



LYD I LAKSEOPPDRETT

Frode Oppedal (HI), Marco Vindas (NMBU), Lise Doksæter Sivle, Karen de Jong (HI), Tim Dempster (Deakin University), Tonje Nesse Forland (HI) og Luke Barrett (Deakin University)



Tittel (norsk og engelsk):

Lyd i lakseoppdrett

Soundscape in salmon aquaculture

Rapportserie:

Rapport fra havforskningen

ISSN:1893-4536

År - Nr.:

2024-23

Dato:

13.06.2024

Forfatter(e):

Frode Oppedal (HI), Marco Vindas (NMBU), Lise Doksæter Sivle, Karen de Jong (HI), Tim Dempster (Deakin University), Tonje Nesse Forland (HI) og Luke Barrett (Deakin University)

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

Oppdragsgivers referanse:

901744

Program:

Fremtidens havbruk

Miljøeffekter av akvakultur

Forskningsgruppe(r):

Dyrevelferd

Antall sider:

34

Forord:

Finansieringen ble gitt av Fiskeri- og Havbruksnæringens Forskningsfond (FHF) prosjekt nr. 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.

Sammendrag (norsk):

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. 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. Vi målte 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. Laksen kan høre mye av lyden som ble målt (nivå, frekvens og mangfold). Støyen varierte betydelig mellom anlegg og over tid og rom innenfor lokaliteter. Lydtrykksnivåene ble beregnet som kvadratisk gjennomsnitt (RMS= root mean square) for frekvensbåndene laksefisk hører best (20-100 Hz og 100-500 Hz). I lukkede merder var lyden kraftigst i frekvensområdet 100-500 Hz hvor typiske SPL_{RMS} verdier lå i området 123-134 dB re 1 μPa . Men lyden i støyende perioder var betydelig høyere, med SPL_{RMS} verdier på 143-154 dB re 1 μPa . I kar var det lavere nivå enn i lukket merd og mer lyd i det laveste frekvensområdet (typiske SPL_{RMS} på 112-127 dB re 1 μPa), forøket i støyende perioder (SPL_{RMS} verdier på 131-135 dB re 1 μPa). I landanleggene var lyden 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 (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. Lydnivåer i støyende perioder hadde SPL_{RMS} verdier på 138-157 dB re 1 μPa med mest støy i det lave 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. Meget støyende forhold gitt som spisstrykket ble beregnet for <1 sekund hvor $SPL > 175$ dB re 1 μPa ble observert ved to anledninger: under sprengning ved et storsmoltanlegg på land, og inne i en lukket merd nær en undervannsluke som ble lukket med et smell (mekanismen ble deretter ombygd for å bli stillere). I et bonusmateriale fra sjøanlegget Hattasteinen ble det målt 1 s SPL_{RMS} på 158 dB re 1 μPa (spisstrykk: 175 dB re 1 μPa) ved detonasjon av 850 kg sprengstoff omtrent 1500 m unna. Bortsett fra i disse tre relativt uvanlige tilfellene, målte vi ikke nivåer av lyd som vi tror kan gi betydelig hørselstap eller akustisk skade hos laks. Men lydnivåer målt i de fleste systemer, spesielt plutselige lyder vil ofte gi betydelige atfedsresponser hos fisken, illustrert av fluktresponser observert ved sprenging og lukelukking. Generelt var lydene vi målte innenfor samme type og nivåer som tidligere er rapportert fra oppdrettsanlegg, men arbeidet beskriver betydelig mer detaljer om lyden og sammenhenger mellom tid på døgnet, 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 oppdrettet laksefisk.

Sammendrag (engelsk):

The noise level in modern, industrial aquaculture has increased as the sites have become larger, more mechanized and use several noisy machines (work- and well-boats, pumps, and compressors). Sound travels well in water and can be perceived by fish. We wanted to describe this man-made sound in more detail as it possibly affects the behaviour, welfare, health, and production of the farmed fish. We measured sound pressure levels (SPL = sound pressure levels) in the water at 10 different salmon farming sites in Norway, of which 4 floating open cages in the sea, 2 semi-closed floating cages in the sea and 4 land-based tank sites. The sound (level, frequency, and diversity) varied significantly between sites, over time and space within sites, and with dominant sounds within the frequency range that salmonids can hear (~20–500 Hz). One of the analysis was to calculate the sound pressure levels (SPL) as root mean square (RMS) for the frequency bands 20-100 Hz and 100-500 Hz. In closed floating cages, the sound was loudest in the frequency range 100-500 Hz, where typical SPL_{RMS} values were in the range 123-134 dB re 1 μPa . The sound in noisy periods was significantly higher, with SPL_{RMS} values of 143-154 dB re 1 μPa . In tanks there were more sound in the frequency range 20-100 Hz whereas the typical level was lower than in closed cages, SPL_{RMS} levels of 112-127 dB re 1 μPa , and in noisy periods with SPL_{RMS} levels of 131-135 dB re 1 μPa . The sound within land-based sites were more predictable and constant than at sea. In the open cages there was generally less noise compared to both semi-closed cages and land-based facilities, similar values between the two frequency bands and with typical SPL_{RMS} values of 95-105 dB re 1 μPa . On the other hand, in open sea cages there were large variations between day and night, where noise was linked to visits from work- and well-boats. Sound levels in noisy periods had SPL_{RMS} values of 138-157 dB re 1 μPa with most noise in the frequency range 20-100 Hz. When well-boats steered along a cage and the sound energy dose was accumulated over time, in the form of the sound exposure level (SEL), the values could reach 144-145 dB re 1 μPa^2s , 20-1000 Hz over 60 s. In very noisy conditions calculating the peak sound pressure (maximum value), we experienced $SPL > 175$ dB re 1 μPa on two occasions: during blasting at a large smolt facility on land, and inside a closed cage near an underwater hatch that was closed with a bang (the mechanism was afterwards rebuilt to become quieter). In a bonus material from the Hattasteinen open sea cage facility, 1-s SPL_{RMS} of 158 dB re 1 μPa (peak pressure: 175 dB re 1 μPa) was measured when 850 kg of explosives were detonated approximately 1500 m away. Except in these three relatively unusual cases, we did not measure levels of sound that we think could cause significant hearing loss or acoustic damage in salmon.

However, sound levels measured in most systems, especially sudden sounds, will often produce significant behavioural responses in the fish, illustrated by escape responses observed when blasting and hatch closing. In general, the sounds we measured were within the same type and levels as previously reported from aquaculture sites, but the work describes considerably more detail about the sound and vary between time of day, type of site, noisy equipment and vessels. It remains to be assessed whether the noisy farming environments can lead to acclimatization and/or chronic stress. More knowledge is needed to understand the synergistic effects of sound and duration on behaviour, health and welfare in farmed salmonids.

Innhold

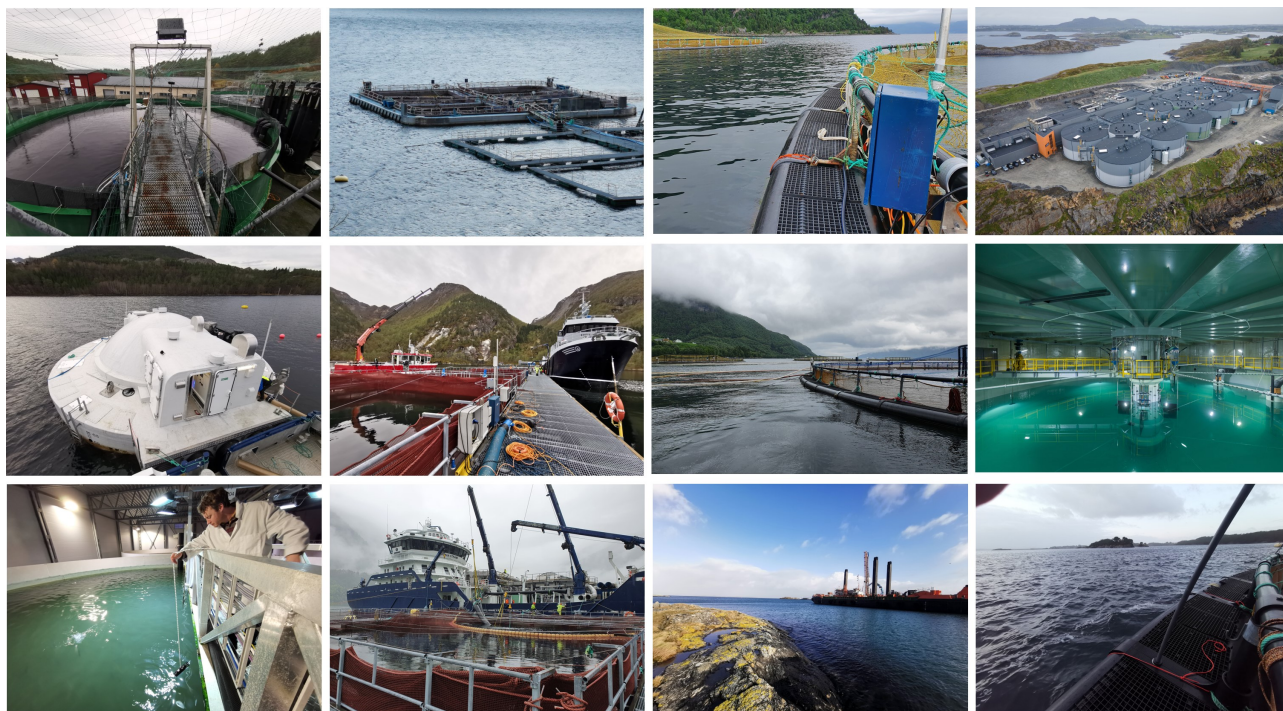
1	Bakgrunn	7
2	Materiale og metoder	9
2.1	Metode, prøvetakingsdesign og protokoll for lydmåling	9
2.2	Databehandling og analyse	10
2.3	Typiske, støyende og stille perioder, viktige lyder og varighet	11
3	Resultater	13
3.1	Lyd og variasjon	13
3.2	Semi-lukkede anlegg i sjø	14
3.2.1	<i>Skarp lyd i semi-lukket sjøanlegg</i>	15
3.3	Åpne merdanlegg	16
3.4	Landanlegg	20
3.5	Frekvensfordeling av lyd i stille perioder	21
4	Bonusdata fra sprenging i sjø ved Hattasteinen merdanlegg	23
4.1	Oppsett og metode Hattasteinen	23
4.2	Resultat Hattasteinen	23
4.3	Atferd Hattasteinen	24
4.4	Velferd Hattasteinen	25
5	Diskusjon	26
5.1	Lyder som ble målt	26
5.2	Sammenligning med tidligere studier av lyd i fiskeoppdrett	26
5.3	Mulige effekter av lyd på laks i oppdrett	27
5.4	Skarpe, høye lyder	28
5.5	Begrensninger og fremtidige retninger	29
6	Oppsummering	31
6.1	Lyden i lakseoppdrett er betydelig og sammensatt	31
7	Referanseliste	32

1 - Bakgrunn

I oppdrettsanlegg er det mye lyd som kan høres av fisken. Hørsel er en nøkkelsans i fiskens liv og dyr som lever i vann bruker lyd for å navigere og finne partner og mat, unngå fiender og predatorer eller kommunisere. Alt som forstyrrer fiskens evne til å oppdage og reagere på biologisk relevante lyder kan redusere ytelsen. Lydsignaler er spesielt egnet i vann fordi de spres over lange avstander, til tross for dårlig sikt. Imidlertid skaper ulike menneskelige aktiviteter støyforurensning som kan øke bakgrunnsstøyen, maskere lydsignaler og forstyrre, avskrekke, skade eller til og med drepe marine dyr (Slabbekoorn et al 2010). Det er også betydelig bevis på at støyforurensning har målbare effekter på økosystemer (Slabbekoorn et al 2010, Solan et al 2016, Popper & Hawkins 2019, Risch et al 2021). Mye av den aktuelle informasjonen som finnes er knyttet til villfisk. Oppdrettsfisk er ikke like avhengig av hørselen som villfisk i naturen, men lyd, spesielt som forstyrrelser, kan likevel være viktig for effektivt oppdrett og laksens velferd. Oppdrettslaks opplever helt andre lyder enn villfisk ettersom de oppholder seg i ulike industrielle omgivelser gjennom hele livet; først i landbaserte settefiskanlegg i kar, deretter etterfulgt av merder i havet for oppvekstperioden. I tillegg har ikke oppdrettsfisk samme mulighet til å svømme unna dersom lyden oppleves som plagsom. Disse forholdene vil utsette dem for støy forårsaket av maskineri, båter og annet utstyr, enten kontinuerlig over tid eller sporadisk.

I oppdrettsanlegg kan det være mye lyd. I merder kommer det lyd fra motoriserte fartøyer og i spesielle tilfeller pæling eller seismikk, (Andrew et al. 2002, Slabbekoorn et al. 2010). Mye av lyden kommer fra selve driften av anlegget, hovedsakelig via fartøy som betjener anlegget eller støyende arbeid (Radford & Slater 2018). I Los Lagos-regionen i Chile, et område med mye laks- og blåskjeloppdrett, var båttrafikk tilknyttet anleggene støyende for blåhval i Chiloéhavet (Bedriñana-Romano et al 2021). I Norge er det vanlig at oppdrettsanlegg i sjø (for laks, regnbueørret og torsk) har flere arbeidsbåter på stedet samtidig, i tillegg til regelmessig besøk fra store fartøyer som brukes til å levere fôr eller overføre, høste eller lusebehandle fisk (BarentsWatch 2023). Til sammenligning er det mindre sannsynlig at landbaserte anlegg lager støy som sjenerer utenfor egne områder, ettersom lyd på land spres dårligere gjennom bakken eller luft. Imidlertid kan store pumper som brukes for vanntransport i gjennomstrømning eller resirkulerende landbaserte oppdrettssystemer overføre mye lyd til oppdrettskarene (Bart et al 2001, Craven et al 2009, Radford & Slater 2018), mens enda flere lyder i frekvensområdet som fisken hører blir skapt av trommelfiltre, luftere, oksygentilsetting og annet utstyr som nyttes. Lukkede og semilukkede anlegg som flyter i sjøen vil ha behov for vanntransport med tilhørende støyende pumper.

Vi vet for lite om hvilken støy som finnes og hvordan støy i oppdrettsanlegg påvirker helse, velferd og produksjonen av laks. De få studiene som er utført ved oppdrettsanlegg til dags dato (Bart et al 2001, Craven et al 2009, Radford & Slater 2018) har dokumentert langvarige lydtryknivåer (SPLs) som varierer fra ~75–160 dB re 1 μ Pa innenfor typiske hørselsområder for fisk (~10–1000 Hz: (Popper & Hawkins 2019)). Det er behov for å samle ytterligere data for å forstå hvordan lydnivåene varierer innenfor og mellom anlegg, og om store, moderne anlegg produserer mer lyd enn det som er målt tidligere.



Figur 1. Representative bilder fra noen av land og sjøanleggene hvor det ble målt lyd. Representative images from some of the land and marine facilities where sounds were measured. Foto: Frode Oppedal, Luke Barrett, Salmon Evolution

I denne studien karakteriserer vi lydnivået og frekvensen til lyder som finnes i norsk lakseoppdrett basert på lydmålinger utført i 10 ulike anlegg (Figur 1). Norsk laksenæring er på mange måter den mest moderniserte og mekaniserte havbruksnæringen i verden, med >1,5 millioner tonn årlig produksjon (Fiskeridirektoratet 2022). Oppdrettsindustrien bruker smoltproduksjonsanlegg på land med kar og ofte pumper, mens det i merdanlegg i sjø ofte er besøk av store fartøy. Vi hadde som mål å kartlegge et bredt spekter av anlegg, inkludert åpne og lukkede merder, landanlegg med gjennomstrømming, hybrid og resirkulering (RAS). Måltrettet prøvetaking på sjøanlegg gjorde det også mulig å kvantifisere variasjonen i lydnivået innenfor anlegget, fra bakgrunnsnivået i rolige perioder til støyende høy aktivitet som ved avlusingsoperasjoner.

2 - Materiale og metoder

2.1 - Metode, prøvetakingsdesign og protokoll for lydmåling

Vi målte lydforholdene på 10 ulike lokaliteter i Norge, hvorav 4 åpne merder, 2 lukkede merder og 4 landanlegg (Tabell 1, Figur 1). Vi besøkte lokaliteter en eller flere ganger og brukte hydrofoner (mikrofon som kan fange opp lydbølger under vann) i flere posisjoner for å fange opp representative situasjoner av lydforholdene, for eksempel med og uten brønnbåter på stedet, eller i posisjoner nærmere eller lenger unna støykilder. Måleintervaller varierte med 2–290 timer og måledyp var tilpasset anleggene og varierte fra 1 til 15 m dyp.

Tabell 1. Lokaliteter hvor lydmåling ble gjennomført, miljø, type struktur, formål og prøvetakingsintervall og antall posisjoner. Forkortelser: FoU = forskning og/eller produktutvikling med kommersiell fiskeproduksjon. Pos=posisjon. En ekstra åpen sjølokalitet, Hattasteinen, ble målt i forhold til sprenging i nærheten (ikke i tabell, rapportert separat). Sites where sound measurements were carried out, environment, type of structure, purpose and sampling interval and number of positions. Abbreviations: FoU= research and/or product development with commercial fish production. Pos=position. An additional open sea location, Hattasteinen, was measured in relation to blasting nearby (not in table, reported separately).

Lokalitet	Miljø	Type	Formål	Prøvetaking
Hjartholm	Sjø (åpen)	Plastring merd	Matfisk	147 t × 1 pos
Indre Oppedal	Sjø (åpen)	Plastring merd	Matfisk	290 t × 1 pos
Tveit	Sjø (åpen)	Plastring merd	Matfisk	93 t × 1 pos
Smørdalen	Sjø (åpen)	Stålmerder	FoU	76 t × 1 pos
Smørdalen	Sjø (åpen)	Stålmerder	FoU	48 t × 1 pos
Oslandsurda	Sjø (lukket)	Presenningsmerd (Ecomerden)	Stamfisk	2 t (mange pos)
Gjermundnes	Sjø (lukket)	Fast kompositt eggformet (Ovum)	FoU	12 t (mange pos)
Matredal	Land	Gjennomstrømning, plastkar	Stamfisk	24 t × 1 pos
Gjæravågen	Land	Gjennomstrømning, plastkar	Smolt	23 t × 2 pos
Matredal	Land	Gjennomstrømning, betongkar	FoU	48 t × 2 pos
Indre Harøya	Land	Hybrid gjennomstrømning, betongkar	Matfisk	5,5 t × 2 pos
Trovåg	Land	Resirkulasjon, plastkar	Storsmolt	22 t × 2 pos

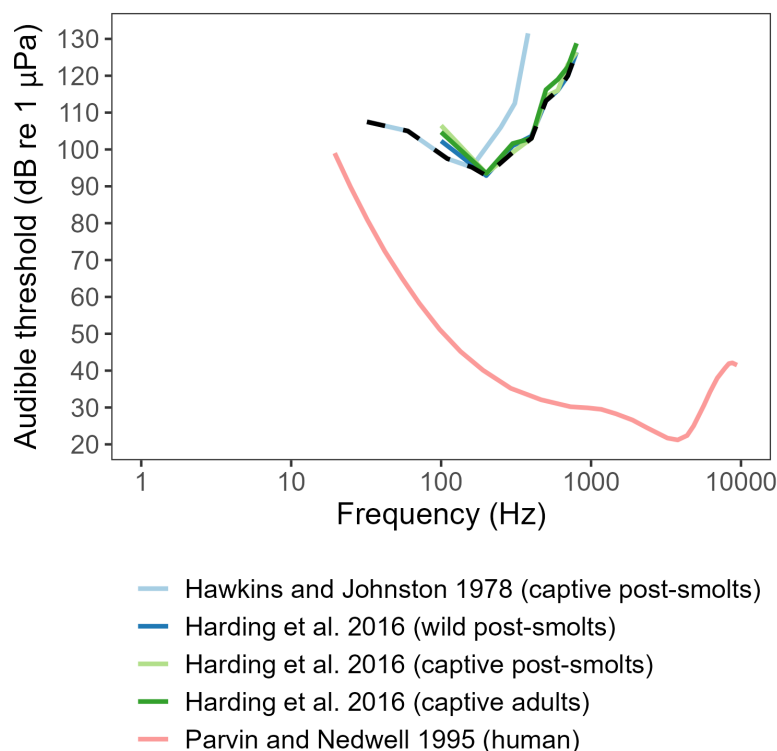
Lydmålinger ble gjennomført med hydrofonen SoundTrap ST400 og noen få målinger med ST300 (Ocean Instruments, New Zealand). Disse har nominell nøyaktighet på ± 3 dB re 1 μ Pa over et frekvensbånd fra 20 Hz til 60 kHz. Instrumentene ble satt med 48 kHz opptaksrate og høy forsterkning. Hydrofonene ble hovedsakelig festet til enden av tau og hengt i vannet på utvalgte, representative posisjoner. I miljøer med høy tetthet av fisk ble vi tvunget til å plassere hydrofonen nærmere overflaten for å redusere forekomsten av fisk som støter mot tauet.

Lyd er bevegelse av partikler som forplanter seg som bølger, usynlige vibrasjoner (trykkforskjeller). Den kommer av hurtige trykkforandringer eller mekaniske svingninger fra en lydkilde gitt ved å sette væsker, faste gjenstander eller luft i bevegelse. Lydbølgens amplitude (lydstyrke, SPL=sound pressure level) måles som avstanden fra nullpunktet til toppunktet både i positiv og negativ retning. Dens maksimale verdi kalles spissstrykk eller spissverdi (SPL_{spiss}), men ofte beregnes lydtryknivået som det kvadratiske gjennomsnittet (RMS, root mean square) som kan uttrykkes som SPL_{RMS} eller ofte bare SPL. Trykkbølgene har en eller flere gitte frekvenser (svingninger per sekund som måles som Hertz (Hz)), mens amplitude angir størrelsen på

trykkvariasjonen, måles i Pascal (Pa) men uttrykkes i desibel (dB) relativ til en referanseverdi som oftest er 1 μPa i vann. Således oppgis ofte lydnivå som dB re 1 μPa innen et eller flere frekvensområder.

2.2 - Databehandling og analyse

Gjennomgang og analyser av lydfiler er fullstendig beskrevet i en vitenskapelig artikkel (Barrett and Oppedal, innsendt) som kan fås ved henvendelse til forfatterne. Kortfattet så ble lydfiler inspisert ved hjelp av avspillings- og visualiseringsverktøyet i Audacity-programvaren (Audacity Team 2023) og ulike perioder med spesifikke hendelser ble analysert videre. Filer ble trimmet for å utelate perioder i luft eller når irrelevante lyder var tilstede. Ved ett smoltanlegg førte høye tettheter til at fisk ofte kom borti tauet eller hydrofonhuset, noe som ga amplitudetopper som klart oversteg de høyeste sanne lydsignalene. Disse toppene ble fjernet. Signalamplitudene ble kalibrert ved å bruke produsentens følsomhetsverdi basert på hydrofonens serienummer. Båndpassfiltre ble brukt på kalibrerte verdier hvor signaler under 20 Hz eller over 1000 Hz ble utelatt da hydrofonene har en nominell nedre grense på 20 Hz, og laks antas å ha begrenset hørselskapasitet over 500–1000 Hz. Laks har best hørsel/ følsomhet for lydgenererte trykkbølger rundt 200 Hz (Hawkins and Johnstone 1978, Harding et al 2016,) mens menneskets hørsel under vann er mye bedre (Parvin and Nedwell, 1995), spenner over et bredere spekter og har maksimal følsomhet på høyere frekvenser (Figur 2). Flere av våre analyser presenterer lyden for 20-100 Hz som er lyden vi kunne måle med vårt utstyr som er nærmeste frekvensområdet hvor laks er kjent for å atferdsmessig reagere kraftigst på (Sonny et al 2006, Bui et al 2013). Komponenten i lyden som kan måles som partikkelakselerasjon (ikke målt i dette studie, men samvarierer med SPL) er sannsynligvis viktigst for fiskens atferdsrespons ved de lave frekvenser (Sonny et al 2006). Samme analyser presenterer også lyd for 100-500 Hz som er området hvor laks sannsynligvis hører best og delvis for området over, 500-1000Hz, som sannsynligvis er lite viktig for laksens oppfattelse av lyd.



Figur 2. Audiogram for laks (*Salmo salar*) og menneske under vann basert på publiserte verdier (gitt ved de ulike farger) og gitt som hørbar grenseverdi i dB re 1 μ Pa. Den stiplede linjen indikerer minimum hørbar terskel fra tilgjengelige data for laks. Menneskets grense for å høre lyder ved de ulike frekvenser er indikert med rød linje. Audiogram for Atlantic salmon (*Salmo salar*) and humans under water based on published values and given as different colours. The dashed line indicates the minimum audible threshold among available data for salmon.

Lydtrykknivået (SPL = Sound Pressure Level) som er definert som kvadratisk gjennomsnitt (Root-mean-square) av lydtrykknivået (dB re 1 μ Pa) ble beregnet fra kalibrerte og filtrerte signaler. For noen målinger beregnet vi også SPL på nivåene 1., 5., 50., 95. og 99. prosentil ved å bruke en tilsvarende metode. For utvalgte lydklipp beregnet vi også lydeksponeeringsnivået (SEL), som det kumulative nivå over et spesifisert frekvensbånd og varighet. Vi inpsierte frekvensinnholdet til de samme lydklippene ved å bruke spektrogram som viser spektraltettheten til lyden i form av effekt (power, PSD= power spectral density) plott som vise signalstyrken fordelt på frekvens.

2.3 - Typiske, støyende og stille perioder, viktige lyder og varighet

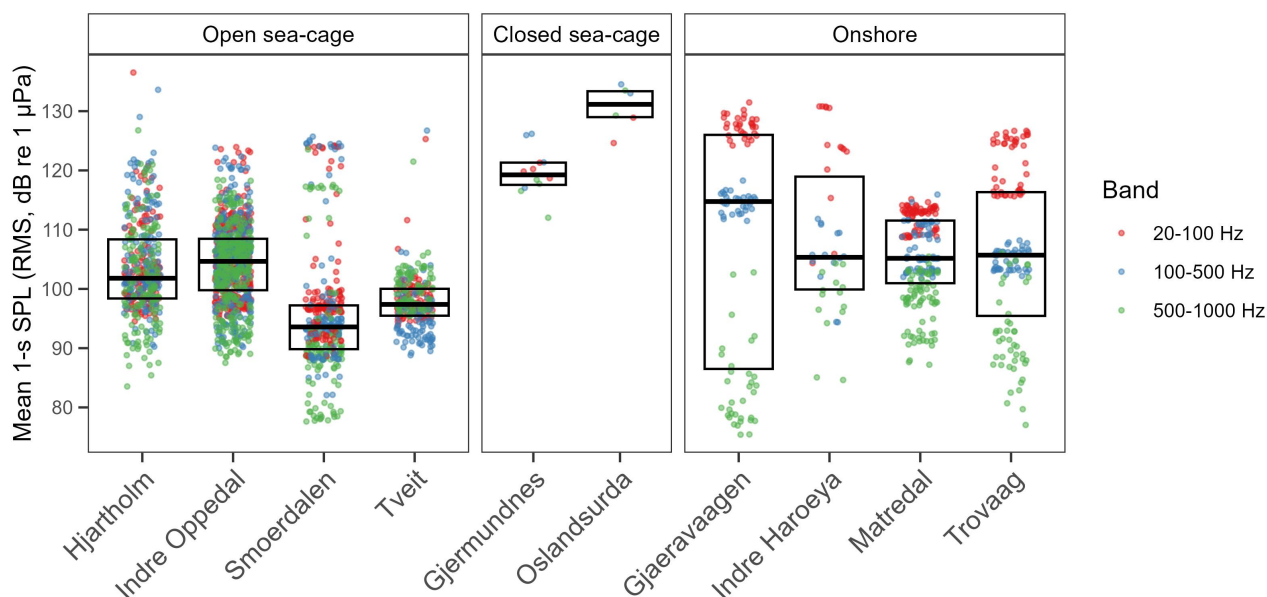
To overordnede typer av analyser ble utført på datamaterialet. For det første ble lydnivåer karakterisert over hele perioder, timer til dager, ved å iterere gjennom alle wav-filer fra lokaliteten (trimme der det er nødvendig), og beregne lydkarakteristikken for hver fil på sekundnivå. Gjennomsnittet av disse verdiene ble definert for å være det generelle lydnivået på lokaliteten. For det andre analyserte vi spesifikke lyder av interesse ved å klippe ut 1- eller 60-sekunders segmenter som var representative for visse akustiske forhold; den stilleste lyden, støyende forhold og et utvalg av akutte eller relativt sjeldne kontinuerlige lyder med høy lydstyrke innenfor hørselsområdet til laks. De stille forholdene på hvert sted ble kvantifisert ved å se på kurveform- og spektrogramplott fra flere tilfeldig utvalgte wav-filer målt på hver lokalitet, og notere tidsstempler som var gode eksempler for de roligste forholdene. I kar eller lukkede merder representerte dette perioder når store pumper var i drift, mens kilder til moderat støy var det ikke (f.eks. periodevis tilsetning av oksygenrikt vann eller at vaskerobot var i aksjon). I åpne merder var dette perioder uten fartøyer til stede eller passerende båter i nærheten, og uten fôringslinjer eller annet maskineri i drift. På de samme merdene noterte vi også perioder der vanlige, men moderate støykilder var til stede, for eksempel fôringslinjer var i bruk. Vi samlet også lydklipp av spesifikke lyder av interesse som skilte seg klart ut. Disse inkluderte nærliggende sprengning, høye lyder fra dører eller luker som ble lukket, og når arbeidsbåter eller større fartøyer var i aktivitet nær merden hvor

hydrofonen var plassert.

3 - Resultater

3.1 - Lyd og variasjon

Lydtrykknivåer (SPL) varierte betydelig mellom anlegg, over tid innenfor anlegg og mellom ulike anleggsmiljø (Figur 3). Den laveste lyden (<80 dB re 1 μ Pa) ble målt ved høye frekvenser innenfor landanleggene Gjøravågen, Trovåg og på sjøanlegget Smørdalen, innerst i en liten fjord. Ved samtlige anlegg, unntatt Matredal, ble lydnivåer >120 dB re 1 μ Pa hyppig målt.



Figur 3. 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 values within 30-60 mins bins. Boxes indicate the 25th, median, and 75th percentile levels among the mean SPLs.

Innenfor relevante frekvenser for fiskens hørsel, og på en typisk dag, var det mindre lyd i åpne merder i sjø enn i lukkede enheter eller anlegg på land (Figur 3; Tabell 2). Lydnivåene var imidlertid mer varierende ved de åpne sjøanleggene, og det var et merkbart døgnmønster i sjøen som ikke var tydelig på land (Figur 5). Lyden i alle miljøene var gjentagende og SPL ga et godt uttrykk for det vedvarende nivået med snittverdier omtrent 3-4 dB re 1 μ Pa over medianverdier. I kar på land var det mest lyd i det lave frekvensbåndet (20-100 Hz, Tabell 2). I lukket merd var det mest lyd i det høyere frekvensbåndet (100-500 Hz), men i åpne merder var det omtrent like mye lyd i begge frekvensbånd (Tabell 2), selv om det ved 2 av 4 anlegg var mer lyd ved lave frekvenser i støyende perioder.

Tabell 2. Lyd målt på 10 laksoppdrettsanlegg. Lydnivåer representerer minimum, gjennomsnitt og maksimum verdier med varighet 1 sekund eller mer, gitt som gjennomsnittlig SPL nivå (SPL_{RMS} som dB re 1 μ Pa). Det kumulative 60-minutters lydeksposeringsnivået (SEL, dB re 1 μ Pa2s) er også beregnet. Range of 1-s continuous sound pressure levels (SPL, dB re 1 μ Pa) recorded at each of the 10 sites sampled. Values are reported for the minimum, mean and maximum 1-s root-mean-square SPL (SPL_{RMS}), representing the quietest, average and loudest periods lasting at least 1 s. The cumulative 60-min sound exposure level (SEL, dB re 1 μ Pa2s) is also calculated based on the mean 1-s SPL_{RMS} .

Miljø	Lokalitet	Frekvens- bånd (Hz)	Min 1-s SPLRMS	Snitt 1-s SPLRMS	Max 1-s SPLRMS	60 min SEL
Åpen merd	Hjartholm	20-100	89	104	157	121
		100-500	81	105	143	123
	Indre Oppedal	20-100	90	105	147	123
		100-500	82	105	148	123
	Smørørdalen	20-100	83	99	142	117
		100-500	78	97	145	114
	Tveit	20-100	90	98	147	116
		100-500	86	95	138	113
Semi-lukket merd	Gjermundnes	20-100	108	120	149	138
		100-500	111	123	154	140
	Oslandsurda	20-100	113	129	139	146
		100-500	123	134	143	152
Land	Gjæravågen	20-100	121	127	133	145
		100-500	108	114	128	132
	Indre Harøya	20-100	92	122	135	140
		100-500	77	105	123	123
	Matredal	20-100	104	112	131	130
		100-500	96	107	123	124
	Trovåg	20-100	110	121	135	139
		100-500	94	105	121	123

3.2 - Semi-lukkede anlegg i sjø

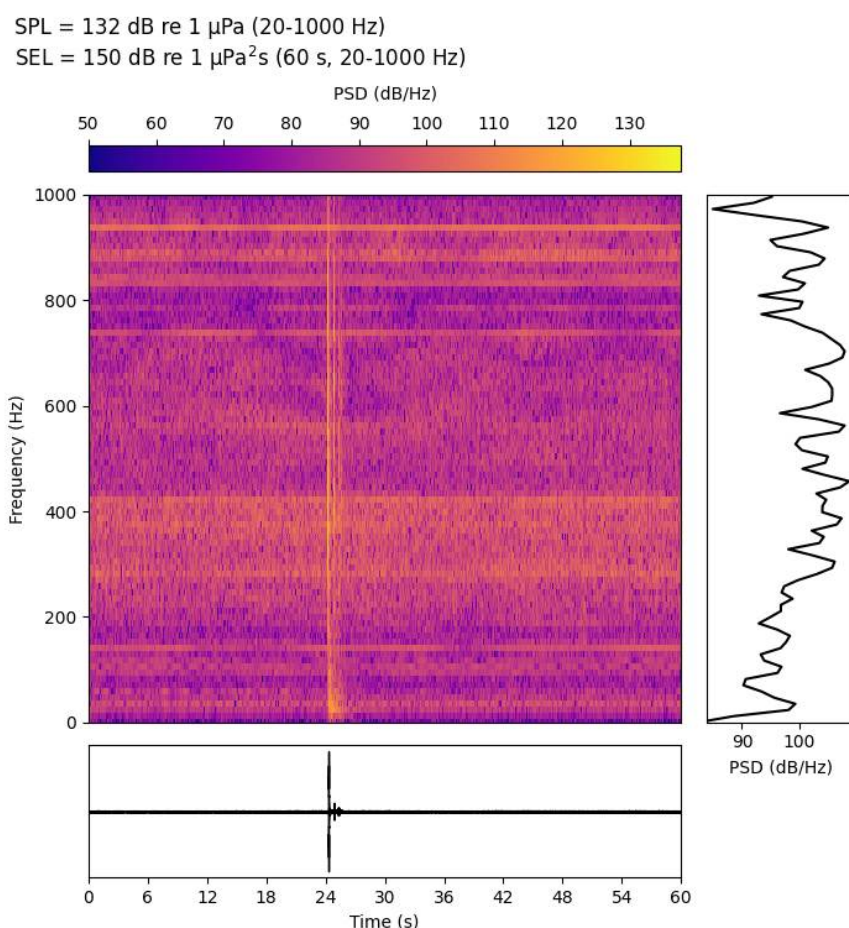
Mest støy ble målt i de to semi-lukkede anleggene i sjø (Figur 3). Lyden i dukmerdene på Oslandsurda var relativt konstant, men avhengig av nærhet til pumpene på 5–15 m dyp varierte lydnivået mellom 113-139 (20-100 Hz) og 123-143 (100-500 Hz) dB re 1 μ Pa (Tabell 2). Kumulativt akkumulert lydnivå (SEL) over 60-minutter varierte fra 146 (20-100 Hz) til 152 (100-500 Hz) dB re 1 μ Pa²s. Vi målte kun lyd i totalt 90 minutter på dette stedet, men lyden som produseres av systemet antas å være relativt konstant ettersom pumpene går kontinuerlig.

Ved det andre lukkede anlegget, Gjermundnes, målte vi lydnivåer i en prototype lukket konstruksjon av stiv kompositt kalt «Ovum». Vi målte ulikt støyende forhold gjennom en halv dag med opptak; lyd fra hovedpumpene både med og uten arbeidsbåt på tomgang utenfor, en rengjørings-ROV, oksygentilsetting, oppsamling av dødfisk og lyden fra en stor undervannsluke som ble lukket. Bakgrunnslyd mens essensielle pumper var aktive ga lyd på 108 dB re 1 μ Pa (20-100 Hz) og 111 dB re 1 μ Pa (100-500 Hz). Under mer

støyproduserende forhold økte verdiene til 139 og 143 dB re 1 μPa innenfor det lave og høye frekvensområde (Figur 3; Tabell 2) hvor variasjoner skyldtes avstand fra støykilden og type støykilde. Gjennom hele måleperioden, inkludert bakgrunnslyder og forhøyet støyforhold varierte 60-minutters SEL innenfor 138 og 140 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ på henholdsvis 20–100 og 100–500 Hz.

3.2.1 - Skarp lyd i semi-lukket sjøanlegg

Lukking av undervannsluken ga en meget kraftig lyd, med et målt spissttrykk SPL på over 175 dB re 1 μPa på ~2 m avstand. Det eksakte lydnivå kunne ikke bestemmes da lyden oversteg den målbare grensen for instrumentet. Men midt i oppdrettskonstruksjonen, ~6 m fra luken, var spissttrykket redusert til ~165 dB re 1 μPa og med et betydelig lavere 60-s SPL_{RMS} på 132 dB re 1 μPa over hele frekvensbåndet 20-1000Hz (Figur 4). Vi observerte atferden til fisken mens luken ble stengt 3 ganger på rad. Selv om flest fisk ble skremt bort første gang var det fortsatt en undergruppe på 5–10 fisk nær overflaten som oppholdt seg i nærheten av luken hver gang den ble stengt, men usikkert om det var de samme individene hver gang. I etterkant av målingene ble lukens lukkemekanisme modifisert slik at støyen under lukking ble betraktelig redusert.

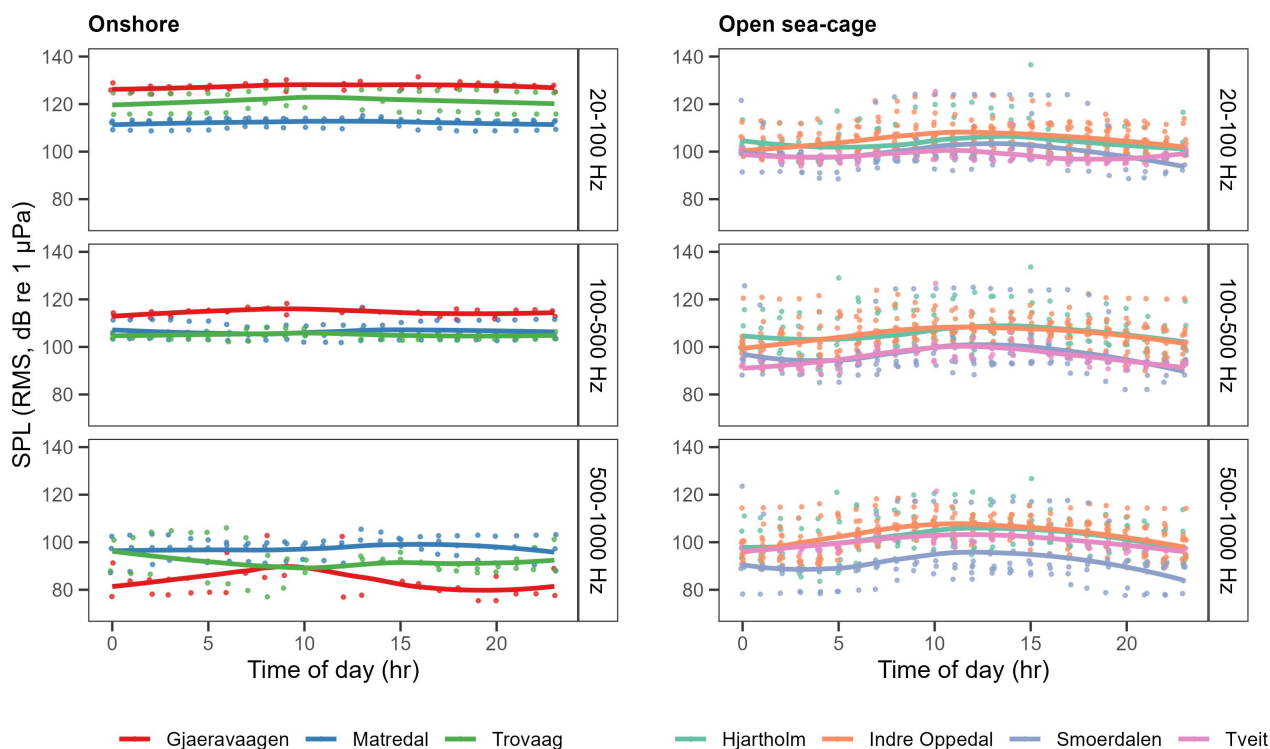


Figur 4. Spektrogram (hovedpanel), effektspektral tetthet (PSD, høyre panel) og bølgeform (nedre panel) av akustiske forhold i Ovum før (0-24 s), under (24 s) og etter (25-60 s) at en undervannsluke ble stengt med et smell. Hydrofonen var plassert 6 m unna luken. Lydtrykksnivået (SPL_{RMS}) var 132 dB re 1 μPa over 20-1000 Hz, med et 60-s lydeksponeringsnivå (SEL) på 150 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$. Spectrogram (main panel), power spectral density (PSD, right panel) and waveform (lower panel) of acoustic conditions before (0-24 s), under (24 s) and after (25-60 s) an underwater hatch was closed with a slam. The hydrophone was placed 6 m from the hatch. The sound pressure level (SPL_{RMS}) was 132 dB re 1 μPa over 20-1000 Hz for 60 s, with a 60-s sound exposure level (SEL) of 150 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$.

3.3 - Åpne merdanlegg

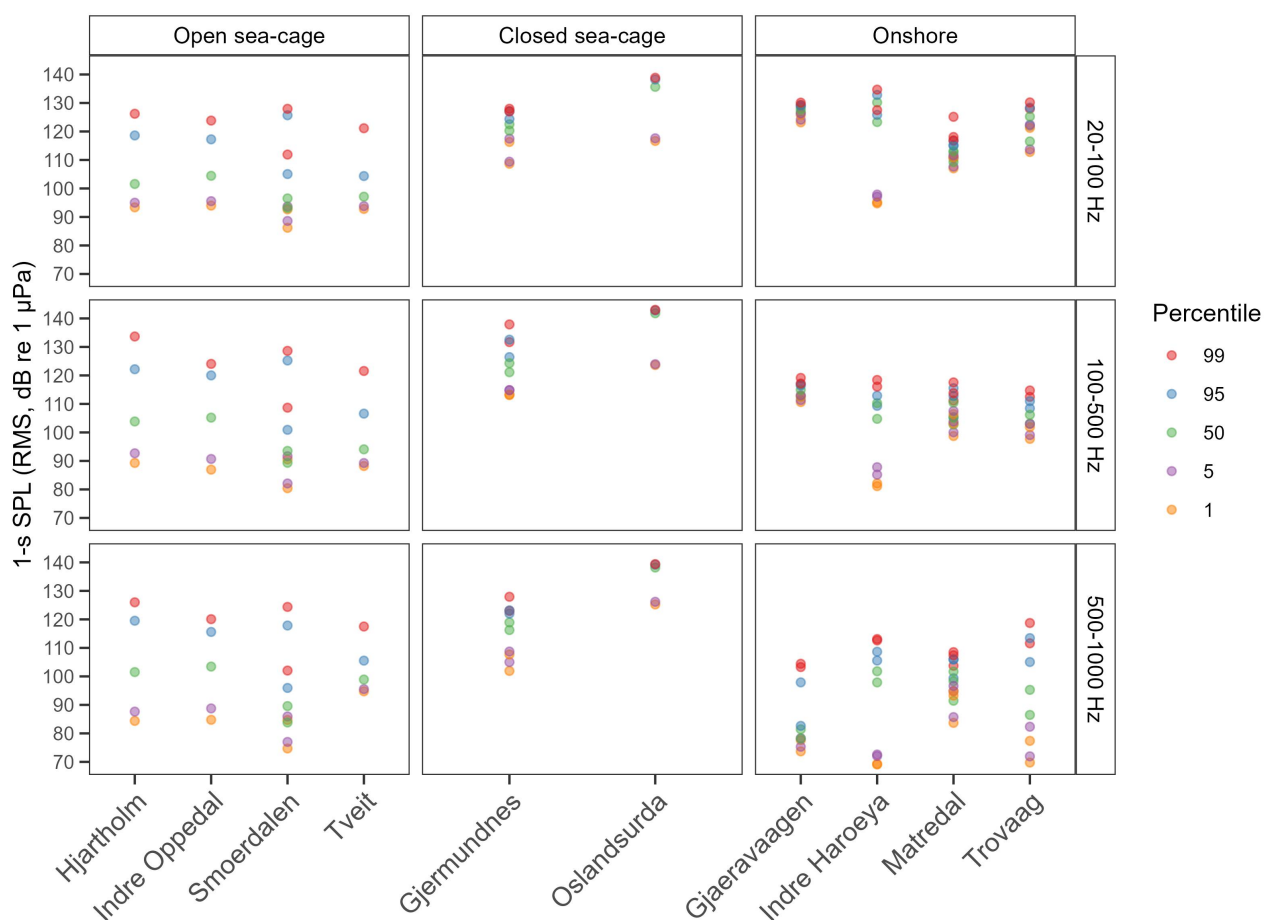
I de åpne merdanleggene var den gjennomsnittlige lyden (1-s SPL_{RMS}) 98-105 (20-100 Hz) og 95-105 (100-500 Hz) dB re 1 μPa . Kumulativt akkumulert lydeksponeringsnivå (SEL) over 60-minutter varierte fra 116 (20-100 Hz) til 123 (10-500 Hz) dB re 1 $\mu Pa2s$ (tabell 2). Generelt så var det mest støy ved lave frekvenser, ofte innenfor 20–100 og 100 til 500 Hz i forhold til 500-1000 Hz (Figur 3, 5). Nivåer under ~90 dB re 1 μPa over alle frekvensbånd ble målt i perioder uten fartøyer i nærheten, hvor den laveste verdien var om natten og tidlig morgen (Figur 5, 6, 7a).

Støyende aktivitet ved merdene skjedde vanligvis i dagslys, så sant avlusningsfartøy ikke var til stede. Nærhet av fartøy til hydrofonen hadde en dramatisk effekt på målt lyd, med høye nivåer når arbeidsbåter eller brønnbåter var langsmed merden hvor hydrofonen var utplassert. Under avlusning 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 (Figur 6, 7b). 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 som observert i Figur 7b. 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 (Tabell 2). Det er sannsynlig at laksen vil bli utsatt for lignende lydnivåer ved brønnbåtbesøk på merdene, spesielt under trenging og fisken er nær fartøyet. Vi målte ikke lydnivåer som fisk opplevde mens de ble behandlet eller transportert inn og ut av brønnbåtene. Tilsvarende lyder ble målt ved anlegget på Tveit når arbeidsbåt var i aktivitet ved merden (Figur 8), men med 10 dB lavere 1-s SPL_{RMS} verdier, dvs. opptil 147 (20-100 Hz) dB re 1 μPa ved hydrofonen (Tabell 2).

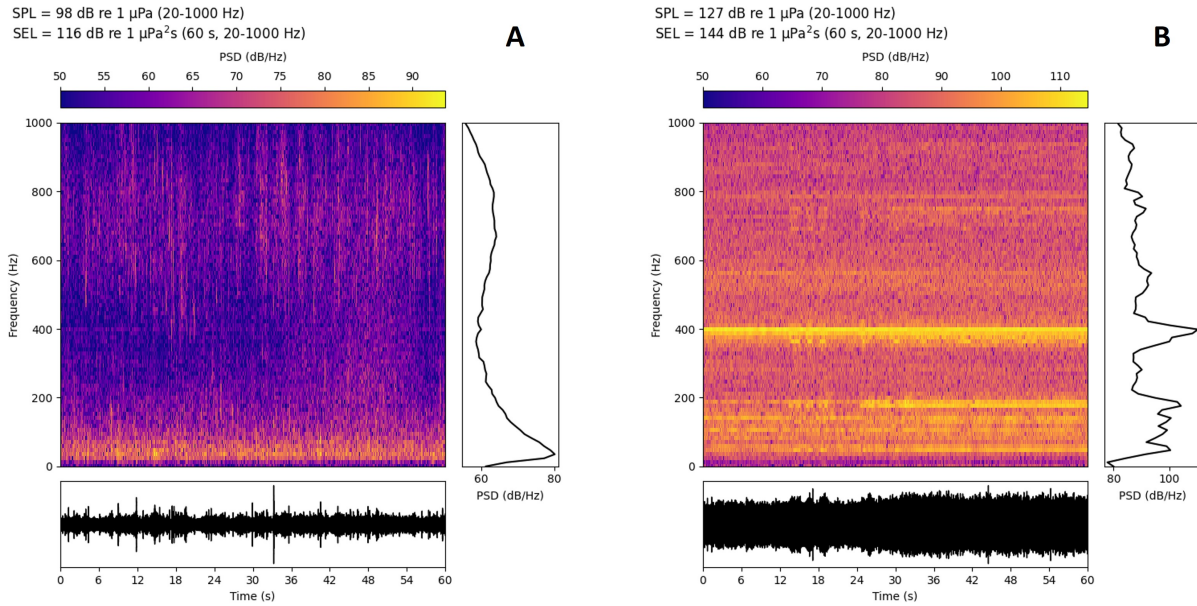


Figur 5. Daglige mønstre i lydnivåer på landanlegg (venstre paneler) og i åpne merder (høyre paneler) gitt 3 ulike frekvensbånd mellom 20-1000 Hz. Lydnivåer er gitt som gjennomsnitt (SPL_{RMS}) for tidsperioder på 60 minutter. Lukkede anlegg er ikke vist, da det ikke ble utført 24-timers opptak i disse systemene. Comparison of daily patterns in sound levels at all locations that were monitored for ≥ 23 hrs: 3 onshore sites (left panels) and 4 open sea-cage sites (right panels). Sound levels were calculated at 1-s increments within 3 frequency bands between 20-1000 Hz. Each point represents the arithmetic mean of numerous 1-s root-mean-square sound pressure level (SPL_{RMS}) values within 1-hr time-of-day bins (colour-coded by location).

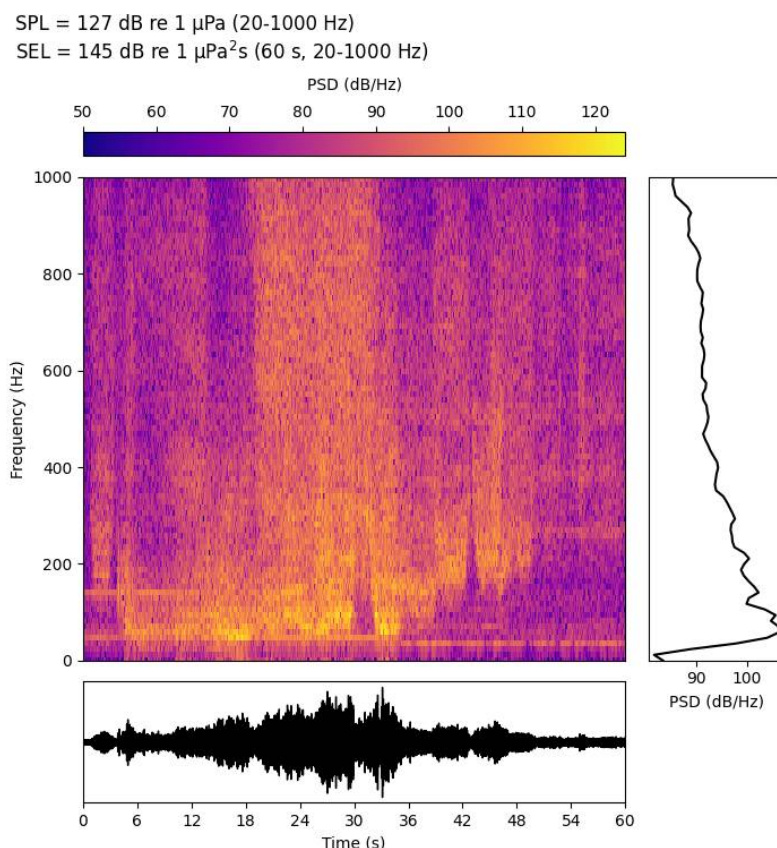
Støyende aktivitet ved merdene skjedde vanligvis i dagslys, så sant avlusningsfartøy ikke var til stede. Nærhet av fartøy til hydrofona hadde en dramatisk effekt på målt lyd, med høye nivåer når arbeidsbåter eller brønnbåter var langs merden hvor hydrofona var utplassert. Under avlusning ble fartøy og tilhørende maskineri kjørt døgnet rundt, noe som ga vedvarende SPL_{RMS}-verdier på ~125–140 dB re 1 μ Pa over 20–1000 Hz (Figur 6, 7b). 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 som observert i Figur 7b. 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 μ Pa ved hydrofona (Tabell 2). Det er sannsynlig at laksen vil bli utsatt for lignende lydnivåer ved brønnbåtbesøk på merdene, spesielt under trening og fisken er nær fartøyet. Vi målte ikke lydnivåer som fisk opplevde mens de ble behandlet eller transportert inn og ut av brønnbåtene. Tilsvarende lyder ble målt ved anlegget på Tveit når arbeidsbåt var i aktivitet ved merden (Figur 8), men med 10 dB lavere 1-s SPL_{RMS} verdier, dvs. opptil 147 (20-100 Hz) dB re 1 μ Pa ved hydrofona (Tabell 2).



Figur 6. Lydnivå ved 10 oppdrettsanlegg i Norge basert på 1-s gjennomsnitt SPL_{RMS} ved hver lokalitet og punktverdier indikerer nivået hvor andel av målinger ligger under prosentilene 1, 5, 50 (median), 95 og 99. Eksempelvis så ligger de 1 % høyeste lydmålingene over 99 prosentilen og de 5 % laveste lydmålingene under 5 prosentilen. Comparison of sound pressure levels (SPLs) at 10 salmon aquaculture sites in Norway based on percentile metrics (1st, 5th, median (50th), 95th, and 99th percentiles). Each point depicts the arithmetic mean of all 1-s SPL values corresponding to each site.



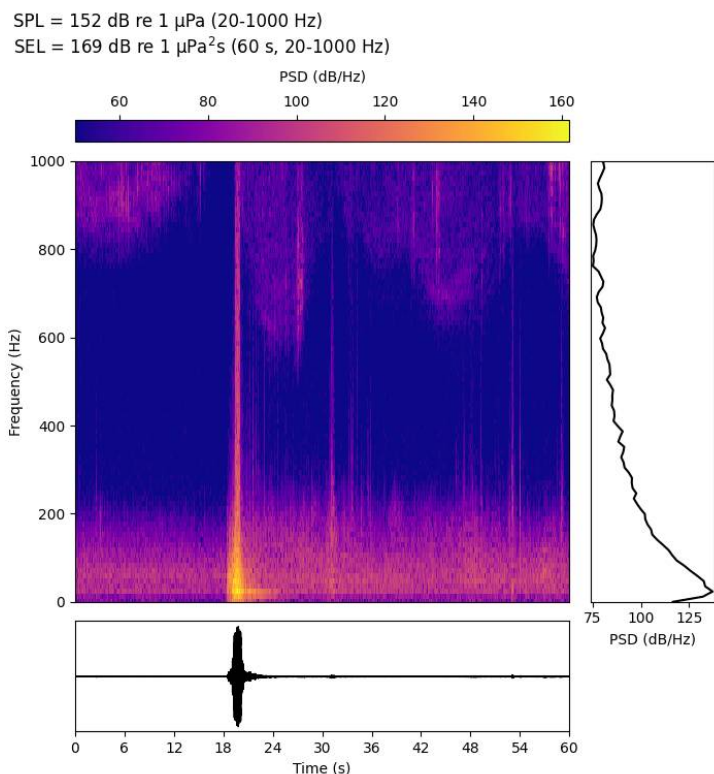
Figur 7. Spektrogram (hovedpanel), effektspektral tetthet (PSD, høyre panel) og bølgeform (nedre panel) av akustiske forhold ved det åpne anlegget på Oppedal om natten med bakgrunnsstøy (A) og under avlusing med brønnbåt til stede på dagtid (B), med ulike fargeskala for å få frem variasjon. Lydtrykksnivået (SPL_{RMS}) var henholdsvis 98 og 127 dB re 1 μPa over 20-1000 Hz, med et 60-s lydeksponeringsnivå (SEL) på henholdsvis 116 og 144 dB re 1 $\mu Pa^2 s$. Spectrogram (main panel), power spectral density (PSD, right panel) and waveform (lower panel) of acoustic conditions at the open cage facilities Oppedal at night with background noise (A) and during de-lousing operations with a well boat present during the day (B), with a different colour scale on plots to highlight variation. The sound pressure level (SPL_{RMS}) was respectively 98 and 127 dB re 1 μPa over 20-1000 Hz, with a 60-s sound exposure level (SEL) of respectively 116 and 144 dB re 1 $\mu Pa^2 s$.



Figur 8. Spektrogram (hovedpanel), effektspektral tetthet (PSD, høyre panel) og bølgeform (nedre panel) av akustiske forhold ved det åpne anlegget på Tveit som illustrerer arbeidsbåt nær merden som endrer gir, motorens turtall og avstand i løpet av 60s med målinger. Gjennomsnittet (SPL_{RMS}) var 127 dB re 1 μ Pa over 20-1000 Hz, med et 60-s kumulativt lydeksponeringsnivå (SEL) på 145 dB re 1 μ Pa²s. Spectrogram (main panel), power spectral density (PSD, right panel) and waveform (lower panel) of acoustic conditions at the cage facilities Tveit during a workboat presence shifting gear, revs and distance from the cage. The root-mean-square sound pressure level (SPL_{RMS}) was 127 dB re 1 μ Pa over 20-1000 Hz, with a 60-s cumulative sound exposure level (SEL) of 145 dB re 1 μ Pa²s.

3.4 - Landanlegg

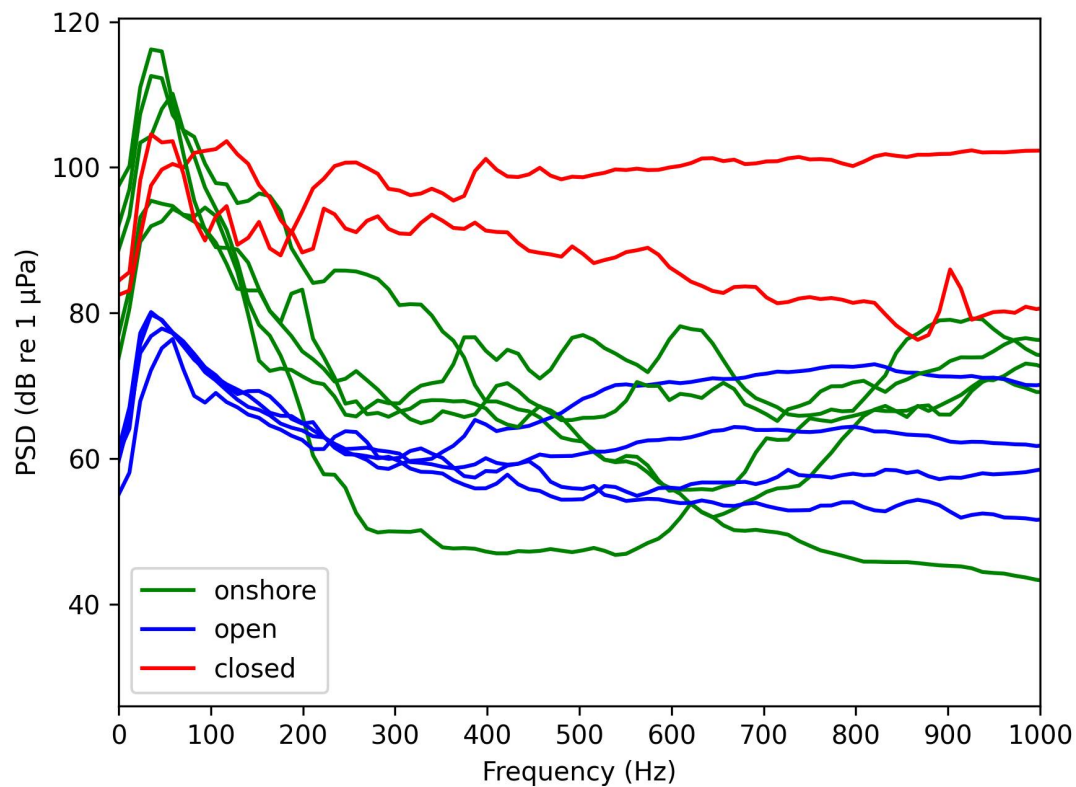
Lydnivået i landanleggene var relativt støyende og konstant, spesielt ved lave frekvenser (Figur 3, 6, Tabell 2), betydelig mer støyende enn i åpne merdanlegg, men likevel mindre støyende enn i lukkede sjøanlegg. Den gjennomsnittlige SPL_{RMS} varierte mellom 112-127 (20-100 Hz) og 105-114 (100-500 Hz) dB re 1 μ Pa, med 99. persentil SPL-er og max SPL_{RMS} opp mot 135 (20-100 Hz) dB re 1 μ Pa, og 60-minutters lydeksponeringsnivå (SEL) på 130-145 (20-100 Hz) dB re 1 μ Pa²s. I tillegg til typisk driftsstøy opplevde det resirkulerende landanlegget i Trovåg en sprenging fra en nabobyggeplass i løpet av perioden hvor vi hadde hydrofoner i oppdrettskarene. Dette signalet ble utelatt fra den generelle dataanalysen og er ikke representert i tabell 2. Lydnivået fra eksplosjonen overskred et kort øyeblikk det målbare området for begge hydrofonene (~175 dB re 1 μ Pa), men de resterende målinger er vist i Figur 9. Det var ikke lov til å oppholde seg innendørs under sprengingen, men personellets tidligere observasjoner var at fisken går mot bunnen av karet hvor de står med høy tetthet når sprenging pågår.



Figur 9. Spektrogram (hovedpanel), effektspektral tetthet (PSD, høyre panel) og bølgeform (nedre panel) av akustiske forhold ved landanlegget i Trovåg hvor en sprenging foregikk ca 300 m unna karene ved tiden 19 sekunder. Lydtryknivået (over 60 sekund) (SPL_{RMS}) var henholdsvis 152 dB re 1 μ Pa over 20-1000 Hz, med et 60-s lydeksponeringsnivå (SEL) på >169 dB re 1 μ Pa²s og spisstrykk på >175 dB re 1 μ Pa. Spectrogram (main panel), power spectral density (PSD, right panel) and waveform (lower panel) of acoustic conditions within the tank at the land facilities Trovåg during a blast performed at time 19 s at about 300 m from the tanks. The sound pressure level (SPL_{RMS}) was respectively 152 dB re 1 μ Pa over 20-1000 Hz, with a 60-s cumulative sound exposure level (SEL) of >169 dB re 1 μ Pa²s and peak pressure of >175 dB re 1 μ Pa.

3.5 - Frekvensfordeling av lyd i stille perioder

I alle anleggene er det mest energi i lyden for frekvensbåndet 20-100 Hz. På de 4 landanleggene ble det målt 5-17 dB re 1 μ Pa mer lyd innenfor frekvensbåndet 20-100 Hz enn på frekvenser 100-500 Hz (tabell 2), til tross for at ulike infrastrukturer var i bruk på tvers av anleggene (f.eks. gjennomstrømnings- og RAS-systemer, innendørs og utendørs, plast- og betongtanker med varierende størrelser). Denne lavfrekvente toppen var mest tydelig på landanlegg, delvis til stede i åpne sjøanlegg og bortimot fraværende i lukkede sjøanlegg (Figur 3, 6, 10). Det er interessant at de lukkede anleggene har veldig bredbåndet støy, med høyt nivå for alle frekvenser. Åpne sjøanlegg har lavest lyd i begge frekvensbånd (20-100 og 100-500 Hz) og lyden er i tillegg mindre variabel enn for de to andre anleggstyper.



Figur 10. Lydnivå ved ulike frekvenser. Effekts (50 persentil) spektral tetthet (PSDs) for 60-s lydklipp som representerer de laveste lydnivåer (dvs. de stilleste periodene) ved 4 anlegg på land, 4 åpne merder og 2 lukkede sjøanlegg. Power spectral densities (PSDs) of 60-s audio clips representing baseline sound levels (i.e. most silent typical ambient conditions) at 4 onshore, 4 open sea-cage, and 2 closed sea-cage salmon farms in Norway.

Ved alle lokaliteter ble SPL_{RMS} påvirket av de høyeste lydnivåene, noe som ga vesentlig høyere gjennomsnittlige SPL_{RMS} -verdier basert på mange måleperioder (Tabell 2) enn median SPL (50 persentil), men lavere enn 95 persentil SPL (Figur 6). Nivået for 95 persentilen representerer nedre grense for de 5 % høyeste lydene som ble målt, og er lavere enn spisslydtrykket som kun representerer den høyeste verdien målt.

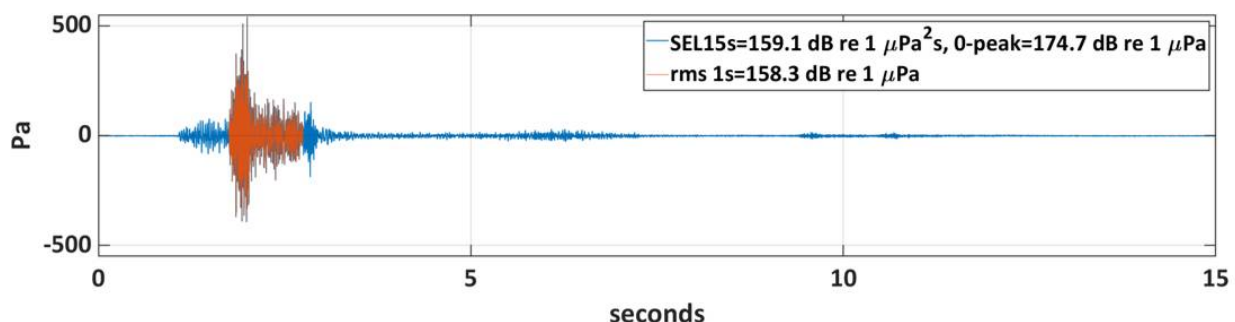
4 - Bonusdata fra sprenging i sjø ved Hattasteinen merdanlegg

4.1 - Oppsett og metode Hattasteinen

I etterkant av de planlagte målinger av lyd i prosjektet ble vi spurt av Vestland fylkeskommune om å observere laksen i oppdrettsanlegget Hattasteinen samtidig som det ble utført sprenging av fjell under vann i Bømlo Fiskerihavn, ca 1500 m unna. Vi var til stede ved den første salven den 3. februar kl 10:00 hvor det ble nyttet 850 kg emulsjon sprengstoff (Offshore Kemiitti) med dynamitt som tenner. Ytterligere salver opp til 1200 kg skulle nyttes de neste 9 dager, både på dag- og nattetid. Enkeltladningene var innboret (i borehull i berget), fordemmet (borehull fylt med 50 cm pukk) og gikk av med forsinkelse i salven (25 millisekund forsinkelse mellom hvert hull). Det var montert en lyddempende boblegardin i en oval ytterst i bukten hvor sprenging fant sted, i retning mot oppdrettsanlegget. Oppdrettsanlegget besto av 5 stk 160-metringer med spagetti nøter, 20 m til blyline, 40 m til spiss og inneholdt omtrent 788 000 laks med snittvekt 3,6 kg. Lyd ble målt på anlegget med 2 stk Soundtrap ST400 plassert på 5 og 15 m dyp i hjørnet av oppdrettsanlegget som pekte mot sprengingsstedet. Anleggets kamera ble nyttet til å observere atferd før, under og etter sprenging i 6 merder samtidig. Det ble tatt ut 5 fisk fra nærmeste merd for velferdskåring og obduksjon før og en time etter sprenging.

4.2 - Resultat Hattasteinen

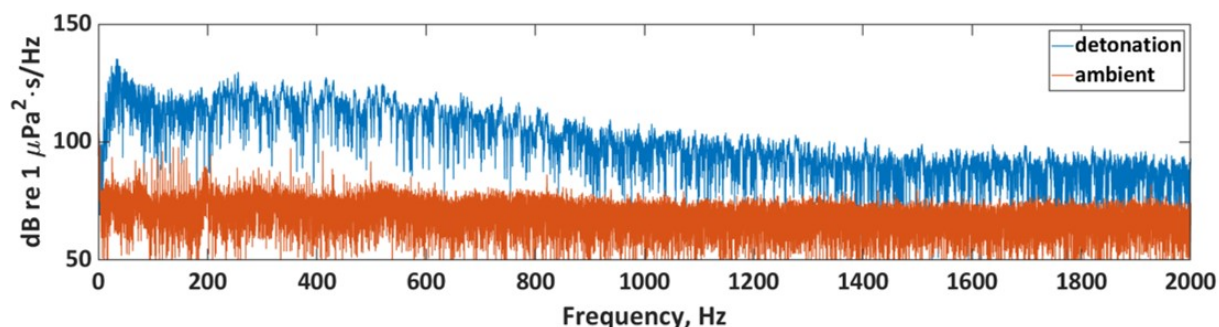
Bakgrunnsstøyen ved anlegget var i samme størrelsesorden som ved de andre åpne sjøanlegg (Tabell 2) og ble målt til 111 dB re 1 μ Pa (RMS over 15 s, 5 minutt før sprenging, ufiltrert 20 – 20000 Hz). Under sprenging er 1-s SPL_{RMS} (for perioden midt i lydimpulsen, Figur 11) 158 dB re 1 μ Pa og SEL integrert over 15 s er på 159 dB re 1 μ Pa²s. SEL over 1 sekund (oransje område i figur 11) blir per definisjon det samme som RMS for 1 sekund, altså 158 dB re 1 μ Pa²s. Spisstrykket (maksverdi 0- peak) var 175 dB re 1 μ Pa. Dette lydnivået ligger 10 dB lavere i SEL enn lyden ved sprenging i landanlegget som trolig var enda høyere siden hydrofonen gikk i metning (Figur 9), men 9 dB høyere enn smellet fra lukelukkingen der SEL også inkluderte bakgrunnsstøy i 60 sekunder (Figur 4).



Figur 11. Lyd ved lokalitet Hattasteinen under sprenging av 850 kg emulsjon sprengstoff (Offshore Kemiitti) omtrent 1500 m unna (fra ca 1 s på tidsskala) gitt som trykk i Pascal med beregnet lydnivå i dB re 1 μ Pa gitt som spisstrykk (0-peak) og SPL_{RMS} for 1 s (merket med oransje) og SEL integrert over 15 s. Sound pressure in pascal measured at Hattasteinen 1500 m from detonation of 850 kg emulsion slurry "dynamite" (Offshore Kemiitti) with delay in the blast, in borehole/ confined and bubble curtain as mitigation. Estimated zero to peak sound pressure level was 174.7 dB re 1 re 1 μ Pa and SPL_{RMS} for 1 s (area marked with orange) was 158. 3 dB re 1 μ Pa, and SEL integrated over 15 s was 159.1 re 1 μ Pa²s. This signal was not filtered and hence includes frequencies from 20 -20000 Hz.

Det meste av lydenergien ligger i frekvensområdet under 100 Hz, med høyeste topp rundt 33 Hz (Figur 12), men nivået er betydelig hevet over bakgrunnsstøyen helt opp til over 20 kHz som var det høyeste vi kunne

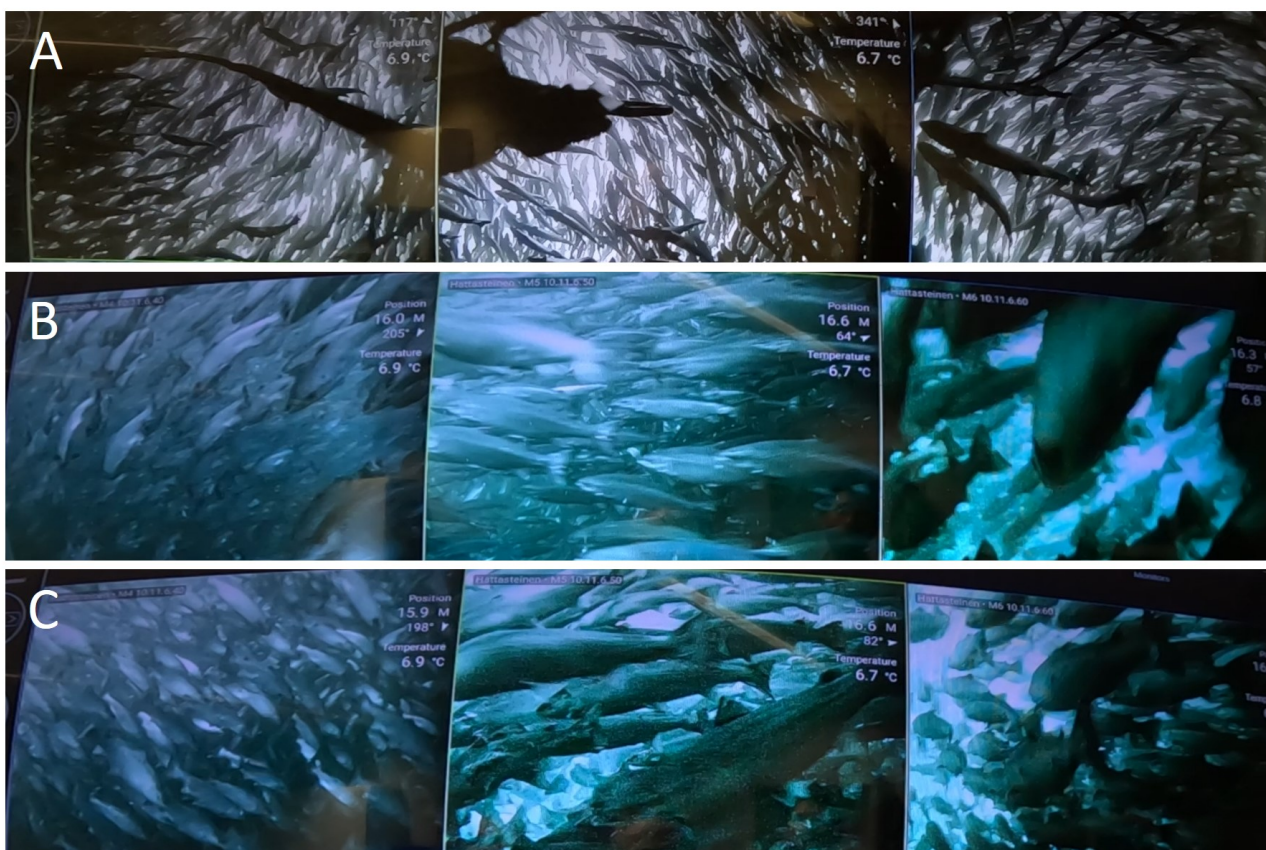
måle. Bakgrunnsnivået over frekvensområder 0-2000 Hz lå på 60-80 dB $1\mu\text{Pa}^2 \text{ s/Hz}$, mens nivået under sprenging var 100-130 dB $1\mu\text{Pa}^2 \text{ s/Hz}$.



Figur 12. Energi spektraltetthet viser fordeling av lydenergi pr frekvens. Blå kurve viser nivå av lyd ved sprenging (detonasjonen) og oransje kurve viser energi spektraltettheten til bakgrunnsstøyen gitt som ESD (energy spectral density) dB re $1\mu\text{Pa}^2 \text{ s/Hz}$. NB. Detonasjoner gir ofte mye energi ved lavere frekvenser (<20Hz) enn vår måleenhet kan registrere. Energy spectral density (ESD) shows the distribution of the sound energy pr frequency. Blue curve shows the ESD for the detonation, and the orange curve shows ESD for the ambient sound measured 5 minutes before the detonation. Note that detonations can have much low frequency energy at lower frequencies (<20 Hz) than our hydrophone was able to detect.

4.3 - Atferd Hattasteinen

Før sprenging ble det observert normal atferd med en jevn gruppestruktur hvor de fleste individer svømmer i ring i merden med hastigheter på 0,6-1,3 fiskelengder per sek (Figur 13A). Ved sprenging ble det observert en akutt atferdsendring (Figur 13B, 13C). Laksen skvatt til, økte svømmehastighet til 2-3 fiskelengder per sek, viste delvis kaotisk struktur med varierende svømmemønstre før store grupper av fisk svømte nedover i merden. Dessverre observerte vi ikke ved notbunn og vet ikke om fisken gikk på denne eller ikke. Etter omtrent 1 minutt begynte noe fisk å svømme opp igjen og etter hvert begynte hele merdgruppene med normal atferd igjen. Underveis var det endel «stressatferd» hvor laksen jaget rundt. Laksens akutte atferdsrespons var betydelig kraftigere enn forventet. Det ble likevel ikke observert atferd som i seg selv ble vurdert som direkte skadelig for fisken. Men det ble anbefalt å observere ved notbunn under de neste sprenginger og at detonasjoner kun burde utføres i dagslys slik at atferd kan observeres. Driftleders senere observasjoner var at laksen hadde omtrent samme reaksjon ved hver detonasjon; «fisken får seg en støkk, går på ned og rotete i ca 2-3 minutter for deretter å normalisere seg. Observasjoner ved notbunn viser at fisken går ned mot bunn, men borer seg ikke på nota». Basert på våre innledende og røkters senere observasjoner ved repetitive sprenginger bekreftet atferden som ble sett ved første salve og ingen åpenbar tilvenning til sprenging ble observert. Det finnes ingen observasjoner fra sprengingene foretatt i mørke.



Figur 13. Stillbilder fra undervannskamera plassert på omtrent 16 m dyp sentralt i merden som var 1500 m unna området hvor 850 kg sprengstoff ble detonert. Før sprenging svømte de fleste lakser et sirkulært mønster rundt i merden med en hastighet på 0,8-1,3 fiskelengder per sekund (A). Under og etter sprenging (B og C) reagerte laksen umiddelbart med å øke svømmehastigeten 2-3x, bli mer ustrukturert, delvis kaotisk hvor etter hvert mange fisk dykket nedover i merden. Images from an underwater camera placed at approximately 16 m deep in the centre of the cage, which was 1500 m away from the area where 850 kg of “dynamite” was detonated. Before blasting, most salmon swam normally around in a circular pattern at a speed of 0.8-1.3 fish lengths per second (A). During and after blasting (B and C), the salmon reacted immediately by increasing their swimming speed 2-3x, becoming more unstructured, partly chaotic followed by many fish diving downwards in the cage.

4.4 - Velferd Hattasteinen

Det ble ikke observert åpenbare skader på fisken som ble tatt ut av merden nærmest sprengingsområdet. Velferdskår på fisken var lik mellom individer tatt ut før og etter sprenging. Ingen åpenbare indre blødninger ble observert. Laksen hadde normal svømmeblærefylling (6-48 ml) og ingen vann (0 ml) i svømmeblære. I løpet av de nærmeste timene etter detonasjonen var det ingen forøket dødelighet eller observasjon av svimlere som holder på å dø. Driftsleder så ikke forøket dødelighet eller nedsatt appetitt i de 9 dagene med ytterligere sprenginger eller de påfølgende uker. Ved et besøk av fiskehelsebiolog, i perioden sprengingen pågikk, ble det antydnet at det var mer væske i dødfiskenes svømmeblære enn det som vanlig observeres.

5 - Diskusjon

5.1 - Lyder som ble målt

Denne studien har undersøkt hva som er typiske lyder ved de vanligste oppdrettsanlegg for laks som er i bruk i dag, fra gjennomstrømming og resirkulering på land med plast- eller glassfiberkar til merder i sjø av stål eller plast. Vi dokumenterte også lyder i mer utviklingsmessige eller fremtidsrettede oppdrettssystemer som kan bli mer vanlig for å begrense lokale miljøinteraksjoner i kyst og hav i fremtidig oppdrett. Disse inkluderer et kommersiell skala gjennomstrømningssystem på land med enorme betongkar som brukes for laks frem til slaktestørrelse, og to semi-lukkede flytende anlegg med ulike konstruksjonsmetoder (presenning og not eller stiv kompositstruktur). Sammenlagt gir denne studien en omfattende oversikt over lydnivå innen oppdrett av laks i dag.

De målte lydnivåene varierte betydelig, både mellom og innenfor anlegg, fra bakgrunnslyd som over et bredt frekvensspekter ikke er særlig forhøyet over typiske nivåer som måles i dagens marine miljø ($SPL_{RMS} < 100$ dB re 1 μ Pa over 20–1000 Hz), til kontinuerlige lyder som er mye høyere enn det typisk marine lydlandskapet (120–140 dB re 1 μ Pa over 20–1000 Hz), til akutte lyder med spissstrykk nivåer som kan forårsake midlertidig hørselstap hos enkelte fiskearter ($SPL_{spiss} > 165$ –185 dB re 1 μ Pa over 20–1000 Hz) (Popper & Hawkins 2019). Generelt var det lavere bakgrunnsnivåer av lyd på de åpne merdanleggene enn på land eller i de flytende semilukkede anlegg i sjø. Dette har en åpenbar sammenheng med at de åpne merdanleggene ikke er avhengig av støyende pumper for å sirkulere vann aktivt da den naturlige varierende vannstrømmen sørger for tilførsel av friskt vann og transporterer avfallet bort. Likevel var det langt mer varierende lydnivå i de åpne sjøanleggene enn på land eller i lukkede anlegg (Figur 3) som følge av båtanløp og ulike arbeidsoperasjoner. Den målte lyden gjenspeilte infrastrukturen og utstyret som var i bruk på de kommersielle anleggene, illustrert med de store pumpene som brukes i landbaserte og semi-lukkede systemer, og fartøyene som besøker de åpne merdanleggene regelmessig. Dette var tydeligst når man sammenlignet lydnivåer ved merder på dagtid og natt (Figur 5), og med og uten brønn- eller arbeidsbåter til stede (Figur 7, 8).

Lyd fra andre kilder enn oppdrettsanlegget ser også ut til å være en faktor ved merdanlegg i sjø, der bakgrunnsnivåer kan være mer avhengig av tilstedeværelse av fartøy utenom akvakultur eller naturlige lydkilder. Eksempelvis var bakgrunnsstøyen, SPL_{RMS} ved Smørdalen, > 6 dB re 1 μ Pa lavere enn på de andre åpne merdlokalitetene som ble undersøkt (Tabell 2). Sannsynligvis har dette sammenheng med at Smørdalen ligger i bunnen av en skjermet fjord (Masfjorden), mens de resterende tre lokalitetene (Hjartholm, Indre Oppedal, Tveit) ligger i mer utsatte posisjoner i den mye større Sognefjorden. Her er det hyppig fartøystrafikk av ferjer, cruiseskip, transportskip, hurtigbåter, brønnbåter og arbeidsbåter av ulike størrelser (<https://nais.kystverket.no/>) samt småbåter.

5.2 - Sammenligning med tidligere studier av lyd i fiskeoppdrett

Nivåene av lyd som er dokumentert i denne studien er stort sett sammenlignbare med de få, tidligere studiene av oppdrettssystemer. Arbeid av Bart et al (2001) karakteriserte lyden i resirkulerende akvakultursystemer (RAS) og jorddammer som inneholdt stripet havabbor, tilapia og atlantisk laks, og rapporterte lyd (SPLs) på opptil 140–160 dB, med primære frekvenstopper mellom 25–250 og 630–2000 Hz. Craven et al (2009)

registrerte maksimal SPL på 124 dB re 1 μ Pa innenfor et kommersielt stamfisk RAS-anlegg, med lyd dominert av en 187,5 Hz frekvenskomponent knyttet til hovedpumpen ved anlegget. I en mer omfattende og nylig studie ble lyd undersøkt både i en laksemerd i sjø i New Zealand, i et landbasert resirkulerende akvakulturanlegg i Tyskland og et dambasert akvakulturanlegg i Indonesia (Radford & Slater, 2018). Studien viste at lavfrekvente lyder (<500 Hz) var dominerende i alle oppdrettssystemene. Merdanlegget hadde lydnivåer fra 107-112 dB re 1 μ Pa SPL_{RMS}, som var betydelig kraftigere enn ved nærliggende lokaliteter uten anlegg (98-107 dB re 1 μ Pa). Den forhøyede lyden på merdene ble først og fremst tilskrevet fartøy som besøkte eller passerte nær anlegget, og var mest tydelig ved frekvenser under 1000 Hz. Lydnivået i RAS-anlegget var lavere, fra 96-103 dB re 1 μ Pa avhengig av karenes plassering og konstruksjon. Jorddammer i Indonesia var meget roligere, med bare 75 dB re 1 μ Pa. Samlet sett viser vår studie at lyden vi har målt er innenfor de forventede nivåer og frekvenser som er beskrevet for moderne, industriell akvakultur, men legger til betydelig kunnskap om eksakte nivåer og variasjon innen dagens oppdrettspraksis for laks, tid på døgnet og akutte hendelser.

5.3 - Mulige effekter av lyd på laks i oppdrett

Meget høye lyder kan forårsake direkte fysiske skader på laksen. Et eksempel er vevsskade hos chinook laks som ble observert etter at den hadde vært utsatt for ≥ 177 dB re 1 μ Pa²s SEL fra et enkelt pæleslag (når man banker påler ned i bakken), Halvorsen et al (2012). Sammenlignet med publisert kunnskap må vi anta at laks i oppdrett fysisk sett vil være relativt upåvirket av det generelle lydnivået og lydspekteret som ble observert i vårt studie (opp til SEL på 169 dB re 1 μ Pa²s). Men litteraturen for hvilket lydnivå og eksponeringstid som gir kortvarige eller langvarige skadelige, fysiske effekter både på laks og andre fiskeslag er derimot ufullstendig og eksakte grenser manglende (e.g. Slabbekorn et al 2010). Hos atlantisk laks fant Solé et al (2021) ingen effekter på sanseepitel eller andre indre organer etter gjentatte eksponeringer for 350 og 500 Hz toner i 2–4 timer om gangen (SPL: ~ 152 – 155 dB re 1 μ Pa; SEL: 195 dB re 1 μ Pa²s, 2 timer). Andre studier har funnet at hørselens følsomhet, fødeinntak, vekst og overlevelse ikke var forskjellig mellom grupper av regnbueørret oppdrettet ved forskjellige lydnivåer (8 måneder ved 115, 130 eller 150 dB re 1 μ Pa RMS (Wysocki et al 2007)); 5 måneder ved 117 eller 149 dB re 1 μ Pa RMS (Davidson et al 2009); 8 uker ved 127 dB re 1 μ Pa (Slater et al 2020)). Disse studiene konkluderte med at det var usannsynlig at de typiske nivåer av lyd målt i kommersiell akvakultur er en begrensende faktor for produksjonen, selv om alle testet for effekter av forhøyede lydnivåer sammenlignet med et ganske høyt bakgrunns- eller referansenivå (≥ 115 dB re 1 μ Pa SPL_{RMS}); som er høyere enn det omgivende lydnivået i mange travle kystfarvann (Andrew et al 2002, Bardyshev 2007, Merchant et al 2016, Dinh et al 2018, Halliday et al 2021). Dermed kan vi ikke utelate at det finnes direkte skadelige effekter av lyd som gjelder likt på tvers av de målte nivåer. Ytterligere studier med representative kontrollgrupper hvor lydnivået er enda lavere må gjennomføres for å dokumentere eventuelle effekter. Endret atferd eller kortvarig stress fra lyd observeres derimot ofte og diskuteres lenger nede.

Alternativt til direkte skader av lyd kan det være at laksefisk raskt akklimatiserer seg til et forutsigbart lydlandskap gjennom tilvenning og økt toleranse. I så fall kan et høyt, men forutsigbart lydnivå maskere plutselige lyder og være å foretrekke fremfor et roligere, men mindre forutsigbart lydlandskap (Davidson et al 2009). Basert på observasjoner av atferd finnes det en del støtte for tilvenning til konstante lyder: regnbueørret viste en atferdsmessig stressrespons når den ble utsatt for 149 dB re 1 μ Pa, men akklimatiserte seg relativt raskt til det forutsigbare lydlandskapet og gjenopptok normal atferd (Davidson et al 2009). Derimot eksponerte Bui et al (2013) laks for periodiske lyder fra en av to kilder: en fiskeskremmende enhet (Sonny et al 2006) som produserte høy lydstyrke ved 12,5 Hz infralyd i 1 min på/av syklus i 10 min, eller slag mot vannoverflaten som ble gitt ved å slippe ned en skive hvert 10. sekund i 1 min på/av syklus i 10 min. Lydnivået ble ikke målt i detalj,

men partikkelakselerasjon (ca 0.03 ms² ved 4 m avstand) i lyden er sannsynligvis den viktigste komponenten fisken reagerte på ved de lave frekvenser (Sonny et al 2006). Gjentakende ved begge lydene var at laksen hadde en fluktrespons hvor den også dykket ned til bunnen av merden. Laksen gjenopptok ikke normal atferd før protokollen med lydeksponering opphørte. Gjentatte periodiske lyder kan oppleves som uforutsigbare av laksen, i hvert fall på kort sikt, selv om det er et konstant intervall. På lang sikt kan etableringen av en daglig rutine som involverer periodiske lyder bli mer forutsigbare for fisken, og resultere i at den blir mindre stresset når de oppstår. Men, mer forskning er nødvendig for å forstå betydningen av konstante/ forutsigbare og plutselige/ uforutsigbare lyder i oppdrettsmiljøet. Det vil også være behov for en utvidet forståelse av laksefisk sin følsomhet for lyd. Dette gjelder spesielt oppdrettet laks som antas å ha redusert følsomhet som følge av feilutviklede, vaterittiske otolitter og andre deformiteter som kan påvirke hørselen (Reimer et al 2016, 2017). Det er mulig at redusert hørsel kan vise seg gunstig for oppdrettslaks i produksjonsmiljøer ved å bufre effekten av plutselig høy eller oppsiktsvekkende støy og dermed redusere stressende reaksjoner på eller forstyrrende støynivåer. De adferdsmessige og fysiologiske responsene til individuelle fisk på lydstimuli bør testes og korreleres med nivået av vateritt deformasjoner i otolittene deres. Det er også ukjent om lydforholdene i klekkeri eller settefiskanlegg bidrar til laksens utvikling av vaterittiske otolitter.

5.4 - Skarpe, høye lyder

Noen av de skarpe og høye lydene vi målte i oppdrettssystemene kan imidlertid være tilstrekkelige til å forårsake midlertidig hørselstap hos fisk. I litteraturen finnes rapporter om midlertidig hørselstap som typisk etterfulgte flere eksponeringer for lydimpulser >185 dB re 1 μ Pa, eller mer moderate lyder som vedvarte lenge nok til å produsere kumulative SEL over 186 dB re 1 μ Pa²s (Smith & Monroe 2016, Popper & Hawkins 2019). Mer alvorlige fysiske skader (dvs. utover hårcelleskade) har også blitt observert etter eksponering for spissstrykk SPL >207 dB re 1 μ Pa eller kumulative SEL >203 dB re 1 μ Pa²s (Smith & Monroe 2016, Popper & Hawkins 2019). Vi målte ikke lydnivåer som nærmet seg disse tersklene bortsett fra ved to tilfeller der topp-/ spisslydnivået overskred hydrofonens dynamiske måleområde (~175 dB re 1 μ Pa). Den første var sprengningen i tilknytning til smoltanlegget på Trovåg, som oversteg 175 dB re 1 μ Pa i begge karene hvor hydrofonene var plassert, og antagelig i alle karene i oppdrettsbygget. Eksplosjonene hadde pågått, om enn sjeldent, i flere måneder, og røkterne rapporterte om alvorlige fluktreaksjoner som førte til økning i oksygenbehovet i RAS-anlegget etter hver eksplosjon. Det andre tilfellet var lyden av en undersjøisk luke som lukket seg med et smell i «egget» hos Ovum på Gjermundnes, som overskred lydterskelen 175 dB re 1 μ Pa ved posisjonen ~2 m fra luken. Ved den andre hydrofonens posisjon, ~6 m fra luken var lydnivået dempet til ~165 dB re 1 μ Pa. I hvert tilfelle er det et klart potensial for at det kunne oppstå et delvis, midlertidig hørselstap. Men, disse akutt, høye lydene er imidlertid ikke et iboende trekk ved ethvert oppdrettssystem: landanlegg er noen ganger utsatt for konstruksjonslyder, men sjelden i lange perioder, mens det lukkede systemet på Gjermundnes var en prototype, og etter at lydmålingene identifiserte undervannsluken som en akutt, høy lydkilde ble lukkemekanismen endret.

Det er sannsynligvis mange lignende eksempler på at støykilder i oppdrettsnæringen delvis kan dempes når de først er identifisert. Men fordi lyd ikke forplanter seg effektivt mellom luft og vann, og fordi det hørbare frekvensspekteret til mennesker er høyere enn for fisk, kan fisk bli påvirket av undervannslyder som røkterne ikke oppfatter (mennesker: ~20–20000 Hz med mest følsomhet ~2000–5000 Hz: (Masterton et al 1969); laks: Figur 2. På samme måte kan hørfrekvente lyder som er irriterende for oss mennesker i stor grad være umerkelige for fisk. Tilgang til hydrofoner og grunnleggende analyseverktøy vil kunne hjelpe oppdrettere med å isolere signaler innenfor det aktuelle frekvensbåndet som laks hører og dermed identifisere og dempe de

viktigste støykildene. For landbaserte eller mer lukkede anlegg med rigide konstruksjoner vil modellering av lydforhold under design- og prosjekteringsfasen tillate at noen problemer kan unngås fra start.

5.5 - Begrensninger og fremtidige retninger

Laksefisk føler først og fremst lyd i form av partikkelbevegelse, noe som ikke ble målt i denne studien. I stedet fokuserte vi på beregninger av lydtryknivå (SPL), som er korrelert med partikkelbevegelse, om enn ikke fullkomment eller til og med dårlig under visse forhold (Nedelec et al 2016). Hawkins og Popper (2017) hevder også at vurderinger av miljøpåvirkninger fra vindturbiner basert på lydtrykk blir feil fordi de fleste arter er følsomme for partikkelbevegelse. Vår hovedbegrunnelse for valg av målemetode var for å kunne inkludere et bredt spekter av oppdrettssystemer og miljøer, noe som krevde en kompakt og robust måleenhet. Tilgjengelige målere for partikkelbevegelse er foreløpig ikke små og enkle (Nedelec et al. 2021) og bortimot umulig å plassere i ulike konfigurasjoner av oppdrettskar og -merder med fisk. Dessuten er ikke grensene for hva laksefisk hører og oppfatter i forhold til måleenheter for partikkelbevegelse (akselerasjon) etablert, noe som betydelig begrenser den kortsiktige anvendelse av eventuelle data på partikkelbevegelse som samles inn.

Noen forfattere har anbefalt å ikke bruke SPL_{RMS} for opptak som inneholder pulsede hendelser med høy amplitude som for eksempel pæling (Merchant et al 2015), men heller ved mer jevn støy. Ofte oppgis både gjennomsnitt og andre beregnede måleverdier tilpasset den spesifikke lydens sammensetning. De målte verdier bør også sees i sammenheng med konteksten som lydmålingene skal nyttes, som i dette studiet var vurderinger av hvordan lyden forventes å påvirke laksen. Vi valgte å rapportere SPL_{RMS} verdier for å gjøre sammenligninger med tidligere arbeid innen emnet (Bart et al 2001, Craven et al 2009, Radford & Slater 2018), og fordi lyden i akvakultur har en tendens til å være dominert av relativt kontinuerlige lyder. Men vårt valg av rapportering av lydnivå fordelt på ulike frekvensbånd kan diskuteres og gjør det vanskeligere å sammenligne direkte med en del andre arbeider som typisk ser på et bredere bånd. Dersom vi hadde analysert for hele frekvensbåndet 20-500 Hz (som vi tror laks hører) i stedet for de oppdelte båndene 20-100 Hz og 100-500 Hz så ville vi fått en høyere verdi avhengig av type støykilde. Men vi valgte å dele opp i ulike frekvensbånd for bedre å få frem lyden i det lavere frekvensområdet som vi antar har mest å si for laksens oppfattelse og dens responderende atferd.

Selv om vi samlet inn akustiske data fra en rekke oppdrettssystemer for laks i denne studien, har vi ikke undersøkt lydnivåer i svært eksponerte eller offshore havmerder, nedsenkede merder (Warren Myers et al 2022) eller kommersielle versjoner: Nautilus fra AkvaGroup.no) eller merder utstyrt med snorkler (Geitung et al 2019). På mer eksponerte lokaliteter vil lyden sannsynligvis være høyere innenfor frekvensområdet som påvirkes av bølgepåvirkning, spesielt når bølger treffer merdstrukturer, flåter og båter av ulike design. Dette kan illustreres av forskjellen i bakgrunns lydnivåer fra den skjermede lokaliteten ved Smørdalen i forhold til de mer eksponerte lokalitetene i Sognefjorden. Likevel vil de maksimale lydnivåene som skapes av bølgepåvirkning forventes å være mye lavere enn lyden fra fartøy som arbeider langs en merd. Målinger når det er sterk vannstrøm må også gjøres med forsiktighet, da vannets hastighet rundt hydrofonen skaper trykkgradienter som virker direkte på sensoren og genererer 'strømsstøy' eller 'pseudolyd' som kan virke mye høyere enn ekte akustiske signaler (Bardyshev 2007). Ved å drive oppdrett av fisk på større dybder vil lyd reduseres fra fartøyer og andre overflatelyster, ganske enkelt fordi dypere merder vil øke avstanden mellom fisken og lydkilden. Fisk oppdrettet under disse forholdene vil bli akklimatisert til et lavere og kanskje mer forutsigbart omgivelseslydnivå enn fisk oppdrettet i overflatemerder. Dette kan igjen føre til at fisk blir mer stresset av høye lyder når den bringes til

overflaten for overføring, behandling eller slakting. Det mangler også lydmålinger av notvasking i sjø, hvor ulike systemer nyttes med forskjellige størrelser og type arbeidsbåter og motorer, kompressorer, rotasjoner, børster, dyser og annet støyende utstyr som varierer mye. Oppdrettere antyder at noen av vaskesystemer er mer støyende enn andre og har sett ulike effekter på laksens atferd og appetitt som muligens kan kobles til støy. Ulike båter gir ulik støy og noen kan ha mer negative effekter på laksen enn andre. Fra villfisk studier er det gode eksempler på at stillegående fartøy skremmer fiske mindre enn støyende fartøy (De Robertis og Handegard 2013). Vi målte ikke lydnivåer som fisk opplevde mens de ble behandlet eller transportert inn og ut av brønnbåtene. Det vil være verdt å undersøke flere av disse temaene i fremtiden for å dokumentere og vurdere laksens velferd i enda flere av oppdrettssystemene og kunne foreslå eventuelle avbøtende tiltak.

De involverte forskere har allerede satt i gang forsøk for å se nærmere på hvordan lyd kan påvirke laks i oppdrett. Laks undersøkes for akklimering til lavfrekvent lyd over tid i forhold til atferd, fysiologi og hjerneaktivitet. Flere av lydende som er målt i denne studien spilles av med undervanns høyttalere for laks i land- og sjøanlegg, hvor vi deretter studerer kort- og langtidseffekter på atferd, fysiologi og hjerneaktivitet underveis i forsøket og etter utsetting som smolt til sjø.

6 - Oppsummering

6.1 - Lyden i lakseoppdrett er betydelig og sammensatt

Samlet sett var lydlandskapet 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 semi-lukkede merdsystemer, ettersom støy skapt av pumper og annet maskineri forplanter seg til oppdrettsmiljøet. Lydnivået ved åpne merdanlegg var mer varierende, med de høyeste periodene knyttet til aktiviteten til arbeidsbåter 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 lydeksposering krever videre undersøkelse, med spesiell vurdering av rollene til forutsigbare og uforutsigbare lyder.

7 - Referanseliste

- Andrew RK, Howe BM, Mercer JA, Dzieciuch MA (2002) Ocean ambient sound: Comparing the 1960s with the 1990s for a receiver off the California coast. *Acoust Res Lett Online* 3:65–70.
- Audacity Team (2023) Audacity(R): Free Audio Editor and Recorder.
- Bardyshev VI (2007) Underwater ambient noise in shallow-water areas of the Indian Ocean within the tropical zone. *Acoust Phys* 53:167–171.
- BarentsWatch (2023) Open data via BarentsWatch. <https://www.barentswatch.no/en/about/open-data-via-barentswatch/> (accessed 2023)
- Bart AN, Clark J, Young J, Zohar Y (2001) Underwater ambient noise measurements in aquaculture systems: a survey. *Aquacult Eng* 25:99–110.
- Bedriñana-Romano L, Huckle-Gaete R, Viddi FA, Johnson D, Zerbini AN, Morales J, Mate B, Palacios DM (2021) Defining priority areas for blue whale conservation and investigating overlap with vessel traffic in Chilean Patagonia, using a fast-fitting movement model. *Sci Rep* 11:1–16.
- 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* 8:e63696.
- Craven A, Carton AG, McPherson CR, McPherson G (2009) Determining and quantifying components of an aquaculture soundscape. *Aquacult Eng* 41:158–165.
- 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* 288:337–343.
- Dinh JP, Suca JJ, Lillis A, Apprill A, Llopiz JK, Mooney TA (2018) Multiscale spatio-temporal patterns of boat noise on U.S. Virgin Island coral reefs. *Mar Pollut Bull* 136:282–290.
- Fiskeridirektoratet (2022) Sale of salmon and rainbow trout.
- Geitung L, Oppedal F, Stien LH, Dempster T, Karlsbakk E, Nola V, Wright DW (2019) Snorkel sea-cage technology decreases salmon lice infestation by 75% in a full-cycle commercial test. *International Journal for Parasitology* 49, 843-846.
- Halliday WD, Barclay D, Barkley AN, Cook E, Dawson J, Hilliard RC, Hussey NE, Jones JM, Juanes F, Marcoux M, Niemi A, Nudds S, Pine MK, Richards C, Scharffenberg K, Westdal K, Insley SJ (2021) Underwater sound levels in the Canadian Arctic, 2014-2019. *Mar Pollut Bull* 168:112437.
- 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* 7:e38968.
- Harding H, Bruintjes R, Radford AN, Simpson SD (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. *Marine Scotland*.
- Hawkins AD, Johnstone ADF (1978) The hearing of the Atlantic Salmon, *Salmo salar*. *J Fish Biol* 13:655–673.
- Hawkins AD, Popper AN (2017) A sound approach to assessing the impact of underwater noise on marine fishes and invertebrates. *ICES Journal of Marine Science* 74:635–651. DOI: 10.1093/icesjms/fsw205.
- Masterton B, Heffner H, Ravizza R (1969) The evolution of human hearing. *J Acoust Soc Am* 45:966–985.
- Merchant ND, Brookes KL, Faulkner RC, Bicknell AWJ, Godley BJ, Witt MJ (2016) Underwater noise levels in UK waters. *Sci Rep* 6:36942.
- Merchant ND, Frstrup KM, Johnson MP, Tyack PL, Witt MJ, Blondel P, Parks SE (2015) Measuring acoustic habitats. *Methods Ecol Evol* 6:257–265.
- Nedelec SL, Ainslie MA, Andersson MH, Cheong SH, Halvorsen MB, Linné M, Martin B, Nöjd A, Robinson S, Simpson SD, Wang L, Ward J (2021) Best Practice Guide for Underwater Particle Motion Measurement for Biological Applications. Technical report by the University of Exeter for the IOGP Marine Sound and Life Joint

Industry Programme.

Nedelec SL, Campbell J, Radford AN, Simpson SD, Merchant ND (2016) Particle motion: the missing link in underwater acoustic ecology. *Methods Ecol Evol* 7:836–842.

Parvin SJ and Nedwell JR (1995). Underwater Sound Perception and the Development of an Underwater Noise Weighting Scale. *Underwater technology* 21, 12-19

Popper AN, Hawkins AD (2019) An overview of fish bioacoustics and the impacts of anthropogenic sounds on fishes. *J Fish Biol* 94:692–713.

Radford C, Slater M (2018) Soundscapes in aquaculture systems. *Aquac Environ Interact* 11:53–62.

Reimer T, Dempster T, Wargelius A, Fjellidal PG, Hansen T, Glover KA, Solberg MF, Swearer SE (2017) Rapid growth causes abnormal vaterite formation in farmed fish otoliths. *J Exp Biol* 220:2965–2969.

Reimer T, Dempster T, Warren-Myers F, Jensen AJ, Swearer SE (2016) High prevalence of vaterite in sagittal otoliths causes hearing impairment in farmed fish. *Sci Rep* 6:25249.

Risch D, Calderan S, Leaper R, Weilgart L, Werner S (2021) Current Knowledge Already Justifies Underwater Noise Reduction. *Trends Ecol Evol* 36:381–382.

De Robertis A, Handegard, NO (2013) Fish avoidance of research vessels and the efficacy of noise-reduced vessels: a review. *ICES Journal of Marine Science* 70, 34-45

Slabbekoorn H, Bouton N, van Opzeeland I, Coers A, ten Cate C, Popper AN (2010) A noisy spring: the impact of globally rising underwater sound levels on fish. *Trends Ecol Evol* 25:419–427.

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* 12:167–177.

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.

Smith ME, Monroe JD (2016) Causes and Consequences of Sensory Hair Cell Damage and Recovery in Fishes. *Adv Exp Med Biol* 877:393–417.

Solan M, Hauton C, Godbold JA, Wood CL, Leighton TG, White P (2016) Anthropogenic sources of underwater sound can modify how sediment-dwelling invertebrates mediate ecosystem properties. *Sci Rep* 6:20540.

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. *J Mar Sci Eng* 9:1114.

Warren-Myers F, Vågseth T, Folkedal O, Stien LH, Fosse JO, Dempster T, Oppedal F (2022) Full production cycle, commercial scale culture of salmon in submerged sea-cages with air domes reduces lice infestation, but creates production and welfare challenges. *Aquaculture* 548, 737570.

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* 272:687–697.



HAVFORSKNINGSINSTITUTTET

Postboks 1870 Nordnes

5817 Bergen

Tlf: 55 23 85 00

E-post: post@hi.no

www.hi.no