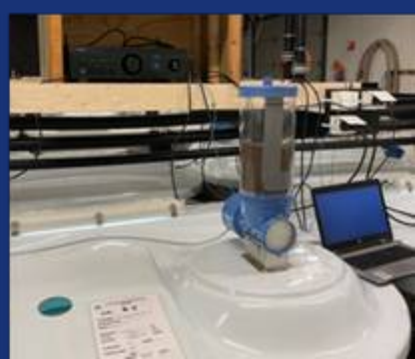
STØY SOM MULIG STRESSFAKTOR OG VELFERDSUTFORDRING I OPPDRETTSNÆRINGEN

Sluttrapport FHF #901744 «Soundscape»





RAPPORT FRA HAVFORSKNINGEN NR. 2025-10

Tittel (norsk og engelsk):

Støy som mulig stressfaktor og velferdsutfordring i oppdrettsnæringen

Sound as a possible stress and welfare challenge in salmon farming

Undertittel (norsk og engelsk):

Sluttrapport FHF #901744 «Soundscape»

End report FHF #901744 «Soundscape»

Rapportserie:	**År - Nr.:**	**Dato:**
Rapport fra havforskningen	2025-10	05.03.2025

ISSN:1893-4536

Forfatter(e):

(HI), Luke Barrett (Deakin University), Thomas Fraser, Tone Vågseth (HI), Kathy Overton (Deakin University), Tim Dempster (Deakin University) og Marco Vindas (NMBU)

Forskningsgruppeleder(e): Lars Helge Stien (Dyrevelferd)
Godkjent av: Forskningsdirektør(er): Geir Lasse Taranger
Programleder(e): Robin Ørnsrud

Distribusjon:

Åpen

Prosjektnr:

14597-17

Oppdragsgiver(e):

Fiskeri og Havbruksnæringens Forskningsfond (FHF)

Oppdragsgivers referanse:

901744

Program:

Fremtidens havbruk

Forskningsgruppe(r):

Dyrevelferd

Antall sider:

31

Samarbeid med

Deakin University og Norges miljø-og biovitenskapelige universitet (NMBU)

Forord:

Finansieringen ble gitt av Fiskeri- og Havbruksnæringens Forskningsfond (FHF) prosjekt #901744 Salmon Soundscape og internt Havforskningsinstitutt prosjekt #14597-17. Vi takker de besøkte anleggene og deres positive holdning til å villig dele deres lyder med oss. En stor takk til prosjektets referansegruppe (Ove Martin Grøntvedt, Geir Magne Knutsen, Karl Fredrik Ottem og FHF observatør Renate Johansen) for nyttige innspill i forkant og underveis. Gjennomføringen har hatt stort utbytte av innspill og tidvis deltagelse fra kollegaer med lydekspertise (Karen de Jong, Tonje Nesse Forland, Guosong Zhang, Lise Doksæter Sivle, Hans Erik Karlsen, Stephen Swearer).

Sammendrag (norsk):

I moderne lakseoppdrett i sjø og på land er miljøet ofte preget av mye menneskeskapt lyd. Muligens kan lydstøy ha negativ påvirkning på laksen, det mest produserte husdyret i Norge, men omfanget og effekten lyden har på fisken er ikke kjent i detalj. Prosjektet: «Lyd i lakseoppdrett: Kartlegging, måling og risikovurdering for atferdsmessige og velferdsmessige konsekvenser (Salmon Soundscape)» har derfor undersøkt hva som er typiske lyder ved 10 ulike anlegg: åpne eller lukkede merder i sjøen og på land. For ytterligere å forstå hvordan støy påvirker laks, gjennomførte vi forsøk på laks hvor særlig stressende lavfrekvent lyd (10 Hz) ble gitt i 5 min hver dag, 30 ganger. Målt var å finne markører i hjernen for vurdering av lydens langtidseffekter. Laks ble deretter utsatt for «oppdrettslyder» både forutsigbart og uforutsigbart som smolt i kar på land etterfulgt av uforutsigbare lyder i merder i sjø for å studere kort- og langtidseffekter på stress og tilvenning.

Fra feltmålinger observerte vi at lyden som oppdrettslaks opplever spenner fra bakgrunnsnivåer rundt 95 dB re 1 µPa, til typiske nivåer opp mot 134 dB og i særlig støyende perioder opp mot 157 dB. Lyden var høyest i lukkede anlegg i sjø, sannsynligvis skapt av pumper som kontinuerlig sørger for friskt vann til fisken. Landanleggene var noe mindre støyende, sannsynligvis fordi pumper og annet støyende utstyr er adskilt fra vannvolumet som fisken oppholder seg i. I åpne merder var det stillere, spesielt om natten. Men på dagtid var det tidvis støyende arbeidsoperasjoner og båter. Ved 3 anledninger ble meget høye lyder med spisstrykk >175 dB målt, enten når en luke ble stengt med ett smell eller sprengning fant sted i nærheten. Frekvensområdet for støyen som ble målt var innenfor det hørbare området for laksefisk. Den enkle konklusjonen er at oppdrettslaks lever i en støyende verden med unntagelsesvis meget høye lyder.

I forsøket med lave frekvenser (< 15 Hz) og meget kraftig lyd (142-169 dB) fant vi at laksen umiddelbart reagerte med en fluktrespons, forhøyet plasma kortisol og redusert nevronal aktivitet i hjernen (hypotalamus). Over tid reagerte færre fisk på den daglig repeterende, kjente lyden og kortisol responsen avtok. Dermed viste laksen en atferdsmessig og fysiologisk tilvenning. Men, etter en måned hadde laksen likevel økt serotonergisk aktivitet (som tyder på kronisk stress i hjernen) og hemmet uttrykk av gener i hypothalamus som normalt er positivt assosiert med vekst og reproduksjon.

I forsøket hvor laksesmolt fikk avspilt uforutsigbar eller forutsigbar lyd fra oppdrettsanleggene eller opplevde oppdrettskarets normale lyd (kontroll), og deretter ble eksponert for uforutsigbare lyder etter sjøutsett i merder analyserte vi atferd, fysiologi, nevrokjemi og genuttrykk. Det var ingen gruppeforskjeller i ferskvannsfasen, men lik atferdsmessig reaksjon på lyd og ingen fysiologiske responser på kortisol eller nevrokjemisk signalering av serotonin eller dopamin. Når vi lot fisk bli ytterligere akutt stresset ved uttak så vi normal kortisolrespons som viser at behandlingene ikke hadde påvirket fiskenes evne til å håndtere nye stressorer, og som igjen tyder på at ingen av de studerte lydmiljøene er mer eller mindre stressende i ferskvannsfasen. I merdene i sjøvann observerte vi derimot noen uforventete forskjeller i hvordan laksen håndterte uforutsigbar lyd og akutt stress. Det mest interessante var at kontroll fiskene reagerte atferdsmessig minst, mens fisk som hadde opplevd lyd i ferskvann responderte relativt sterkt med et uryddig svømmemønster. Responsen var mer dramatisk i gruppen som hadde fått forutsigbar lyd i ferskvann. Kortisol responsen i sjøvann var fraværende ved lydeksponering fra båter og lignende, men normal for alle grupper når den ble ytterligere akutt stresset. Den nevrokjemiske signalisering responsen viste at etter en akutt stress test responderte både kontroll og uforutsigbart gruppen med økt signalisering i hjernen (nevrotransmitteren serotonin) i bestemte områder, mens fisken som hadde fått forutsigbar lyd ikke responderte. Økt kortisolnivå uten å øke serotoninnivå kan være skadelig ved å føre til dårligere hjerne helse (mindre nevronal plastisitet og ubalanse i kroppens energi budsjett). Sammen med resultatene på atferd, tyder de nevrokjemiske responsene på at fisk som opplever stor grad av forutsigbar lyd i ferskvannfasen blir mer stresset når de opplever uforutsigbar lyd i sjøfasen.

Sammenstillingen av dagens kunnskap (i et litteratur review) viser at det meste av lydforskningen er utført og målt mhp. lydtrykk (dB re 1 µPa), mens partikkelbevegelse (ms^{-2}), som utgjør den viktigste lydkomponenten laks responderer på, er svært lite undersøkt. Flest studier er utført på arter med lukket svømmeblære som hører betydelig bedre enn laksen med sin åpne svømmeblære. Laksefisk kan detektere et bredt spekter av frekvenser, fra 1 til 1 000 Hz men hører best fa 100 Hz og 500 Hz, lyd som overlapper med typiske frekvenser fra utstyr og båter benyttet i oppdrett. Lyd i oppdrett rapportert i andre studier er innenfor nivåene registrert i dette prosjektet. Lydeksponeringer med kumulative nivå >177 re 1 μPa^2s ga moderate fysiologiske skader og >183 re 1 μPa^2s ga dødelige skader hos chinook laks. Akutte lyder utløser normalt en atferd som kan karakteriseres som en flukt- eller stressrespons hvor laksen prøver å unngå området med høy lyd eller virrer uryddig rundt med variabel retning og hastighet. Langtidsstudier på nivå opp til 149 re 1 µPa viser umiddelbare endringer i atferd hos laks som forsvinner over tid, mens fysiologi og velferd er vurdert som uendret (bortsett fra studiet nevnt over med 142-169 dB re 1 µPa). Noen få studier rapporterer at infralyd (f.eks. 5Hz) virker meget skremmende for laks og støtter at langtidsstudiet med daglig eksponering for 10 Hz ga dårligere velferd. Habituering til lyd er vanlig både målt som atferd og fysiologi. Det mangler klare anbefalinger for hva som er akseptable grenseverdier for ulik lyd i oppdrettsanlegg for laks.

Prosjektet har sammenfattet en liste med anbefalinger i forhold til støy i oppdrett. Støymålinger innen det hørbare området for laks bør vurderes opp mot grenseverdier for «kjente» negative konsekvenser på atferd, fysiologi og

fysiske skader. Unødig høy støy bør unngås og uforutsigbar støy begrenses. Oppdretter bør ha et aktivt forhold til bruk av støykilder i nærheten av fisken og vurdere om tilvenning kan være mulig. Sprengningsarbeid i nærheten eller andre akutt høye lyder kan føre til ugunstige atferdsendringer eller skader og er uønsket. Lite støy i ferskvannsfasen kan gi mer hardfør laks i sjø. Tiltak for å redusere støy kan være å lete etter støykilder med frekvenser < 500Hz og dempe lyden med adskillelse eller fysisk demping. Boblegardin kan nyttes som lyddemper i sjø, for eksempel ved sprenging. Bruk av elektrisk båt er mindre støyende enn tradisjonelle motordrevne. Anlegg bør ikke ligge meget nær travle farleder med stor båttrafikk og mye støy. Et godt eksempel på støyreduksjon er å dempe lukking av luker og unngå at de smeller igjen med et brak.

I fremtiden er det behov for å forstå bedre hvordan andre og nye typer anlegg kan påvirke laksens lydlandskap, eksempelvis nedsenket drift, lukket og semi-lukket i sjø samt oppdrett til havs. Vi må forstå bedre langtids konsekvensene av forskjellige typer lyd miljø i ferskvannsfasen (høy vs. lav støy). Allerede har vi sett at meget kraftig lyd påvirker hjernen i en retning som kan gi mulig veksthemming eller dårligere hjernehelse, men langtids konsekvensene er ikke undersøkt.

Prosjektet har hatt høy måloppnåelse, satt støy i lakseproduksjon på dagsorden, frembrakt nye resultater om hva som er lyden i oppdrett og mulige konsekvenser. De normale lydene i oppdrett (<135 dB re 1 µPa) antas ikke å gi betydelige negative konsekvenser for laksen, kortvarige støyende perioder (< 157 dB re 1 µPa) kan gi negative konsekvenser avhengig av varighet mens de akutte lyder som ble observert (>175 dB re 1 µPa) forventes å kunne gi hørseltap og fysiske skader. Kunnskapssammenstillingen viser behov for mer forskning for å frembringe mer eksakte terskelverdier for når lyd av ulike frekvenser, varigheter og intensiteter påvirker laksens atferd, fysiologi og velferd samt hvordan tilvenning og kronisk stress henger sammen. Rådgivende kunnskap for sprenging er mangelfull og det mangler data på målt partikkelakselerasjon og effekten av denne, lydens viktigste komponent i forhold til laks. For at oppdrettere skal kunne måle relevant støy som kan påvirke laksen, velge avbøtende tiltak og vurdere effekten bør det utvikles standardiserte målemetoder/ «beste praksis for lydmålinger».

Sammendrag (engelsk):

In modern aquaculture, both at sea and on land, farmed salmon live in environments characterized by significant human-made noise. This noise may potentially have a negative impact on the most farmed animal in Norway. However, the extent and effects of noise in salmon farming is not fully understood. The project titled: “Soundscape in salmon aquaculture: mapping, measurement, and risk assessment of behavioural and welfare consequences (Salmon Soundscape)” has therefore investigated the typical sounds within 10 different farms: open or closed sea cages and land-based systems. To better understand how noise affects salmon, we exposed them experimentally to particularly stressful low-frequency sound (10 Hz) for 5 minutes daily, 30 times. We tried to identify molecular markers in the brain to assess the long-term effects of the sound. In another trial, salmon smolts were exposed to "fish-farming sounds" in a predictable or unpredictable setup in freshwater tanks, followed by unpredictable sounds in sea cages to study both short- and long-term effects on stress and habituation.

The sound that farmed salmon experience ranges from background levels around 95 dB re 1 µPa to typical levels approaching 134 dB, with very noisy periods reaching up to 157 dB. The sound was loudest in closed sea cages, likely caused by pumps continuously supplying water to the fish. Land-based systems were somewhat less noisy, probably from pumps and other noisy equipment separated from the water volume in which the fish reside. In open cages, the environment was quieter, especially at night, though noisy operations and boats were present during the day. On three occasions, extremely high sounds exceeding 175 dB were measured, either when an underwater door was slammed shut or when blasting occurred nearby. The frequency range of the noise measured fell within the audible range for salmon. The simple conclusion is that farmed salmon live in a noisy world, with occasional very high sounds.

Previous knowledge indicate that low frequencies (<15 Hz) are particularly stressful for salmonids, and therefore experimental fish were exposed to 142-169 dB re 1 µPa whereby they immediately responded with a flight reaction, elevated plasma cortisol levels, and reduced neuronal activity in the hypothalamus. Over time, fewer fish reacted to the daily repetitive, familiar sound, and the cortisol physiological stress response diminished. Thus, the salmon showed both behavioural and physiological habituation. However, after a month, the salmon still had increased serotonergic activity (indicating chronic stress in the brain) and suppressed expression of genes in the hypothalamus that are normally positively associated with growth and reproduction.

In the experiment where smolts were exposed to either predictable or unpredictable playbacks of sounds, or experienced the normal tank sounds (control), followed by exposure to unpredictable sounds in sea cages, we analysed behaviour, physiology, neurochemistry, and gene expression. No group differences in the freshwater phase were present, but similar behavioural reactions to sound and no physiological responses in cortisol or neurochemical signalling of serotonin or dopamine. When individuals were further exposed to a standardised stressor, a normal increase in cortisol was seen, showing that the treatments did not affect the fish's ability to handle new stressors, and suggesting that none of the studied sound environments were more or less stressful during the freshwater

phase. In the sea cages, however, we observed some interesting differences in how the salmon handled unpredictable sound and acute stress. The most interesting finding was that control fish reacted behaviourally the least, while fish that experienced sound in freshwater responded relatively strongly with a disorganized swimming pattern. This response was more dramatic in the predictable compared to the unpredictable group. The cortisol response in seawater was absent when exposed to boat or similar sounds but increasing normally when additional acute stress at sampling. The neurochemical signalling responses showed that after an acute stress test, both the control and unpredictable groups responded with increased serotonergic activity in specific areas of the brain, while fish exposed to predictable sound did not respond. Elevated cortisol levels without a corresponding increase in serotonin levels may be harmful by impairing brain health (reduced neuronal plasticity and imbalance in the body's energy budget). Together with the behavioural results, the neurochemical responses suggest that fish exposed to high levels of predictable sound during the freshwater phase become more stressed when exposed to unpredictable sound in the seawater phase.

A review of current knowledge (literature review) reveals that most sound research has been performed and measured in terms of sound pressure (dB re 1 µPa), while particle movement (ms^{-2}), the most important sound component to which salmon respond, has been very little studied. Most sound studies focused on fish species with closed swim bladders that hear significantly better than the salmon with its open swim bladder. Salmonids can detect a wide range of frequencies, from 1 to 1000 Hz, but hear best at 100 Hz and 500 Hz, frequencies that overlap with typical frequencies from equipment and boats used in aquaculture. Sound in aquaculture, as reported in other studies, are within the levels measured in this project. Cumulative exposures to sound levels at single points exceeding 177 re 1 μPa^2s caused moderate physiological damage, and levels exceeding 183 re 1 μPa^2s caused lethal damage in chinook salmon. Acute sounds typically trigger a behavioural response that can be characterized as a flight or stress response, where the salmon try to avoid the high-noise area or swim disrupted with variable direction and speed. Long-term studies exposing salmon for up to 149 re 1 µPa have shown immediate behavioural changes that disappear over time, while physiology and welfare assessed as unchanged (except for the study mentioned above with 142-169 dB re 1 µPa). A few studies report that infrasound (e.g., 5 Hz) is particularly frightening for salmon, supporting the long-term study where daily exposure to 10 Hz resulted in poorer welfare. Habituation to sound is common, both in terms of behaviour and physiology.

The project has compiled a list of recommendations regarding noise in aquaculture. Noise measurements within the audible range for salmon should be considered against “established” threshold values for known negative consequences on behaviour, physiology, and physical damage. Unnecessarily high noise should be avoided, and unpredictable noise should be minimized. Fish farmers should actively manage the use of noise sources near the fish and consider whether habituation is possible. Blasting work nearby or other acute high sounds can lead to undesirable behavioural changes or injuries and should be avoided. Low noise levels in the freshwater phase may result in more resilient salmon in the seawater phase. Measures to reduce noise could include identifying noise sources with frequencies < 500 Hz and damping the sound by separation or physical attenuation. Bubble curtains could be used for sound attenuation in seawater, for example, during blasting. Using electric boats is less noisy than traditional motorized boats. Facilities should not be located too close to busy shipping channels with heavy boat traffic and noise. A good example of noise reduction is to soften the closing of hatches and avoid them slamming shut with a bang.

In the future, there is a need to better understand how different and new types of farming technology might impact the salmon's soundscape, such as submerged farming and operations, closed and semi-closed systems at sea, and offshore aquaculture. We must better understand the long-term consequences of different sound environments in the freshwater phase (high vs. low noise). We have already observed that very loud sounds affect the brain in a way that may hinder growth or impair brain health, though the long-term consequences have not been studied.

The project has achieved its original aims, brought noise in salmon production on the agenda, and generated new results about the sounds in aquaculture and their possible consequences. Normal sounds in aquaculture (<135 dB re 1 µPa) are not expected to have significant negative consequences for the salmon, but short noisy periods (<157 dB re 1 µPa) could have negative effects depending on their duration, while the acute sounds observed (>175 dB re 1 µPa) could lead to hearing loss and physical damage. The knowledge compilation highlights the need for more research to provide more precise threshold values for when sounds of different frequencies, durations, and intensities affect salmon behaviour, physiology, and welfare. Advisory knowledge for blasting is insufficient, and measured data on particle acceleration and it's consequences, the most important sound component for salmon, is lacking. To enable fish farmers to measure relevant noise that could affect salmon, choose mitigation measures, and assess their effects, standardized measurement methods should be developed.

Innhold

1 **Bakgrunn** 8
2 **Prosjektorganisering og metoder** 9
3 **Støy i lakseoppdrett** 10
4 **Den atferdsmessige og nevrobiologiske responsen på lydstress hos laks** 13
5 **Tilvenning til lyd** 17
6 **Effekter av støy på velferden til oppdrettslaks** 20
7 **Anbefalinger** 25
8 **Oppsummerende vurderinger og kunnskapsbehov** 26
9 **Prosjektets måloppnåelse** 27
10 **Referanseliste** 28

1 - Bakgrunn

Hørsel er en nøkkelsans i laksens liv, gir informasjon fra alle tre dimensjoner, og er viktig i mange sammenhenger, inkludert kommunikasjon, oppdagelse av mat og predatorer. Mye er kjent om hørselsevnen til både vill og oppdrettet fisk men det gjenstår viktige kunnskapshull om hvordan miljøstøy påvirker fisk. I settefisk- og sjøanlegg opplever laksen ulik grad av støy. Omfanget og effekten lyden har på laksen er ikke kjent i detalj og det er et behov for å utrede om hvilken lyder som er stressfaktorer for laks i oppdrettsanlegg. Påvirkningen kan være atferdsmessig med eller uten negative konsekvenser, føre til fysiologiske stressresponser, øke hørselsterskler, gi midlertidig eller ikke reversibel redusert hørsel, eller i verste fall gi dødelig utfall. I åpne sjømerder finnes det en rekke mulige støykilder som følge av infrastruktur, værforhold, operasjoner og særdeles båttrafikk. I landbasert oppdrett finnes enda flere mulige støykilder som både er konstante (f.eks. pumper) eller akutte (f.eks. transport, operasjoner og anleggsarbeid). Selv om laksefisk er meget dynamisk i forhold til sitt levemiljø og tilpasningsdyktig til en rekke avvikende faktorer som opptrer, kan lydstøy være en utfordring. Det er et uttrykt behov for innledende studier i oppdrettsnæringen, hvor målet er å kartlegge hvilke støykilder som finnes og hvorvidt slike faktisk påvirker fiskens helse og velferd. Slik kunnskap vil være utgangspunkt for anbefalinger om tiltak mot slike støyfaktorer og støykilder. I moderne oppdrett i sjø og på land lever oppdrettslaksen i et miljø som er preget av mye menneskeskapt lyd og støy. Muligens kan de støyende omgivelsene ha negativ påvirkning på det mest produserte husdyret i Norge.

Basert på behovet var prosjektets spesifikke målsetninger: å helhetlig gjennomgå og publisere status for dagens kunnskap om effekten av lyder, hvordan laksen prosesserer lyd, hvordan de reagerer og hvor tilpasningsdyktige de er i oppdrettsmiljøer for laksefisk (i), å kartlegge det kort- og langsiktige lydbildet ved oppdrettslokaliteter for laksefisk i landbaserte anlegg og merder for å etablere en basislinje for lydene som laksefisk utsettes for i industrielle omgivelser og identifisere frekvens, volum og varighet av lyder som kan være stressende for oppdrettsfisk (ii), bruke basislinjen for målte lyder i settefiskanlegg og sjø for å teste effekten av mulig skadelig lydfrekvens, -volum og -varighet på laksens atferd, stress og velferd i små og store eksperimenter (iii) for til slutt å sammenstille kunnskap og utvikle et hierarki av mulige risikotiltak for støy på oppdrettsanlegg og formidle disse til næringen (iv).

2 - Prosjektorganisering og metoder

Prosjektet har først undersøkt hva som er typiske lyder i merder i sjøen, lukkede anlegg i sjøen og ulike anlegg på land for liten og stor fisk. Deretter ble det utviklet noen markører i hjernen for å se på langtidseffekter av lyd. Til sist ble laks utsatt for typiske «oppdrettslyder» i kar og sjø for å studere kort- og langtidseffekter på stress og tilvenning til forutsigbare eller plutselige lyder.

Arbeidet ble fordelt på 4 arbeidspakker (AP) som skulle oppsummere kunnskapsgrunnlaget, kartlegge støybildet, teste relevant støy på fiskens atferd og velferd samt vurdere risiko og eventuelle mottiltak. Først skulle prosjektet gjennomgå publisert og erfaringsbasert kunnskap og lage en «state of the art» oppsummerende artikkel på hvordan støy forventes å påvirke atferd og velferd til oppdrettslaks (AP1). Et utkast ble presentert, men funnet meget mangelfull da det ikke fantes mye kunnskap og i samarbeid med referansegruppen ble denne utsatt til sluttfasen for å kunnen inkludere resultater fra prosjektet. Deretter kartla vi støy og støykilder i flere settefiskanlegg og sjøanlegg for å forsøke å beskrive sannsynlig skadelig støy, deres frekvenser og varighet (AP2). Gjennom eksperimentelle kar- og merdstudier testet vi mulig skadelig støy på individer og grupper av atlantisk laks. Her skulle vi avdekke mulige negative effekter på atferd, stress og velferd, og mulige terskelnivåer der negative effekter begynner å bli synlige (AP3). Til slutt skulle prosjektet sammenfatte all eksisterende informasjon og gi anbefalinger til næringen for mulig støyreduksjon og andre avbøtende tiltak for å minimere eventuelle skadelige effekter av støy på fisk (AP4). Prosjektets nytteverdi skulle overføres til næringen gjennom aktiv kommunikasjon etter hvert som resultater foreligger fra de ulike arbeider.

Forskningsarbeidene er utført av prosjektdeltakere fra Havforskningsinstituttet (HI), Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU) sammen med Deakin University. Forsøk har blitt gjennomført ved HI sine forsknings- og oppdrettsfasiliteter i Matre og kjemiske analyser er utført i lab hos NMBU.

For å beskrive lyden i lakseoppdrett ble målinger av lyd foretatt hos kommersielle oppdrettere (Bremnes Seashore, Osland Havbruk, Salmon Evolution, Ovum og MOWI) eller HI. Lyd ble hovedsakelig målt med hydrofonen SoundTrap ST400 i representative posisjoner hvor laksen oppholder seg.

I forsøk 1 ble halvvoksen laks i kar utsatt for meget kraftig, lavfrekvent støy i 5 minutter daglig, repetert 30 ganger. Atferd, fysiologi og neurologiske responser i hjernen ble målt regelmessig for å etablere en basis for hvordan laks responderer på akutt og repeterende lyd.

I forsøk 2 ble laks gitt forutsigbar, uforutsigbar eller kontroll lydforhold 2 måneder i FV og deretter overført til sjøvann som smolt og gitt uforutsigbar lyd. Atferd, fysiologiske og nevrologiske responser ble målt akutt og over tid. Til sist ble laksens evne til å reagere på annet stress undersøkt.

Til sist i prosjektet ble det forfattet en oppsummerende artikkel på hva vi vet om hvordan lyd påvirker laks, hva vi ikke vet og generelle anbefalinger for å unngå støy som en velferdsutfordring.

3 - Støy i lakseoppdrett

Lydmålingene hentet inn fra ulike oppdrettsanlegg i sjø og på land er tilgjengelig i mer detalj som en HI rapport (Oppedal m.fl. 2024/ HI-23) og som innsendt vitenskapelig manuskript (Barrett et al., in revision).

Bakgrunn

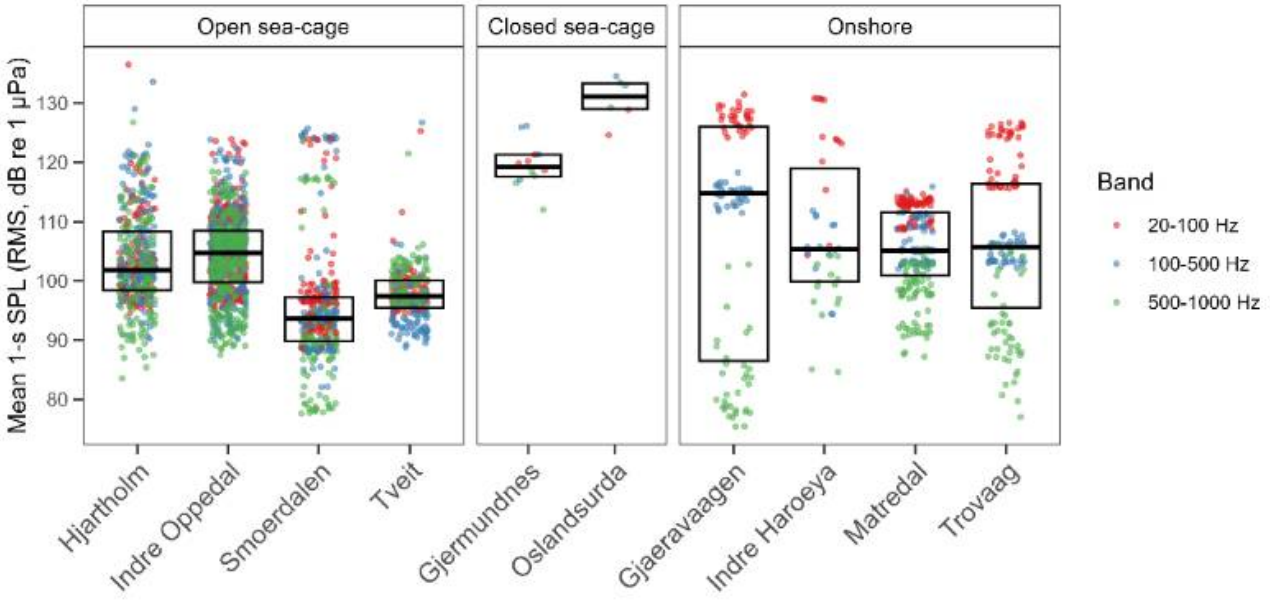
Lydnivået på oppdrettsanlegg har økt ettersom anleggene har blitt større, mer mekanisert og bruker en rekke støyende maskiner (arbeids- og brønnbåter, pumper og kompressorer). Lyd brer seg godt under vann og kan høres av fisk. Oppdrettsfisk lever med andre ord i et miljø som er preget av mye menneskeskapt lyd og støy. Vi ønsket å beskrive denne menneskeskapte lyden i mer detalj ettersom den muligens påvirker atferd, velferd, helse og produksjonen av oppdrettsfisken, eller andre dyr i nærheten av anlegget.

Oppsett

Gjennom feltobservasjoner ble det målt lydnivå (SPL = sound pressure levels) under vann ved 10 ulike oppdrettsanlegg for laks i Norge, hvorav 4 åpne merder, 2 semi-lukkede merder og 4 landbaserte karanlegg. Lydmålinger ble gjennomført med hydrofonen SoundTrap ST400 (Ocean Instruments, New Zealand). Lyden (nivå, frekvens og mangfold) varierte betydelig mellom anlegg, over tid og rom innenfor lokaliteter, og med dominerende lyder i frekvensområdet som laksefisk kan høre (~20–500 Hz). Lydnivåene for anleggene ble beregnet som kvadratisk gjennomsnitt (RMS) for blant annet frekvensbåndene 20-100 Hz og 100-500 Hz.

Resultat

Lyden varierte betydelig mellom anlegg, over tid innenfor anlegg og mellom ulike anleggsmiljø (Figur 3.1). Den laveste lyden (<80 dB re 1 µPa) ble målt innenfor høye frekvenser ved landanleggene Gjæravågen, Trovåg og på sjøanlegget Smørdalen, innerst i en liten fjord. Ved samtlige anlegg, unntatt Matredal, ble lydnivåer >120 dB re 1 µPa hyppig målt. Det var mindre lyd i åpne merder i sjø enn i lukkede enheter eller anlegg på land innen hørselsområde for laks. Lydnivåene var imidlertid mer varierende ved de åpne sjøanleggene og med døgnmønster i sjøen som ikke var tydelig på land.



Figur 3.1 Gjennomsnitt av lydtrykknivåer over 20–100, 100–500 and 500–1000 Hz frekvensbånd fra hydrofoner plassert på 10 lakseoppdrettsanlegg, åpne/ lukkede merder eller på land. Hvert punkt representerer gjennomsnittlig lydnivå for perioder på 30-60 minutter basert på 1-s SPL_{RMS} verdier. Punktene er farget i forhold til frekvensområde. Bokser indikerer nivået for 25., median og 75. prosentil for frekvensbåndet 20-1000 Hz. Continuous root-mean-square sound pressure level (SPL) over 20–100, 100–500 and 500–1000 Hz frequency bands during hydrophone deployments at 10 commercial salmon farming sites. Each point represents the arithmetic mean of numerous 1-s SPL_{RMS} values within 30-60 mins bins. Boxes indicate the 25th, median, and 75th percentile levels among the mean SPLs. Alternativ tekst: Grønne, blå og røde punkt indikerer lydnivå ved henholdsvis frekvensene 20-100, 100-500 og 500-1000 Hz for de ulike lokaliteter hvor det er høyeste lyd på de laveste frekvenser, særlig på land.

I lukkede merder var lyden kraftigst i frekvensområdet 100-500 Hz hvor typiske SPLRMS verdier lå i området 123-134 dB re 1 µPa. Lyden i støyende perioder var betydelig høyere, med SPL_{RMS} verdier på 143-154 dB re 1 µPa. I kar var det mer lyd i frekvensområdet 20-100 Hz hvor det typiske lydnivået var lavere enn i lukket merd med SPL_{RMS} på 112-127 dB re 1 µPa, og i støyende perioder med SPL_{RMS} verdier på 131-135 dB re 1 µPa. Lyden i landanleggene var mer forutsigbare enn i sjø. I de åpne merdene var det mindre støy enn i både lukket og landanlegg, likere verdier mellom de to frekvensbåndene og med typiske SPL_{RMS} verdier på 95-105 dB re 1 µPa. Men, i åpne sjøanlegg var det derimot stor variasjon mellom dag og natt, hvor støy var knyttet til besøk av arbeids- og brønnbåter og deres operasjoner (eksempelvis; avlusing med trenging og pumping av fisk). Lydnivåer i støyende perioder hadde SPL_{RMS} verdier på 138-157 dB re 1 µPa med mest støy i frekvensområdet 20-100 Hz. Når brønnbåter manøvrerte langs en merd og lydenergien ble kumulert over tid, i form av lydeksponerings nivået (SEL) som et mål på total lyd-dose kunne verdiene komme opp i 144-145 dB re 1 μPa^2s, 20–1000 Hz over 60 s. Nærhet av fartøy til hydrofonen (fisk) hadde en dramatisk effekt på målt lyd, med høye nivåer når arbeids- eller brønnbåter var langsmed merden hvor hydrofonen var utplassert. Under avlusing ble fartøy og tilhørende maskineri kjørt døgnet rundt, noe som ga vedvarende SPL_{RMS}-verdier på ~125–140 dB re 1 µPa over 20–1000 Hz. Avlusingsoperasjoner var dominert av vedvarende lyder (innen spesifikke frekvenser) fra motorer, pumper og kompressorer som roterer med konstant hastighet, illustrert av bredbåndssignaler produsert av hovedmotorene, propellene og generell etterklang. De høyeste lydnivåene (sekunder til minutter) var assosiert med propell/impeller-kavitasjon mens fartøyene manøvrerte langs merden, og ga 1-s SPL_{RMS} verdier på opptil 157 (20-100 Hz) dB re 1 µPa ved hydrofonen. Det er sannsynlig at laksen normalt vil bli utsatt for lignende lydnivåer ved brønnbåtbesøk på merdene, spesielt under trenging da fisken er nær fartøyet. Vi målte ikke lydnivåer som fisk opplevde mens de ble behandlet eller transportert inn og ut av

brønnbåtene.

Meget støyende forhold gitt som spisstrykket ble beregnet for <1 sekund hvor SPL_{RMS} ≥175 dB re 1 µPa ble observert ved tre anledninger: under sprengning ved et storsmoltanlegg på land, inne i en lukket merd nær en undervannsluke som ble lukket med et smell og ved sjøanlegget Hattasteinen ved detonasjon av 850 kg sprengstoff omtrent 1500 m unna. Når undervannsluken ble lukket viste de fleste fisk en fluktrespons vekk fra lydkilden. Basert på støyen som luken laget og atferdsresponsen ble lukkemekanismen ombygd og lyden dempet. Et typisk eksempel på lydreduserende tiltak. På landanlegget observerte personellets at fisken går mot bunnen av karet under sprengingen og tilsvarende svømte fisken i merdene ned mot bunnen av merden.

Bortsett fra i disse tre relativt uvanlige tilfellene, målte vi ikke nivåer av lyd som kan gi betydelig hørselstap eller akustisk skade hos fisk. Men lydnivåer målt i de fleste systemer, spesielt plutselige lyder vil ofte gi betydelige responser på atferd hos fisken, illustrert av fluktresponsene observert ved sprenging og lukelukking. Generelt var lydene vi målte innenfor samme type og nivåer som tidligere er rapportert fra oppdrettsanlegg, men målingene beskriver betydelig mer detaljer om lyden og sammenhenger mellom tid på døgn, type anlegg, støyende utstyr og fartøy. Det gjenstår å vurdere om de støyende oppdrettsmiljøene kan føre til akklimering og/eller kronisk stress. Det er behov for mer kunnskap for å forstå de samvirkende effektene av lyd og varighet på atferd, helse- og velferd hos oppdrettslaks.

Samlet sett var lyden ved lakseanlegg dominert av relativt lavfrekvente lyder som faller innenfor det hørbare området til laksefisk og andre fisker. Dette gjaldt spesielt innen landbasert oppdrett eller lukkede merdsystemer, ettersom støy skapt av pumper og annet maskineri forplanter seg til oppdrettsmiljøet. Lydnivået ved merdoppdrettsanlegg var mer varierende, med de mest støyende periodene knyttet til aktiviteten hos arbeids- og brønnbåter på stedet. Med sjeldne unntak er det imidlertid lite sannsynlig at typiske lydnivåer i lakseoppdrett vil forårsake betydelig hørselstap eller akustisk skade på oppdrettsfisk. Potensialet for kortvarig og/eller kronisk stress som respons på lydeksponering krever videre undersøkelse, med spesiell vurdering av rollene til forutsigbare og uforutsigbare lyder.

4 - Den atferdsmessige og nevrobiologiske responsen på lydstress hos laks

Oppsett og resultater er tilgjengelig i mer detalj som en publisert vitenskapelig artikkel (Oppedal et al., 2024a)

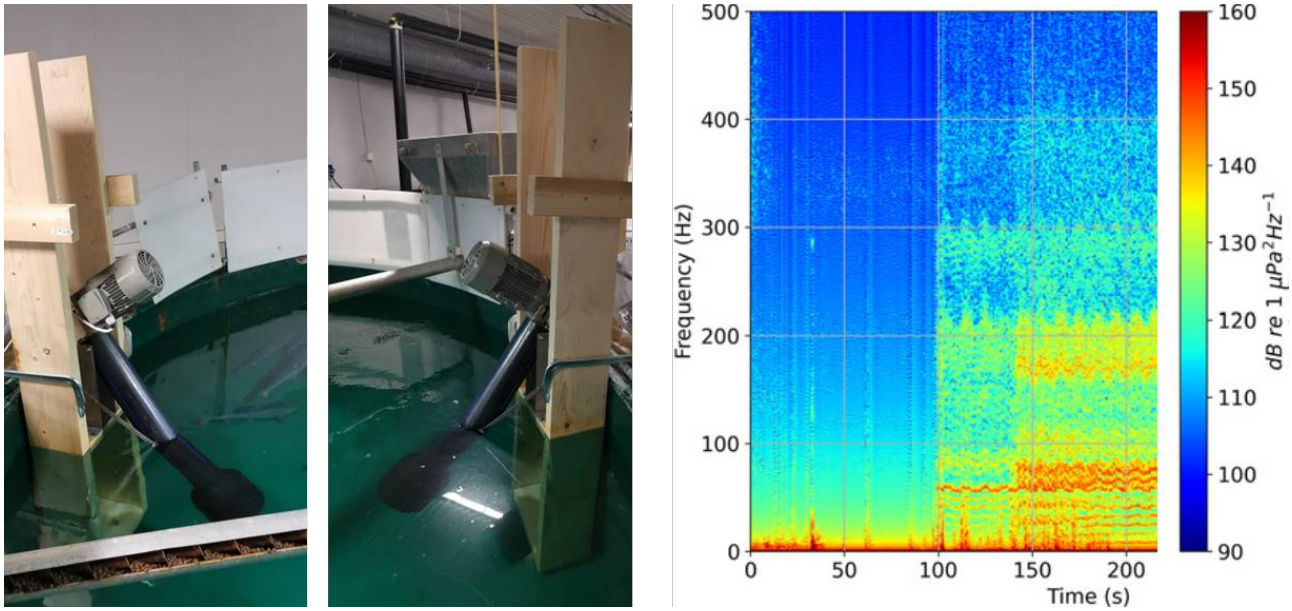
Bakgrunn

Støy knyttet til menneskelige aktiviteter i vannmiljøer kan påvirke fysiologien og atferden til fisk og andre vannlevende arter. Ved langvarig påvirkning kan negative konsekvenser på populasjons- og økosystemnivå oppstå. Lavfrekvent lyd er spesielt stressende siden det er en viktig faktor i interaksjoner mellom rovdyr og byttedyr. Det er også kjent at lavfrekvent lyd påvirker laksen i naturen og initierer en fluktrespons vekk fra lydkilden. For oppdrettslaks finnes det imidlertid lite kunnskap på området. Selv om atferdsmessige og fysiologiske studier er utført for å vurdere effekter av lyd på en rekke arter, er også nevrobiologiske studier fortsatt manglende, og fraværende på oppdrettslaks. Sannsynligvis blir også fisken vant med lyd som er til stede over lengre perioder eller som alltid kommer på samme tidspunkt.

Vi ønsket å undersøke hvordan kraftig, lavfrekvent lyd som fisken hører ofte påvirker dens atferd og fysiologi, samtidig som vi ønsket å finne markører/ utrykk i hjernen for slik påvirkning som senere kunne nyttes i andre forsøk eller ved prøvetaking av annen fisk. Vi testet også om laksen kan venne seg til lyden etter repetitive eksponeringer.

Oppsett

I forsøket ble replikate grupper av laks utsatt for en lydbølger som ble laget ved hjelp av en maskin som hadde et stempel som beveget seg opp ned i vannet med en frekvens på omtrent 10 Hz. To slike maskiner ble montert motsatt av hverandre i et kar med diameter 3 m og det totale lydnivået var 142-169 dB avhengig av laksens avstand fra de to lydkildene. Lydmaskinenes plassering i karet og lydstyrkens fordeling på ulike frekvenser er illustrert i figur 4.1. Maskinens stempel produserer lyd på 9-10 Hz og de ulike bånd på diagrammet representerer andre bevegelige deler i maskinen som lager lyd med høyere frekvenser eller resonanser.



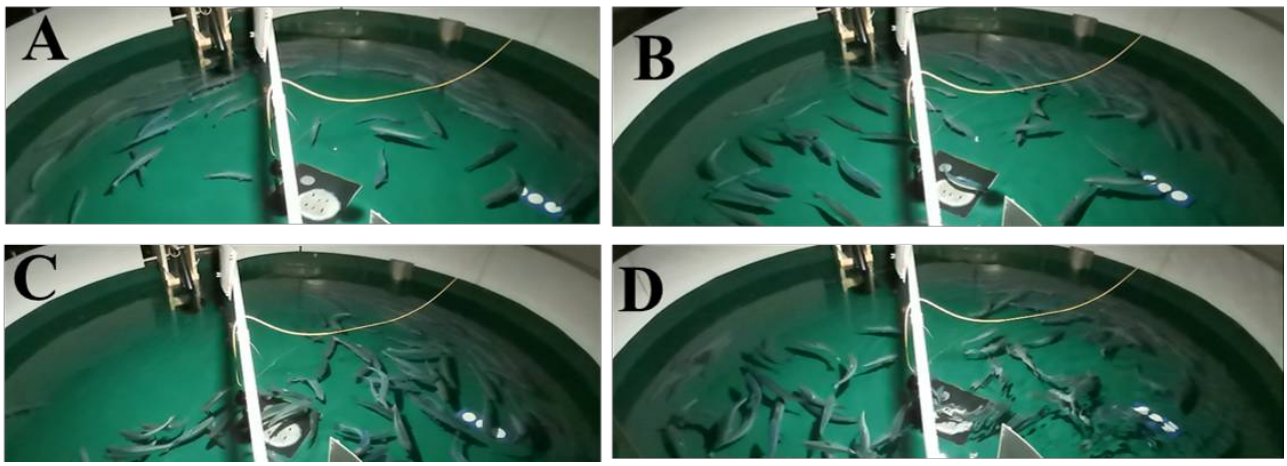
Figur 4.1 Bilder av 2 lydmaskiner montert ovenfor hverandre i et kar med diameter 3 m. Diagram viser lydnivå gitt frekvens før lyd (0-100s) og med hhv. en (100-140s) og to (140s-) lydmaskiner påslått. Images of two sound machines mounted across each other in a tank with a diameter of 3 meters. The diagram shows the sound level at different frequencies before the sound (0-100s) and with one (100-140s) and two (140s-) sound machines turned on.

Lydbølgene (f.eks. 10 Hz) som oppstår når vi beveger stempelet med 10 Hz i vann, er lavfrekvent lyd og partikkelakselerasjonen er stor. I naturen vet vi at når en rovfisk svømmer, kommer lyden av disse bølgene først. Rovfisken avslører altså at den er på vei med lydbølgene den produserer, og da vet laksen at den må komme seg bort. Derfor vet vi at slik lavfrekvent lyd stresser, eller gir en fluktrespons laksen. Eksperimentet varte i en og en halv måned og gikk ut på å utsette laksen for samme lyd flere ganger, på samme tidspunkt og like lenge hver gang. Oppdrettslaksen opplevde 5 minutter med lavfrekvent lyd om dagen i 30 gjentagelser. Underveis ble det gjennomførte observasjoner av atferd.

Det ble repetitivt tatt ut 21 prøver av fiskens blod og hjerner før eksperimentet startet, etter at de hadde hørt lyden én gang og så etter at de hørt den 10, 20 og 30 ganger. På denne måten ville vi vurdere markører for stressresponsen og studere atferdsmessig og fysiologisk tilvenning. Vi ville forstå både hva som skjer første gangen de hører lyden og hva som skjer over tid. Kan de venne seg til den hvis samme type lyd alltid kommer på samme tid? Og hvor lang tid tar det å venne seg til det? Måleparameterne inkluderte kortisol i blodplasma, nevronal aktivitet, monoaminerg signalering og genuttrykk i 4 områder av forhjernen.

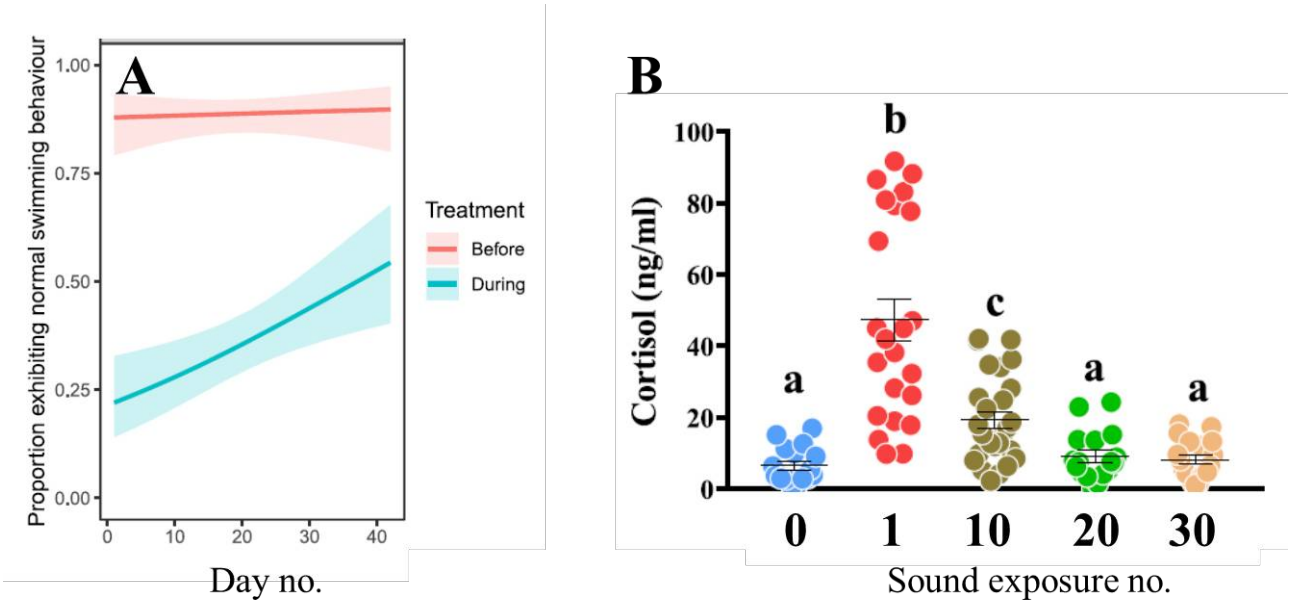
Resultater

Ved lydeksponering reagerte de fleste laksene med å endre atferd (Figur 4.2 og 4.3A). I forkant av lyden står fisken med normal svømming som innebærer at de fleste fisker typisk svømmer mot vannstrømmen og individene fordeler seg relativ jevnt utover i karet (Figur 4.2A). Ved lydeksponering endres atferden umiddelbart ved at laksen viser en fluktrespons og svømmer vekk fra lydkilden (Figur 4.2B-C). Under de 5 minutter med lyd fortsetter laksen med å vise et uryddig svømmemønster med ujevn og ustrukturert svømmeretning, -fart og fordeling (Figur 4.2D).



Figur 4.2 Bilder som illustrerer atferd før (A), umiddelbart etter lyd startes (B, C) og 10 sekunder inn i perioden med lyd (D). Når lydeksponering starter, flykter laksen fra lydkilden og svømmer «uryddig» på kryss og tvers i karet. *Images illustrating behaviour before (A), immediately after the sound is started (B, C), and 10 seconds into the sound exposure period (D). When the sound exposure commence, the salmon flee from the sound source and swim "erratically" away and in all directions within the tank.*

Laksen ble noenlunde like mye skremt hver gang lyden startet, men viste mer normal svømming ett minutt inn i perioden med lyd, etter gjentatte eksponeringer (Figur 4.3A). Vi vet ikke om laksen var blitt mer vant med lyden eller om det var fordi de hadde lært seg hvilket område den kraftigste lyden var og derfor holdt seg unna. For de fiskene som var nært lydkilden, reagerte de like kraftig hver gang.



Figur 4.3A Nedgang i atferdsmessig stressrespons gjennom antall eksponeringer (og dager) i ett av tre replikate kar. Responsen ble målt som andel av fisk som svømmer normalt før lyd (rød) og 1 minutt (blågrønn) inn i lydperioden. Økende andeler av fisken viste normal atferd 1 minutt inn i perioden med lydeksponering. 4.3B Nedgang i stressrespons målt som kortisol i blod 5 minutter etter avsluttet lydstimuli på dag 0 (før stimuli), 1, 10, 20 og 30 lydrepetisjoner. 4.3A Predicted proportion of salmon exhibiting typical behaviour (i.e., maintaining their position in the water column swimming against the current) before and during exposure to the sound stress illustrated for 1 out of 3 replicate tanks. The increasing proportion exhibiting typical behaviour during sound exposure between Day 1 and Day 42 (i.e., after 30 days of sound stress) indicates an increasing number of fish showing normal swimming behaviour. 4.3B Cortisol response in blood measured before sound stimulus given (sample 0) and after 1, 10, 20 and 30 sound stimuli repetitions.

Første gang laksen ble eksponert for den kraftige lavfrekvente lyden, oppsto det en voldsom stressreaksjon som sees som økt mengde kortisol i blodet (Figur 4.3B). Men når de hadde hørt lyden 10 ganger, var det færre fisk som responderte med økt kortisol og selv om gjennomsnittet var forhøyet var det en betydelig svakere stressrespons. Når laksen hadde hørt lyden 20 ganger, var kortisolnivået nesten nede på normalen, slik det var før eksperimentet startet.

Hjernen påvirkes av lydstresset (Oppedal et al 2024). Vi fant at lydeksponering induserte en aktivering av stressresponsen ved å fremkalle en innledende fluktatferd, sammen med økt plasmakortisolnivåer. Videre så vi en reduksjon i nevronal aktivitet i de hypotalamiske tuberkulære kjernene (TN). Etter 20 og 30 gjentagelser viste laksen en grad av tilvenning i sin atferd og kortisolrespons. Men ved 30 gjentagelser viste laks også tegn på kronisk stress med økte serotonerge aktivitetsnivåer i det dorsolaterale og dorsomediale pallium, preoptiske område, og TN, samt en hemming av vekst og reproduksjons transkripsjon i TN. Med andre ord, både laksens atferd og stressnivå kan tyde på at fisken er i stand til å venne seg til lyder ganske raskt, men undersøkelsene av fiskehjernene viste en mer varig påvirkning. Sammensatt så tyder våre data på at langvarig eksponering for lyd resulterer i kronisk stress som fører til nevrologiske endringer som kan gi nedsatt fitness.

Når vi ser på enkeltparametere, ser vi at stresset er mer langvarig enn vi trodde på forhånd. Flere av hjerneområdene som påvirkes av stress, var nokså aktive gjennom hele eksperimentet. Vi ser at uttrykket av de forskjellige genene som har å gjøre med vekst og reproduksjon å gjøre, er hemmet. Det er for tidlig å si noe nøyaktig om hva det kan få å si for veksten og reproduksjonsevnen, men endringene i hjernen tyder på at de kan bli påvirket. Flere områder i hjernen fikk et forhøyet nivå av signalstoffet serotonin. En slik ubalanse i serotoninsystemet kan føre til mange forskjellige sykdommer, og særlig sykdommer som har å gjøre med hjernehelse. Serotonin er et stoff som påvirker blant annet vekst, regulering av emosjoner og appetitt. Et av områdene i hjernen som hadde forhøyet serotonin-nivå, er et område det foreløpig er forsket lite på, så vi kan ennå ikke slå fast hva slags konsekvenser det kan få. Men vi vet at forhøyet serotoninnivå i andre områder av hjernen fører til problemer. Og dersom fisken har det over lengre tid, kan det føre til økt dannelse av såkalte taperfisk. Disse er små fisk med dårlig vekst, og har et kronisk forhøyet serotonin-nivå (Vindas et al., 2016).

Den kraftige lavfrekvente lyden ser ut til å virke negativt for fiskevelferden. Det er flere studier som indikerer at sporadisk lyd er verre for fisken enn jevn lyd, og at det kun delvis er mulig for fisken å venne seg til lyder. Til og med jevn lyd til samme tid, slik vi brukte i denne studien, påvirket fisken negativt. Det tyder på at fiskens velferd blir dårligere av å bli utsatt for kraftig, lavfrekvent menneskeskapt lyd. Enkelt forklart kan man påstå at første gangen fisken hører en lyd, har lyden en 100 prosent negativ innvirkning på den. Men med tiden går påvirkningen ned til omtrent 50 prosent. Tilvenning gir en forbedring, men kraftig lyd er fortsatt dårlig for fiskens velferd. Det kan tenkes at fisken kan venne seg til lyder på lang sikt, men det vil komme an på hva slags type lyd det er og hvor kraftig den er.

Forskningen er gjort med utgangpunkt i oppdrettsnæringens behov for å vite hvordan lyd kan påvirke oppdrettsfiskens utvikling og helse, men funnene kan også være relevante for villfisk. Når vi vet at menneskeskapt lyd, og særlig sporadisk lyd som kommer helt ut av det blå, kan påvirke fiskens vekst og evne til reproduksjon, er det klart at det også er relevant for villfisk som befinner seg i nærheten av meget støyende oppdrettsanlegg eller andre steder hvor det er mye menneskeskapt lyd.

5 - Tilvenning til lyd

Flere detaljer er tilgjengelig i vitenskapelig manus (Vindas et al., in prep)

Bakgrunn

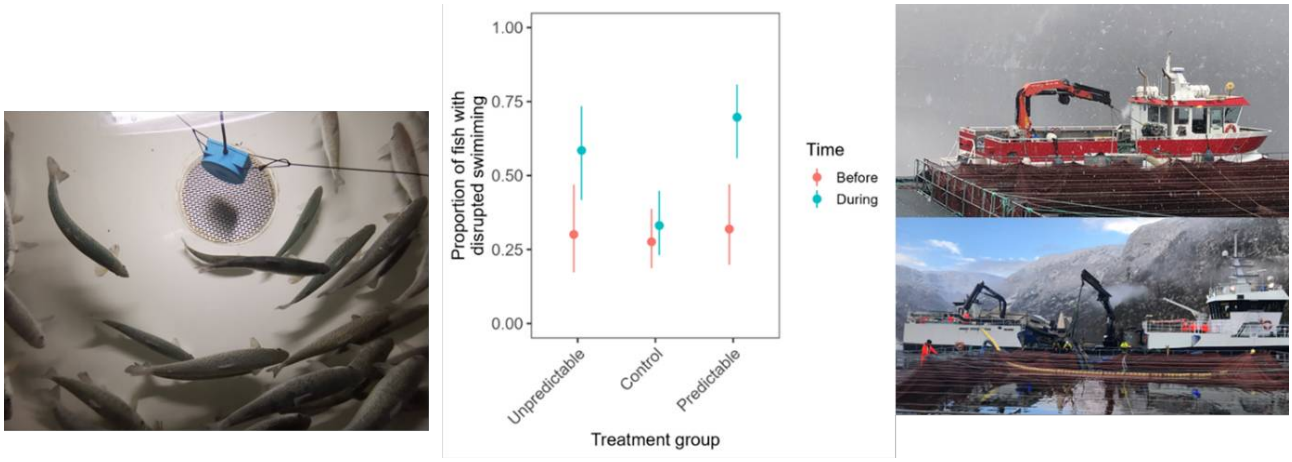
Det eksperimentelle designet hadde som hovedmål å teste om det er mulig å lære fisk til å venne seg til uforutsigbar eller forutsigbar lyd i settefiskfasen for å kunne håndtere lydmiljøet i sjøfasen bedre. Oppsettet baserte seg på resultatene fra de første forsøkene i kar som tydet på at lydmiljøet i sjøfasen er mer uforutsigbart enn det som laks opplever i settefisk fasen. I tillegg sammenlignet vi hvordan de forskjellige lyder i settefisk fasen påvirker fisk senere i livet. Det vil si, vil ville undersøke hvordan fisk blir påvirket av hvor mye lyd de opplever i ferskvannfasen har å si for hvordan de håndterer livet i sjøvannsfasen.

Oppsett

Vi hadde tre grupper i eksperimentet: kontroll (lavt lyd miljø, normalt for kar), forutsigbart (høyere lyd enn kontroll fiskene og presentert hver dag alltid på samme tidspunkt. Lyden ble skapt ved avspilling av opptak på utvalgte lyder fra noen av de 10 oppdrettsanleggene som beskrevet i kapittel 3. Siste gruppen ble gitt andre utvalg av lydene tatt opp på de ulike anlegg, med høyere lydstyrke. Men det viktigste var at disse var uforutsigbare (fiskene opplevet høy lyd som ble presentert på forskjellige tidspunkter hver dag). Eksperimentet varte omtrent 90 dager hvor de første 60 dager var i kar i ferskvann med det beskrevne lydoppsettet. De siste 30 dager var i merder i sjøvann. Da ble laksen fra alle grupper eksponert for en rekke ulike uforutsigbar lyder laget av ulike små og store arbeidsbåter som hver hadde karakteristiske lyder fordelt over ulike frekvenser, lydstyrker. Avstander mellom båt og fisk varierte også over tid når båter ble silt fra eller til merdene.

Resultat

Vi registrerte at det var ingen forskjeller mellom gruppene i ferskvannsfasen, hverken på hvordan de atferdsmessig reagerte på lyd eller den fysiologiske responsen på kortisol nivå eller nevrokjemisk signalering av serotonin eller dopamin. Vi inkluderte også fisk som ble akutt stresset ved uttak slik at vi kunne teste hvordan behandlingen hadde påvirket evnen fiskene hadde til å håndtere nye stressorer, men det var heller ikke her forskjeller mellom gruppene. Dette tyder på at ingen av de studerte lydmiljøene er mer eller mindre stressende enn de andre i denne fasen.

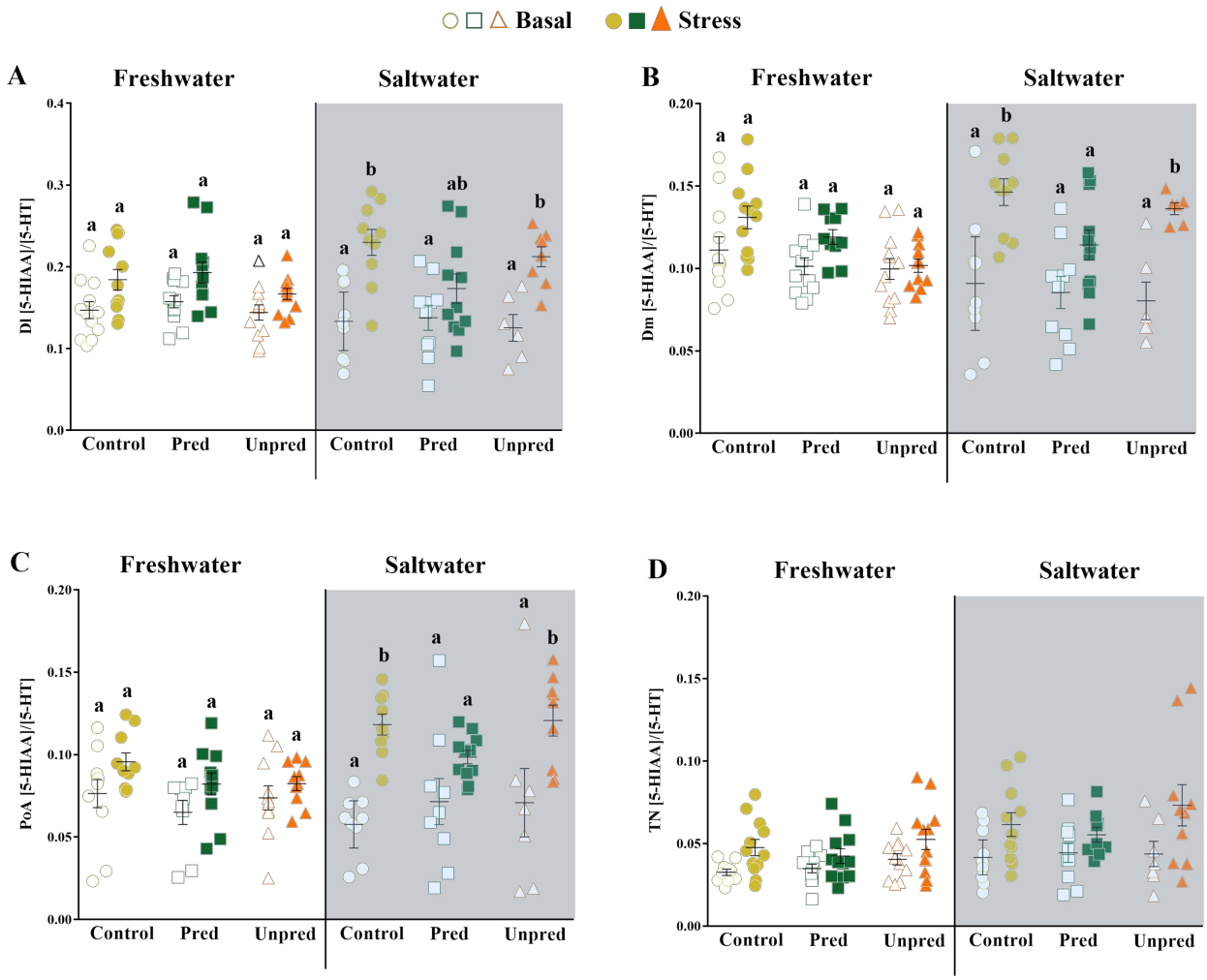


Figur 5.1 Venstre: Foto av kar med laks i ferskvann og undervannshøyttaler (blå) for avspilling av lyd. Midt: Andel av laks med «uryddig» (disrupted) svømming før (røde punkt) og i løpet av (blågrønne punkt) lydstimuli gitt i merder i sjø. Høyre: Eksempel på båter som ble nyttet for å lage lyd ved merder i sjø. Left:Photo of salmon in freshwater tanks were noise were created using the blue underwater loudspeaker. Middle: Proportion of salmon displaying "erratic" swimming before (red points) and during (bluegreen points) sound stimuli provided in sea cages. Right: Examples of boats used to create sounds in sea cages.

I sjøvannsfasen observerte vi derimot noen forskjeller i hvordan laksen håndterte uforutsigbar lyd og akutt stress med endring i svømmemønster. Det mest interessante funn var at kontroll fiskene reagerte minst på den uforutsigbare lyd i sjøen, mens begge gruppene som opplevede lyd i ferskvannsfasen fortsatt responderte relativt sterkt på lyden. Responsen deres var å øke andelen av fisk som brøt ut av den stabile svømmestrukturen og viste et mer uryddig svømmemønster (Figur 5.1). I tillegg så var det en mer dramatisk respons på lyd i forutsigbar gruppen, sammenlignet med uforutsigbar gruppen. Men det var ingen forskjeller i kortisol responsen.

Når det gjelder den nevrokjemiske signalisering responsen, fant vi at etter en akutt stress test responderte både kontroll og uforutsigbart gruppen med økt serotonergisk aktivitet i bestemte områder i hjernen, men dette var ikke tilfellet for fisken som hadde fått forutsigbar lyd (Figur 5.2). Hjerne områdene ble valgt etter resultatene vi fikk fra eksperiment 1 og det er forventet at de er spesielt viktige for håndtering av lyd stress. Det at forutsigbart gruppen ikke klarer å reagere på ytterlig stress tyder på at langvarig stress påvirker deres evne til å håndtere ny stress. Å øke kortisol uten å øke serotonin nivå kan være skadelig siden det kan føre til dårligere hjerne helse (mindre nevronal plastisitet og ubalanse i kroppens energi budsjettet) (Vindas et al 2016; Shapouri et al 2024). Sammen med atferds resultatene, tyder dette på at fisk som opplever høy forutsigbart lyd i ferskvannfasen blir mer stresset når de opplever uforutsigbart lyd i sjøfasen.

Vi valgte noen bestemte gener som vi antok var gode markører for lyd stress hovedsakelig assosiert med vekst og reproduksjon basert på de som ble mest nedregulert i forsøket med kraftig, lavfrekvent lyd (kapittel 3) som bra markører for lyd stress. Vi fant ingen forskjeller i gen utrykk mellom gruppene i fersk- eller saltvann som tyder på at lyd forskjellene mellom gruppene har forårsaket store endringer i investering i vekst eller reproduksjon. Det vil si at lyden vi spilte av i ferskvannskar eller de ulike lydene som ble laget fra båter i sjøen ikke var like stressende som den kraftige, lavfrekvente lyden laksen opplevde i det første kar forsøket (kapittel 3).



Figur 5.2 Gjennomsnitt (± SEM) serotonin (5-HT; a) kataboliten 5-hidroxy-indoleacetic syre (5-HIAA; b) konsentrasjoner, samt 5-HIAA/5-HT ratio (c) i den dorsolateralet pallium (Dl), dorsomedialet pallium (Dm), det preoptiske området (PoA) og det tuberale kjernen (TN) hos Atlantisk laks. Laksegruppene ble behandlet i enten en forutsigbart (Pred) eller uforutsigbart (Unpred) høy intensitet lyd regime, eller kontroll (lav intensitet lyd miljø). Prøvene ble tatt under basale eller post-akutt stress forhold. Små bokstaver viser signifikante posthoc forskjeller mellom gruppene. Mean (± SEM) serotonin (5-HT; a) and its main catabolite 5-hidroxy-indoleacetic acid (5-HIAA; b) concentrations, as well as the 5-HIAA/5-HT ratio (c) in the dorsolateral pallium (Dl), the dorsomedial pallium (Dm), the preoptic area (PoA) and the tubercular nuclei (TN) of Atlantic salmon. Salmon groups were subjected to either a predictable (Pred) or unpredictable (Unpred) high intense sound regime or control conditions (low intensity soundscape). Samples were taken at either basal or post-acute stress conditions. Small letters indicate posthoc significant differences between the groups.

6 - Effekter av støy på velferden til oppdrettslaks

En vitenskapelig review artikkel er under opparbeidelse basert på resultat fra dette prosjektet og litteratur. Detaljer fra dette arbeidet vil bli tilgjengelig etter at prosjektet ferdigstilles. Hovedpunkter er gjengitt i følgende:

Bakgrunn

Velferd for oppdrettslaks er en kritisk faktor i oppdrett, hvor drift, håndtering av stressfaktorer, sykdommer og parasitter er essensielt for å opprettholde både dyrehelse og best mulig produksjon. Blant de ulike stressfaktorene som oppdrettslaks utsettes for, har støy blitt ansett som en betydelig faktor som kan påvirke deres velferd, spesielt når det gjelder atferd og fysiologi. De akutte og langsiktige effektene av lyd på atferd og fysiologi, og dermed velferd, hos oppdrettslaks, blir i økende grad vurdert. Etter hvert som akvakulturindustrien vokser og oppdrettsmiljøene blir mer industrialiserte, blir det stadig viktigere å forstå effektene av støy. Støy er et vanlig fenomen i oppdrettsmiljøer, med støykilder som mekanisk utstyr (f.eks. pumper, vannbehandlingsutstyr, fôringssystemer, luftbobling, nøter/ tau og systemer for oppsamling av dødfisk), båttrafikk, utbygging over eller under vann og andre menneskeskapte aktiviteter. I tillegg kan miljøfaktorer som dårlig vær og bølger også bidra til økte støynivåer. Støy kan påvirke oppdrettslaks på ulike måter, og det er økende bekymring for at støy kan forårsake både akutte og langsiktige velferdsproblemer. Å forstå velferdseffektene av lyd på oppdrettslaks som egen art er viktig, da mesteparten av tidligere forskning har sett på arter av villfisk med lukkede svømmeblærer (fysoklist). Ettersom laksefisk har åpen svømmeblære (fysostom), kan tidligere funn ikke generaliseres til laksefisk, noe som presenterer et betydelig kunnskapshull.

Lyd har to komponenter og oppfattes på to hovedmåter: partikkelbevegelse målt som akselerasjon (m/s^2) og lydtrykk (dB re 1 µPa). Siden lyd blir formidlet ved vibrasjonsenergi, relaterer partikkelbevegelse seg til retningen på den utbreende bølgen (uttrykt som forflytning, hastighet eller akselerasjon), mens lydtrykk refererer til trykkfluktuasjoner i mediet over og under det lokale hydrostatiske trykket. En lydkilde som vibrere i vann vil vekselvis trykke vannpartiklene sammen (øke trykket) og trekke dem fra hverandre (minske trykket). Partikkelbevegelsen er vannpartiklene som svinger frem og tilbake om sitt likevektspunkt. Frekvensen er gitt som svingninger per sekund og måles i hertz (Hz). Trykket måles typisk i Pascal (Pa) og oppgis vanligvis i decibel (dB) relatert til 1 Pa. Alle fisketaksa oppdager og benytter seg av komponenten partikkelbevegelse i lyd, mens noen taksa også oppdager lydtrykk. Derfor er det avgjørende å forstå partikkelbevegelsens komponent i lyd og dens relevans for fisk for å kunne forstå hvordan landskapet av undervannsstøy kan påvirke fisk. Likevel fokuserer mye av forskningen på lydtrykk, mens partikkelbevegelse er svært lite undersøkt. Dette skyldes kompleksiteten knyttet til måling av partikkelbevegelse, hvor bare nylige teknologiske fremskritt de siste tiårene har muliggjort en gradvis integrering og bruk av sensorer for partikkelbevegelse i vitenskapelig forskning.

Med dette som bakgrunn, beskriver arbeidet først hvordan laksefisk hører, hvilket frekvensområde de kan detektere, og gjennomgår hvordan dette kan variere mellom villfisk og oppdrettslaks. Deretter utføres to systematiske litteraturgjennomganger for å: (1) forstå de eksisterende lydlandskapene oppdrettslaks utsettes for, og (2) identifisere potensielle akutte og langsiktige effekter av lyd på velferd (atferds- og fysiologiske effekter) hos oppdrettslaks. Ved å gjennomføre systematiske litteraturgjennomganger blir det mulig å identifisere kunnskapshull om hvordan lyd kan påvirke velferd hos oppdrettslaks, og lette fremtidig arbeid med å finne og redusere lyder som kan ha skadelige effekter på velferd og produksjon.

Hørselsevne hos laks

Laksefisk, som de fleste fisk, har spesialiserte hørselssystemer som gjør at de kan oppdage lydbølger i vannet. I motsetning til de fleste fiskearter som har lukkede svømmeblærer, er laksefisk fysostome, noe som betyr at de

har en åpen svømmeblære, og sammenlignet med andre fisketaksa har de relativt lav følsomhet for lydtrykkbølger på grunn av mangel på forbindelse mellom det indre øret og svømmeblæren. I stedet er laksefiskens hørsel avhengig av sansepartikkelbevegelse ved hjelp av sidelinjen, som er et mekanosensorisk system med små sanseorganer fordelt over større områder av fiskens kropp. Sidelinjen er ansvarlig for å omdanne partikkelbevegelse til elektriske signaler som stimulerer nervesystemet. Laksefisk kan detektere et bredt spekter av frekvenser, vanligvis fra ca 1 til 1 000 Hz, med det mest følsomme frekvensområdet mellom 100 Hz og 500 Hz. Disse frekvensene er viktige fordi de overlapper med frekvensene som vanligvis produseres av maskineri og båter i oppdrettssystemer. Derfor er det viktig å forstå hvordan disse lydkildene påvirker velferden til oppdrettslaks, ettersom de kan oppfatte og reagere på lyd annerledes enn ville fisk, spesielt arter med lukkede svømmeblærer. Mer spesifikt så viser tidligere forskning at laksefisk er spesielt følsomme for lave frekvenser (ca. 1–200 Hz), og deres toppfølsomhet har tidligere blitt identifisert ved ca. 160–250 Hz basert på atferdsmessige responser og reaksjoner i hjernestammen. Tidligere arbeider rapporterte opprinnelig at oppdrettet Atlantisk laksesmolt bare responderte på lavfrekvente toner under 380 Hz og kun innenfor et smalt frekvensområde, med det laveste terskelnivået og dermed størst følsomhet ved 160 Hz. Senere arbeider testet også hørselsterskler hos både ville og oppdrettede postsmolt, samt oppdrettet voksen Atlantisk laks på frekvenser fra 100–800 Hz. De fant størst følsomhet ved 200 Hz (med nivå fra 92,9 til 93,5 dB re 1µPa), med litt lavere følsomhet ved 100 Hz. Et arbeid testet hørsel på ulike frekvensområder (1-1000 Hz) hos juvenile oppdrettete chinook laks (*O. tshawytscha*). De fant at chinook hadde størst følsomhet ved 250 Hz, med den laveste terskelen på 105 dB re 1 µPa for oppdrettet fisk med to normale sagittale otolitter. Hørsel og følsomhet for ulike frekvenser hos laksefisk har vanligvis blitt målt for fisk som er produsert i oppdrett, noe som gir større relevans i akvakulturkontekst.

Hørselsevnen mellom oppdrettslaks og vill laks kan trolig være forskjellig. Ved å sammenligne forholdet mellom vateritt (deformert) og aragonitt (normal) otolitter hos oppdrettslaks, fant forskerne at mer enn halvparten av de norske oppdrettslaksene hadde vaterittiske otolitter, betydelig høyere forekomst enn hos villfisk. Denne deformasjonen reduserte sannsynligvis hørselssensitiviteten med 28–50 % over det meste av det kjente hørselsspekteret til laksen. Deformasjonen skyldtes sannsynligvis rask vekst i de tidligere stadier (Reimer et al 2017). Konsekvensene av vateritt-deformasjoner for laksens velferd i oppdrett er ukjente. På samme måte identifiserte andre forskere at tilstedeværelse av minst en vateritt otolitt (spesielt sagittae) hos oppdrettet chinook laks som førte til et tap av hørselssensitivitet (2,5–6,5 dB) innenfor det primære hørselsspekteret (100–300 Hz). Det er også rapportert at oppdrettete juvenile coho laks (*Oncorhynchus kisutch*) hadde høyere prevalens (52,9%) av vaterittiske otolitter sammenlignet med ville individer (11,8 %). Mens hørselssensitiviteten kan være drevet av otolittenes mineralogi, kan selektiv avl også være en annen faktor som kan bidra til lavere hørselssensitivitet hos oppdrettslaks. Domestisering på tvers av arter har tidligere ført til dårligere hørsel. Avlsprogrammer kan utilsiktet selektere for individer med lavere reaksjonsevne (og dermed lavere følsomhet) for lyder, ettersom fisk som er kronisk stresset av lyd er mindre sannsynlig å prestere godt og dermed bli valgt som yngelfisk.

Det er for øyeblikket uklart om miljøeksponering under yngelproduksjonen påvirker hørselsevnen til oppdrettslaks, og om det er et potensial for habituering til lyd. Muligheten finnes for at redusert hørselssensitivitet kan være gunstig for oppdrettslaks i oppdrett ved å dempe effektene av plutselige høye eller sjokkerende lyder, og dermed redusere stressende reaksjoner på ugunstige støynivåer. De atferdsmessige og fysiologiske reaksjonene til individuelle fisk på lydstimuli kan testes og korreleres med nivået av vateritt deformasjon i deres otolitter. Dette vil muliggjøre en bedre forståelse av hvordan denne deformasjonen påvirker oppdrettsfiskens evne til å håndtere lyder i sine oppdrettsmiljøer. Det ble ikke funnet effekt av vateritt deformasjon i Oppedal et al. (2024a) (kapittel 4) i forhold til den fysiologiske eller nevrobiologiske responsen

som ble målt. Atferden ble forsøkt studert, men gjenkjenning av tilstrekkelig antall individ var ikke mulig. Ytterligere studier er nødvendige for å beskrive hvordan deformerte otolitter påvirker laks i oppdrett.

Støykilder og lydlandskap i oppdrettsanlegg for laks

Oppdrettsanlegg kan være støyende miljøer, spesielt med økende mekanisering i moderne systemer. For å forstå lydlandskapene som oppleves i lakseoppdrett, gjennomførte vi en systematisk gjennomgang i henhold til PRISMA-retningslinjene i Web of Science. Dette returnerte 547 resultater, som hver ble individuelt screenet etter tittel og sammendrag for relevans, og resulterte i 39 studier. Disse 39 studiene ble deretter grundig gjennomgått for å sikre at lydlandskap var spesifikke for laksefiskarter og hadde relevante lydmålinger. Til slutt identifiserte vi åtte relevante studier, inkludert Oppedal et al. 2024a (kapittel 3).

I anlegg på land vil en rekke mekanisk utstyr skape støy, eksempelvis filtreringssystemer, luft- og vannpumper, luftbobler, sorterings-/ vaksinemaskiner og luftvifter. Lydnivåene i karene er varierende, hvor ulike vannvolum opplever forskjellige lydlandskap avhengig av tilknyttede infrastrukturer. I resirkulerende akvakultursystemer (RAS), fant forskere at lydene fra trommelfilter-spylingen, nødoksygen diffusoren og selvrensingen av oksygensensoren var mest støyende (fra 120–184 dB). I lignende system rapporterte andre forskere lydtrykk på 149 dB re 1 µPa produsert av RAS. Fôring genererte også støy, med lydnivå som økte med antall fôrpellets. Kar av fiberglass var mer støyende enn betong, selv om rapporterte lydtrykknivåer vanligvis varierte mellom 83–127 dB re 1 µPa. I de fleste studiene var systemene mer støyende ved lavere frekvenser (f.eks. 113 dB re 1 µPa ved 52 Hz og 96 dB re 1 µPa ved 3957 Hz; 112–127 dB re 1 µPa over 20–100 Hz, og 87–97 dB re 1 µPa over 500–1000 Hz). Andre studier viste imidlertid relativt like lydtrykknivåer på tvers av frekvenser (f.eks. 83–105 dB re 1 µPa over 63–1000 Hz).

I oppdrettsanlegg på sjøen utsettes oppdrettslaks ofte for eksterne kilder til støyforurensning fra motoriserte fartøy, og kan også av og til utsettes for seismiske undersøkelser, pæling, sprenging og marine sonarer. Anleggene genererer også egen støyforurensning gjennom små eller store arbeidsbåter, store fartøy som leverer fôr, avluser eller slakter. Vår systematiske gjennomgang identifiserte tre studier som har kvantifisert lydlandskap på anlegg i sjøen. Ett studie registrerte lydtrykk på 107–112 dB re 1 µPa ved et chinook anlegg, og bemerket at støykilder inkluderte fartøy, fôr-båter og midlertidige håndteringsanlegg knyttet til lokaliteten. Båtlyd ble registrert i 65 % av opptakene. I kapittel 3 (og mer fullstendig i Oppedal et al. 2024a) ble lydtrykknivåer ved forskjellige lakseanlegg målt. I åpne merdanlegg var det roligere (91–105 dB re 1 µPa ved 20–1000 Hz) sammenlignet med lukkede flytende anlegg (dukmateriale: 129–134 dB re 1 µPa ved 20–1000 Hz; kompositt: 116–123 dB re 1 µPa ved 20–1000 Hz).

Lydtrykknivåene som er rapportert fra de fleste studiene er innenfor de hørbare frekvensene for laksefisk, med registrerte lyder som vanligvis topper seg ved lave frekvenser hvor laks hører best. Imidlertid, til tross for at laksefisk er mest følsomme for partikkelbevegelse, ble alle innsamlet data ovenfor kvantifisert ved hjelp av lydtrykknivåer. Selv om det er nyttig å ha en grunnleggende forståelse av hørselens responser som måles innenfor konteksten av lydtrykknivåer når man sammenligner med andre fiskearter, betyr dette at vi fortsatt har en begrenset forståelse av hvordan laksefisk reagerer på lyd innenfor den mest viktige og følsomme komponenten av lyd: partikkelbevegelse. Dette utgjør et betydelig kunnskapshull når det gjelder vår forståelse av lydlandskapene i lakseoppdrett.

Lyder i oppdrett sin påvirkning på velferd

Fisk av ulike arter som ble eksponert for ulike typer støy (bredbåndet hvit støy eller rene toner) ved lydtrykknivåer som varierer fra 142–170 dB re 1 µ Pa har forårsaket korte- og langsiktige hørselstap. Ulike fiskearter som opplever antropogene lyder har i forskjellig grad forårsaket fysisk eller fysiologisk skade, maskert

biologisk viktige lyder (f.eks. for byttedyrdeteksjon, predatorunngåelse, orientering og navigasjon), gitt atferdsendringer som akkumulert kan påvirke vekst og overlevelse (og dermed fitness) hos individer, men også ha konsekvenser på populasjonsnivå.

Innenfor lakseoppdrett er det avgjørende å forstå de fysiologiske og atferdsmessige påvirkningene som lyd kan ha, gitt de mulige velferdsimplikasjonene. For å forstå innvirkningen av støy på oppdrettslaks, gjennomførte vi en systematisk gjennomgang av den vitenskapelige litteraturen som foreligger for laksefisk. Totalt identifiserte vi 10 relevante studier. Vi fant blandede bevis på akutt og kronisk stress som respons på støy. Tre studier testet de akutte virkningene av lydstøy på laksearter. Ved svært høye lydtrykknivåer ble det rapportert (Halvorsen et al 2012) at ved kumulative lydnivåer mellom 204–220 dB re 1 μPa^2s (tilsvarende kumulativt lydnivå hver gang lyd ble gitt på 171–187 dB re 1 μPa^2s) resulterte i fysiologiske skader som strakte seg fra milde til dødelige for chinook-laks. Kumulative lydnivå ≥210 dB re 1 μPa^2s (≥177 dB re 1 μPa^2s som enkeltstående eksponering) resulterte i moderate skader, mens ≥216 dB re 1 μPa^2s (≥183 dB re 1 μPa^2s som enkeltstående eksponering) resulterte i dødelige skader. Svømmeblæren fikk rivningsskader og skader oppsto på nærliggende organer. Slike skader er også observert ved dynamitteksplosjoner under vann, med død fisk som flyter til overflaten. Bui et al. (2013) kvantifiserte akutte endringer i atferd hos atlantisk laks etter eksponering for et uspesifisert lydtrykknivå fra en infrasoundkilde (12,5 Hz), og fant at laksen svømte uregelmessig etter eksponering for lyd, med 3× økt svømmehastighet. Narnaware et al. (1994) fant en fysiologisk effekt på regnbueørret, der fagocytose ble påvirket etter eksponering for støy og vibrasjoner lagd med en liten elektrisk motor som vibrerte mot sideveggen på karet i en time.

I langtidsstudier (kroniske studier) som eksponerte laksearter for lyd ble det funnet relativ liten påvirkning. For atlantisk laks rapporterte Solé et al. (2021) ingen fysiologiske eller atferdsmessige påvirkninger. Tilsvarende observerte Slater et al. (2020) lignende fysiologiske forhold mellom kontrollgrupper og fisk som ble utsatt for 127 dB re 1 µ Pa etter 8 uker i RAS. Terhune et al. (1990) utsatte laks for forskjellige lydnivåer (83–105 og 93–99 dB re 1 µ Pa, henholdsvis), og observerte litt høyere smoltifiseringsrater i én av tre årsklasser i glassfiberkarene sammenlignet med betongkarene. Oppedal et al. (2024 og kapittel 4) fant atferdsmessige og fysiologiske virkninger av lavfrekvent (5–15 Hz) lyd på 142–146 dB re 1 µ Pa gitt 5 minutter daglig til laks over 42 dager. Lyden endret først svømmeatferd og plasmakortisol, en respons som avtok over tid. Men, det ble sett langtids endringer i monoamin-nevro-kjemi og noen aspekter ved nevronal aktivitet var påvirket, mens andre parametere var like. Den lavfrekvente lyden var meget kraftig, med partikkelakselerasjon som en viktig komponent, nær fisken og uten mulighet for laksen til å rømme unna lydmaskinene. Denne lyden representerer ikke forventede forhold innenfor normal oppdrettsproduksjon av laks, men ble nyttet for å finne indikatorer som viser at dyret har opplevd negative effekter av lyden. Davidson et al. (2009) og Wysocki et al. (2007) kvantifiserte begge virkningene av lyd på regnbueørret. Mens Davidson et al. (2009) fant en atferdsrespons hos regnbueørret ved første eksponering for 149 dB re 1 µ Pa, ble normal svømmeatferd observert etter noen timer. De fysiologiske parametere var like på tvers av behandlingene.

Habituering, eller avtagende respons til en sansepåvirkning, observeres på atferd vanligvis etter gjentatte lydstimuli. Habituering skjer raskt når lyden repeteres hurtig og tar lenger tid når den gis sjelden. Knudsen et al. (1992) viste at vill atlantisk lakseparr sin spontane reaksjonsterskel økte med frekvens fra 5 til 150 Hz. Lakseparren var mest sensitiv ved 5 Hz (25 ± 3,5 dB) og reagerte ikke på 114 dB (over hørselsgrensen) ved 150 Hz. Knudsen et al. (1997) viste en initiell fluktrespons som etter hvert ble en langsommere unnvikelsesatferd gitt 10 Hz hos chinook-laks og regnbueørret. Det ble deretter laget en kommersiell infralyd fiskeskremmer (Sonny et al. 2006) som blant annet ble benyttet i Bui et al. (2013). Selv om habituering ikke ble funnet i studiene er det antydet at når fiskeskremmeren benyttes over lengre tid, tilvennes en del fiskearter og blir ikke like mye skremt lenger (pers. komm. Frank Reier Knudsen).

Litteraturen diskuterer at habituering og tilvenning til lydene ikke nødvendigvis er fordelaktige og kan føre til maladaptive stressresponser, sviktende eller forstyrret tilpasning. Ett eksempel er de nevrologiske endringene og mulige effekter på hjernehelse som sees i kapittel 4 (Oppedal et al. 2024), som på sikt kan gi negative konsekvenser for individene. Da er det bedre å redusere mengde lydstøy. I landanlegg kan akustisk isolasjon nyttes mellom støyende utstyr/ maskiner/ pumper og karene hvor fisken oppholder seg eller demping kan skje ved å planlegge avstand mellom fisk og støy. I merdanlegg kan lokalisering velges unna travle skipsleder og fartøy med elektrisk fremdrift kan velges. Særskilt støyende båter kan unngås eller gjennomgå støydempende tiltak. I lukkede anlegg på sjøen kan man skille pumper fra fisken med avstand eller isolasjon og støysvake pumper kan velges fremfor støyende. Ved å måle støy i vannvolumet innen frekvenser man vet påvirker laks mest kan må få oversikt og vurdere støydempende tiltak. Standard målemetoder bør utvikles.

Popper og Hawkins (2019) gjennomgikk nylig status for kunnskap om virkninger av antropogene lyder på fisk generelt. Slående nok konkluderer de med at "det finnes for øyeblikket så mange kunnskapshull at det er nesten umulig å trekke klare konklusjoner om naturen og nivåene av antropogene lyder som har potensial til å forårsake endringer i dyreatferd, eller til og med føre til fysisk skade. Videre forskning er nødvendig for å vurdere responsene til forskjellige lydkilder, under ulike forhold. Det er behov for både å undersøke de umiddelbare effektene av lydens påvirkning og de langsiktige effektene, med hensyn til fitness og sannsynlige konsekvenser for populasjoner"

Forskningsbehov

Innenfor både de fysiske, atferdsmessige, stressfysiologiske og neurokjemiske responsene på lyd er det nødvendig å utføre flere eksperimenter på liten og stor fisk for å finne og finjustere terskelverdier som sikrer god velferd for laks i oppdrett. De roligste industrielle oppdrettsforholdene er fortsatt relativt høye sammenlignet med det naturlige miljøet. Derfor finnes det ingen sann "kontroll"-tilstand i de fleste studier som har sett på virkningene av lydstøy på laksearter – litteraturen diskuterer om det er mulig at alle testede forhold er over terskelnivået for virkninger av lyd på både neurokjemi og atferd. Data for lydstøy ved noen av de mest moderne oppdrettssystemer som nedsenket drift eller «offshore» havbruk er ikke målt.

7 - Anbefalinger

Basert på prosjektets arbeid med innsamling og vurdering av lyd, eksperimenter med lyd, resultater, litteraturgjennomgang, praktisk erfaring og innspill fra næringsaktører er følgende liste over anbefalinger laget:

Ikke ha unødig støy

- Minske uforutsigbar lyd når mulig
  - Hvis lyd, gjør lyden betinget, forventet, regelmessig
  - Lær fisken opp til at lyd kommer gjennom andre signal (eks. lys/ lyd/ tilvenning, økende styrke)
- Unngå sprengningsarbeid i nærheten
  - Terskelverdier for skade er ikke kjent, men atferdsrespons sees og denne må i hvert tilfelle vurderes i forhold til om den fører til skade. Ut fra et "føre var perspektiv" bør fisken undersøkes og følges nøye før, under og etter påvirkning
- Lavt støymiljø i ferskvann kan anbefales ettersom vi observerte mindre responser i atferd når slik fisk ble gitt støyende eksponering i sjøvann
  - (uventet, men antydet av data i kapittel 5)

Tiltak for å redusere støy

- Måle støy og vurdere tiltak i forhold til hva målingene viser
  - Det bør utvikles en standard for målinger tilpasset frekvenser som laksen oppfatter og reagerer på, hovedsakelig området 5-500 Hz med mest fokus på de laveste frekvenser
- Lete etter støykilder med frekvenser som laksen kan oppfatte og minimere dem
- Redusere støykilden (eksempel: montere demper på lukelukking, bruke båter som erfaringsmessig ikke påvirker laksen)
- Skille lydkilde og vannvolum med fisk (for eksempel holde pumper, luftere, filtre og lignende atskilt fra fisken)
- Bruke boblegardin som støydemper/ lydisolator i sjø (f.eks. ved sprenging)
- Vurdere å benytte lite støyende båter fremfor de med kjent kraftig støy, f.eks. elektrisk båt
- Unngå oppdrett nært områder med betydelig støyende båt- og skipstrafikk

8 - Oppsummerende vurderinger og kunnskapsbehov

Oppdrettsanlegg for laks er til tider meget støyende. Men er støyen skadelig for laksen? Vi har ikke et endelig svar da lyden varierer meget og de kort- og langvarige terskelverdiene for når og hvor mye laksen påvirkes er ikke tilstrekkelig kjent. De normale lydene i oppdrett, som typisk varierer opp til 135 dB antas ikke å gi betydelige negative konsekvenser for laksen. Men effekten av de mer kortvarige støyende perioder som ble målt, verdier opp mot 157 dB, kan gi negative konsekvenser avhengig av varighet og nærhet til fisken. De unntaksvis, akutt høye lyder som ble observert ved lukking av luke med et smell eller sprengningsarbeid ved land- og sjøanlegg var i størrelsesorden >175 dB og forventes å kunne gi hørseltap og fysiske skader utover fluktresponsene som ble observert. Opp til visse lydnivå regenerer fisken slike skader på hørselsorgan, men spesifikke data for laks i forhold til terskelverdier finnes ikke. Andre mer studerte arter, med svømmeblære, har sannsynligvis mye lavere terskel for å få ødelagt hørsel, -organ eller svømmeblære.

Støy kan forårsake både akutte og langsiktige skader på oppdrettslaks, og påvirke deres atferd, fysiologi og helse. Flere oppdrettere har også gitt innspill på at ved besøk fra enkelte båter eller "støyende" notrengjøring sees en reduksjon i appetitt (ikke undersøkt i dette prosjektet). Å forstå lyden i oppdrettsmiljøer, og utvikle strategier for å redusere skadelig støy, er avgjørende for å sikre velferden til oppdrettslaks. Å adressere disse problemene gjennom kontinuerlig forskning og implementering av støyreduserende tiltak ved behov vil sikre at oppdrettslaksens velferd opprettholdes innenfor akseptable rammer, og fremmer både dyrehelse og en bærekraftig produksjon.

Det er et behov for å vite mer om effekter av sprenging på laksen. Hvordan påvirker enkelt- eller repetitiv sprenging nær land- og sjøanlegg for liten og stor laks? Forsvaret utfører jevnlige sprenginger i sjø, utbygging av oppdrettsanlegg på land eller infrastruktur nær disse skjer med sprenging, kaier eller utbedrende tiltak av farleder krever ofte sprengning. Her er det vanskelig å gi råd når det spørres ettersom terskelverdier for hvordan laksen påvirkes ikke finnes i tilstrekkelig grad. Det kommer jevnlig spørsmål om å gi råd til forvaltning, utbyggere, oppdrettere, leverandørindustri, Forsvaret og konsulenter som jobber innenfor fagfeltet.

Det trengs mer forskning på mulige konsekvenser av støyende lyd i lakseoppdrett for å gi gode råd for hva som er akseptabelt i forhold til dyrevelferd. Gjennom arbeidet i den vitenskapelige kunnskapssammenstillingen i kapittel 6 forsøker vi å fylle inn komplett tabell med kunnskap om, og «manglende» terskelverdier for når ulike frekvenser av lyd (kort- eller langvarig) påvirker ubetydelig, normalt, unormalt eller uakseptabelt. Parametere som inngår er atferdsmessige, fysiologiske, stressende, nevrologiske, genuttrykk og fysiske endringer. Dessverre er tabellen for laks relativt mangelfull, selv om prosjektets arbeid har hjulpet litt med utfylling. Det er spesielt behov for terskelverdier innen de lave frekvenser hvor måling av partikkelakselerasjon representerer lyden best. SAmtidig ser vi behov for å bedre forstå sammenhengen mellom tilvenning og kronisk stress.

Det er et behov for å utvikle beste praksis for lydmåling og avbøtende tiltak. Mer brukervennlige lydmålingsmetoder bør utvikles. Dagens målemetodikk krever bruk av instrumentspesifikke kalibreringsfiler sammen med avansert etterprosessering av lydopptak og det finnes ingen standard tilpasset laksens hørselsevne. Det finnes heller ikke hyllevare av måleinstrumenter som kan måle partikkelakselerasjon. Hvis oppdretter selv skal vurdere støyen i sitt anlegg, velge metoder for demping og se på effekt av disse trengs det enklere måleutstyr og metodikk. Oppdretter kan da kartlegge selv, gjøre tiltak og måle effekt av tiltak. Beste praksis på hvordan måle støy på en enkel måte må tilpasses ulike oppdrettsteknologier. Det er også viktig at terskelverdier som diskutert ovenfor frembringes slik at oppdretters måledata kan vurderes opp mot hva verdiene betyr for laksen. Det bør også utvikles god praksis for hvordan oppdretter kan teste effekter på avbøtende tiltak.

9 - Prosjektets måloppnåelse

Arbeidet i prosjektets har hovedsakelig oppfylt de spesifikke mål som var satt ved oppstart.

Hovedfunn kan oppsummeres i følgende kulepunkt:

- Laks i oppdrettsanlegg lever i en støyende verden med lyder som den kan høre og unntaksvis oppfatte som negative
- Kraftig støy med lav frekvens gir laksen fluktresponser og fysiologiske stressresponser som delvis tilvennes, men langtidseffekter sees på hjernenivå
- Ro og fred i ferskvann gir mindre responser på atferd og fysiologi i sjøvann
- Oppsummert kunnskap om støy sin effekt på oppdrettslaks viser behov for mer forskning på toleransegrenser
- Det anbefales at kraftig støy unngås

Prosjektets opprinnelige resultatmål er satt opp punktvis med etterfølgende beskrivelse av hvordan de er nådd:

- Å helhetlig gjennomgå og publisere status for dagens kunnskap om effekten av lyder, hvordan laksen prosesserer lyd, hvordan de reagerer og hvor tilpasningsdyktige de er i oppdrettsmiljøer for laksefisk.
- Å kartlegge det kort- og langsiktige lydbildet ved oppdrettslokaliteter for laksefisk i landbaserte anlegg og merder for å etablere en basislinje for lydene som laksefisk utsettes for i industrielle omgivelser og identifisere frekvens, volum og varighet av lyder som kan være stressende for oppdrettsfisk.
- Å bruke basislinjen for målte lyder i settefiskanlegg og sjø for å teste effekten av mulig skadelig lydfrekvens, -volum og -varighet på laksens atferd, stress og velferd i små og store eksperimenter.
- Å sammenstille kunnskap fra arbeidspakke 1–3 og utvikle et hierarki av mulige risikotiltak for støy på oppdrettsanlegg og formidle disse til næringen.

Dagens kunnskap er gjennomgått og flere publikasjoner oppsummerer tidligere arbeider og samtidig fremskaffer nye data på hvordan lyd påvirker laksen, hvordan fisken prosesserer lyd gjennom fyiologisk respons (nå også på hjernenivå), hvordan de reagerer atferdsmessig og hvor tilpasningsdyktige de er i eksperimentelle oppdrettsmiljøer for laksefisk. Vi har kartlagt det kort- og langsiktige lydbildet ved oppdrettslokaliteter for laksefisk i landbaserte anlegg, lukkete og åpne merder i sjøen og etablert en basislinje for lydene som laksefisk utsettes for i industrielle omgivelser. Noen frekvenser og varigheter av lyder som kan være stressende for oppdrettsfisk er identifisert. Gjennom avspilling av oppdrettslydene fra feltmålinger til laks i kar testet vi effekten av mulig skadelig lydfrekvenser og -varighet på laksens atferd, stress og velferd i eksperimenter. Til slutt ble kunnskap fra alle arbeidspakker sammenstilt, og vi har forsøkt å gi anbefalinger for mulige tiltak for støy på oppdrettsanlegg. Formidling er utført underveis og vil fortsette de neste år. Prosjektet er på vei til å oppnå forventet nytteverdi, noe som vil ferdigstilles gjennom videre formidling av resultater. De vitenskapelige arbeidene og feltmålinger av lyd danner grunnlag for rådgiving til næring og myndigheter i forhold til hva som er gode og dårlige støyforhold i settefisk- og matfiskanlegg. Kunnskapen vil gi næringsnytte gjennom å sikre laksens velferd og produksjonseffektivitet i forhold til støy innen industriell lakseoppdrett.

10 - Referanseliste

Arbeider fra prosjektet.

Barrett LT, Oppedal F (In revision) Characterisation of the underwater soundscape at Norwegian salmon farms. *Aquaculture* .

Dempster, Overton, Barrett, Vindas, Oppedal (in prep). Impacts of noise on the welfare of farmed salmon: a review

Oppedal F, Vindas, M., Doksæter Sivle, L., de Jong, K., Dempster, T., Nesse Forland, T., Barrett, L., 2024a. Lyd i lakseoppdrett. Rapport fra havforskningen 2024-23, 34s https://hi.no/hi/nettrapporter/rapport-fra-havforskningen-2024-23

Oppedal F, Barrett LT, Fraser TWK, Vågseth T, Zhang G, Andersen OG, Jacson L, Dieng M-A, Vindas MA (2024b) The behavioral and neurobiological response to sound stress in salmon. *Brain, Behavior and Evolution* , 1-18, https://doi.org/10.1159/000539329

Vindas, Barrett, Jacson, Fraser, Vågseth, Oppedal (In prep.) Effects of intensity and predictability of the environmental soundscape in Atlantic salmon.

Annen relevant litteratur (utdrag).

Bart AN, Clark J, Young J, Zohar Y (2001) Underwater ambient noise measurements in aquaculture systems: a survey. *Aquacultural Engineering* .

Bui S, Oppedal F, Korsøen ØJ, Sonny D, Dempster T (2013) Group behavioural responses of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) to light, infrasound and sound stimuli. *PLOS One* .

Craven A, Carton AG, McPherson CR, McPherson G (2009) Determining and quantifying components of an aquaculture soundscape. *Aquacultural Engineering* .

Davidson J, Bebak J, Mazik P (2009) The effects of aquaculture production noise on the growth, condition factor, feed conversion, and survival of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss. Aquaculture* .

Duan S, Vasconcelos RO, Wu L, Li X, Sun W, Li X (In review) Managing aquaculture noise: impacts on fish hearing, welfare, and mitigation strategies. *Reviews in Aquaculture* . https://zenodo.org/records/13325653

Halvorsen MB, Casper BM, Woodley CM, Carlson TJ, Popper AN (2012) Threshold for onset of injury in Chinook salmon from exposure to impulsive pile driving sounds. *PLoS One* .

Hawkins, A.D., Johnstone, A.D.F., 1978. The hearing of the Atlantic Salmon, *Salmo salar. J. Fish Biol.*

Harding, H., Bruintjes, R., Radford, A.N., Simpson, S.D., 2016. Measurement of hearing in the Atlantic salmon (*Salmo salar*) using Auditory Evoked Potentials, and effects of pile driving playback on salmon behaviour and physiology (No. 11), *Scottish Marine and Freshwater Science. Marine Scotland.*

Knudsen, FR, Enger, PS, Sand, O (1992) Awareness reactions and avoidance responses to sound in juvenile Atlantic salmon, Salmo salar L. Journal of Fish Biology 40: 523-534.

Knudsen FR, Enger PS, Sand O (1994) Avoidance response to low frequency sound in downstream migrating Atlantic salmon smolt, Salmo salar. Journal of Fish Biology 45: 227-233.

Knudsen FR, Schreck, CB, Knapp, SM, Enger PS, Sand O (1997). Infrasound produces flight and avoidance responses in Pacific juvenile salmonids. Journal of Fish Biology 51, 824-829

Narnaware YK, Baker BI, Tomlinson MG (1994) The effect of various stresses, corticosteroids and adrenergic agents on phagocytosis in the rainbow trout Oncorhynchus mykiss. Fish Physiology and Biochemistry 13(1): 31-40.

Oxman DS, Barnett-Johnson R, Smith ME, et al. The effect of vaterite deposition on sound reception, otolith morphology, and inner ear sensory epithelia in hatchery-reared Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*). *Can J Fish Aquat Sci* .

Papoutsoglou SE, Karakatsouli N, Skouradakis C, Papoutsoglou ES, Batzina A, Leonaritis G, Sakellaridis N (2013) Effect of musical stimuli and white noise on rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) growth and physiology in recirculating water conditions. Aquacultural Engineering 55: 16-22

Popper AN, Hawkins AD (2019) An overview of fish bioacoustics and the impacts of anthropogenic sounds on fishes. Journal of Fish Biology 94(5): 692-713.

Radford CA, Slater MJ (2019) Soundscapes in aquaculture systems. *Aquacult Env Interac.*

Reimer T, Dempster T, Wargelius A, Fjelldal PG, Hansen T, Glover KA, Solberg MF, Swearer SE (2017) Rapid growth causes abnormal vaterite formation in farmed fish otoliths. Journal of Experimental Biology 220: 2965-2969.

Satou M, Takeuchi HA, Takei K, Hasegawa T, Okumoto N. (1994) Characterization of vibrational and visual signals which elicit spawning behavior in the male hime salmon (landlocked red salmon, *Oncorhynchus nerka*). *J Comp Physiol A* .

Satou M, Takeuchi HA, Nishii J, et al. (1994) Behavioral and electrophysiological evidences that the lateral line is involved in the inter-sexual vibrational communication of the himé salmon (landlocked red salmon, *Oncorhynchus nerka*). *J Comp Physiol A.*

Shapouri, S., Sharifi, A., Folkedal, O., Fraser, T. W., & Vindas, M. A. (2024). Behavioral and neurophysiological effects of buspirone in healthy and depression-like state juvenile salmon. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, *18*, 1285413.

Slater M, Fricke E, Weiss M, Rebelein A, Bögner M, Preece M, Radford C (2020) The impact of aquaculture soundscapes on whiteleg shrimp *Litopenaeus vannamei* and Atlantic salmon *Salmo salar* . *Aquac Environ Interact* .

Solé M, Constenla M, Padrós F, Lombarte A, Fortuño J-M, van der Schaar M, André M (2021) Farmed salmon show no pathological alterations when exposed to acoustic treatment for sea lice infestation. Journal of Marine Science and Engineering 9: 1114

Sonny D, Knudsen FR, Enger PS, Kvernstuen T, Sand O (2006) Reactions of cyprinids to infrasound in a lake and at the cooling water inlet of a nuclear power plant. J Fish Biol 69: 735–748.

Sverdrup A, Kjellsby E, Krüger PG, et al. (2010) 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* .

Terhune JM, Friars GW, Bailey JK, O'Flynn FM (1990) Noise levels may influence Atlantic salmon smolting rates in tanks. *J Fish Biol* .

Tlusty MF, Andrew J, Baldwin K, Bradley TM (2008) Acoustic conditioning for recall/recapture of escaped Atlantic salmon and rainbow trout. *Aquaculture* .

Vindas, MA, Johansen, IB, Folkedal, O, Höglund, E, Gorissen, M, Flik, G, Kristiansen, T, Øverli, Ø (2016). Brain serotonergic activation in growth-stunted farmed salmon: adaption versus pathology. Royal society open science 3, https://doi.org/10.1098/rsos.160030

Wysocki LE, Davidson JW, Smith ME, Frankel AS, Ellison WT, Mazik PM, Popper AN, Bebak J (2007) Effects of aquaculture production noise on hearing, growth, and disease resistance of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss. Aquaculture.*

Zhang Q, Bloecher N, Evjemo LD, Føre M, Kelasidi E (submitted) Responses of farmed Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) in net pens towards intrusive objects: the influence of sound and light.

HAVFORSKNINGSINSTITUTTET

Postboks 1870 Nordnes
5817 Bergen
Tlf: 55 23 85 00
E-post: post@hi.no
www.hi.no