

Simen Grina Bråthen
Jacob Mørch Solem
Nikolai Vestbøstad

Lydopptak av atlantisk laks (*Salmo salar*), fra prosjektering til knitrelyd

Hvilke muligheter gir passiv akustisk overvåkning av oppdrettslaks

Hovedoppgave i Havbruksingeniør - BIHAV
Veileder: Bengt Finstad
Medveileder: Audun Torp
Mai 2024

Simen Grina Bråthen
Jacob Mørch Solem
Nikolai Vestbøstad

Lydopptak av atlantisk laks (*Salmo salar*), fra prosjektering til knitrelyd

Hvilke muligheter gir passiv akustisk overvåkning av oppdrettslaks

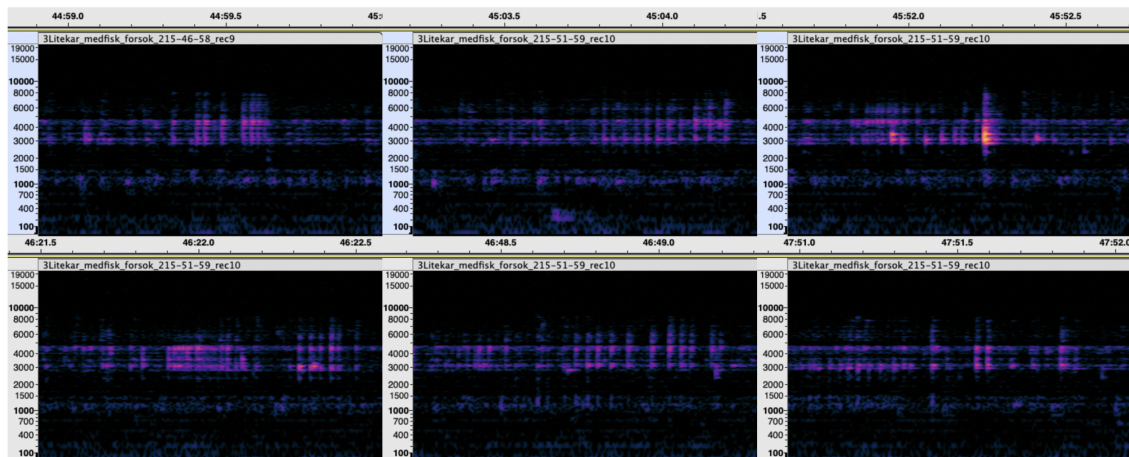
Hovedoppgave i Havbruksingeniør - BIHAV
Veileder: Bengt Finstad
Medveileder: Audun Torp
Mai 2024

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for naturvitenskap
Institutt for biologi



Kunnskap for en bedre verden

Lydopptak av atlantisk laks (*Salmo salar*), fra prosjektering til knitrelyd
Hvilke muligheter gir passiv akustisk overvåkning av oppdrettslaks?



Skrevet av:
Simen Grina Bråthen,
Jacob Mørch Solem,
Nikolai Vestbøstad

Mai, 2024

Forord

Det har vært en god arbeidsinnsats blant alle gruppens medlemmer, og vi har utforsket et spennende tema. I løpet av arbeidsprosessen har vi møtt på ulike utfordringer, som måtte bli løst i team.

Først og fremst ønsker vi å rette en stor takk til hovedveileder på NTNU, Bengt Finstad, som har gitt konstruktive tilbakemeldinger på endringer som må gjøres for å forbedre det helhetlige inntrykket av oppgaven. Han har vist god faglig innsikt og vært tålmodig med våre spørsmål og henvendelser.

Vi ønsker også å takke NTNU SeaLab v/ Iurgi Imanol Salaverria-Zabalegui og Sintef Ocean v/ Eirik Svendsen som lot oss bruke fisk og laboratorie for å utføre våre forsøk. Resultatene som kom fra dette har vært bærende i oppgaven.

Videre fortjener Audun Torp, vår veileder i Optoscale, en stor takk for tilbakemeldinger på behandling av data og hvordan dette kunne effektiviseres. Vi vil også rette en takk til resten av Optoscale som har stilt opp med ressurser, både i form av finansiering, men også med fagpersonell som har hjulpet i løpet av prosessen.

Sammendrag

Prosjektet har hatt som oppgave å vurdere hvilke muligheter passiv akustisk overvåkning av atlantisk oppdrettslaks (*Salmo salar*) kan gi. For å svare på dette er det i denne oppgaven beskrevet biologi om hørselsystemet til atlantisk laks, en gjennomgang av lydutbredelse og fysiske egenskaper tilknyttet lyd i vann, samt sett på tidligere forskning og det tekniske tilknyttet lydopptak og komponenter. For å utføre disse målingene ble det prosjektert og produsert en målerigg med hydrofon. Denne ble brukt i forsøk på fisk tilknyttet NTNU SeaLab og SINTEF Ocean på Brattørkaia. Det ble tatt lydopptak av liten og stor fisk på henholdsvis ca. 20 gram og ca. 1,7 kg. Underveis i opptaket ble det utført et eksternt stress på fisken, for å se om dette påvirket det helhetlige lyd miljøet. Ved analyse av lydopptakene ble det opprettet spektrogrammer for å undersøke frekvenser og signaturer i opptaket. Ved nærmere gjennomgang ved å se på opptakene over kortere tidsperioder ble det oppdaget en "knitrelyd" og signaturen for denne ble undersøkt. Dette ble del av hovedfunnene og blir tatt opp først i diskusjonen, før måleriggen og forsøkene diskuteres. På denne måten ble de mest signifikante resultatene diskutert først. I denne oppgaven konkluderes det med funn av knitrelyd som antagelig er tilsvarende som for funn i tidligere forskning, og den antas å komme av at laksen slipper luft fra svømmeblæren og ut gjennom munnåpningen. Ved å telle signaturer over tid etter stress ble det vist høyest prevalens av knitresignatur i opptak mellom 20-30 minutter etter stressor. Datagrunnlaget er derimot ikke stort nok til å avgjøre om knitrelyden korrelerer med stress.

Abstract

The project's task was to consider which opportunities a passive acoustic monitoring of farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*) could offer. In order to address this, this thesis describes the biology of the Atlantic salmon's hearing system, a review of sound propagation and the physical abilities associated with sound in water. Additionally, this thesis investigates previous research and the technical aspects related to sound recordings and components. In order to perform these measurements, a measuring rig with a hydrophone was designed and produced. This rig was used during experiments on fish at NTNU SeaLab and SINTEF Ocean at Brattørkaia. Sound recordings were recorded of both small and large fish which were approximately 20 grams and 1,7 kg. During the recording, external stress was applied to the fish in order to observe whether this affected the overall sound environment. By analyzing the sound recordings, spectrograms were established to investigate frequencies and signatures within the recordings. Upon further investigation of the recordings over shorter time periods, a "ticking sound" was discovered, and the signature for this sound was analyzed. This became part of the main discoveries and is discussed first in the discussion section, followed by a discussion of the measuring rig and experiments. Through this organizing, the most significant results were discussed first. This thesis concludes with the discovery of a ticking sound which presumably is similar to those found in previous research. Additionally, this sound is also believed to be caused by the salmon releasing air from the swim bladder out through the mouth. By counting signatures over time after stress, the highest prevalence of ticking signatures was observed in recordings 20-30 minutes after the stressor. However, the data set is not large enough to determine whether the ticking sound correlates with stress or not.

Innhold

Figurer	vi
Tabeller	vii
1 Innledning	2
2 Teori	3
2.1 Biologisk perspektiv	3
2.1.1 Fysiologi til laks for å høre lyd	3
2.1.2 Fysiologi til fisk for å lage lyd	5
2.1.3 Laksens kommunikasjon	6
2.1.4 Tidligere forskning	6
2.2 Akustikk	7
2.2.1 Lyd i havet	7
2.2.2 Lyd i karmiljø	8
2.2.3 Forplantning av lyd	8
2.2.4 Forholdet mellom trykk, intensitet og desibel	11
2.3 Lydopptak	12
2.3.1 Sampling	13
2.3.2 Frekvensanalyse	13
2.3.3 Støy	15
2.3.4 Piezoelektrisk opptak	16
2.4 Teknisk gjennomgang av komponenter i akustisk måleutstyr	16
2.4.1 Hydrofon	16
2.4.2 Op-amp	17
2.4.3 ADC	17
2.4.4 Raspberry Pi	17
2.5 Oppsummering, hypotese og hovedmål	17
3 Material og metode	19
3.1 Produktutvikling av måleriggene	19

3.2	Målerigg 1 - Raspberry Pi	21
3.3	Målerigg 2 - Diktafon	22
3.4	Forsøk - SeaLab	23
3.5	Forsøk - SINTEF	25
3.6	Analyse	28
3.6.1	Analyseverktøyene Audacity og Python	28
3.6.2	Databehandling	28
3.6.3	Fouriertransformasjon	28
3.6.4	Power spectral density plot	29
3.6.5	Spektrogram	29
3.6.6	Særundersøkelse av knitrelyd	29
4	Resultater	30
4.1	Oversikt over opptak og datagrunnlag	30
4.1.1	Opptak diktafon	31
4.2	Opptak - SeaLab	32
4.2.1	Opptak - SeaLab - uten fisk	32
4.2.2	Opptak - SeaLab - med fisk	33
4.3	Opptak - SINTEF	34
4.3.1	Opptak - SINTEF - uten fisk	34
4.3.2	Opptak - SINTEF - med fisk	34
4.4	Lydintensitetsanalyse	35
4.5	Funn av knitrelyd	37
5	Diskusjon	41
5.1	Knitrelyd	41
5.1.1	Annotering og kvantifisering av lyder	42
5.2	PSD-analyse	42
5.3	Målerigg	43
5.4	Forsøkene	44
5.4.1	SeaLab	44
5.4.2	SINTEF	44

6	Konklusjon	46
7	Forskning, innovasjon og utvikling	47
7.1	Overvåkning av lydmiljø	47
7.2	Passende driftsmiljø for lydovervåkning	47
7.3	Maskinlæringsproblematikk og kommersialisering	48
	Referanser	49
A	Vedlegg	54
B	Vedlegg	58

Figurer

1	Venstre indre øre hos laks	4
2	Lydproduksjon hos fysisstom fisk basert på luft og adferd	5
3	”Plask”, ”knitrelyd”, ”stønn” og ”gurgle” vist i spektrogram, lydkilde ukjent salmonid.	7
4	Sirkulær lydutbredelse	9
5	Sirkulær lydutbredelse intensiteter	10
6	Sylindrisk lydutbredelse	10
7	Rekonstruert signal etter sampling	13
8	Grafisk framstilling av Fouriertransformasjon	14
9	Fast Fouriertransformasjon, power spectral density og spectrogram	15
10	Målerigg 1, oversikt over komponentene	21
11	Oversikt over komponentene i målerigg 2	22
12	Lab-oppsett for forsøk på SeaLab	24
13	Notatark brukt ved forsøk på SeaLab. Hvilefase i blått, stressfase i grønt og lang- tids/hvile i orange.	25
14	Karene på SINTEF	26
15	Notatark brukt ved forsøk hos SINTEF. Langtids/hvile i blått, stressfase i grønt og hvile i orange.	27
16	Oversikt over kar uten fisk SINTEF, med plassering av hydrofonene i karet.	27
17	Spektrogram over første opptak gjort av målerigg 2 på SeaLab.	31

18	Spektrogram fra opptak T1, lite kar uten fisk.	32
19	Spektrogram fra opptak T4, lite kar uten fisk	32
20	Spektrogram fra opptak T2, lite kar med fisk.	33
21	Spektrogram fra opptak T3, lite kar med fisk.	33
22	Spektrogram fra opptak T7, stort kar uten fisk.	34
23	Spektrogram fra opptak T5, stort kar med fisk.	34
24	Spektrogram fra opptak T6, stort kar med fisk.	35
25	PSD plott av alle de oppdelte fem min opptakene fra lite kar uten fisk i T1 og T4.	35
26	PSD plott over alle opptak i T2 og T3 fra lite kar med fisk.	36
27	PSD plott for stort kar uten fisk.	36
28	PSD plott over stort kar med fisk.	37
29	"Plask" og "knitrelyd" i spektrogram, fra opptak i lite kar med fisk.	37
30	Seks tilfeldig utvalgte knitresignaturer fra T3. X-aksen for samtlige utsnitt er satt til omtrent ett sekund.	38
31	Grafisk framstilling av oksygeninnhold [mg/l] og antall klikk hørt i min [n/min over tid i lite kar	38
32	Grafisk framstilling av oksygeninnhold [mg/l] og antall klikk hørt i min [n/min] over tid i stort kar	39
33	Undersøkelse av boblefrekvens i bolle med taffel.	40

Tabeller

1	Komponentliste for målerigg 1	21
2	HY-03 - produktspesifikasjoner	22
3	Komponentliste for målerigg med diktafon	23
4	HY-01 - produktspesifikasjoner	23
5	Oversikt over alle opptakene med forskjellige navn og egenskaper	30
6	Resultatene viser knitresignaturer telt per time per fisk, med stresskilde inkludert.	39

Terminologi

Antropogene lyder - Lyder som er menneskeskapt.

Cutoff - I lydopptaksteori defineres cutoff som den høyeste lyden et system kan måle. Om en lyd øker i styrke vil ikke systemet kunne fange den opp.

Desibel - Enhet for lydnivå, og er definert slik at en endring på én desibel (dB) skal være nok til å høre endring for mennesket (Sutton, 2021). dB følger en logaritmisk skala det betyr at for hver 10 dB så dobles lydmengden. Det betyr også at en kan ha negative dB verdier.

Elektromagnetisk støy - EMS, strøm som går igjennom en krets vil danne et elektromagnetisk felt rundt seg. Om dette elektromagnetiske feltet påvirker en annen krets kan dette kalles EMS.

HY-01 - Hydrofon fra H-industries på Island, flat bidireksjonell piezokrystall .

HY-03 - Hydrofon fra H-industries på Island, sylindrisk omnidireksjonell piezokrystall .

HY-11 - Op-amp fra H-industries på Island, en komponent som øker spenningen i en krets.

Klikk - en rask pulserende lyd, kjennetegnes som en eksplosiv lyd, altså at den er høy fra begynnelsen av.

Knitrelyd/knitresignatur - Defineres i denne oppgaven som flere individuelle klikk satt sammen.

Lydsignatur - En aktivitet eller hendelse vil ha en gitt lydsignatur. I et spektrogram vil en kunne gjenkjenne hendelser basert på likhet i bildet.

Måleinstrument - Et verktøy som har en sensor og gir informasjon, i denne oppgaven hovedsakelig hydrofon.

Målerigg - Beskriver det generelle systemet med alle komponenter for å kunne ta lydopptak.

Otophysan fisk - En egen underklasse av teleost fisk. Otophysan fisk kjennetegnes ved at de har ett bein som går fra svømmeblære til det indre øret. Dette gjør at otophysan fisk har svært god hørsel (Chen, S. og R., 2013).

RPI - Raspberry Pi er en liten ettkortsdatamaskin.

SCP protokoll - *Secure Copy Protocol*, er en protokoll innenfor SSH som muliggjør kopiering mellom datamaskiner.

SSH protokoll - *Secure Shell Protocol*, er en protokoll som tillater kommunikasjon mellom to datamaskiner.

STFT - *Short Time Fourier Transformation*, er en algoritme for å utføre Fouriertransformasjonen.

Støygulv - Støygulv blir definert som lydene i et system som alltid er tilstede, en kontinuerlig lyd. Et eksempel på støygulv er lyden som kommer fra motorer i et fly.

Teleost fisk - Ektebeinsfisk eller egentlig beinfisker en vitenskapelig fordeling av fisk. De aller fleste fisker i oppdrett er teleost fisker.

1 Innledning

I fiskehelse rapporten for 2023 (Sommerset mfl., 2024) blir det presentert at det døde 62,8 millioner laks i sjøvannsfasen, som tilsvarer 16,7% dødelighet. Dette er de høyeste dødelighetstallene for laks i sjøfase både i antall og prosent registrert. For å redusere denne dødeligheten er det nødvendig med et kunnskapsløft innenfor forståelse for hvordan laksen har det. Det er derfor nødvendig å lytte mer til laksen.

For å vurdere og dokumentere fiskvelferden benyttes det i dag ulike velferdsindikatorer. Historisk sett har røktere vært på merdkanten for å være oppdrettersens øyne og ører. I ett moderne oppdrettsmiljø hvor røkteren stadig flyttes lengre og lengre fra laksen, gjennom en mer høyteknologisk føring og overvåkning, er det nødvendig å lage hjelpemidler som kan hjelpe røkteren med å sikre at laksen får best mulig betingelser. I de siste årene har det derfor vært en stor oppslutning rundt kamerateknologi for å vurdere velferden.

Fiskehelse rapporten (Sommerset mfl., 2024) viser til flere utfordringer knyttet til bruk av kamerateknologi i dagens akvakultur: kameraoppløsning, lysforhold, og partikler i vann. Ifølge en spørreundersøkelse gjort av veterinærinstituttet til fiskehelsepersonell var det kun 3% av de spurte som svarte at de benyttet kamerateknologi i stor grad som en del av velferdsåringen. Rapporten viser til muligheten med å kombinere kamerateknologi med andre typer sensorer, som sammen med maskinlæring kan generere nye velferdsindikatorer.

En mulig sensor som kan brukes sammen med kamerateknologi er hydrofonen, en mikrofon laget for å ta opp lyder under vann. Ved å undersøke hvilke muligheter benyttelse av hydrofon gir kan oppdrettere få verdifull innsikt i hvordan laksens lyd miljø er. Dette kan gi en bedre forståelse av akutte stressorer, som kan gi en større bredde av informasjon enn kameraovervåkning alene. Ved å analysere lydopptakene fra hydrofonene kan det bli mulig å identifisere spesifikke lyd mønstre som indikerer velvære eller stress.

Hensikten med dette arbeidet er å utforske og besvare problemstillingen: *Hvilke muligheter gir passiv akustisk overvåkning av oppdrettslaks?* Oppgaven begynner med å etablere det nødvendige teoretiske grunnlaget som er essensielt for å forstå og håndtere utfordringene knyttet til problemstillingen. Deretter presenteres selve utførelsen av prosjektet, hvor det i kronologisk rekkefølge blir vist fremgangsmåte og metode som er brukt. Til slutt presenteres og diskuteres resultatene som er oppnådd.

2 Teori

For å utføre nøyaktige målinger av lyd under vann, er det essensielt å ha et solid teoretisk fundament. Innledningsvis blir det undersøkt de etiske og juridiske rammene som styrer hvordan oppdretter skal behandle laks i forhold til lyd. Videre undersøkes den fysiologiske siden av hvordan laksen oppfatter og produserer lyd. I tillegg til den biologiske vinklingen, blir det gjort rede for akustikkens grunnprinsipper slik de opptrer i et vannmiljø. Dette inkluderer en gjennomgang av lydens natur og dens oppførsel under vann, som er kritisk for å forstå hvordan lyd påvirker og blir påvirket av marine organismer. Avslutningsvis blir det gått inn på det tekniske om lydopptaks-teori. Dette inkluderer en detaljert gjennomgang av de tekniske aspektene ved lydopptaksutstyr og komponentenes egenskaper.

2.1 Biologisk perspektiv

Det meste av norsk fiskeoppdrett av atlantisk laks (*Salmo salar*) er i dag en intensiv produksjonsform (Misund, 2023). Det vil si at mennesket kontrollerer hele livssyklusen til laksen fra rogn til stamfisk. Næringen har i Norge siden begynnelsen på 70-tallet utviklet seg til å bli svært høyteknologisk. I takt med utviklingen har kravene og regelverk for å drive med oppdrett blitt strengere. I dag reguleres oppdrettsnæringen etter flere lover og forskrifter, og de mest sentrale er akvakulturloven, dyrevelferdsloven, matloven, forurensingsloven, og andre forskrifter.

Med tanke på lydmiljø for oppdrettslaks er det flere lover og forskrifter som dekker lydmiljø hos laks. I dyrevelferdsloven (Dyrevelferdsloven, 2009, §3) står det at dyr har en egenverdi og at de skal behandles godt og beskyttes mot fare for unødvendig påkjenninger og belastninger. Det vil si at oppdrettsfisk skal beskyttes mot påkjenninger som påvirker velferden. Dyrevelferdsloven mener også at fiskens levemiljø skal være tilpasset artstypiske og individuelle behov, fremme god helse og bidra til at dyr har en god velferd med tilstrekkelig hvile (Dyrevelferdsloven, 2009, §23). Når det kommer til generelle vilkår for hold av dyr, skal dyr kun holdes om dyret kan tilpasse seg holdet på en dyrevelferdsmessig måte (Dyrevelferdsloven, 2009, §22). Med utgangspunkt i disse paragrafene foreligger det et krav om å skåne laks fra unødig lidelse. For å forstå hvordan laksen blir påvirket av lyd er det viktig å forstå fiskens biologi.

2.1.1 Fysiologi til laks for å høre lyd

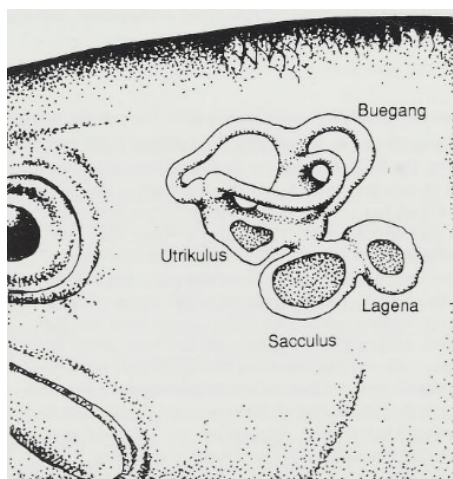
Fisk har gjennom evolusjonære prosesser over millioner av år utviklet et hørselsystem for å oppfatte lyder og vibrasjoner. Hørselsystemet har egenskapene til å oppdage trusler, byttedyr og for å orientere seg. Det er store forskjeller imellom de ulike artene. Hørselsegenskapene strekker seg fra fisk som mangler svømmeblære og dermed bare hører partikkelbevegelsen, til mer avanserte hørselsspesialister som gullfisk (*Carassius auratus*) som i tillegg hører lydtrykk (Mayer, Fontaine og Vindas, 2024, s.100).

Laksefisk er en hørende generalist (Mayer, Fontaine og Vindas, 2024, s.100), som i likhet med alle teleost fisk har et hørselsorgan som gjør at fisken både kan høre og endre adferd som følge av lyd. Fiskens oppfattelse av lyd kan skille mellom partikkelbevegelsesdeteksjon og trykkdeteksjon.

Det grunnleggende hørselssystemet til teleost fisk består av det indre øret. Det indre øret er delt inn i tre halvsirkulære kanaler (det fremre, horisontale og bakre) og otolittendeorganer (saccule,

lagna og utricle) som inneholder tette sensoriske strukturer som kalles otolitter (ørestein). Figur 1 viser de forskjellige organene i det indre øret. Oppgaven til halvsirkulærsystemet av kanaler er likevektorientering i det tredimensjonale rommet, mens otolittsystemet benyttes til hørsel og deteksjon av lineær akselerasjon (Mayer, Fontaine og Vindas, 2024, s.99).

Ved lyd i vann vil fisken vibrere på samme måte som vannpartiklene. Otolittene vil svinge med en svakere fase og amplitude enn resten av kroppen til fisken, på grunn av at otolitten har en tre ganger større massetetthet enn fiskekjøtt (Mayer, Fontaine og Vindas, 2024, s.96). Otolittstrukturene fungerer derfor som ett differensialakselerometer hvor otolittene vil bevege seg i en annen amplitude og fase enn sansecellene, og dette vil skape en lydoppfattelse hos fisken (Døving og Reimers, 1992, s.96; Mayer, Fontaine og Vindas, 2024).



Figur 1: Venstre indre øre hos laks med oversikt over de forskjellige otolittorganene; saccule, lagena og utricle, hentet fra (Døving og Reimers, 1992)

Hørselspecialister slik som atlantehavs sild (*Clupea harengus*), kan motta lydtrykk og konvertere det om til partikkelbevegelse, som igjen det indre øret kan fange opp. For å gjøre dette benyttes den gassfylte svømmeblæren som fanger opp vibrasjonene (Døving og Reimers, 1992). Siden luft er lettere å komprimere enn vann vil vibrasjonene som oppstår på svømmeblæren under vann ha en forsterket vibrasjon i forhold til vannet rundt fisken (Døving og Reimers, 1992). Svømmeblæren kan være plassert slik at den befinner seg i nærheten av det indre øret, og/eller direkte koblet opp mot det indre øret gjennom f.eks gassfylte kanaler slik som hos sildefisk (Sand og Hawkins, 1973). Det finnes også andre gassfylte vesikler som ligger i nærheten av det indre øret som kan fungere på samme måte. Otophysan fisk (en spesifikk gruppe av fisk) benytter en mekanisk kobling mellom svømmeblære og det indre øret med hjelp av små bein til å sende signal (weberian-apparat) (Mayer, Fontaine og Vindas, 2024, s.100). Fisk med denne ekstra hørestrukturen vil gjennom å ha svømmeblæren tett tilkoblet det indre øret og/eller weberian-apparatet, dermed ha en større hørselsfølsomhet - karper og ål er eksempler på slike arter.

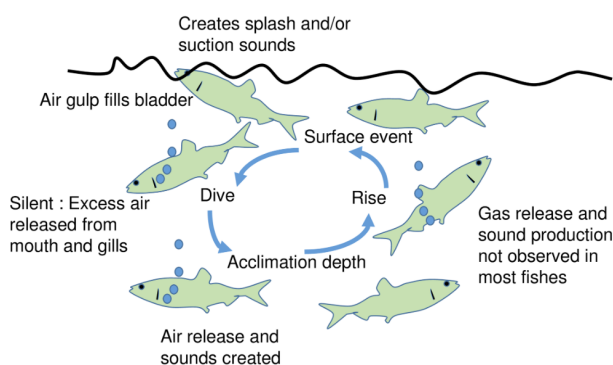
Atlantisk laks er bare følsom for partikkelbevegelsen og ikke lydtrykk, dette er trolig på grunn av at svømmeblærens plassering er for langt unna øret (Hawkins og Johnstone, 1978). Dette gjør det vanskelig for overføring av signaler mellom svømmeblære og det indre hørselsystemet (Mayer, Fontaine og Vindas, 2024, s.100). Derfor er atlantisk laks kategorisert til å være en hørende generalist, som har et hørselsområde fra 10Hz til 400Hz (Popper og Hawkins, 2019), men det mest sensitive området ligger rundt 160Hz til 200Hz (Hawkins og Johnstone, 1978; Harding mfl., 2016).

2.1.2 Fysiologi til fisk for å lage lyd

Lyd fra fisk kan deles inn i aktive og ufrivillige. Aktiv lyd kan defineres som kommuniserende lyder fisken lager, og det er gjort ulike studier som har vist at fisk lager lyd. Den kommuniserer under ulike situasjoner som gyting, spising, agonistisk adferd, og nødsituasjoner (Amorim og Hawkins, 2000a; Amorim og Hawkins, 2000b; Amorim, Stratoudakis og Hawkins, 2004; Tricas og Boyle, 2014). Ufrivillige lyder kommer av aktivitet som fisken gjør, men som ikke har til hensikt å aktivt kommunisere.

De tre hovedlydkildene for fisk generelt er: svømmeblære, stridulasjon og hydrodynamiske lyder (Sound in the Sea, 2024; Bass og Ladich, 2008). Svømmeblæren kan lage lyd ved å fungere som en tromme. Soniske muskler (raske muskler) får svømmeblæren til å komprimere og utvide seg så raskt at fisken lager en trommelyd. Disse lydene ligger i et frekvensområde fra 45Hz til 1000 Hz (Sound in the Sea, 2024). Torsk er en art som lager lyd ved hjelp av denne mekanismen, det er også vist at prevalensen for lyd øker ved aggressivitet og stress (Brawn, 1969). Stridulasjon (stridulering) er en skarp skingrende lyd med høyt tonefall, som skapes ved å gnisse harde skjelettdeler, eller tenner mot hverandre (Institutt for biovitenskap UIO, 2024). Hos fisk oppstår denne lyden ofte når fisken spiser og tennene gnis mot hverandre (Amorim og Hawkins, 2000a). Lyder som kommer av stridulering kan også lages når fisk føler seg truet, eller for å markere et territorielt område (Sound in the Sea, 2024). Slike lyder kan derfor være både frivillige og ufrivillig. Hydrodynamiske lyder fra fisk dannes når fisk endrer retning og hastighet. Disse lydene kommer som et resultat av selve bevegelsene og aktiviteten til fisken i vannet. Disse lydene er svært lavfrekvente med en frekvens under 20 Hz (Sound in the Sea, 2024).

Hos atlantisk laks har det blitt dokumentert at den kan lage flere ulike lyder (Rountree, Juanes og Bolgan, 2018). Lydene som ble påvist i studien "*Air Movement Sound Production by Alewife, White Sucker, and Four Salmonid Fishes Suggests the Phenomenon Is Widespread Among Freshwater Fishes*" var lyder beskrevet som gurgle- og stønnylyder, og raske repetitive tikkelyder. Luftbevegelseslyder er beskrevet som lyder produsert av luftpassasje og pneumatiske lyder, som trolig stammer fra indre luftbevegelse og ytre luftutslipp (Rountree, Juanes og Bolgan, 2018). Også i artikler for andre typer laksefisk (arktisk røye *Salvelinus alpinus*, ketalaks *Oncorhynchus keta*, og pukkellaks *Oncorhynchus gorbuscha*) kommer luftbevegelseslyder trolig fra de luftbærende kanalene og lukkemusklene tilknyttet svømmeblæren eller som følge av luftsnapping (Bolgan mfl., 2016 og i Kuznetsov, 2009).



Figur 2: Lydproduksjon hos fysostom fisk basert på luft og adferd som består av en stigning til overflaten, plasking og snapping av luft, videre dykk til dybden hvor overflødig luft fra munn og gjeller slippes, for å gjenoppta normal adferd på en akklimatiseringdybde før syklusen gjentas (Rountree, Juanes og Bolgan, 2018). Bildet er et skjermbilde fra (Rountree, Juanes og Bolgan, 2018, s. 27)

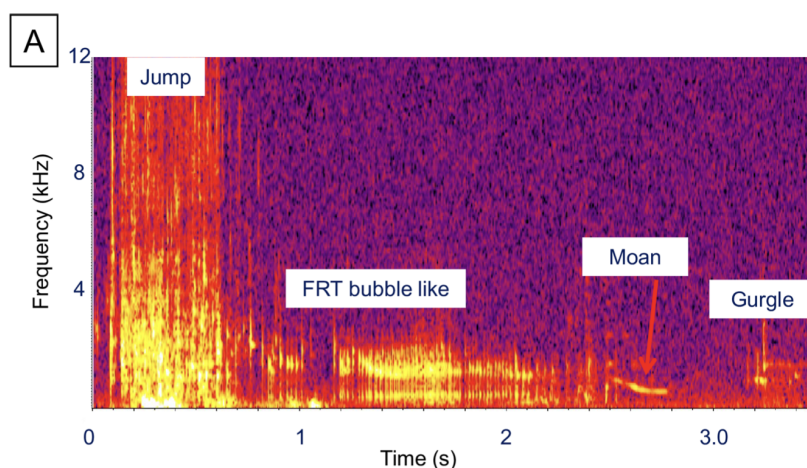
2.1.3 Laksens kommunikasjon

I studien ”*Vibrational communication during spawning behavior in the him salmon (landlocked red salmon, *Oncorhynchus nerka*)*” omtalt i (Satou mfl., 1991), ble kroppsvibrasjoner og elektromyografisk aktivitet i musklene til rød laks (*Oncorhynchus nerka*) målt. Disse vibrasjonene ble overført gjennom vannet til partneren, som demonstrerer en sterk indikasjon på kommunikasjon hos laks i frekvensområdet 0-40 Hz. Dette frekvensområdet er interessant da lavfrekvent lyd kan forplante seg over lange avstander i vann, som indikerer at det skulle være mulig å måle lyd fra laks i dette spekteret under naturlige forhold. I artikkelen ”*Does the Artic Charr *Salvelinus alpinus* produce sounds in a captive setting?*” (Bolgan mfl., 2016) blir det derimot konkludert, under gyting hos røye, at lydbevegelseslyder ikke er sentral i kommunikasjon. Dette kommer av at det ikke ble oppdaget sammenheng mellom lydene og oppførselen til fiskene. Rapporten inkluderer også begrensningen om at det kun er undersøkt oppdrettsrøye og at tidligere forskning i stor grad baserer seg på villfisk.

2.1.4 Tidligere forskning

Forskningsprosjektet *Owitoools*, ledet av SINTEF la frem hypotesen: ”Laksen påvirker trolig lydbildet ved å, a) gi fra seg lyd, b) dempe/absorbere omliggende støy.” (Schroder mfl., 2022). I oppsamlingsrapporten beskrives det også lyder som defineres som ”knitrellyder”. Dette er en lyd som varer i 0,01 sekund, og befinner seg i frekvensområdet 700-8000 Hz (Schroder mfl., 2022, s.43). I artikkelen ”*Bruk av lydbilde for velferdsovervåkning ved operasjoner i et oppdrettsanlegg*” (Volent mfl., 2022) fra det samme prosjektet, ble knitrellyden foreslått til å være en stressrespons. Lyden avtok 1 time og 34 minutter etter nota ble sluppet ned. Rapporten går ikke inn på om dette er en lyd som kommer fra laksen, eller om det er en lyd laksen lager, for eksempel ved snapping av luft eller andre fysiologiske endringer. I artikkelen ”*Acoustic environment of aquaculture net-pens varies with feeding status of Atlantic salmon (*Salmo salar*)*” (Rosten, Mathiassen og Volent, 2023), fant de at lydmiljøet i en oppdrettsmerd var forskjellig under og etter føring av fisken. På bakgrunn av sine resultater konkluderer de med at atlantisk oppdrettslaks påvirker/endrer det akustiske miljøet, og at endringer kan detekteres hvor variasjonen i lyd speiler ”matsøking-statusen” til fisken.

Det er også utført studentoppgaver innenfor tematikken, og i bacheloroppgaven ”*Laks og lyd - en kartlegging av lydmiljø for atlantisk laks (*Salmo salar*)*” (Skogstad, 2019) blir det vist at oppdrettslaksen ofte har redusert hørsel. Det ble vist ved å se på 17 stykk dødfisk, hvor over 50% av fiskene hadde deformiteter på otolittene. Bacheloroppgaven viser og at lydmiljøet i oppdrettsmerder blir påvirket av forskjellige arbeidsoperasjoner, og at mye av støyen fra forskjellige hendelser ligger i laksens hørselsområde. I masteroppgaven ”*Passiv akustiske statusindikatorer - en mulighetsstudie*” (Daush, 2022), blir støykilder i oppdrettsmiljøet undersøkt. Hovedfunnene fra disse rapportene er at det finnes mange karakteristiske lyder i et oppdrettsanlegg som er identifiserbare som for eksempel føring og båtstøy. I Daush sin masteroppgave blir det vist at det er mulig å bruke en maskinlæringsmodell for å skille mellom forskjellige støykilder, med føringslyd som eksempel (Daush, 2022). I Skogstad sin bacheloroppgave vises det også tydelig at laks utsettes for irregulært støy iløpet av en vanlig driftsperiode, og det etterspørres mer forskning for å forstå forholdet mellom akustisk støy og påvirkningen det har på laksen (Skogstad, 2019).



Figur 3: "Plask", "knitrelyd", "stønn" og "gurgle" vist i spektrogram, lydkilde ukjent salmonid, figur hentet fra (Rountree, Juanes og Bolgan, 2018, s.23)

En av de vanligste grunnene til å utføre akustiske analyser er artsbestemmelse. Dette har også blitt gjort for atlantisk laks. I prosjektet "*Air movement sound production by alewife, white sucker, and four salmonid fishes suggests the phenomenon is widespread among freshwater fishes*" (Rountree, Juanes og Bolgan, 2018), ble det benyttet hydrofon til å undersøke forskjellige lydfenomen fra de forskjellige artene. I prosjektet dokumenterte de flere lydsignaturer som er tilstede for fisk i Salmo-familien. Det ble blant annet observert knitrelyder med rask frekvens, som ble kalt "*very fast repetitive tick*" (VFRT). Denne signaturen var mest prevalent for brunørret (*Salmo trutta*). Lydklippet vist i figur 3 er av en uidentifisert art, men tilegnes landfast atlantisk laks (Rountree, Juanes og Bolgan, 2018, s.22-25). Lignende funn på røye ble også vist i (Bolgan mfl., 2016).

2.2 Akustikk

Akustikk er vitenskapen om lyd, og brukes ofte om lydforholdene i rom (Gjestland, 2021). Lyd stammer fra en lydkilde, som er et objekt som vibrer i et elastisk medium slik som vann eller luft (Døving og Reimers, 1992, s.94). Lyd beveger seg med forskjellige hastigheter basert på hva slags medie det befinner seg i. Lyd er sanseintrykk, og kan beskrives som "*mekaniske svingninger eller periodiske trykkvariasjoner avhengig av hvilket medium lyden opptrer i.*" (Gjestland, 2023) Svingningene eller trykkvariasjonene brer seg utover med en hastighet på 340 m/s i luft og 1500 m/s i vann (Gjestland, 2023).

Akustisk overvåking av biologisk mangfold er mulig å benytte både på land og i vann, og kan være med på å overvåke naturen mer effektivt. Ved å lytte til omgivelsene kan man over tid dokumentere endringer i den økologiske tilstanden (Rosten, 2024).

2.2.1 Lyd i havet

Det har vært en betydelig økning av bakgrunnsstøy i havet som følge av menneskelig aktivitet. Dette skyldes blant annet økt skipsfart, seismikk og ulike detonasjoner (Kvadsheim mfl., 2023). Et økt støynivå kan være til hinder for den naturlige akustiske kommunikasjonen mellom dyrene, gjøre dem desorientert og svekke evnen til å finne mat. I akustikken defineres støy som en uønsket

lyd, men dette er et subjektivt begrep. Ett individ kan oppfatte en lyd som støy, mens ett annet individ oppfatter det som en behagelig lyd (Gjestland, 2022).

Et akvatisk miljø er sjelden stille og innehar ofte mange ulike lyder skapt av omgivelsene. Typiske naturlige fysiske lyder genereres av vind, bølger, nedbør, jordskjelv og biologisk lyd fra ulike marine organismer (Popper og Hawkins, 2019). Med tiden er det også blitt en kraftig økning støy i havet som følge av menneskers adferd og kommersielle aktiviteter som påfører lyd til havmiljøet. De antropogene lydene, som er de menneskeskapte, kommer fra ulike kilder og er enten impulsive eller kontinuerlige. Kontinuerlige lyder kan komme av skipsfart, vindturbiner eller boring på havbunnen. De impulsive lydene er ofte korte i varighet, men med høy amplitude og kan komme av ulike seismiske undersøkelser ved bruk av luftpistoler og undervannsekspløsjoner (Mayer, Fontaine og Vindas, 2024, s.102). Nåværende undersøkelser og forskning har funnet at fisk reagerer i liten grad på militære sonarer, da lydene hovedsakelig innehar frekvenser som er utenfor fiskens hørsel. Undervannsdetonasjoner derimot kan medføre skader på både fisk og pattedyr over relativt lange avstander (Kvadsheim mfl., 2023). Hvor store skader, adferdsmessige påvirkninger og hvor stort påvirkningsområde eksplosjonene påvirker avhenger av størrelsen på ladningene.

Som følge av økt aktivitet tilknyttet leting etter petroleum ved hjelp av seismikk i nærhet til havmerder, er det blitt gjennomført en litteraturstudie for å se på effekten dette har på laks. Denne er gjennomført av Salmar Ocean for å undersøke mulige effekter seismiske undersøkelser vil ha på laks i havmerder (Knudsen og Gaasø, 2021). I studien sier de luftkanonskudd kan utløse stressreaksjoner hos laks i merd. En stressreaksjon kan være forsinket og medføre død, sykdomsutbrudd og/eller redusert vekst. Ved gradvis økning av lydintensitet (ramp-up), ser laksen ut til å raskt tilvenne seg kraftig lydeksponering, og avstand fra lydkilden er en viktig faktor. Det er stor sannsynlighet for at det forekommer adferdsendringer innenfor noen titalls meter fra en seismisk kilde, moderat sannsynlighet innenfor noen hundre meter, og liten sannsynlighet dersom avstanden blir mer enn noen tusen meter (Knudsen og Gaasø, 2021). Studien anbefaler derfor at havmerder der det skal utføres seismikkskyting i nærheten utrustes med blant annet hydrofoner, for å overvåke fiskens adferd tilknyttet seismiske undersøkelser og annen påvirkning av støy.

2.2.2 Lyd i karmiljø

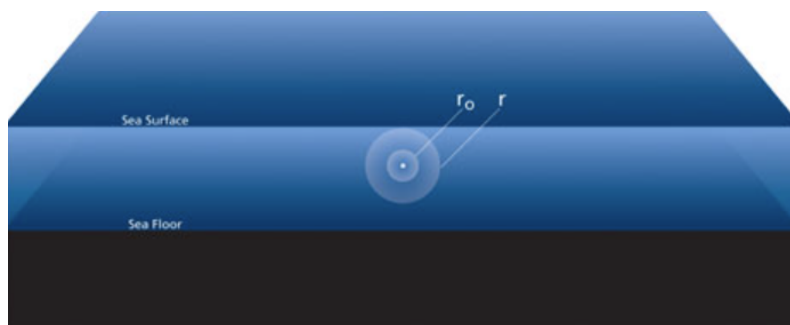
Et karmiljø vil aldri være helt stille, da det ofte befinner seg inne i et rom med ulike mekaniske anretninger som generer lyd og vibrasjon. De ulike lydkildene har forskjellige frekvenser og karakteristikk, som gjør at de kan klassifiseres og finnes igjen i lydopptak. Støykilder kan skiller i kontinuerlig støy og akutt støy. Konstant støy kan blant annet være sildrelyden i utløpet til vannet, pumpestøy, lyd fra oksygenering og viftestøy. Akutt støy kan eksempelvis være lyder fra røktning og nødoksygenering. Det vil også være lyder som dukker opp mer tilfeldig i lydopptak, men ikke nødvendigvis er høye i virkeligheten, disse lydene kan lages av fisk som kommer i kontakt med sensoren, svømmer i veggen på karet (dunkelyd), eller bryter overflaten. Luftbobler har også en lyd-karakteristikk og kan gjenkjennes i lydopptak.

2.2.3 Forplantning av lyd

I akustisk terminologi er det viktig å skille mellom lyd og vibrasjon. Vibrasjon refererer til direkte bevegelse av lydkilden. Lyden beveger seg som en bølge gjennom et medie, men til tross for at

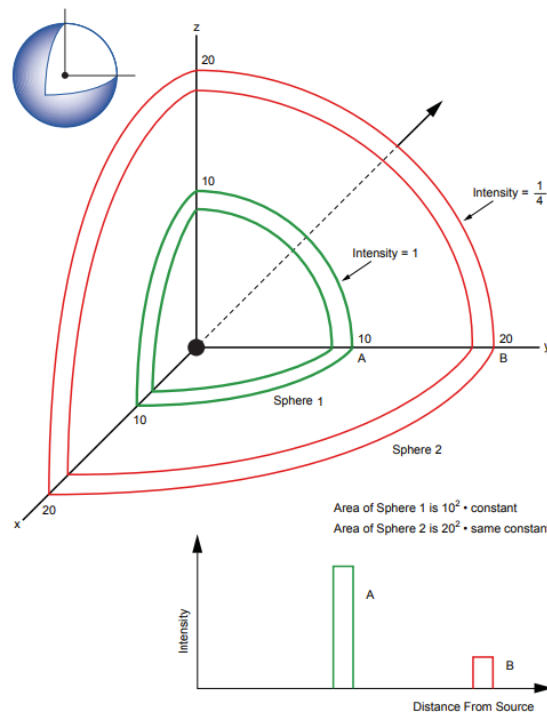
den beveger seg som en bølge, beveger ikke de individuelle partiklene i mediet seg sammen med bølgen. De vibrerer fram og tilbake om likevektsposisjonen partikkelen har (University of Rhode Island, 2021d). Med lyd er det slik at om det ikke er et medie som kan vibrere eller beveges, som i vakuum eller i verdensrommet, kan det ikke bære lyd. Dette vil si at det er vibrasjonene som brer seg utover, og ikke selve mediet vibrasjonen har oppstått i (Bradley og Stern, 2008). Ved en igangsetting av vibrasjoner ”dytter” forstyrrelsen videre på mediet som ligger rundt. Dette foregår til vibrasjonen er blitt betydelig svekket og spredt ut slik at det ikke lengre er mulig å skille den fra bakgrunnstøyen (Bradley og Stern, 2008). Lydintensiteten, dB, er en relativ enhet og ikke absolutt. Lyden som oppfattes avhenger av avstanden mottakeren av lyden er fra lydkilden.

Sylindrisk og sfærisk spredning er to enkle tilnærminger som er gjort for å kunne beskrive hvordan lydintensiteten avtar når lyden beveger seg vekk fra kilden (University of Rhode Island, 2021a). Når lydbølgene beveger seg uniformt utover i alle retninger fra lydkilden beveger de seg sfærisk som en kule. En slik situasjon forekommer som regel for lydkilder som er på en middels dybde i vannet (University of Rhode Island, 2021a). Lydnivået er konstant på den sfæriske overflaten som omgir lydkilden, men lydnivåene avtar raskt når lydbølgene brer seg fra kulen med radius ” r_0 ” og utover til en større radius ” r ” (University of Rhode Island, 2021a), som illustreres i figur 4.



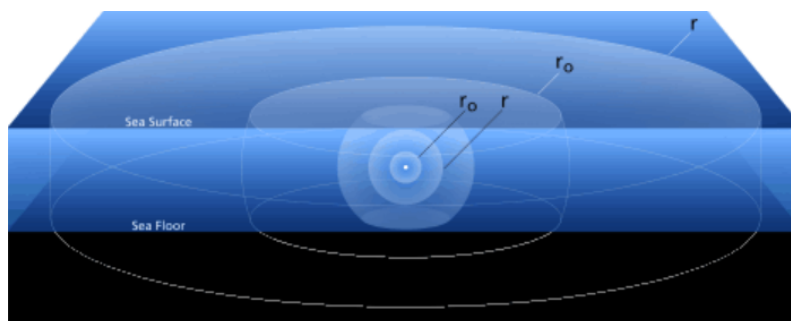
Figur 4: Den hvite prikken viser lydkilden lyden kommer fra i en middels dybde i vannet, og lydbølgene beveger seg likt ut i alle retninger. Radiene vises i bildet som ” r_0 ” og ” r ”. Bildet er hentet fra (University of Rhode Island, 2021a).

Intensiteten for lyd med sfærisk spredning avtar med prinsippet for bevaring av energi, og intensiteten til lyden er den gjennomsnittlige mengden energi som overføres per tidsenhet gjennom et enhetsareal i en spesifikk retning. Dersom den akustiske kraften som genereres beveger seg likt i alle retninger blir den fordelt likt over overflaten til enhver kule som omgir kilden (University of Rhode Island, 2021a). Som følge av dette får man et spredningstap når energimengden i bølgen forblir den samme når den sprer seg utover fra en kilde. Det er viktig å tenke over at dette er i et tenkt perfekt scenario der det ikke er noe form for absorpsjon eller andre hindrende faktorer i mediet. Når sirkelen til overflatebølgen blir større sprer energien seg for å fylle den (University of Rhode Island, 2021c). Det kan sammenlignes med å blåse bobler med tyggegummi. Når det blir mer luft innvendig i boblen blir overflaten større mens ”veggene” blir tynnere, men det er fremdeles like mye tyggegummi. Dette svarer til den totale energien i en lydbølge mens den brer seg utover, da den i et perfekt absorpsjonsfritt medie beholder den totale energien, men får en redusert amplitude og lavere intensitet i hvert punkt desto lengre ut fra kjernen man kommer. Dette kalles geometrisk spredning og siden overflaten til sfæren er proporsjonal med avstanden til kvadratet fra lydkilden, vil det si at hver gang avstanden doubles, firedobles arealet og intensiteten avtar firedobbelt (Bradley og Stern, 2008, s.48), som illustreres i figur 5.



Figur 5: Forplantning av lyd utifra en lydkilde, hvor den svarte prikken er senter for kilden. Hvis lydbølgen har en intensitet på "1" i punkt "A", blir intensiteten dobbelt så langt ut "B" lik $\frac{1}{4}$, da energien er spredt utover en fire ganger så stor overflate (Bradley og Stern, 2008). Bildet er hentet fra (Bradley og Stern, 2008, s.39)

Lyd i havet kan ikke bevege seg uniformt i alle retninger i all evighet. Det kommer et punkt der lydbølgen treffer havoverflaten eller havbunn. Med øvre og nedre grenser i et medium beveger lydbølgene seg sfærisk fra kilden til den treffer overflate eller bunn, da endrer den karakteristikken til sylindrisk spredning. Sylindrisk spredning oppnås ved å anta at lyden blir jevnt fordelt over overflaten til en sylinder med radius lik "r" og en høyde "H" lik havets dybde. Lydeintensiteten avtar saktere når den sprer seg som en sylinder med radius "r₀" til en sylinder med en større radius "r", sammenlignet med avtagende rate for sfærisk spredning (University of Rhode Island, 2021a), som illustreres i figur 6.



Figur 6: Lyd som er generert av en lydkilde, vist som den hvite prikken i bildet, kan ikke bre seg uniformt utover i alle retninger for alltid. Dette kommer av begrensningene som følge av havoverflaten og havbunn. Når den sfæriske lydbølgen når topp og bunn begynner den å bevege seg sylindrisk utover, horisontalt vekk fra kilden (University of Rhode Island, 2021a). Bildet er hentet fra (University of Rhode Island, 2021a)

Det er viktig å se på sfærisk og sylindrisk spredning som grove tilnærminger sammenlignet med det egentlige spredningstapet i havet. Disse er geometriske tilnærminger og eksemplene som er presentert tidligere har ikke tatt for seg tap til omgivelsene som absorpsjon, refleksjon, refraksjon, spredning eller etterklang (University of Rhode Island, 2021a). Når lyd forplanter seg i et medie blir deler av den akustiske energien absorbert og omgjort til varme. Ettersom akustisk energi får molekylene i mediet til å vibrere må energien overkomme molekylene sin ”hvile” posisjon og egen resistans mot bevegelse. Mengden absorpsjon og hvor langt en lyd bærer avhenger av frekvensen til lyden, og en høyfrekvent lyd absorberes raskere enn lavfrekvent lyd. Når en lyd er høyfrekvent vibrerer partiklene i mediet svært raskt. Molekylene får energien sin til å vibrere fra lydbølgen, og siden den høyfrekvente lyden har flere svingninger per sekund vil den gå tom for energi raskere. Under like forhold vil dermed en høyfrekvent lyd forflytte seg kortere enn en lavfrekvent lyd (University of Rhode Island, 2021b).

2.2.4 Forholdet mellom trykk, intensitet og desibel

Når vannmolekyler blir satt i bevegelse blir de trykket tettere sammen, som fører til at trykket øker. Trykk-komponenten til lyd i vann er Pascal og den kinetiske komponenten er partikkelakselerasjonen, som blir målt i m/s^2 (Kvadsheim mfl., 2023). Desibel brukes som måleenhet for lydtrykk, som er styrken eller lydnivået lyden oppfattes med. Det er en dimensjonsløs måleenhet og uttrykker den logaritmiske verdien til forholdet mellom det oppfattede trykket og referansetrykket (Holtebekk, Myren og Ulseth, 2024). I vann er dette referansetrykket $1 \mu Pa$ (Kvadsheim mfl., 2023). Til sammenligning er det valgt et referansetrykk i luft på $20 \mu Pa$. Ettersom det er en forskjell i referanseverdi i luft og vann, blir desibelskalaen forskjellig. Forholdet mellom de to akustiske mediene medfører at for hver dobling av trykket øker lydnivået med 6 desibel. Dette resulterer i at et lydtrykk på $1 \mu Pa$ i vann får energi tilsvarende et omtrentlig 62 desibel lavere lydtrykk i luft ved referansetrykket på $20 \mu Pa$ (Kvadsheim mfl., 2023).

Lydintensitet har enheten W/m^2 og kommer av

$$I = \frac{p^2}{(\rho c)} \quad (1)$$

Her er p den kvadratiske middelverdien av trykket i Pa, altså referanseverdien som er satt til $20 \mu Pa$ i luft, ρ er tettheten i kg/m^3 og c er lydets hastighet i m/s (Dahl mfl., 2007, s.24). Referanseintensiteten til lyd i luft når ρ i luft er $\approx 1,2 kg/m^3$ og c_{luft} er $340 m/s$.

$$I_{ref-luft} = \frac{p_{ref-luft}^2}{\rho_{luft} c_{luft}} \approx 1 \times 10^{-12} W/m^2 \quad (2)$$

Referanseintensiteten for lyd i vann når ρ er $\approx 1025 kg/m^3$, c_{vann} er $1500 m/s$, og med referansetrykk $p_{ref-vann}$ på $1 \mu Pa$ blir intensiteten lik

$$I_{ref-vann} = \frac{p_{ref-vann}^2}{\rho_{vann} c_{vann}} \approx 6,5 \times 10^{-19} W/m^2 \quad (3)$$

Som følge av forskjellen i referanseintensitet fremstår lydnivåer i vann ofte som mye høyere enn det de ville vært i luft. Ettersom det er et forskjellig referansetrykk i de to mediene kan man ikke

sammenligne disse direkte (Holm, 2019). Et lydtrykk på 20 μPa er det laveste et menneske kan høre, og derfor også referansenivået. Det er derimot ikke noen naturlig referanse i vann, og det er blitt valgt et rundt tall, 1 μPa . Dette alene gjør at lydtrykket i vann er 26 dB større enn i luft (Holm, 2019).

Det er intensitet som er den fundamentale størrelsen som bestemmer virkningen av lyd, og hvilket arbeid som skal til for å lage den, ikke trykk. Ved å bruke en høyttaler som eksempel kan dette illustreres. I luft vil det kreve et stort utsving, siden luft har liten tetthet, og dermed lite trykk for å utføre arbeidet. I vann derimot blir det motsatt, for der kreves det et stort trykk for det samme arbeidet (Holm, 2019). Derfor blir lydtrykket i vann regnet om til intensitet, for å bruke intensiteten for å finne ut hva denne tilsvarer i luft. Produktet som da kommer av lyd hastigheten og tettheten "akustisk impedans" viser forholdet mellom vann og luft og gir 36 dB større trykk i vann (Holm, 2019).

Referanseintensitetsnivåene i vann og luft varierer med mer enn 6 størrelsesordener, som er vist i likning 2 og 3. Dette er grunnen til at de to mediene ikke kan sammenlignes direkte basert på dB, da referansen selv varierer med 62 dB (Dahl mfl., 2007). For å få det tilsvarende lydtrykket i vann som luft må det altså legges 62 dB til lydtrykket i luft. Det blir altså

$$\text{Lydtrykk i vann} = 62 \text{ dB} + \text{Lydtrykk i luft} \quad (4)$$

Nivå av dB kan også brukes for å uttrykke lydtrykk, og står i tråd med definisjonen for forholdet mellom de ulike referanseintensitetene i likning 2 og 3. SPL, lydtrykknivå defineres som

$$SPL(\text{dB}) = 10 \log_{10} \frac{p^2}{p_{ref}^2} \quad (5)$$

Likningen definerer SPL i form av kvadratet til trykkamplituden, og det har blitt praksis å uttrykke referansenivået avhengig av om p ble målt i luft eller vann (Dahl mfl., 2007).

Formlene og tilnærmingene i kapitlet viser kompleksiteten og forskjellene mellom lydtrykk og intensitet i luft og vann. Desibelskalaen gir muligheter for sammenligning av lydnivåer, og det er viktig å huske at referanseverdiene for lydintensiteten varierer betydelig mellom disse to mediene. Forskjellen i akustisk impedans og hvordan lyd oppfattes og overføres i vann sammenlignet med luft gir en grunnleggende og fundamental forståelse for å tolke lydnivåer i ulike miljø. På denne måten kan man forstå hvorfor lyder i vann oppfattes som kraftigere i vann enn i luft.

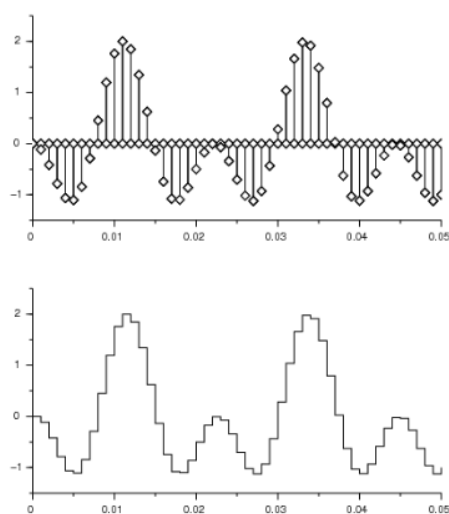
2.3 Lydopptak

For å ta lydopptak i vann er det viktig å ha god forståelse for grunnkonseptene ved lydopptak. Hydrofoner er mikrofoner som måler trykkendringer i vann, og er designet for å være i vannmiljøet. Det blir gjort rede for viktige grunnkonsepter om hydrofoner, signalbehandling, frekvensanalyse og hvordan den valgte hydrofonen fungerer.

2.3.1 Sampling

Ved opptak av lyd med en analog måler må signalet konverteres til et digitalt signal. Et analogt signal vil som regel være kontinuerlig, det vil si at for et signal $s(t)$ vil det være en gitt verdi. I et digitalt signal må man bestemme seg for hvor ofte den skal hente inn datapunkter, samt hvor stor oppløsning opptaket skal ha. Vokabularet som beskriver dette er sampling frequency ($S(f)$) altså hvor ofte det skal måles per sekund, med enheten Hz ($Hz = \frac{1}{\text{sekund}}$)

Det er bitdybden som bestemmer oppløsningen til lydopptaket. Med 16-bitdybde vil hver sampling kunne sette lydnivået fra 0 til 65 536 (2^{16}). Dette gir teoretisk en 16 bit analog digital converter (ADC) et potensiale for å gi 96 dB i dynamisk rekkevidde. Det betyr at det mest stille lydopptaket kan være -96 dB og det høyeste nesten 0 dB (Theriot, 2022). Desibel oppgis fra -96 til 0 ved digitale lydopptak ettersom det er standard at 0 dB er så høy en lyd kan være uten klipping, altså metning av input-signalet.



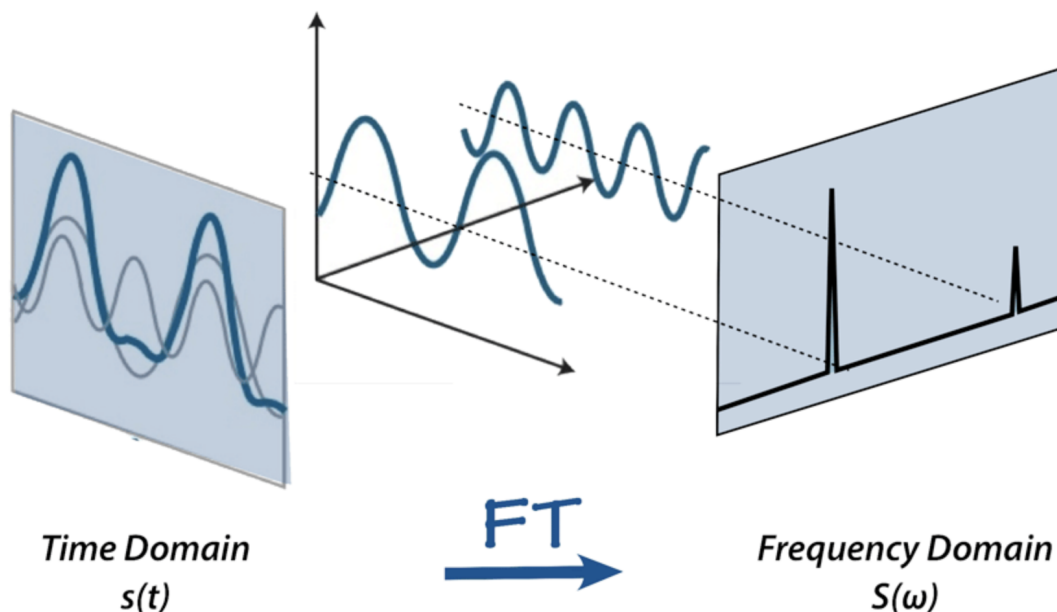
Figur 7: Et rekonstruert signal etter sampling vil ha et informasjonstap i forhold til det originale signalet (Westcott, 2018, s.7)

I signalteori finnes det et prinsipp som sier at for å fange opp et signal med frekvensen f_0 , må du sample med en frekvens som er minst $2f_0$. Dette er kjent som Nyquist-frekvensen, og ved å overholde denne grensen unngår man informasjonstap som følge av aliasing. Hvis man sampler sjeldnere enn dette, vil høyere frekvenser feiltolkes som lavere frekvenser, som kan føre til tap av viktig informasjon i signalet (Westcott, 2018). For å kunne gjengi hele frekvensområdet for menneskelig hørsel, som går opp til 20 000 Hz, må det derfor samples med minst 40 000 Hz. Etter at et signal har blitt samlet, kan det rekonstrueres, og denne prosessen kan medføre et visst informasjonstap sammenlignet med det originale signalet (Westcott, 2018), som illustreres i figur 7.

2.3.2 Frekvensanalyse

Enhver lyd kan skrives som en funksjon kombinert av forskjellige skalerte sinuskurver og cosinuskurver (Universitetet i Oslo, 2023). Det er mulig å tenke på lyd som et tredimensjonalt objekt, hvor aksene er tid, frekvens og amplitude (Gomede, 2023). I en vanlig ”avspilling” av et lydopptak vil

det spilles av i et perspektiv hvor tid og amplitude vises og alle frekvensene blir spilt av samtidig. Ved å utføre en Fouriertransformasjon kan frekvensene skilles fra hverandre og dermed se hvilke frekvenser som er tilstede.



Figur 8: Grafisk framstilling av Fouriertransformasjon, fra (Steven, 2023), som viser tidsdomenet $s(t)$ til venstre og frekvensdomenet $S(\omega)$ til høyre som ett resultat av Fouriertransformasjon. $s(t)$ viser amplituden til et signal over tid. $S(\omega)$ viser hvordan signalet fordeler seg utover over ulike frekvenser

Tidsdomenet er signalet og $s(t)$ er funksjonen som beskriver hvilken amplitude lyden har over perioden T (vist til venstre i figur 8). Tidsdomenet er den naturlige måten å undersøke lyd da dette er slik lyden oppleves fra naturen.

Frekvensdomenet er signalet og $S(\omega)$ er en funksjon som beskriver hvordan amplituden fordeler seg på de forskjellige frekvensene (vist til høyre i figur 8).

Fouriertransformasjonen er matematisk definert som:

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot e^{-i2\pi ft} dt \quad (6)$$

Hvor $e^{-i2\pi ft}$ kommer av den generelle løsningen til en differensialligning for harmoniske oscillatorer. Løsningen på denne transformasjonen vil gi et komplekst svar for hvert tidssteg som kan representeres på formen:

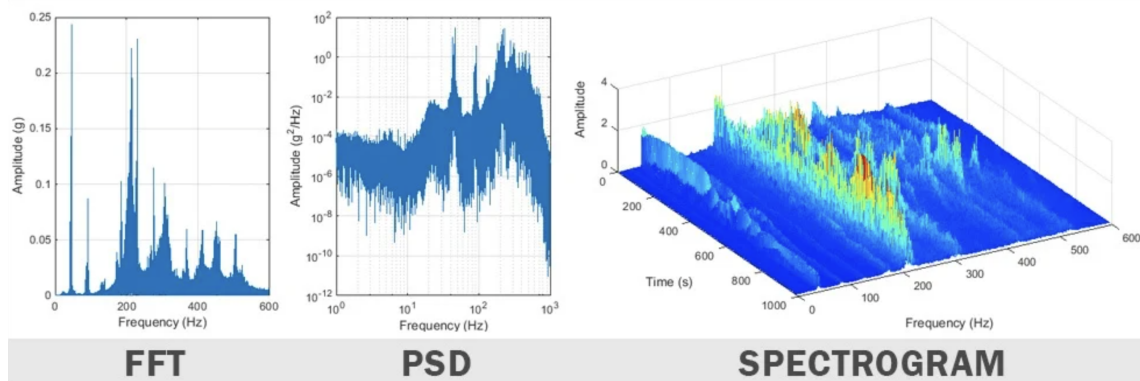
$$S(f) = a + bi \quad (7)$$

Hvor a og b representerer henholdsvis amplituden til \cos og \sin - funksjonene på en gitt frekvens f . Siden $a + bi$ inkluderer imaginære deler er det hensiktsmessig å kvadrere funksjonen for å få forståelse over magnituden til de forskjellige frekvensene. For å finne magnituden til uttrykket brukes absoluttverdien til $S(f)$ og man sitter igjen med uttrykket:

$$|S(f)|^2 = |a + bi|^2 = a^2 + b^2 \quad (8)$$

” $2abi$ ” blir fjernet, da den imaginære delen av leddet forklarer fasen mellom cosinuskurvene og sinuskurvene og ikke forteller noe om magnituden til uttrykket. Ved å plotte $s(f)^2$ kan en vise hvilke frekvenser som er dominerende i et frekvensområde både i cosinus- og sinusområdet. Dette plottet blir kalt ”*power spectral density plot*” (PSD-plot).

Når det er utført en Fouriertransformasjon kan man for ethvert tidssteg se amplitude og frekvens. Dette gir et spektrogram (*spectrogram*) som er et plot hvor frekvensområde og tidsområde vises samtidig, og ved å gi en fargeskala til amplituden er det mulig å se hvordan lydbildet endrer seg over tid.



Figur 9: Skjermutsnitt fra forklarende figur hentet fra (Hanly, 2016). Figuren gir et innblikk i hvordan lyd kan representeres ved hjelp av fast Fouriertransformasjon, Power spectral density og spectrogram

I figur 9 illustreres ulike måter å representere lydbildet. Det finnes ulike algoritmer for å utføre Fouriertransformasjoner, som *diskret Fouriertransformasjon* (DFT) og *fast Fouriertransformasjon* (FFT). FFT er fordelaktig å bruke når man har stasjonære lydverdier, enten for svært korte tidssteg eller stasjonære toner over tid. For å undersøke endringer i lyder over forskjellige frekvenser benyttes hovedsakelig DFT, og da spesielt algoritmen som kalles for ”*short-time Fourier transform*” (STFT) (The SciPy Project, 2008-2024).

2.3.3 Støy

Støy kan defineres som uønsket lyd i et lydopptak. Støy har stor påvirkning på signalbehandling, da støy kan maskere eller skjule signaler (Helseth, 2024). Det kan være nyttig å beskrive forholdet mellom signal og støy som en matematisk verdi. Denne kalles for ”*signal to noise ratio*” og den matematiske formelen blir $SNR = \frac{\text{signal}}{\text{uønsket signal}}$

En jordsløyfe oppstår når det er forskjellige jordpotensialer mellom to punkter som teoretisk skulle vært like. Dette fenomenet, også kjent som elektrisk spenning, måles i Volt. En effektiv metode for å oppdage en jordsløyfe er å måle spenningen mellom to jordingspunkter. Hvis det ikke er spenningsforskjell, indikerer det at kretsen er fri for jordingsfeil. Tilstedeværelsen av jordsløyfer kan føre til en uønsket krets, der strømmen ikke følger den opprinnelig designete banen. Slike problemer oppstår ofte på grunn av utilstrekkelig isolering eller skjerming i kretser, spesielt i lange

kabler. Jordsløyfer kan også oppstå ved strømlekkasjer, som er spesielt problematisk i vannrike miljøer hvor vannets konduktivitet kan skape flere veier til jord (Scientific, 2024).

2.3.4 Piezoelektrisk opptak

Den piezoelektroniske effekten er egenskapen til et krystallstrukturert material for å omgjøre kinetisk energi til elektrisk energi. Ordet piezo kommer fra det greske ordet " $\pi\iota\epsilon\zeta\omega$ " som betyr "å dytte" (Nanomotion, 2023). Ved å påføre et piezoelektronisk materiale en mekanisk påkjenning vil det skape elektrisk spenning. Dette kalles den direkte piezoelektrise effekten (sensor). Det finnes også en omvendt piezoelektrisk effekt (aktuator) (Maestre, 2024), som gjør at det er mulig å manipulere materialene ved å påføre elektriske spenninger over et materiale. Piezoelektriske materialer kan derfor brukes i for eksempel høytalere og mikrofoner. Krystallstrukturen i for eksempel kvarts gjør at mekaniske påkjenninger vil flytte polariteten innad i strukturen og dermed gi krystallen en positiv og negativ pol som kan drive en krets.

Ved å koble en piezosensor opp mot en bevegelig membran kan man lettere overføre vibrasjoner fra membranen til piezoelementet. Dette gjør at vibrasjoner i sensoren vil gi et svakt vekselstrømssignal som korrelerer med vibrasjonene som blir tatt opp. Den piezoelektriske sensoren vil ha høy impedans (se tabell 2 og 4), dette gjør at den vil være svært utsatt for elektromagnetisk støy (EMS). Dette skjer delvis fordi sensoren vil gi en relativ lav utgangsspenning, som gjør at små forstyrrelser i kretsen fra EMS vil bli forsterket og dermed påvirke det målbare signalet fra kretsen (Avnet.com, 2024).

2.4 Teknisk gjennomgang av komponenter i akustisk måleutstyr

For å vurdere hva som er viktig ved valg av komponenter er det nødvendig å ha forkunnskaper om de vanligste komponentene for en opptaksrigg med hydrofon. Det ble tidlig gjort vurderinger av utstyr som var nødvendig for prosjektet, og komponentene ble vurdert opp mot behov. Det blir derfor gitt en teknisk og teoretisk gjennomgang av komponentene som kan inngå i et akustisk måleinstrument.

2.4.1 Hydrofon

Det finnes hovedsakelig to typer hydrofoner, optiske og elektriske. Optiske hydrofoner fungerer ved å sende lys gjennom en optisk fiber, for deretter å konvertere det mottatte signalet til et digitalt signal i den andre enden. Optiske hydrofoner er immune mot elektromagnetisk støy (Bucaro, Dardy og Carome, 1977) og tåler større trykk og mer ekstreme miljøbelastninger enn andre alternativer.

Andre vanlige typer hydrofoner er piezoelektroniske eller basert på prinsippet om bevegelige spoler. Prinsippet for bevegelige spoler innebærer at en trykkmembran beveger seg mot et materiale som fysisk endrer posisjon, og dermed endrer motstanden som strømmen bruker for å fullføre kretsen. Denne endringen i spenning kan deretter måles og registreres som et lydopptak. Den andre typen er en sensor som baserer seg på den piezoelektroniske effekten (Saheban og Kordrostami, 2021).

De største fordelene med å velge en piezoelektronisk sensor er at den er svært robust, rimelig, og har et frekvensområde som er relevant i forhold til tidligere forskning (les mer ved 2.2.4). I tidligere

forskningsprosjekter har det ofte blitt brukt svært kostbare hydrofonloggere hvor man kan stille inn opptak etter tidsvindu, frekvens og lengde, og deretter la loggeren ligge ute over lengre tid.

2.4.2 Op-amp

En operasjonsforsterker (op-amp) er en komponent som brukes i flere forskjellige elektroniske kretser. I lydopptak brukes den ofte som en effektforsterker for å øke effekten av et elektrisk signal. Det er viktig å velge en op-amp som er balansert og tilpasset det spesifikke systemet og miljøet den skal operere i. Hvis op-ampen er for kraftig, kan det oppstå problemer som klipping, hvor utgangssignalet ikke endres selv med små variasjoner i inngangssignalet. Dette fører til tap av informasjon ved at lydtoppene blir beskåret. På den andre siden, hvis op-ampen er for svak, blir det vanskelig å detektere endringer i lydbildet. Dette resulterer også i et svakere signal-til-støy-forhold (SNR), som kan nødvendiggjøre digital forsterkning i etterkant, og dermed forverre signal-til-støy-forholdet ytterligere (Andersen, 2017).

2.4.3 ADC

En ADC "*analog to digital converter*" er en komponent som gjør konverteringen fra et analogt signal til et digitalt signal. En ADC vil for hvert tidssteg måle det analoge signalet, og konvertere det til et digitalt signal. Det er i hovedsak sampling og bitdybde som skiller ADC'er fra hverandre (Andersen, 2022).

2.4.4 Raspberry Pi

Raspberry Pi (RPI) er en ettbretts datamaskin som er konstruert på ARM-arkitektur og som hovedregel bruker Linux som operativsystem (Raspberry Pi Foundation, 2024). Brettet er laget av Raspberry Pi foundation og ble originalt konstruert som et læreverktøy for universitetsstudenter som studerte datavitenskap (Opensource.com, 2016), men har senere også gått mer mot yngre elever. RPI er mye brukt i prototyper og stadig større grad i industrielle løsninger. De største fordelene med RPI er pris, størrelse og tilgjengelighet. Ved å bruke serveregenskapene til linux trenger en ikke å benytte seg av skjerm og tastatur, men kan bruke nettverksprotokoller som SSH (Secure Shell) og SCP (Secure Copy) for å kommunisere på tvers av datamaskiner.

2.5 Oppsummering, hypotese og hovedmål

Det er gitt innsikt i hvorfor lydmiljøet er viktig å studere med tanke på dyrevelferd og hørselsområdet til laks ligger mellom 10 og 400 Hz, som er svært lavfrekvent. Det har blitt kartlagt hvilke lyder som kommer fra laksen, inkludert både kommunikative og ufrivillige lyder. Studier har vist at det definitivt er mulig å registrere lyder både fra laksen selv og fra dens lydmiljø. Ved å lytte til omgivelsene over tid, er det mulig å dokumentere endringer i lydmiljøet. Lydmiljøet varierer betydelig mellom forskjellige oppdrettsmiljøer, og det er derfor interessant å dokumentere hvilke lyder fisken blir utsatt for. Lyd avtar over distanse, og lavfrekvent lyd bærer bedre enn høyfrekvent lyd. Det er gitt en forklaring på grunnkonseptene bak Fourier-transformasjoner, PSD og spektrogram. Videre har det blitt belyst de største problemene med støy og hvordan disse kan håndteres. Til slutt har det blitt gitt en innføring i de komponentene som er nødvendige i en målerigg for opptak av lyd.

I bacheloroppgaven presenteres en hypotese om at det er mulig å egenutvikle en målerigg som kan benyttes til å registrere lyder spesifikt fra laks i et oppdrettsmiljø. Hovedmålet med riggen er å produsere gode lydfiler slik at det er mulig å identifisere og skille lakselyder fra miljølyder.

Prosjektet er strukturert rundt tre delmål. Det første målet fokuserer på å spesifisere de tekniske og funksjonelle kravene til komponentene i måleriggen. Det andre målet er å demonstrere riggens kapasitet til å identifisere og skille lyder fra laksen fra andre støykilder. Dette vil kreve praktiske tester i et kontrollert oppdrettsmiljø for å verifisere riggens effektivitet og nøyaktighet. Det tredje målet omhandler analysen av lydsignaler og deres korrelasjon med kjent adferd- og stressrespons hos laksen. Det vil bli utarbeidet en metode for å korrelere lakselyd med stress.

3 Material og metode

For å gjennomføre lydopptak var det nødvendig å designe og bygge en målerigg med spesifikke funksjonskrav. Prosessen fram til ferdig produkt, inkludert lydopptak av fisk og analyse, ble gjennomført med tre klare mål:

1. Spesifisere komponentkrav for hydrofonen.
2. Identifisere lyd fra laks og miljøet.
3. Analysere lydsignaler og korrelere disse med fiskens aktivitet.

3.1 Produktutvikling av måleriggene

For å etablere et datagrunnlag for å svare på problemstillingen, *"Hvilke muligheter gir passiv akustisk overvåkning av atlantisk oppdrettslaks?"*, måtte det bygges et måleinstrument som kunne måle lyd under vann. Av hensyn til bestillinger, praktiske hensyn og for å øke påliteligheten, ble det besluttet å kjøpe inn utstyr for å produsere to uavhengige målerigger. Dette ga fordeler ved å redusere den tekniske risikoen som kommer av å kombinere ukjente komponenter til en enhet. Det var også fordeler ved å ha flere måleinstrument da det gjorde det mulig å utføre parallelle målinger og dermed øke troverdigheten til datagrunnlaget.

For å bygge måleriggene på en effektiv og grundig måte, ble det laget en utviklingsplan. Prosjektet med å bygge måleriggene ble delt inn i seks hoveddeler; prosjektering, informasjonsinnhenting, innkjøp, bygging, programvare og testing. For målerigg 2 var det ikke nødvendig å utvikle programvare.

For å starte utviklingen av målerigg 1 med RPI ble det som en del av prosjekteringen satt en rekke funksjonskrav. Måleriggene hadde ulike funksjonskrav, og målerigg 1 var designet for å integreres i et produksjonsmiljø på et kommersielt oppdrettsanlegg, mens målerigg 2 var spesifikt ment for labforsøkene i oppgaven. Målerigg 1 hadde flere funksjonskrav og var betydelig mer ressurskrevende å utvikle enn målerigg 2.

Funksjonskrav til Målerigg 1:

1. Automatisk starte å måle data, ved oppstart
2. Lagre data i .wav format lokalt på målerigg
3. Skal innhente lyd av god kvalitet, uten for mye støy
4. Gjøre lydfilene tilgjengelig uten å være fysisk tilstede på området, kommunisere trådløst gjennom bruk av internett
5. Klarer å skille mellom kar med og uten fisk
6. Ta opptak etter ønsket forhåndsbestemt tid
7. Opprette flere opptak etter ønsket antall, intervall og lengde på intervaller og over en forhåndsbestemt tid

8. Lagre filene med ønsket navn og nummerering

Funksjonskrav for Målerigg 2:

1. Skal innhente lyd av god kvalitet, uten for mye støy
2. Lagre data i .wav format lokalt på målerigg
3. Ha god nok batteri for å fungere i over 3 timer
4. Stor nok lagring til å kunne lagre opptak på over en time
5. Diktafon og hydrofonen er kompatible

For å produsere måleriggene var det nødvendig å sette seg inn i teorien rundt de ulike komponentene, signalbehandling, og tidligere forskning på lydopptak av fisk. Samtidig som informasjonsinnhentingen tok sted, ble testfasen planlagt.

I innkjøpsdelen ble det anskaffet RPI for målerigg 1, dette fordi gruppen hadde erfaring med bruk av RPI som måleinstrument fra tidligere fag. Videre måtte annet materiell som hydrofon, forsterker og lydkort, se tabell 1, bli kjøpt. For målerigg 2 ble det kjøpt inn diktafon, SD-kort og hydrofon, se tabell 3. For å sikre at sensorene ville fungere i henhold til funksjonskravene, ble det undersøkt hvilken sensitivitet sensorene måtte ha. Komponentene måtte fungere sammen, og kompatibiliteten mellom komponentene ble derfor undersøkt. Tidsmessig tok denne fasen lengre tid enn planlagt, da anskaffelse av hydrofonene tok over en måned fra bestilling til de var levert.

Bygging av målerigg 1 ble gjennomført uten nevneverdige problemer. På grunn av omfattende arbeid under informasjonsinnhentingen, var komponentene kompatible, som lettet sammensetningen av de forskjellige delene. Ved å anvende installasjonsinstruksjonene fra leverandøren (HiFiBerry, 2024) av analog-digital omformer (ADC), ble det mulig å integrere ADC med RPI. Å sette sammen målerigg 2 var svært enkelt. Den krevde bare å sette inn batteri i diktafonen og koble sammen diktafon og hydrofon ved bruk av AUX-kabel.

Utviklingen av programvare til RPI-enheten i målerigg 1 ble påbegynt allerede i under informasjonsinnhentings delen og pågikk gjennom hele produktutviklingen frem til det ferdige produktet. Det ble gjort endringer og forbedringer underveis med bygging og testing. Programvareutviklingen ble gjort ved hjelp av ChatGPT, som viste seg å være et svært nyttig verktøy for å sette opp rammeverket for programvaren. Standardoppsettet til de forskjellige Python bibliotekene kunne brukes direkte, og fokuset til gruppen kunne legges på den individuelle tilpasningen som prosjektet krevde.

Under testdelen ble det kontrollert om alle komponentene i måleriggen fungerte sammen slik som tiltenkt. Det ble tidlig gjort tester om måleriggen greide å ta opptak, og lagre opptakene. De tidlige testene foregikk uten å ta opptak i vann. Utover i utviklingsprosessen ble måleriggene etterhvert testet i karmiljø på SeaLab, før endelig forsøk ble iverksatt. Ved å teste om måleriggene utførte de funksjonene som var tiltenkt, kunne det bli gjennomført nødvendige rettinger. Når nødvendige endringer var gjort, var måleriggene klar til endelige forsøk.

3.2 Målerigg 1 - Raspberry Pi

Målerigg 1 ble utviklet med tanke på å lage en målerigg som skulle oppfylle funksjonskravene som ble bestemt under produktutviklingen. Funksjonskravene ble satt med tanke på å integrere målerigg i ett produksjonsmiljø på et oppdrettsanlegg. Ettersom forsøkene ble gjort innendørs på et kontrollert labmiljø ble det valgt å ikke prioritere å gjøre systemet fullstendig vanntett, med unntak av selve hydrofonen.

Tabell 1: Komponentliste for målerigg 1

Komponent	Modell/Type	Leverandør	Merknader
Raspberry Pi	Raspberry Pi 4 Model B	Raspberry Pi Foundation	4GB RAM
Lydkort	DAC+ ADC PRO	Hifiberry	-
Hydrofon	HY-03	H-Instruments	Bidireksjonell
Forsterker	HY-11	H-Instruments	Anbefalt Forsterker
Strømforsyning	Yoga slim 7 USB	Lenovo	-
SD-Kort	64GB MicroSDHC	SanDisk	Kjører Debian
Diverse kabler	AUX, microusb, tillegg jordingskabel	Ukjent	-

I tabell 1 er det en oversikt over alle komponentene som ble brukt i målerigg 1 under forsøk på både SeaLab og SINTEF. I figur 10 er det bilde av hovedkomponentene koblet sammen i målerigg 1. Valg av komponenter var et resultat av produktutviklingen, med stor vekt på de to delene informasjonsinnhenting og testing.



Figur 10: Målerigg 1: Oversikt over komponentene til målerigg 1; A: Raspberry Pi, B: Lydkort, C: Hydrofon HY-03, D: Forsterker, E: Strømforsyning, F: Jordingskabel (hvitkabel).

Ved testing av hydrofonen (HY-01) oppsto det mye støy som det ikke ble funnet en årsak for. Problemet ble løst ved å teste begge hydrofoner tilknyttet riggen, og den med minst støy ble valgt. Valget med å benytte seg av den bi-direksjonelle hydrofonen (HY-03) istedet for den omni-direksjonelle hydrofonen (HY-01) sammen med RPI var dermed ikke planlagt på forhånd. Det var også et stort problem med støy når det ble benyttet en dedikert strømforsyning direkte koblet på strømmettet (vekselstrøm), som ga støy i 50 Hz området. Støykilden som følge av strømmettet ble fjernet ved å koble seg til PC på batteristrøm (likestrøm).

Under testing av hydrofoner i kar på SeaLab ble det oppdaget en annen type støy, trolig fra kryptstrømmer i karene. For å redusere denne støykilden ble det festet en jordingskabel parallelt med hydrofonkabelen og den ble koblet til jord via micro-USB porten på forsterkeren. Lydkvaliteten ble betydelig bedre som følge av å jorde vannet og forsterkeren.

Tabell 2: HY-03 - produktspesifikasjoner (H-Instruments, 2023b)

Specification	Value
Frequency range (-3 dB)	20Hz to 20kHz
Transducer Sensitivity [dB, re 1V/ μ Pa]	-190
Maximum Operating Depth (tested)	4m
Output impedance	>10 Mohm (piezo)
Nominal capacitance	20nF + cabel (118pF/m)

Det var mulig å betjene testriggen ved å koble seg på et delt WIFI-tilkoblingspunkt fra en mobiltelefon, og deretter benytte Secure Shell protokollen (SSH) inn på RPI for å styre programvaren. For å overføre filer ble det benyttet Secure Copy protokollen (SCP) i Linux . Denne arbeidsmåten gjorde det mulig å benytte seg av utstyret gjennom internettilkobling. Gjennom SSH kunne brukeren starte pythonskriptet, som ligger i vedlegg B, hvor brukeren måtte bestemme lydkilde og navn for lydopptaket.

Programvaren som ble brukt til å ta lydopptak under forsøket, var et Python-program som gjennomførte 5 minutter med kontinuerlig lydopptak 12 ganger på rad. Scriptet ble tilpasset i henhold til forsøksplanen, som vist i figur 13 og figur 15. Lydopptakene ble tatt opp med lydinnstillingene 16bit/88,2kHz.

3.3 Målerigg 2 - Diktafon

Måleriggen med diktafon ble produsert spesifikt for den type forsøk som ble gjennomført i oppgaven og var ikke ment å implementeres i større kommersielle sjøanlegg. Målerigg 2 fulgte dermed ikke de samme funksjonskravene som målerigg 1, da målerigg 2 skulle være enkel og fungere som reserve, og for sammenlikning mellom de to typer måleriggene. I labforsøkene var det en person tilstede ved hvert opptak dermed ble det ikke behov for fjernstyring av denne riggen. Batterikapasiteten og lagringskapasiteten til diktafonen var god nok, slik at de relativt korte forsøkene som ble planlagt kunne bli utført uten problemer. Lydopptakene ble tatt opp med lydinnstillingene 24bit/96kHz.



Figur 11: Oversikt over komponentene i målerigg 2: A: Diktafon, B: Hydrofon (HY-01), C: Jordingskabel (hvit).

Komponentene i målerigg 2 slik de var satt sammen er å se i figur 11, og liste for de spesifikke komponentene er vist i tabell 3. Dette var et enkelt oppsett og kan ses på som ”plug and play” da det bare var å koble delene sammen og trykke på opptaksknappen for start og stopp.

Tabell 3: Komponentliste for målerigg med diktafon

Komponent	Modell/Type	Leverandør	Merknader
Diktafon	Zoom H1n	Zoom	Integrert forsterker
Hydrofon	HY-01	H-Instruments	Omnidireksjonell
SD-Kort	32GB MicroSDHC	SanDisk	-
Jordingskabel	Kobberledning med isolering	Ukjent	Ukjent

På grunn av at diktafonen hadde innebygd forsterker kunne en direktekoble diktafonen og hydrofonen med AUX-kabel. Denne måleriggen måtte også ha en jordingskabel fra vannet ved siden av hydrofonen til jord på båndopptakeren for å unngå samme støyproblematikk som med målerigg 1. Støy fra strømmettet var ikke et problem på denne måleriggen, da den ikke trengte ekstern strømforsyning under bruk.

Tabell 4: HY-01 - produktspesifikasjoner (H-Instruments, 2023a)

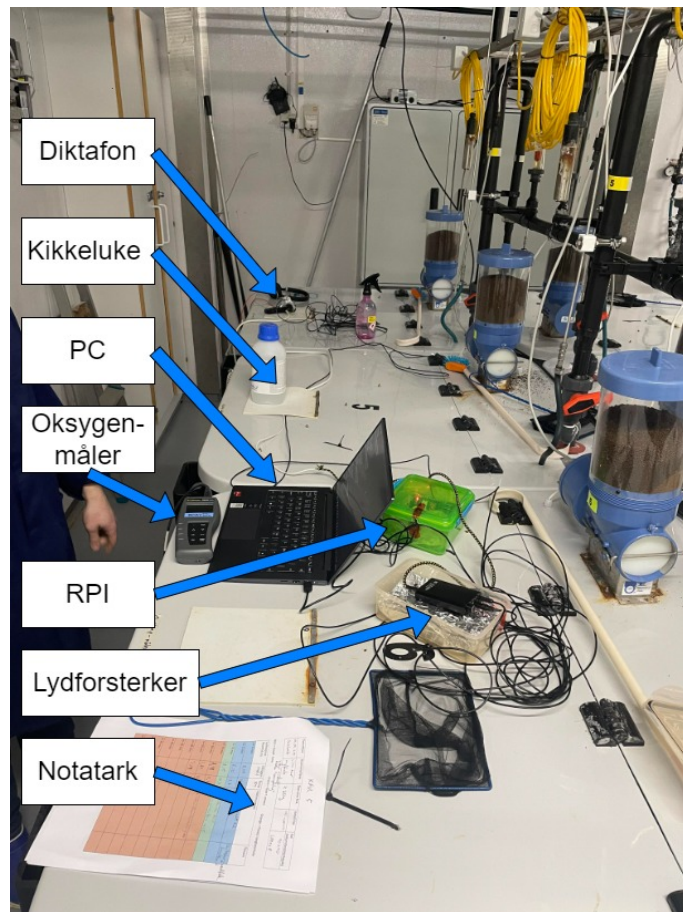
Specification	Value
Frequency range (-3dB)	20Hz to 100kHz
Transducer Sensitivity [dB, re 1V/ μ Pa]	-170
Maximum Operating Depth (tested)	30m
Output impedance	>10 Mohm (piezo)
Nominal capacitance	9nF + kabel (118pF/m)

Brukergrensesnittet for målerigg 2 var ved å operere knappene på enheten manuelt, altså starte og stoppe opptaket ved å trykke på knappen merket ”REC”. Opptakene i forsøkene varte i en time fra begynnelse til slutt, og lydfilene ble lastet ned til et SD-kort og videre overført til PC etter forsøkets slutt.

3.4 Forsøk - SeaLab

Forsøk på SeaLab blir det totalt utført fire lydopptak: to lydopptak fra kar med fisk og to fra kar uten fisk.

Forsøket begynte med lydopptak i kar 3 uten fisk. Først ble måleutstyret plassert mest mulig sentralt i karet gjennom en kikkelukke i lokket. Alle karene som ble brukt i forsøk på SeaLab var identiske. De var kvadratisk med avrundede hjørner. Karene var ca. 90 cm \times 90 cm bred og ca. 50 cm dype. Måleriggen ble rigget til og tilkoblet strøm (Lenovo Yoga Slim 7) på en hensiktsmessig måte, slik at det ble unngått å søle vann på RPI og PC. Kar 3 var innstilt på en volumstrøm på 3 LPM (liter per minutt), da det ikke var mer kapasitet i systemet på SeaLab til å ha volumstrøm på 8 LPM i dette karet da det ville gått utover de andre karene med fisk. Fra tidligere erfaringer og testforsøk i forkant, ble det oppdaget mye støy i karet. Løsningen på støyproblematikken ble å jorde måleriggen til vannet gjennom en jordingskabel, for å sikre likt spenningspotensiale i målemediet og måleriggen. Etter dette forsvant det meste av støyen og lyd kvaliteten ble betydelig bedre. Lydopptaket på målerigg 1 og 2 ble startet samtidig, og hvert opptak varte totalt i 60 min.



Figur 12: Lab-oppsett for forsøk på NTNU SeaLab, med forsøk i kar 5. Her vises målerigg 1 (nærmest i bildet) og målerigg 2 (ytterst), notatark og det ene karet det gjøres forsøk i (kar 5). Ved kikkelluke går ledningen ned sentralt i karet.

Når forsøkene begynte ble det benyttet et notatark med en kjøreplan. Figur 13 viser notatark for gjennomføringen på SeaLab. Det ble notert oksygenmetning [mg/l] i vannet, temperaturen [C°] og kommentarer til eventuell hjelp når man hører på opptakene eller skal tolke spektrogram og lydbilde i etterkant av forsøket. Kommentarene var typisk ting som kan påvirke målingene, som eksternt støy fra vifter, plutselige lyder fra kar eller folk som pratet og beveget seg.

Dato/Sted	Scenario/fase	Størrelse fisk	Antall fisk	Kar (volum/bredde/høyde)

Blå = fase0: hvile Grønn = fase1: stress Orange = Fase2: langtids/hvile

Lydopptak Starttid (n):	Oksygen [mg/L]	Temp [C°]	Kommentarer	Filnavn
n+ 0 min				
n+ 5 min				
n+ 10 min				
n+ 15 min				
n+ 20 min				
n+ 25 min				
n+ 30 min				
n+ 35 min				
n+ 40 min				
n+ 45 min				
n+ 50 min				
n+ 55 min				

Figur 13: Notatark brukt ved forsøk på SeaLab. Hvilefase i blått, stressfase i grønt og langtids/hvile i orange.

I kar 6 og kar 5 var det atlantisk laks med en gjennomsnittlig vekt på ca. 20 gram og det var ca. 140 fisk i hvert av karene. Volumstrømmen for begge karene var på 8 LPM. Måleutstyret ble for alle kar plassert på samme måte som for kar 3 uten fisk. Det første opptaket i karet med fisk ble gjennomført i kar 6. Når opptaket hadde pågått i 10 minutter ble det framprovosert en stressrespons hos fisken. I kar 6 ble kikkelukka åpnet og fisken begynte å svømme mer aktivt, men roet seg veldig fort og gjemte seg i skyggen i hjørnet av karet. Det ble derfor valgt å åpne hele lokket istedenfor bare kikkelukka under forsøket på kar 5 for å indusere en tydeligere stressrespons. Ved å titte på fisken og kaste skygge ned i karet ble det mye aktivitet. Det ble underveis valgt å avslutte stressresponsen etter tre minutter da det ble vurdert at dette var nok, og at det ikke var nødvendig å stresser fisken mer. Opptaket for både kar 6 og 5 pågikk til det hadde gått 60 min.

I det siste opptaket for kar uten fisk i kar 3 ble det gjort opptak uten gjennomstrømming av vann. Dette opptaket varte bare i rundt 40 minutter som følge av strømmangel i begge måleriggene. Måleriggene ble etter dette opptaket ryddet sammen.

3.5 Forsøk - SINTEF

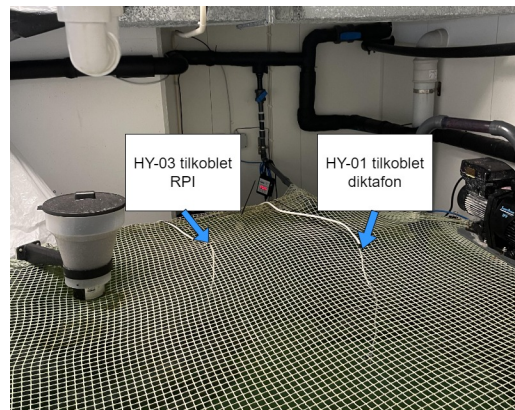
Forsøket hos SINTEF besto av to deler. Tre målinger i et kar med 19 stk, ca. 1,7kg atlantisk laks, og en måling i et tilsvarende kar uten fisk (se figur 14 a. for oversikt over de to karene). Karene på SINTEF var større enn på SeaLab. Karene var kvadratiske med 2 m × 2 m bredde og 0,9 m dybde fra vannlinje til bunn. Hjørnene og bunnen av karet var avrundet. Under hele forsøksperioden var en ansatt ved SINTEF Ocean med da gruppa ikke hadde lov til å være på labområdet uten oppsyn.

Forsøket startet i karet med fisk. Fisken i karet gikk på redusert førmengde, og ble føret en gang i døgnnet. Fisken ble automatisk føret kl. 07.00. Utstyret benyttet i målerigg 1 og 2 var likt som tidligere, bortsett fra en forlenget jordingskabel. Hydrofonene ble satt opp i nærheten av føeringsautomaten til karet, og vises i figur 14 (b). Hydrofonene ble plassert til siden for føeringsautomaten da fisken

var tilvendt å få fôr i dette området, og derfor sto den for det meste i denne delen av karet. Fisken var til å begynne med svært skvetne, og oppriggingen ble gjennomført på en rolig og varsom måte for å ikke stresser fisken unødvendig. Hydrofonene ble plassert ca. 50 cm under vannoverflaten i karet. Sirkulasjonspumpen til karet ble skrudd av for å reduserer støyen i karet, men etter en liten periode slo nødoksygenet inn og pumpen måtte justeres litt opp igjen.



(a) Oversikt over karene hvor det innerste er med fisk (bak forhenget), og det ytterste er uten fisk (nærmest i bildet).



(b) Oversikt over plasseringen til hydrofonene i stort kar med fisk.

Figur 14: Karene på SINTEF, hvor (a) er bilde av begge kar og (b) viser hvordan hydrofonene er plassert i kar med fisk.

I tidsplanen for målingene ble det gjort endringer fra forsøk på SeaLab. Tidsplanen ble endret til å ha en lengre fase med måling uten stress fra start, som vises i figur 15. Hvert femte minutt ble temperatur [C°] og oksygenmetning [mg/l] avmålt. Det ble tatt notater med tidspunkt for hendelser og lyder i rommet som kunne påvirke lydene i karet. Mot slutten av tidplanen (50 minutter ut i forsøket) ble stressfasen startet, som i dette tilfellet var håndfôring. Stressfasen ble flyttet senere i opptaket for å øke graden av habituering, og minimere stresset fram til fôringen, da fisken var svært skvetten. Håndfôringen ble utført så lenge fisken spiste, og når fôr (pellets) begynte å legge seg på bunnen av karet stoppet fôringen (2-3 min). Etter dette fortsatte lydopptaket til det hadde gått 60 min.

Dato/Sted	Scenario/fase	Størrelse fisk	Antall fisk	Kar (volum/bredde/høyde)

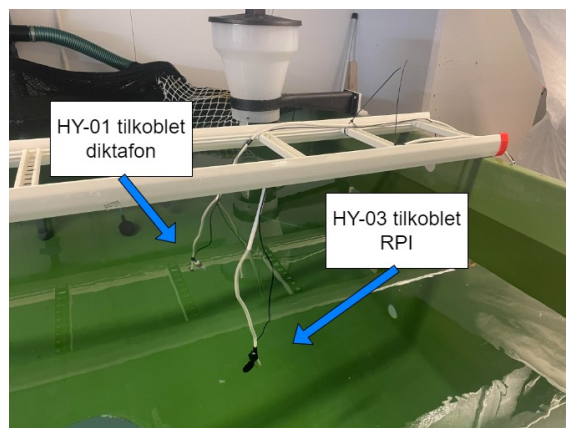
Blå = fase0: langtids/hvile Grønn = fase1: stress/før Orange = Fase2: hvile

Lydopptak Starttid (n):	Oksygen [mg/L]	Temp [C°]	Kommentarer	Fiilnavn
n+ 0 min				
n+ 5 min				
n+ 10 min				
n+ 15 min				
n+ 20 min				
n+ 25 min				
n+ 30 min				
n+ 35 min				
n+ 40 min				
n+ 45 min				
n+ 50 min				
n+ 55 min				

Figur 15: Notatark brukt ved forsøk hos SINTEF. Langtids/hvile i blått, stressfase i grønt og hvile i orange.

Forsøket i kar med fisk ble utført tre ganger. Det første forsøket startet kl. 09.15, men ble stoppet etter et kvarter da det viste seg at utstyret ble montert feil. Dette opptaket ble derfor ikke brukt videre i analyse. De to neste forsøkene, to og tre, startet henholdsvis kl 09.31 og kl. 10.33, med kort tid i mellom. Forsøket ble gjennomført to ganger fullstendig for å kunne dokumentere reproduserbarheten til forsøket, samt skaffe mer måledata.

I kar uten fisk ble samme metode benyttet som i kar med fisk, inkludert håndføring, til tross for et tomt kar. Figur 16 viser hvordan hydrofonene ble plassert i karet uten fisk. Dette ble gjort for å gjenskape lyden en pellet lager når den treffer vannoverflaten. Forsøk i kar uten fisk ble gjennomført kun en gang.



Figur 16: Oversikt over kar uten fisk SINTEF, med plassering av hydrofonene i karet.

3.6 Analyse

For å analysere lydopptakene ble det benyttet forskjellige datadrevne metoder i Python. Utviklingen av analyseprogramvaren involverte bruk av kunstig intelligens, primært for feilsøking og kodegenerering. Verktøy som GitHub Copilot og ChatGPT 4.0 ble brukt til disse formålene. Før analysen kunne starte, var det nødvendig å konvertere .WAV-filer til arrays. Dette ble gjort med ”wave” rammeverket. Lydfilene ble organisert i arrays med navnene `cxfy_z`, hvor ’x’ indikerer størrelsen på beholderen (0 for liten, 1 for stor), ’y’ indikerer om beholderen var tom (0) eller inneholdt fisk (1), og ’z’ representerer opptaksnummeret, oppsettet vises i 5 og Pythonkoden vises i vedlegg A

3.6.1 Analyseverktøyene Audacity og Python

Audacity er en åpen kilde programvare for å redigere og analysere lydfiler (Audacity, 2024). Programmet kan presentere lydklipp, i form av bølgeform og spektrogram. Audacity er brukt til å få oversikt over lydfilene og for å se nærmere på tidsperioder som er relevante for videre analyse med Python. Det ble besluttet å bruke Python for å utføre analyser og lage grafer. Python har flere gode bibliotek for opptak og bearbeiding av lydfiler, blant annet Librosa, Wave og Scipy, som er blitt brukt, for beskrivelse se vedleggA

3.6.2 Databehandling

Etter lydopptak ble lydfilene fra RPI flyttet til PC ved hjelp av SCP protokollen over internett. Deretter ble opptakene lastet opp i en felles arbeidskanal i skytjenesten Teams.

De to første opptakene gjort med målerigg 1 på SeaLab (T1 og T2) måtte samples om igjen (*resample*) for at lydopptakene skulle ha korrekt varighet. Årsaken til feilen var at koden som håndterte opptaket ikke lagret opptaket på riktig måte. Opptaket ble samlet som 88,2kHz, men lagret i henhold til CD standarden for samling som er 44,1 kHz, og gjorde at opptaket varte i 10 min i stedet for 5min. Måten resamplingen ble gjort var ved å benytte Audacity sin eksporteringsfunksjon for å resample opptakene. Det førte ikke til informasjonstap da det var korrekt antall samples, men feil avspillingshastighet.

Opptakene med diktafon ble lastet opp fra SD-kort direkte til Teams ved hjelp av PC. Opptakene ble videre delt opp i 5 min intervaller.

3.6.3 Fouriertransformasjon

Analysen ble basert på fouriertransformasjon, spesifikt ”Short-Time Fourier Transform” (STFT), for å undersøke dynamiske frekvensendringer over tid. Det ble benyttet ”signal.stft” modulen fra SciPy, selv om den er markert som foreldet. ”Hann” vindusfunksjonen ble valgt siden den ga de beste resultatene i forsøksdataen. Variabelen ’nperseg’ bestemmer tidsopløsningen, og ble justert dynamisk basert på lengden av x-aksen som skulle analyseres, for å balansere mellom detaljnivå og unngå matematiske artefakter.

3.6.4 Power spectral density plot

Fouriertransformasjonen og beregning av ”power spectral density” (PSD) ble gjennomført i samme kodeblokk for å øke effektiviteten. Datamaskinen som ble benyttet hadde tilstrekkelig minne til å behandle transformasjonen, som gjorde at analysene kunne kjøres raskt. PSD ble beregnet ved å bruke $psd = \text{numpy.abs}(Zxx)^2$. Deretter ble gjennomsnittlige PSD-verdier (psd_avg) beregnet. Funksjonen ‘calculate_psd_stft’ returnerte to lister: en med frekvensene (f) og en med de gjennomsnittlige PSD-verdiene for disse frekvensene ($psd_avg(f(x))$). Verdiene ble visualisert med Matplotlib, og data fra forskjellige opptak ble kombinert for en helhetlig bilde. For hvert 5. minutt sekvens er det gitt en linje i plottet. I plottene ble det også programmert en funksjon slik at PSD i stressperiode fikk stiplede linje (se figur 26 og 28).

3.6.5 Spektrogram

For å få et bilde på hvordan lyden endret seg over tid ble det først programmert et program som produserte spektrogram i Python. Dette ble gått bort fra, da Audacity var en mer versatil programvare og lettere å håndtere. Det ble ikke gjort filtrering eller forsterkning av spektrogrammene for å bedre sikten. Fordelen med dette var at det ble vist nøyaktig hva som hadde blitt målt. Skjermbilder av de ulike lydopptakene ble lastet opp til resultatene.

3.6.6 Særundersøkelse av knitrelyd

Denne delen av studien fokuserte på detaljert analyse av knitrelyder i opptakene. For å utføre analysen, ble oppløsningen av spektrogrammet forbedret slik at hvert bilde representerte en tidsperiode på 2-3 sekunder. Det gjorde det mulig å identifisere og telle antall tilfeller av knitrelydsignaturer i hvert 5-minutters segment av lydopptaket. En knitrelydsignatur ble definert som isolerte lyder med mer enn 1 sekunds intervall mellom hver gruppe av ”klikk”. En gruppe av klikk måtte minimum ha tre repetitive klikk etter hverandre

I større kar ble det observert færre knitrelyder. På grunn av færre tilfeller, ble hver knitrelyd nøye annotert med tidspunkt i et Excel-ark for å lette videre analyse. Resultatene fra denne undersøkelsen ble visualisert ved bruk av Python-biblioteket Matplotlib. For spesielle tekniske detaljer og tilpasninger som ble gjort under denne prosessen, se vedlegg A.

For å undersøke om bobler i vann lignet på knitrelydenes karakteristikk ble det utført et forsøk hvor det ble tatt lydopptak i en bolle med kullsyrevann. Hensikten med forsøket var å produsere en lydfil hvor luftbobler som popper var tilstede. Forsøket ble utført ved å redigere lydopptak til å vare i 5 sekund istedet for de 5 minuttene som ble benyttet på de tidligere opptakene.

4 Resultater

Resultatene presenteres i den rekkefølgen de er blitt bearbeidet. De følger forsøkenes gang fra SeaLab til SINTEF, og det presenteres først spektrogrammene, deretter lydintensitetsanalyse og til slutt en nærmere undersøkelse av en knitrelydsignatur som ble funnet i opptakene. Resultatene er produsert på bakgrunn av opptakene fra målerigg 1, da målerigg 2 viste seg å inneholde så mye støy at det ikke ble brukt videre.

4.1 Oversikt over opptak og datagrunnlag

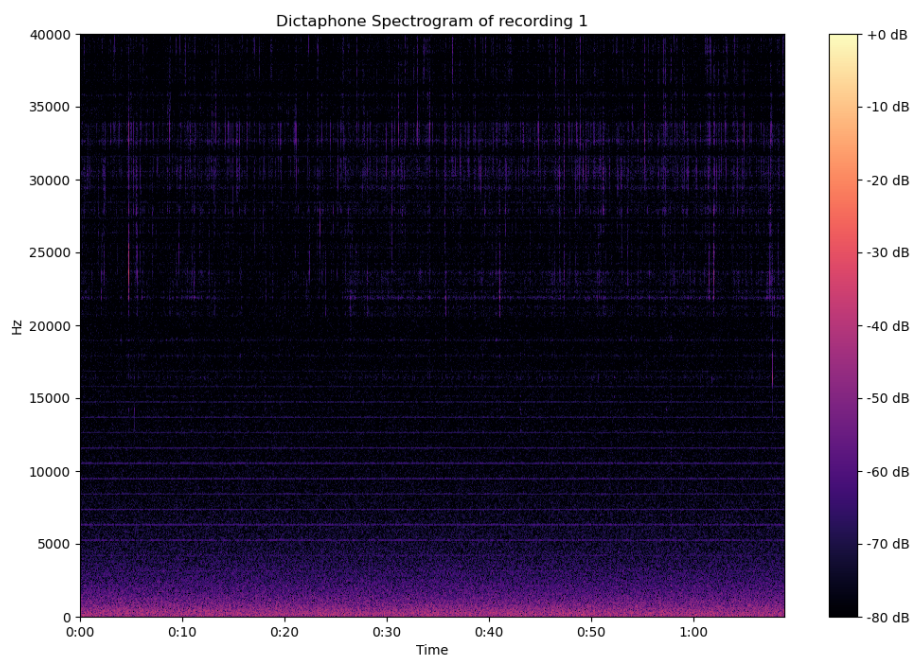
Det var nødvendig å lage en oversikt over de ulike opptakene for å gjøre det enklere å holde orden på dem. Det ble derfor laget en tabell som gjør det enklere å skille mellom om det er opptak fra kar med eller uten fisk, og om det er stort eller lite kar.

Tabell 5: Oversikt over alle opptakene med forskjellige navn og egenskaper

Test No.	Opptaksnavn	Python navn	Kar	Fisk?	Opptak lengde [min]
T1	litekar_utenfisk_forsok_1	c0f0_0	lite	tomt	60
T2	Litekar_medfisk_forsok_1	c0f1_0	lite	med fisk	60
T3	3Litekar_medfisk_forsøk_2	c0f1_1	lite	med fisk	60
T4	4Litekar_utenfisk_forsøk_2	c0f0_1	lite	tomt	40
T5	2Storkarstorfisk	c1f1_0	stor	med fisk	60
T6	2VidereopptakStorkarStorfisk	c1f1_1	stor	med fisk	60
T7	2StortkarUtenfisk	c1f0_0	stor	tomt	60

I tabell 5 er det en oversikt over de forskjellige navnene for opptakene som brukes iløpet av prosjektet. "Test No." viser hvilket forsøksnummer hvert av opptakene er i kronologisk rekkefølge. "Opptaksnavn" viser navnet til filene slik den ble lagret på målerigg 1. "Python navn" er navnet til opptaket som er blitt brukt under analyse og behandling av data (som forklart i starten av kapittel 3.6). Kolonnen "Kar" viser om det er opptak fra et lite eller stort kar som er blitt brukt, og dermed også om opptaket er fra forsøk på SeaLab (lite kar) eller SINTEF (stort kar). "Fisk?" viser om opptaket er fra kar med eller uten fisk. Den siste kolonnen "Opptak Lengde [min]" viser hvor lang tid opptaket varte. For T4 varte opptaket kun i 40 min på grunn av at begge måleriggene gikk tom for strøm.

4.1.1 Opptak diktafon



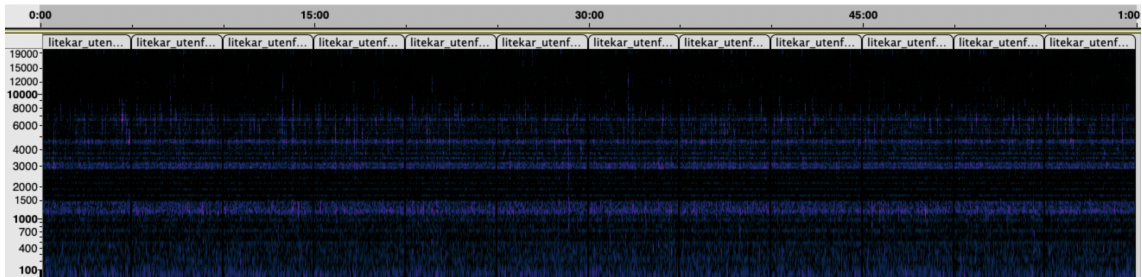
Figur 17: Spektrogram over første opptak gjort av målerigg 2 på SeaLab. Her er det mye støy i 0 kHz - 5 kHz. Fra 5 kHz er det tydelige støy linjer for hver 1 khz vider opp til 40000 kHz.

Målerigg 2 har som vist i figur 17 mye støy. Det er mest støy fra 0 til 5 kHz, men mest prevalent fra 0 til 1 kHz. Videre ser vi konstante støylinjer omtrent ved hver 1 kHz. Signaler fra 20 kHz til 35 kHz viser overtoner som samsvarer med støy sett i det første minuttet i T1, dette er dog utenfor det hørbare spekteret for mennesker. Opptakene for målerigg 2 ble derfor på grunn av all støyen ikke benyttet videre i analyse da denne støyen var fremtredende i alle opptakene.

4.2 Opptak - SeaLab

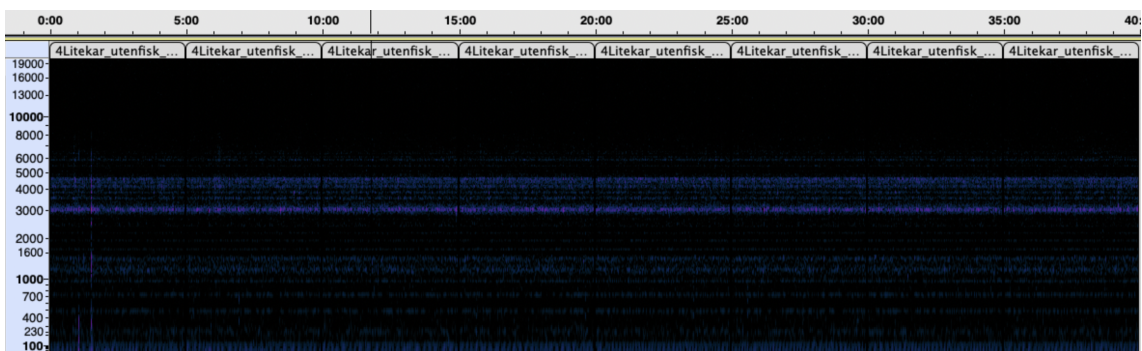
Det ble utført 4 opptak på NTNU SeaLab sitt laboratorie. T1 og T4 er opptak uten fisk, T2 og T3 er opptak med fisk. Opptakene foregikk på dagtid, samtidig som det var andre i laboratoriet.

4.2.1 Opptak - SeaLab - uten fisk



Figur 18: Spektrogram fra opptak T1, lite kar uten fisk. Her er det tydelig å se støybelter på frekvensene 1 kHz til 1,5 kHz, også flere støybelter rundt 3 kHz, 4,5 kHz og 7 kHz. Spektrogrammet viser hele det 60 minutter lange lyd opptaket. Skjerm bilde fra Audacity

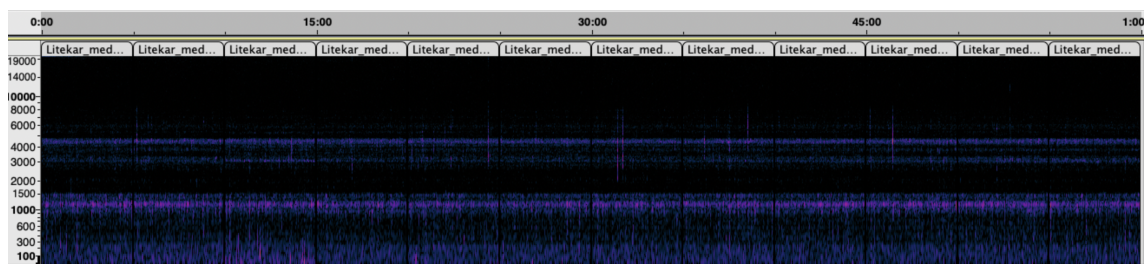
Figur 18 viser spektrogram over lite kar uten fisk i forsøk T1. I området fra 1 kHz til 1,5 kHz er det et tydelig støybelte, som strekker seg over hele perioden. Det er også flere støybelter ved 3, 4,5 og 7 kHz. I perioder var det andre personer til stede på labområdet mens opptakene for forsøket ble gjort, som kan ha forårsaket ulike utslag på spektrogrammene.



Figur 19: Spektrogram fra opptak T4, lite kar uten fisk. Her er det tydelig å se et støybelte på rundt 3 kHz og rundt 5 kHz. Ved 1,5 er det tydelig en utslag i lyden som strekker seg på tvers av frekvensene. Spektrogrammet viser hele det 40 minutter lange lyd opptaket. Skjerm bilde fra Audacity

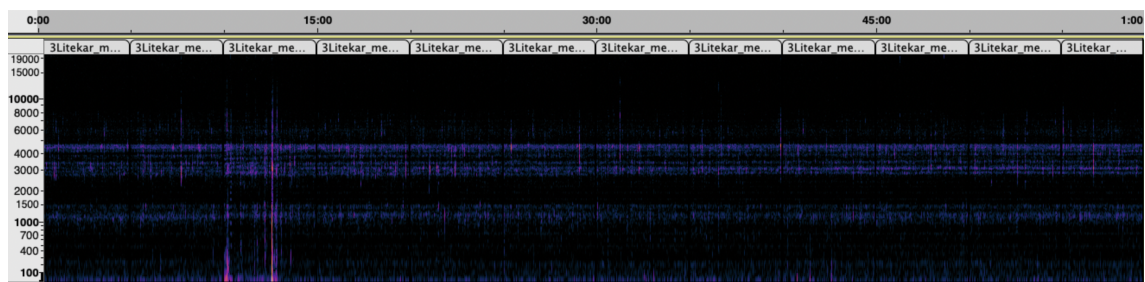
I figur 19 viser et spektrogram over lite kar uten fisk i forsøk T4. Her ser det ut som om det er en svakere lydintensitet i frekvensområdet fra 1 kHz - 1,5 kHz enn i figur 18. I frekvensområdet rundt 3 kHz ser det ut til å være sterkest lydintensitet. 1,5 min ut i forsøket er det tydelig et utslag i lydintensiteten på tvers av flere frekvenser.

4.2.2 Opptak - SeaLab - med fisk



Figur 20: Spektrogram fra opptak T2, lite kar med fisk. Her er det et tydeligere lydsignal i de lavere frekvensområdene 0 kHz - 0,3 kHz, rundt 1 kHz. Spektrogrammet viser enkelte utslag i fra 10 - 15 minutter ut i forsøket under stressfasen for fisken. Skjerm bilde fra Audacity

Spektrogrammet av opptak T2 som er vist i figur 20 viser en høyere lydintensitet i frekvensområde fra 0 til 0.3 kHz, 1 til 1.5 kHz og rundt 4 kHz. Stressfasen varte fra 10. minutt til 13. minutt, som ga et lite utslag da det kun var kikkelukka som ble åpnet. Aktiviteten i karet gikk opp og fisken plasket mer i overflaten. 15 minutter inn i opptaket ble en dør i nærheten av karet smelt igjen. Spektrogrammet vist i figur 20 er mer irregulært sammenlignet med spektrogrammene i figur 18 og 19 ovenfor som er for kar uten fisk.



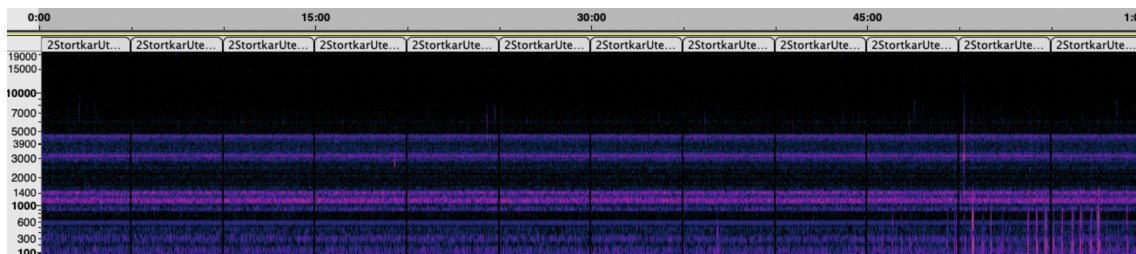
Figur 21: Spektrogram fra opptak T3, lite kar med fisk. Her er det to tydelige utslag (vertikale linjer) i spektrogrammet i starten og slutten av stressfasen ved 10. og 13. minutter som mest sannsynlig er åpning og lukking av hele lokket. skjerm bilde fra Audacity

For det andre forsøket for lite kar med fisk (T3) er det tydelig større utslag på lydintensitet i stressfasen fra det 10. til 13.min, som vist i figur 21. De to tydelige utslagene (de to vertikale linjene) er et resultat av at hydrofonen flyttet på seg i forbindelse med at lokket til karet blir lukket og åpnet, som skjer henholdsvis i 10. og 13. minutt ut i forsøket. Det er tydelig å se at lydbildet i figur 21 er påvirket av beslutningen om å åpne hele lokket i stedet for bare kikkelukken, sammenlignet med spektrogram i opptak T2 i figur 20.

4.3 Opptak - SINTEF

Her presenteres det spektrogrammer fra de tre opptakene gjort på SINTEF. T7 gjelder for opptak uten fisk, mens T5 og T6 gjelder for opptak med fisk.

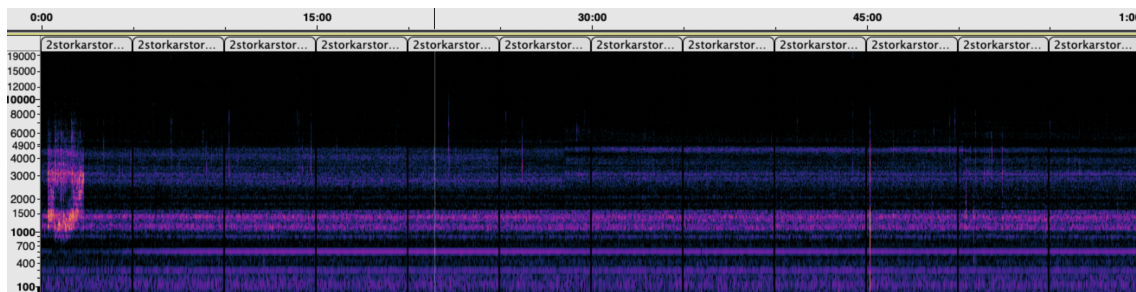
4.3.1 Opptak - SINTEF - uten fisk



Figur 22: Spektrogram fra opptak T7, stort kar uten fisk. Viser et stabilt lydbilde de første 50 minuttene. I mellom 50 og 60 minutter er det tydeige periodiske utslag i spektrogrammet, som trolig kommer av fôret som blir spredt i karet og dunke lyder i forbindelse med selve fôringen. Skjerm bilde fra Audacity

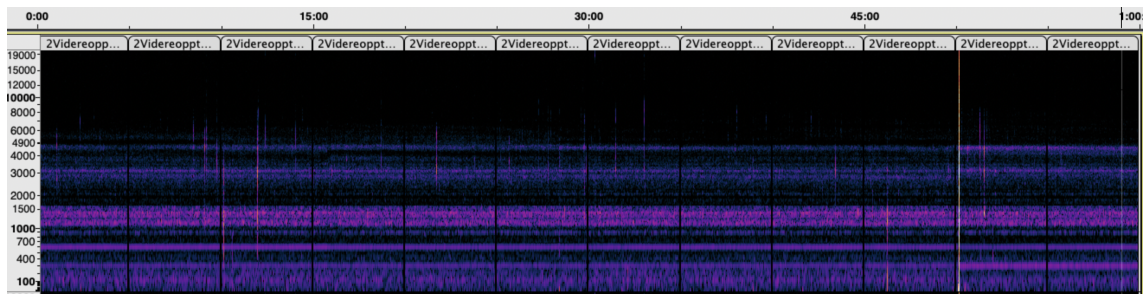
Opptak T7 (figur 22) viser et stabilt lydbilde for de første ca 50 min i forsøket. Støyen som kommer fra 50 min og utover er lyd fra stressfasen, hvor fôr (pellets) blir spredt ut i karet. Noen av lydutslagene er trolig et resultat av dunking i karet i forbindelse med fôringen.

4.3.2 Opptak - SINTEF - med fisk



Figur 23: Spektrogram fra opptak T5, stort kar med fisk. Første to til tre minuttene er støy fra oksygenering av karet, etter 45 min i forsøket er det en stekt utslag av ukjent kilde. Under stressfasen er det flere lydutslag i forbindelse med fôring. Skjerm bilde fra Audacity

I opptak T5 (figur 23) er det tydelig støy i de første 3 minuttene. Støyen skyldes oksygenering av karet gjennom oksygenknuseren. Den høyeste lyden registrert ved 45 minutter er ikke knyttet til noen kjent hendelse og har derfor en ukjent kilde. For stressfasen, 50 minutter ute i opptaket, er det flere vertikale linjer for den 3 min lange stressperioden, som inkluderer fôring med pellets.

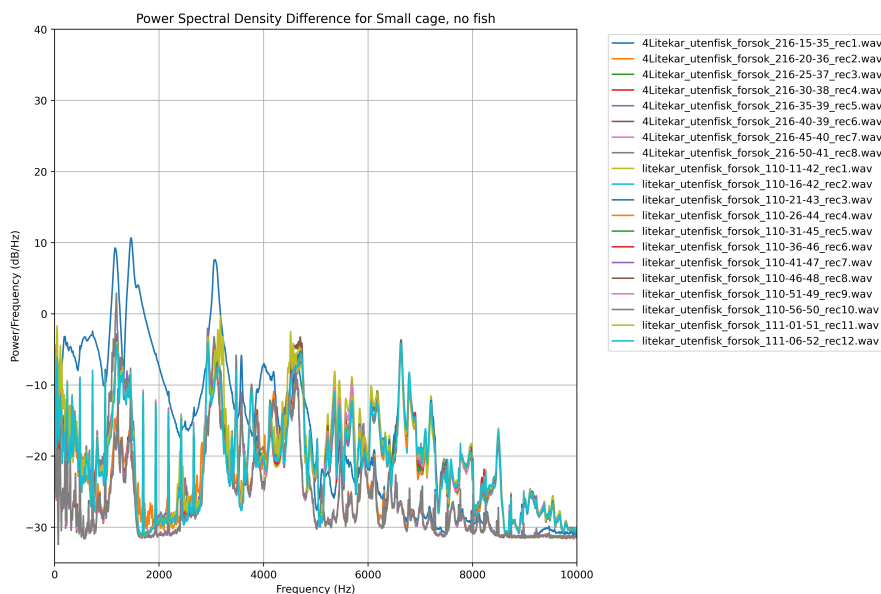


Figur 24: Spektrogram fra opptak T6, stort kar med fisk, Her er det flere vertikale utslag etter 10 minutter, 13 minutter, 22 minutter og 47 minutter som trolig er fisk som dunker i kar. Etter 50 minutter er det flere lyd utslag i stressfasen i forbindelse med føring. Skjembilde fra Audacity

Opptakene T5 og T6, ble gjort kontinuerlig etter hverandre, med omtrentlig 30 sekunder dødtid mellom de to lydopptakene. Opptak T6 (figur 24) er det flere vertikale lydutsalg, med ukjent årsak: 10 minutter, 13 minutter, 22 minutter og 47 minutter. Lydutslagene er ikke registrerte hendelser fra labrommet, og disse mest sannsynlig dunkelyder fra laksen. Ved 50 minutter er det vist samme type lydutsalg over 2-3 minutter som under stressfasen, slik som i T5 (figur 23).

4.4 Lydintensitetsanalyse

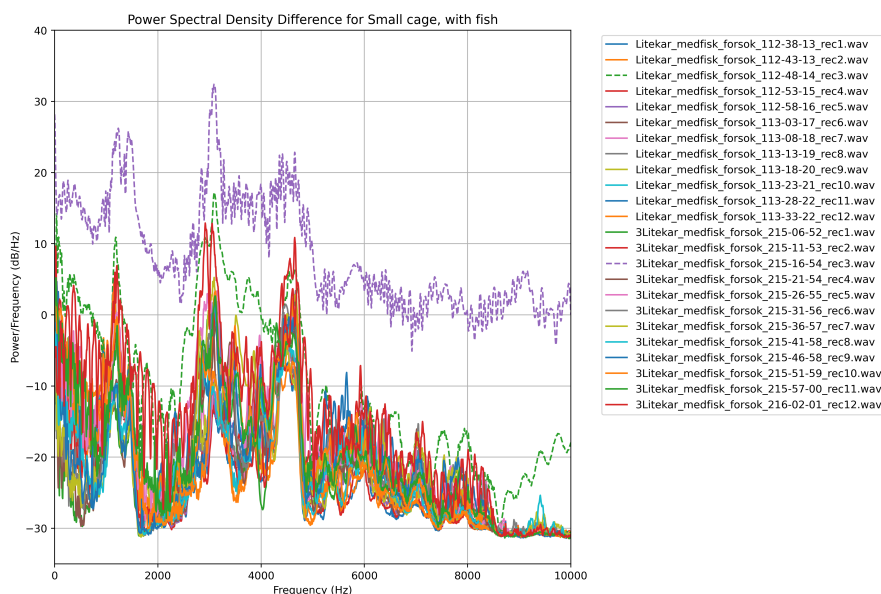
Plottene under viser den gjennomsnittlige PSD for hvert fem minuttersopptak som ble utført i forsøkene. Det er stor variasjon i støygulvet mellom opptakene, som indikerer at det er områder med frekvenser hvor det er mer bakgrunnstøy. Striplede linjer viser fem minuttersopptaket som dekker stressfasen i hvert av forsøkene med fisk.



Figur 25: PSD plott av alle de oppdelte fem min opptakene fra lite kar uten fisk i T1 og T4. Den horisontale aksene viser frekvensen [Hz] og den vertikale aksene viser intensiteten uttrykt som power/frequency [dB/Hz]. Her ser man et støygulv ved 1.7 kHz, 1.8 kHz, 3 kHz og 4 kHz. Grafen er laget ved bruk av Python

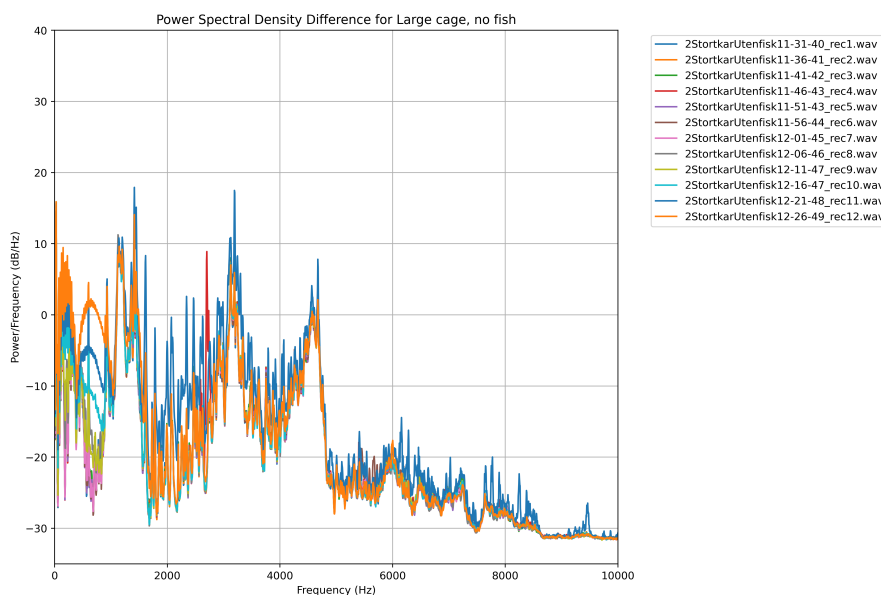
Plottet i figur 25 er et resultat av PSD analyse for begge opptakene i lite kar uten fisk. Figuren viser et støygulv ved 1.7 kHz, 1.8 kHz, 3 kHz og 4 kHz. Et forhøyet støygulv viser til hvilke frekvenser

som har en mer intens bakgrunnstøy. Det angir det laveste intensitet som er målt i frekvensområdet. Grafene for de forskjellige opptakene korrelerer i frekvensområdet. Den blå grafen, som kommer fra stressfasen i opptak T1, har jevnt over en høyere intensitet i frekvensområdet 0 - 5000 Hz. Det er et avvik mellom opptakene T1 og T4 i frekvensområdet 6.5 kHz til 10 kHz.



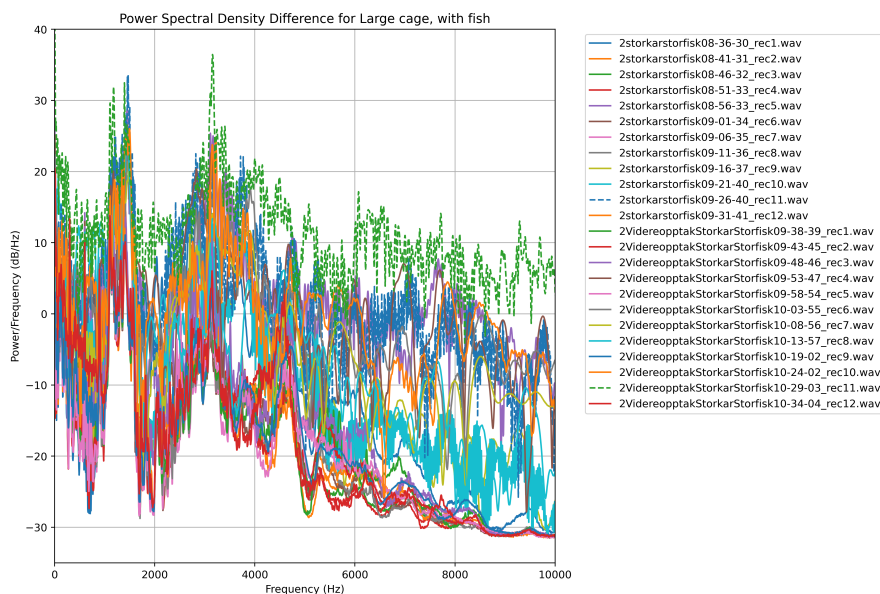
Figur 26: PSD plott over alle opptak i T2 og T3 fra lite kar med fisk. Den horisontale aksene viser frekvensen [Hz] og den vertikale aksene viser intensiteten uttrykt som power/frequency [dB/Hz]. Her ligger et forhøyet støygulv rundt 1 kHz, 3 kHz og 4,5 kHz. Stripplete opptak for stressfasen (i rosa og grønn) har et betydelig høyere støygulv over hele frekvensspektret. Graf laget ved bruk av Python

PSD plottet i figur 26 viser at lavfrekvente lyder er mer tilstedet i kar med fisk enn uten. De to striplete linjene er opptak hvor det er stressperiode. Disse ligger på et høyere [Db/Hz] nivå enn de andre opptakene. Figur 26 viser også et tilsvarende støygulv som opptakene uten fisk, se figur 25.



Figur 27: PSD plott for stort kar uten fisk. Den horisontale aksene viser frekvensen [Hz] og den vertikale aksene viser intensiteten uttrykt som power/frequency [dB/Hz]. Støygulvet er høyt rundt 250 hz, 1,5 kHz 3 kHz og 4,75 kHz. Grafen er laget ved bruk av Python

Figur 27 viser PSD plott over stort kar uten fisk. Grafene viser flere støygulv ved ca 250 Hz, 1.5 kHz, 3kHz og 4.75kHz. Opptakene under og etter stressfasene 11 og 12 avviker fra de andre opptakene i 500 Hz området.

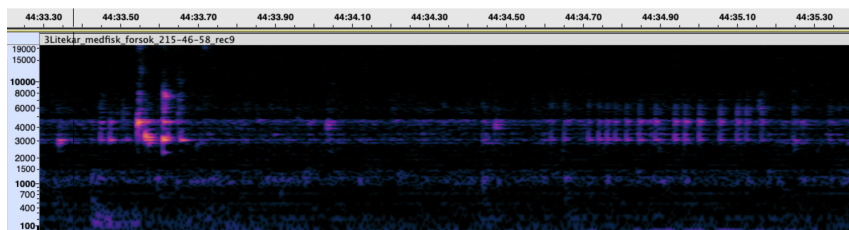


Figur 28: PSD plott over stort kar med fisk. Den horisontale aksene viser frekvensen [Hz] og den vertikale aksene viser intensiteten uttrykt som power/frequency [dB/Hz]. Støygulvet er høyt ved 250 kHz, 1,5 kHz, 3 kHz og 4,75 kHz. Grafen er laget ved bruk av Python

Figur 28 viser også et støygulv ved ca 250 Hz, 1.5 kHz, 3kHz og 4.75kHz. De striplede linjene gjelder for opptak 11 i forsøk T5 og T6 gjort i stressfasen. Ellers ser vi at grafen er svært sporadiske. Dette indikerer at lyd miljøet i karene har endret seg aktivt over tiden opptaket varte.

4.5 Funn av knitrelyd

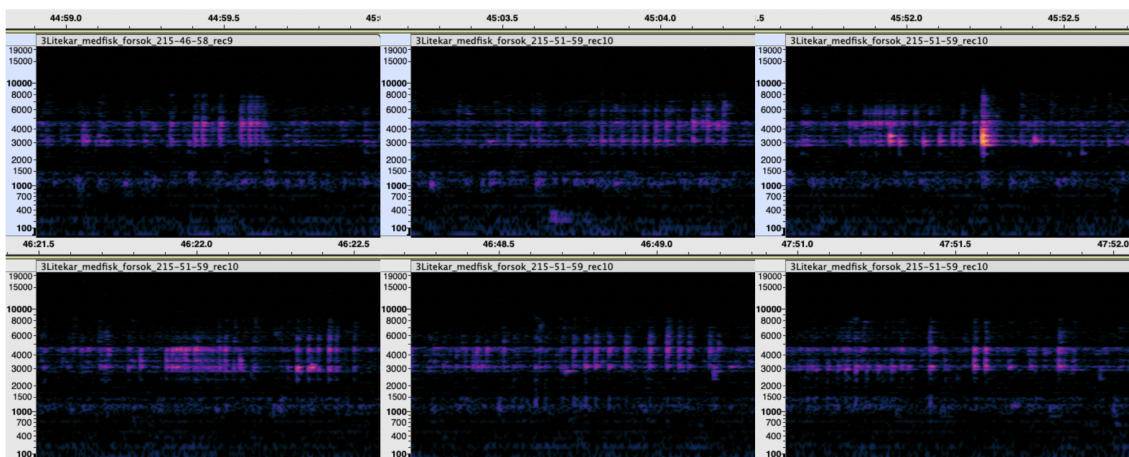
Ved nærmere gjennomgang av opptakene ble det funnet en knitrelyd, som ble spennende å undersøke nærmere da det ble omtalt en knitrelyd i tidligere forskning. Resultatene av dette ble et funn av noe som kan være en knitresignatur og presenteres videre.



Figur 29: Knitresignatur i spektrogram, fra opptak i lite kar med fisk. Til venstre i figuren er det et en mulig plaskelyd og til høyre i bildet er det 16 individuelle klikk som utgjør lydsignaturen Skjerm bilde fra Audacity

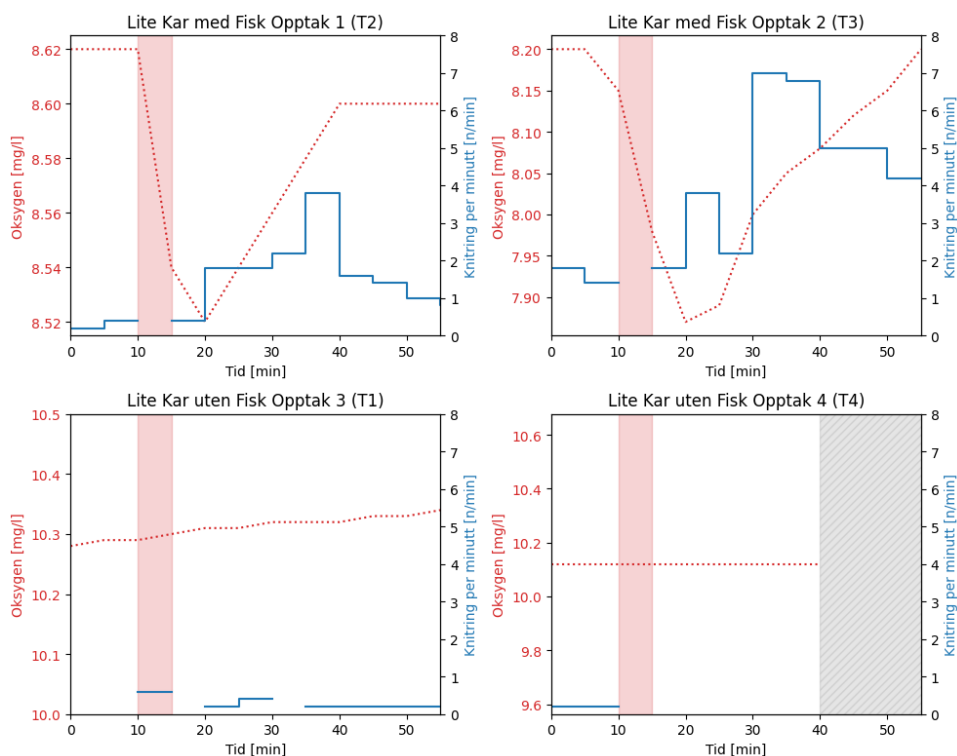
Figur 29 viser en form for knitresignatur. Lyden varer i litt over 0,6 s og inneholder 16 individuelle klikk, fra ca. 44:34:65 til 44:35:25, til høyre i spektrogrammet. Lydsignaturen kan beskrives som raskt repetitive tikkelyder "FRT". Klikkene registreres fra ca 3 kHz til 7.5 kHz. Knitrelyden har

ingen utslag på lavere frekvenser. Lyden til venstre i bildet er av usikker kilde, men kan høres ut som et plask. Hvert individuelle klikk varer i 0.004-0.006 sekund.



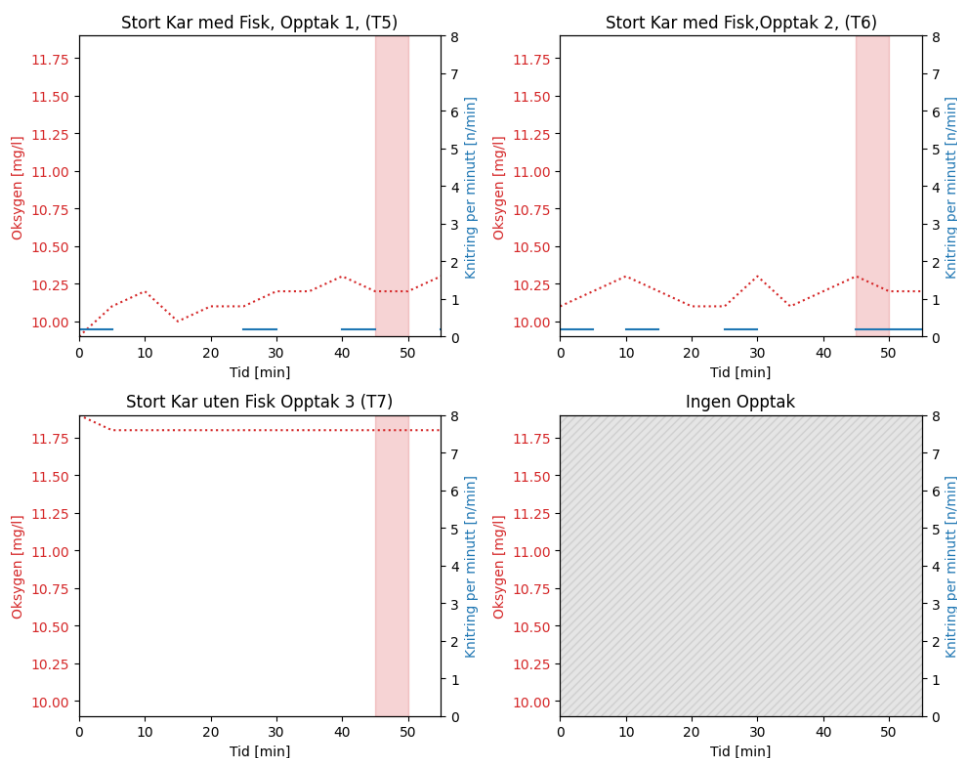
Figur 30: Seks tilfeldig utvalgte knitresignaturer fra T3. X-aksen for samtlige utsnitt er satt til omtrent ett sekund. Utsnittene er fra Audacity

De 6 individuelle knitresignaturene vist i figur 30 er en representasjon av forskjellige knitreltyder. Alle lydopptakene er fra T3, men signaturene er like på tvers av ulike lydopptak. Lydene kjenntegnes av at de varierer både i intensitet og frekvensområde over tid i signaturen. Lydpulsene registreres til å gå fra 3 kHz til 7.5kHz.



Figur 31: Grafisk framstilling av oksygeninnhold [mg/l] og antall klikk hørt i min [n/min] over tid for hver av de fire forsøkene i lite kar med og uten fisk. Venstre y-akse viser oksygen i kar over tid, høyre y-akse viser antall klikk hørt i minuttet. Rødt markert område(10-15 min) markerer stressfasen. Grått skravert område viser at opptaket i T4 bare ble 40 min langt.

Den blå grafen i figur 31 viser at antall knitresignaturer per minutt øker etter stressperioden for begge kar med fisk og uten fisk hos SeaLab. Det var ca. 140 fisk i hvert av karene, og en markant nedgang i oksygeninnholdet i vannet i de to karene med fisk fra stressfasen blir igangsatt. I karene uten fisk er det registrert noen få tilfeller av knitresignaturer. Disse lydene kommer ikke fra fisk og er fra andre ukjente kilder. I karene med fisk er det registrert flest knitrelyder mellom 30 og 40 minutter, dette er 20-30 minutter etter stressor. Grått felt for Opptak 4 (T4) viser at lyd etter 40 minutter ikke eksisterer, da måleriggen gikk tom for strøm.



Figur 32: Grafisk framstilling av oksygeninnhold [mg/l] og antall klikk hørt i min [n/min] over tid for hver av de tre forsøkene i stort kar med og uten fisk. Venstre y-akse viser oksygen i kar over tid, høyre y-akse viser antall klikksignaturer hørt i minuttet. Rødt markert område (45-50 min) markerer stressfasen

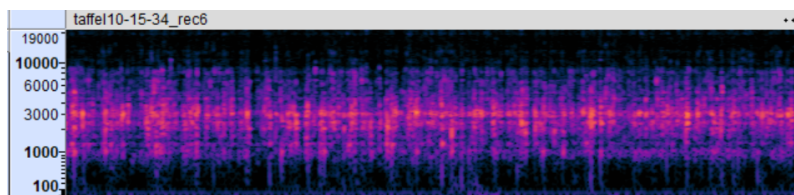
For stort kar på SINTEF ble det registrert betydelig færre tilfeller av knitrelyder. I figur 32 er det vist at antall knitrelyder per minutt er under 1 i begge opptakene med fisk (T5 og T6). Målingene gjort på SINTEF, som vist i figur 32, viser færre tilfeller av knitrelyder registrert. Det var kun 19 fisk i karene på SINTEF, og oksygenet for opptakene med fisk (T5 og T6) varierer mellom 9.9 mg/l og 10.3 mg/l oksygen.

I opptak 3 (T7) for stort kar uten fisk ble det ikke registrert knitrelyd (figur 32 nede til vestre). Her er oksygenivået stabilt rundt 12 mg/l.

Tabell 6: Resultatene viser knitresignaturer telt per time per fisk, med stresskilde inkludert.

Tidsperiode	Antall Signaturer	Resultat	Stresskilde
T2	78	$78/119 \approx 0.66$	Åpning av kikkelukke
T3	216	$216/119 \approx 1.81$	Åpning av hele lokket
T5	4	$4/19 \approx 0.21$	Føring
T6	6	$6/19 \approx 0.31$	Føring

Det ble identifisert henholdsvis 78, 216, 4 og 6 knitresignaturer i T2, T3, T5 og T6. I T2 og T3 var det ca. 140 fisk i karet, og i T5 og T6 var det 19 fisk. Ved å dele på antall fisk, kan vi få en indikasjon på hvor ofte hver fisk lager denne lyden.



Figur 33: Undersøkelse av boblefrekvens i bolle med taffel. Stekest lydintensitet signal i frekvensområdet 2 kHz til 4 kHz. Skjerm bilde fra Audacity

Figur 33 viser spektrogrammet for lydopptak av en kjøkkenbolle fylt med kullsyrevann. Den eneste lydkilden i karet er kullsyrebobler. Frekvensområdet til opptaket går fra 1 kHz til 10 kHz, men med hovedstyrken fra 2 kHz til 4 kHz.

5 Diskusjon

I resultatene er det flere interessante funn som gir innsikt i lyder fra miljøet og fisk i kar. Det blir først rettet fokus mot hovedfunnene, og deretter diskutert andre funn, måleriggen, og forsøkene. På denne måten blir de mest signifikante resultatene diskutert først.

5.1 Knitrelyd

Knitrelyden funnet i karene med fisk ligner på lydene definert som "fast repetitive tick" (FRT) og "very fast repetitive tick" (VFRT) i "*Air Movement Sound Production by Alewife, White Sucker, and Four Salmonid Fishes Suggests the Phenomenon is Widespread Among Freshwater Fishes*" (Rountree, Juanes og Bolgan, 2018). Lydene som blir tilegnet atlantisk laks i ferskvann, i figur 3, viser plask og deretter knitresignaturen. Denne sammenhengen er vanlig i lydopptakene og vises i figur 29. For å forstå årsaken til knitresignaturen er det nødvendig å utføre forsøk med kameraopptak fra samme tidsperiode. Dette kan oppnås ved å filme fisken samtidig som lydopptakene gjøres. Et godt oppsett vil inkludere ett kamera under vann og ett kamera over vann for å observere når fisken bryter overflaten, og om den slipper luftbobler.

Delrapporten fra OWITOOOLS "*rapport bruk av lydbilde for velferdsovervåkning ved operasjoner i et oppdrettsanlegg*" (Volent mfl., 2022), beskriver hvordan en individuell knitrelyd er, med hovedmengde av lyd mellom 3-8kHz og hver individuelle lyd varer 1-2 hundredeler. Rapporten (Volent mfl., 2022) viser ikke til knitrelyden sin signatur selv om en kan se tre individuelle klikk i plottet på side 13. Derfor er det vanskelig å si om det er funnet tilsvarende knitrelyder i dette prosjektet som i rapporten.

Forsøket utført med kullsyrevann i bollen viste en lydsignatur lignende den som ble funnet i knitrelydene. Amplituden til boblene i opptaket var sterkere, men det kan være på grunn av liten distanse i bollen. I rapporten (Rountree, Juanes og Bolgan, 2018) presenteres det flere muligheter for hva lyden kan være, og at den kan være lyd fra overskuddsluft som fisken slipper ut etter å ha snappet luft. Dette samsvarer med våre funn, hvor det observeres en korrelasjon mellom en sterk lyd etterfulgt av knitrelyd. Den sterke lyden antas å være fisken som bryter overflaten. Deretter svømmer fisken ned til ønsket flytedybde hvor den slipper luft for å oppnå nøytral oppdrift.

For å gi mer troverdighet til påstanden om at knitrelyden skyldes luftutslipp etter snapping for oppdriftsregulering, bør det utføres forsøk hvor det blir tatt video- og lydopptak samtidig. I (Rountree, Juanes og Bolgan, 2018, s. 27) understrekes også behovet for bedre datagrunnlag for å dokumentere og kartlegge lyd miljøet i scenarioene vist i figur.2.

For antall lydsignaturer per time per fisk som vist i tabell 6, er det registrert svært varierende antall signaturer mellom forsøk på SeaLab og SINTEF. Det kan være ulike faktorer påvirket forsøket, for eksempel ble de forskjellige karene utsatt for ulike typer stressorer over ulik lengde. For lite kar med fisk i forsøket T3, med stressor som er å åpne lokket, ble det registrert høyest signatur per fisk per time på 1,81, vist i tabell 6). Dette kan indikere at fisken lager knitrelyd flere ganger i timen under forsøk T3. Sammenlignet med lite kar med fisk er det registrert et vesentlig lavere antall sinaturer per time per fisk i stort kar. Differansen mellom kar på SeaLab og SINTEF er vesentlige og gjør at det er usikkerhet i om de definerte knitresignaturene er en indikator på antall ganger laks slipper luft tilknyttet stress. Disse er ikke direkte sammenlignbare ettersom stresset

var vesentlig mer synlig på SeaLab, og nesten ikke tilstedeværende på SINTEF.

5.1.1 Annotering og kvantifisering av lyder

For å representere knitrelydene som ble oppdaget i datainnhenting, måtte det velges en passende datarepresentasjon for å definere disse lydene nøyaktig. Ved å benytte spektrogram i små tidssteg var det mulig å filtrere dem ut fra de andre lydene på en effektiv måte ved å se på signaturen. Lydene ble først oppdaget i det minste karet og hypotesen var at lyden kom av at luft ble sluppet fra fisken, som illustreres i figur 2. Derfor ble det bestemt å annotere knitresignaturer, altså antall ganger det ble observert tre eller flere klikk etter hverandre i spektrogrammet. Det ble ikke skilt på lengde av signalet, så en signatur som varte i 0.2 sekund telte like mye som en signatur som varte i 1 sekund. Ved analyse av stort kar, stor fisk, ble det oppdaget at knitrelydene ikke var like ofte tilstede som i små kar. En av årsakene til dette kan være at det kun var 19 fisk i karet på SINTEF, i forhold til ca. 140 fisk i karet på SeaLab. Det ble også observert en kraftigere stressrespons hos fisken på SeaLab.

Grunnen til at det er registrert knitrelyder i kar uten fisk, er at det ble observert svake lyder som lignet på signaturen i spektrogrammene. Selv om Knitresignaturene i dette karet var svært lave og vanskelig å høre var de til stede i spektrogrammet (falske positive). For videre studier bør det på forhånd bestemmes en konkret avskjæring (*cutoff*). Med avskjæring menes det en avgrensing til amplitude i signalet som er stort nok, slik at en ikke får falske positive registreringer. Ulempen med å ha en for streng avskjæring er at reelle målinger kan bli forkastet (falske negative).

5.2 PSD-analyse

PSD-analysene viser at det er mange kraftige bakgrunnstøykilder i kar både med og uten fisk. I opptakene for SeaLab karene er det første konstante støygulvet på 1.7 kHz, mens i lydopptakene fra SINTEF blir det observert et støygulv ved 250 Hz. Hørselsområdet fra laks er hovedsakelig fra 10 Hz - 400Hz (Popper og Hawkins, 2019). Det viser til at det første støygulvet i opptakene på SeaLab ligger utenfor hørselsområdet til laks, mens det første støygulvet i opptaket på SINTEF ligger innenfor hørselsområdet. Det er usikkert hva som egentlig er lyd fra laksen i PSD-analysen, og det må undersøkes nærmere for å skille mellom passiv og aktiv lyd.

Funnene fra PSD-analysen viser at det er mulig å vise hvilke lydkilder som er konstant til stede. Det er mulig å identifisere pumper ved å se på frekvensene de opererer i, og identifisere andre lydkilder som predatorer og båtstøy. Ved å lære opp en AI til å identifisere ulike lydsignaturer, kan det automatisk registreres hendelser. Ved å bruke informasjonen kan oppdrettere få bedre forståelse for hva som har påvirket fisken. Siden det ikke var et fokusområde i denne oppgaven, har det ikke blitt gjort forsøk på å lære opp en slik modell for å identifisere ulike støykilder.

Siden PSD-plottene som brukes representerer gjennomsnittet av PSD for hvert tidssteg, viser den ikke svake lyder som forekommer over korte perioder. Høye lyder over et kort tidsrom vil fremstå mer markant sammenlignet med lavere lyder som varer over flere sekunder. Dette skyldes at PSD i realiteten reflekterer en kombinasjon av lydintensitet og varighet. For å gi en bedre forståelse av lydintensiteten til et karmiljø, kan det derfor gi mening å bruke kortere tidssteg enn 5 minutter i analysen. Ved å for eksempel ta PSD for hvert sekund og vise dette i en tidslinje, kan det gi en forståelse for hvordan det akutte lyd miljøet er.

5.3 Målerigg

Det var en god avgjørelse å kjøpe inn utstyr for å bygge to uavhengige målerigger, da måleriggen med diktafon (målerigg 2) ikke fungerte optimalt og hadde mye støy i opptakene. På grunn av støy i alle opptakene til diktafonen ble det besluttet å forkaste disse resultatene, og ikke bruke de videre i analysen. Det kan være at den interne forsterkeren i diktafonen ikke var sterk nok, og dermed fikk et for lavt forhold mellom støy og signal, som gjorde at lyden ble uklar. Dette kunne blitt løst ved å benytte en ekstern op amp, tilsvarende HY-11 slik det ble brukt for målerigg 1.

For målerigg 1, med RPI ble det utviklet programvare i henhold til funksjonskravene som ble satt i kapittel (3.1). Av alle delpunktene var det punkt 1, *Automatisk starte å måle data, ved oppstart* og 5, *Klarer å skille mellom kar med og uten fisk*, som ikke ble fullført. Punkt 1 ble ikke gjennomført siden det viste seg å ikke være nødvendig eller ønskelig for oss å starte opptak direkte ved oppstart av enheten. Punkt 5 ble forkastet da det ikke burde vært med som et funksjonskrav til målerigg 1, men heller et funksjonskrav for målesystemet ved videre iterasjoner i analyse.

Opptaksprogrammet ble satt til å ta 12 stk. 5 minutters opptak. Lydopptakene ble lagret internt på SD-kortet til RPI'en, som var en god egenskap ved eventuelt strømbrudd, da delene fram til dette punktet ble lagret. Hvis det derimot hadde blitt valgt å ta et kontinuerlig opptak på 60 minutter ville opptaket bli borte. Hver gang det hadde gått 5 minutter ble det logget i terminalen på PC hvilket opptak den var på fra 1-12, som ble et hjelpemiddel for enklere å overholde timingen for når stressfasen skulle påbegynnes og avsluttes. Den største ulempen med segmenterte opptak var nedetiden mellom målinger, som var på ca. 0.5 - 1 sekund mellom opptakene.

Det ble etablert et godt grunnprogram som gjorde det enkelt å bruke og ta opptak. Grunnprogrammet gjorde det mulig å legge til flere funksjoner som automatisk påbegynt opptak ved oppstart, kontinuerlig opptak og flere opptakssekvenser. Det var mulig å implementere flere funksjoner om ønskelig, men de mest nødvendige funksjonene ble istedet prioritert. Ved videreutvikling av riggen for lengre kontinuerlige opptak, må det legges til en form for ekstern lagring. Dette ble tidligere nedprioritert, da 64GB var mer enn nok for 60 minutters opptak. For å bruke målerigg 1 i et større kommersielt anlegg på sjø eller i settefiskanlegg, ville det vært nødvendig å lage et kabinett med vanntette kabelgjennomføringer. Om målerigg 1 skulle blitt brukt på sjølokalitet måtte den blitt mer robust mot ytre påkjenninger, og ha mulighet til å bli fastmontert slik at utstyret forblir stabilt og sikkert selv under krevende vær- og sjøforhold.

Hydrofonene HY-01 og HY-03 ble benyttet og disse kom med en uskjermet AUX-kabel. For å forbedre hydrofonene er det to tiltak som burde gjennomføres. AUX-kabelen burde bli skjermet for å redusere elektromagnetisk støy (EMS). AUX-kabelen har 3 ledere i seg. To av de blir benyttet i HY-01 og HY-03 og den siste jordlederen er dermed tilgjengelig, og kan fjerne behovet for en ekstern jordingskabel. Disse to endringene ville gjort hydrofonene mer beskyttet mot blant annet EMS og jordingsssløyfer. En alternativ metode for å motvirke EMS kan være å konvertere det analoge signalet til et digitalt format så raskt som mulig, for eksempel ved å utføre prosessen umiddelbart etter hydrofonen før lange ledninger. Dette kan oppnås ved å integrere en ADC i direkte tilknytning til hydrofonen.

5.4 Forsøkene

Målerigg 1 krevde håndtering ved installasjon, som dessverre førte til noe støy under riggingen av forsøket. Dette kan ha ført til at fisken ble påvirket før forsøket startet, og for å minimere effekten av denne påvirkningen, ble det ventet med å starte opptakene til fisken hadde hatt tid til å roe seg ned og bli vant til hydrofonene i karet. Ved gjentakelse av forsøkene ville det vært hensiktsmessig å utføre lengre lydopptak, for å få et bedre datagrunnlag på hvordan lydintensiteten til fisken i karet er når den ikke er stresset.

Ved å la opptakene vare over en lengre periode, ville det vært mulig å få et mer omfattende innblikk i hvordan knitresignaturen varierer over tid. Det kunne for eksempel blitt tatt opptak i et døgn for å undersøke hvor fremtredende knitrelyden er eksempelvis 6, 12 eller 18 timer etter stress. Det kunne også vært en mulighet å utsette fisk for lik stressor over tid, for å se om knitrelyden eventuelt påvirkes. Ved et slikt forsøk hadde det vært fordelaktig å se på andre stressresponser i tillegg, og eksempler på type målinger kan være kortisolmåling, aktivitetsmåling, pustefrekvens og oksygennivå. For å se om det er mulig å korrelere knitrelyden med kjente, målbare stressindikatorer.

I rapporten *"Owitoools - Teknologiske verktøy for objektiv dokumentasjon av velferd hos laksefisk ved håndteringsoperasjoner"* ble det benyttet flere hydrofoner for å filtrere ut lyder som ikke var tilstede for flere av hydrofonene. Siden det kun var målerigg 1 som hadde god nok lyd kvalitet var det ikke mulig å bruke tokilde verifisering av lyder, for å helt sikkert identifisere den samme lyden på to målepunkter. På denne måten kunne det blitt avgjort om en markant høy lyd ble produsert som følge av at fisken kom i kontakt med hydrofonen. Derfor var det uheldig at ikke målerigg 2 fungerte optimalt, som ville tillatt oss å gjøre filtreringsoperasjoner.

5.4.1 SeaLab

Resultatene fra forsøkene på SeaLab ble svekket som følge av valgt stressmetode. I karene med liten fisk ble kikkelukke i det ene karet åpnet og hele lokket åpnet i det andre. Dette var med å påvirke lydopptakene med ytre lydkilder som ikke var fisk og lydutslagene som er vist i figur 21, i start og slutt av stressfase, mest sannsynlig var bevegelse av hydrofonene i vannet. Det gjorde at data fra stressfasen ikke kunne benyttes i analysen da det ikke med 100% sikkerhet var kun lyd fra fisken eller karmiljøet i det gjeldende tidsrommet. Det kunne derfor vært lurt å benytte en stressmetode som ikke kom til å bevege på hydrofonene eller påvirke lydopptaket direkte. For å ha muligheten til å ta i bruk også de fem minuttene med stressperiode burde stressperioden utføres med en form for stress hvor stresskilden ikke lager lyd. Det kan for eksempel tas i bruk eksponering av LED-strobelys i karet.

I opptakene for lite kar med fisk vises det i figur 31 at oksygennivået gikk ned i begge karene. Det var en kraftigere nedgang oksygenmetning i opptak 2 (T3) enn opptak 1 (T2), og dette skyldes antagelig en kraftigere stressreaksjon. Forskjellen mellom disse var at hele lokket ble åpnet og ikke bare kikkelukka, som gjorde at fisken fikk høyere aktivitet og dermed brukte mer oksygen.

5.4.2 SINTEF

Hos SINTEF ble stressmetode endret til håndfôring da dette var den eneste tillatte "stressmetoden". Det var tydelig at fisken gikk etter fôret, men dette viste ikke en klar stressrespons som i forsøket

på SeaLab. Det ble ikke observert i nærheten av like mange knitresignaturer i karet på SINTEF som på SeaLab. Med 19 fisk og en utydelig stressrespons var det å forvente at dette ikke var nok til å framprovosere en like sterk respons som på SeaLab. Det hadde derfor i ettertid vært ønskelig å overvåke fisken over en lengre periode uten stressperioder, for å se hvor mange ganger knitrelydene forekommer iløpet av et døgn med opptak, for å kartlegge antallet ”uprovserte” knitrelyder i døgnet per fisk. Opptakene T5 og T6 som ble startet rett etter hverandre varte i totalt to timer og er samlet sett det lengste sammenhengende opptaket.

6 Konklusjon

Basert på resultatene er det funnet en knitrelyd som ser ut til å komme av at laksen slipper luft fra svømmeblæren og gjennom munnen. Knitrelyden samsvarer i stor grad med funnene i (Rountree, Juanes og Bolgan, 2018) og til en viss grad med funnene i (Schroder mfl., 2022). Denne lyden ligger i frekvensområdet 3 til 7.5 kHz, og består av flere individuelle ”klikk” som varer i 5-6 hundredeler av et sekund.

Det er nødvendig å gjøre videre forskning for nærmere kvantifisering av disse lydene med kamera-teknologi for å koble lydsignatur opp mot oppførsel. Lyden virker å ha en viss korrelasjon med stress, da den endrer seg ved ekstern påkjenning (figur 31). Denne effekten ble ikke observert i stort kar med få fisk (figur 32). Om det er mulig å identifisere knitrelydene i et storskala kommersielt anlegg, og det forekommer en økning av disse i forbindelse med stressperioder, kan det muligens bidra som en del av en velferdsindikator. Ved å telle signaturer over tid etter stress ble det vist høyest prevalens av knitresignatur mellom 20-30 minutter etter stressor. Dette kan tyde på en økning av knitrelyd etter stress, men datagrunnlaget er ikke stort nok til å avgjøre om knitrelyden korrelerer med stress.

Gjennom studien har det blitt vist at det var mulig å sette sammen komponenter og få til gode målinger. Lydopptakene var av god kvalitet som gjorde det mulig å analysere opptakene og skille lakselyd fra miljølyd. Ved å utvikle en målerigg med hovedenhet RPI, var det mulig å omprogrammere opptaksfunksjoner basert på behov. Ved videreutvikling vil det være hensiktsmessig å påse at hydrofoner har tilstrekkelig med jording allerede fra produsenten.

7 Forskning, innovasjon og utvikling

Måling av lyd i oppdrett kan gi nye muligheter for overvåkning av fisken og det helhetlige lydmiljøet. Det vil være interessant å se hvordan dette fagområdet utvikler seg over tid og hva pågående og ny forskning kan fortelle oss om mulighetene tilknyttet lydovervåkning av atlantisk oppdrettslaks.

7.1 Overvåkning av lydmiljø

En av sammenhengene hvor lydovervåkning av oppdrettsmiljøet kan være nyttig er i forbindelse med fôring. Dette er et tema som har blitt sett litt på tidligere, for eksempel i ”*Acoustic environment of aquaculture net-pens varies with feeding status of Atlantic salmon (Salmo salar)*” (Rosten, Mathiassen og Volent, 2023), ble det funnet at frekvensen/lydnivået i merden endret seg basert på om laksen var sulten eller ikke. I artikkelen konkluderer de med at atlantisk oppdrettslaks påvirker/endrer det akustiske miljøet, og at endringer kan detekteres og at lyden gjenspeiler ”matsøking-statusen” til fisken. Det hadde derfor vært interessant å undersøke om det er en økning av knitrelyder underveis eller etter fôring. Etersom ”matsøking-statusen” påvirker aktiviteten til laksen vil det også muligens påvirke hvor mye den er i overflaten og eventuelt leter etter mat og snapper luft.

For å fange opp knitrelyden som antagelig kommer av luftslipp kan plasseringen av hydrofonen ha en betydning. Den burde ikke plasseres for dypt og helst være relativt nære overflaten da det virker som om det er poppingen i overflaten og ikke selve bobledannelsen som er å se i spektrogrammene. Det å ha hydrofonen i nærhet til overflaten kan by på problemer tilknyttet støy. Dette kommer av at det er mer bevegelse i vannoverflaten som følge av bølger og vind. Det ville derfor vært interessant å gjennomført ulike tester for å se hvor knitrelyden er mest prevalent for å finne en optimal plassering for nettopp denne signaturen.

Hydrofoner i en merd vil kunne fortelle oss hvordan lydmiljøet i merden endrer seg over tid. Dette kan være som følge av internt eller eksternt støy. Det kan være at visse anlegg er mer utsatt for en type støy sammenlignet med andre. Et åpent anlegg vil ha andre forutsetninger for å ”kvitte” seg med lyd, sammenlignet med et lukket anlegg. Forplantningen av lyd og vibrasjoner kan bli forsterket av ulike strukturer og dermed spille inn på det helhetlige lydmiljøet. Ved hjelp av maskinlæring bør det være mulig å trene opp en modell til å registrere forskjellige lydkilder og klassifisere disse. Lydenene kan deretter integreres i et system hvor oppdretter kan få varsel når det er predatorer, båttrafikk eller uønskede høye lyder rundt anlegget. Dette kan logges, som fører til at en kan undersøke hvor mange stressorer fisken har vært utsatt for.

7.2 Passende driftsmiljø for lydovervåkning

Ulike oppdrettsmiljø byr på ulike typer utfordringer, og det som ligger nærmest det som er undersøkt i denne bacheloren er settefiskanlegg og RAS. Dette er fordi settefisk og RAS ligner mest på karsystemet på SeaLab og SINTEF, og basert på denne erfaringen kan det være nettopp et slikt system overvåkingen kan passe best. En økning i antall fisk, bør basert på våre funn, gjøre det lettere å finne sammenhengen eller mangelen på sammenheng mellom knitrelyder, stress og aktivitet. I nedsenkbare merder kan lydovervåkning fungerer godt da man unngår overflatestøy i større grad. Fisken snapper luft i luftkuppelen og hydrofonen burde være plassert i nærheten av

denne for å fange opp plask, snapping av luft og eventuelle luftbobler.

Det kan hende at oppdrettslaks ikke er den beste arten å overvåke ved hjelp av akustisk overvåkning. Torsk, som også er en vanlig oppdrettsart i Norge har mer forskning bak seg når det gjelder korrelasjonen mellom lydproduksjon og stressindikator (Brawn, 1969). Det er derimot for tidlig å si om lydovervåkning av laks vil bli et revolusjonerende overvåkningsverktøy, men det har et potensial som enda ikke er fullt utforsket.

7.3 Maskinlæringsproblematikk og kommersialisering

For å utvikle en god maskinlæringsmodell er det nødvendig å ha tilstrekkelig med data for å trene den opp. Datamaskinen tar inn rådata og trenger ikke nødvendigvis grafiske presentasjoner for å finne mønstre. Det gjør at lyd er en god kilde for maskinlæring, da det er mulig å fortelle en AI at mellom to spesifikke punkter forekommer det en hendelse, som angis som "x". Videre oppgir man at det samme også skjer i opptaket der, der og der osv. På denne måten kan datamaskinen lære seg hva som inngår i mønsteret den skal lete etter og hva som er utenfor, uten en beskrivelse.

Hvis en skulle kommersialisere et produkt som baserer seg på knitrelyder er det et problem da knitrelyder er "snake oil", altså et produkt som definitivt eksisterer men vanskelig å fortelle hva nøyaktig gjør. Derfor vil det være lurt å fokusere på andre typer lydovervåkningsområder som kan gi realverdi for oppdretter fra begynnelsen av. Eksempler på slike produkter er lydnivåsensorer, som kan informere røkteren i sanntid om endringer i lydnivået for laksen, enten akutt eller over tid. Samtidig genererer de nødvendige datasett for å videreutvikle produktet og trene modellen ytterligere.

Referanser

- Amorim, M.C.P. og Hawkins, A. D. (2000a). «Growling for Food: Acoustic Emissions During Competitive Feeding of the Streaked Gurnard». I: *Journal of Fish Biology* 57 (4), s. 895–907. DOI: <https://doi.org/10.1006/jfbi.2000.1356>.
- (2000b). «Spawning Sounds of the Male Haddock, *Melanogrammus Aeglefinus*». I: *Environmental Biology of Fishes* 59 (1), s. 29–41. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1007615517287>.
- Amorim, M.C.P., Stratoudakis, Y. og Hawkins, A. D. (2004). «Sound Production During Competitive Feeding in the Grey Gurnard». I: *Journal of Fish Biology* 65 (1), s. 182–194. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.0022-1112.2004.00443.x>.
- Andersen, P. B. (2017). *Operasjonsforsterker - Elektroteknikk i Store Norske Leksikon på snl.no*. Online. Sjekket: 2024-05-01. URL: <https://snl.no/operasjonsforsterker>.
- (2022). *Analog-digital-omformer - Mikroelektronikk i Store Norske Leksikon på snl.no*. Online. Sjekket: 2024-05-01. URL: <https://snl.no/analog-digital-omformer>.
- Audacity (2024). *About Audacity*. URL: <https://www.audacityteam.org/FAQ/> (sjekket 3. mai 2024).
- Avnet.com (2024). *Capacitive vs Piezoresistive vs Piezoelectric Pressure Sensors*. URL: <https://my.avnet.com/abacus/solutions/technologies/sensors/pressure-sensors/core-technologies/capacitive-vs-piezoresistive-vs-piezoelectric/> (sjekket 15. apr. 2024).
- Bass, A. og Ladich, F. (2008). «Vocal–Acoustic Communication: From Neurons to Behavior». I: red. av Webb, J., Fay, R. og Popper, A. New York, New York, USA: Holt, Rinehardt og Winston, s. 253–278.
- Bolgan, M., O'Brien, J., Rountree, R. A. og Gammell, M. (2016). «Does the Arctic Charr *Salvelinus Alpinus* Produce Sounds in a Captive Setting?» I: *Journal of Fish Biology* 89 (3), s. 1857–1865. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfb.13067>.
- Bradley, D. L. og Stern, R. (2008). *Underwater Sound and the Marine Mammal Acoustic Environment: A Guide to Fundamental Principles*. Marine Mammal Commission.
- Brawn, V. M. (1969). «Sound Production by the Cod (*Gadus Callaris* L.)» I: *Dove Marine Laboratory, King's College, University of Durham*. URL: https://brill.com/view/journals/beh/18/4/article-p239_1.xml.
- Bucaro, J. A., Dardy, H. D. og Carome, E. F. (1977). «Fiber-Optic Hydrophone». I: *Journal of the Acoustical Society of America* 62.5. Received 26 April 1977, s. 1302.
- Chen, W., S., Lavoué og R., Mayden (2013). «Evolutionary origin and early biogeography of otophysan fishes (ostariophysi: teleostei)». I: *The Society for the Study of Evolution*. 67.8. DOI: [10.1111/evo.12104](https://doi.org/10.1111/evo.12104).
- Dahl, P. H., Miller, J. H., Cato, D. H. og Andrew, R. K. (2007). «Underwater Ambient Noise». I: *Acoustics Today* January 2007, s. 23–33.
- Daush, J. (jun. 2022). «Passive Acoustic Status Indicators - A Feasibility Study». Master Thesis in Electronic System Design and Innovation. Master's Thesis. Trondheim, Norway: Norwegian University of Science og Technology.

-
- Dyrevelferdsloven (2009). *Lov om Dyrevelferd*. LOV-2021-06-18-134. URL: <https://lovdata.no/dokument/NL/lov/2009-06-19-97>.
- Døving, K. og Reimers, E. (1992). *Fiskens Fysiologi*. John Greig Forlag. ISBN: 82-533-0268-1.
- Gjestland, T. (2021). *Akustikk, Store Norske Leksikon*. URL: <https://snl.no/akustikk> (sjekket 16. feb. 2024).
- (2022). *Støy i Store Norske Leksikon på snl.no*. URL: <https://snl.no/st%C3%B8y> (sjekket 18. apr. 2024).
- (2023). *Lyd, Store Norske Leksikon*. URL: <https://snl.no/lyd> (sjekket 16. feb. 2024).
- Gomede, E. (nov. 2023). *The Fourier Transform and Its Application in Machine Learning*. The Modern Scientist. Sjekket: 2024-04-15. URL: <https://medium.com/the-modern-scientist/the-fourier-transform-and-its-application-in-machine-learning-edecfac4133c>.
- H-Instruments (2023a). *HY-01 Professional Hydrophone for Underwater Sound Recording*. Online. Sjekket: 2024-04-15. URL: <https://www.h-instruments.com/product/hy-01>.
- (2023b). *HY-03 Small Hydrophone*. Online. Sjekket: 2024-04-15. URL: <https://www.h-instruments.com/product/hy-03>.
- Hanly, S. (2016). *Vibration Analysis: FFT, PSD, and Spectrogram Basics*. Sjekket: April 26, 2024. URL: <https://blog.endaq.com/vibration-analysis-fft-psd-and-spectrogram>.
- Harding, H., Bruintjes, R., Radford, A. og Simpson, S. (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». I: *Scottish Marine and Freshwater Science* 7.11. DOI: 10.7489/1701-1.
- Hawkins, A. D. og Johnstone, A.D.F. (1978). «The Hearing of the Atlantic Salmon, *Salmo Salar*». I: *Journal of Fish Biology* 13, s. 655–673.
- Helseth, L. E. (apr. 2024). *Stokastisk Resonans*. Store Norske Leksikon. Sjekket: 2024-04-16. URL: https://snl.no/stokastisk_resonans.
- HiFiBerry (2024). *Datasheet DAC+ ADC Pro*. Last Sjekket: 2024-05-20. URL: <https://www.hifiberry.com/docs/data-sheets/datasheet-dac-adc-pro/>.
- Holm, S. (2019). *Lydtrykk i luft og i vann er ikke det samme*. URL: <https://www.titan.uio.no/blogg/sverre-holm/2019/lydtrykk-i-luft-og-i-vann-er-ikke-det-samme.html> (sjekket 20. apr. 2024).
- Holtebekk, T., Myren, S. K. og Ulseth, T. (2024). *Desibel i Store Norske Leksikon*. URL: <https://snl.no/desibel> (sjekket 16. apr. 2024).
- Institutt for biovitenskap UIO (2024). *Musikkmenneske og Dyresang*. URL: <https://www.mn.uio.no/ibv/tjenester/kunnskap/plantefys/leksikon/m/musikkmenneske-og-dyresang.html> (sjekket 25. apr. 2024).
- Knudsen, F. R. og Gaasø, M. (2021). «Seismiske undersøkelser og mulige effekter på laks i havmerder». I: *Kunnskapsstatus*, s. 1–19.
- Kuznetsov, M. Y. (2009). «Traits of Acoustic Signalization and Generation of Sounds by Some Schooling Physostomous Fish». I: *Akusticheskii Zhurnal* 55, s. 866–875. DOI: <https://doi.org/10.1134/S10637711009060219>.
-

-
- Kvadsheim, P. H., Forland, T. N., Jong, K. de, Nyqvist, D., Grimsbø, E. og Sivle, L. D. (2023). *Effekter av menneskeskapt støy på havmiljø*. Rapport M1670. Sjekket: 2024-05-16. Miljødirektoratet. URL: <https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/m1670/m1670.pdf>.
- Maestre, S. (2024). *What is Piezoelectric Effect?* Online. Sjekket: 2024-04-16. URL: <https://www.circuitbread.com/ee-faq/what-is-piezoelectric-effect>.
- Mayer, I., Fontaine, R. og Vindas, M. (2024). «Fiskens sensoriske system». I: *Fiskefysiologi*. Red. av Olsen, R. og Finstad, B. Trondheim, Norge: Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet, s. 84–119.
- Misund, B. (2023). *Fiskeoppdrett*. Store Norske Leksikon. Sjekket: 2024-05-10. URL: <https://snl.no/fiskeoppdrett>.
- Nanomotion (2023). *The Piezoelectric Effect*. Online. Sjekket: 2024-04-15. URL: <https://www.nanomotion.com/nanomotion-technology/the-piezoelectric-effect/>.
- Opensource.com (2016). *What is the Raspberry Pi Foundation? 10 Million Computers Sold*. YouTube video. Delivered by Ben Nuttall, the Raspberry Pi Foundation's Community Manager. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=fuAkRui5ngs>.
- Popper, A. og Hawkins, A. D. (2019). «An Overview of Fish Bioacoustics and the Impacts of Anthropogenic Sounds on Fishes». I: *Journal of Fish Biology* 94, s. 692–713.
- Raspberry Pi Foundation (2024). *About Raspberry Pi*. Webpage. Sjekket: insert-date-here. URL: <https://www.raspberrypi.com/about/>.
- Rosten, C. (2024). *Akustisk overvåkning*. URL: <https://www.nina.no/V%C3%A5re-fagomr%C3%A5der/Milj%C3%B8overv%C3%A5king-i-vann/Akustisk-overv%C3%A5king#> (sjekket 8. apr. 2024).
- Rosten, C., Mathiassen, J. R. og Volent, Z. (2023). «Acoustic Environment of Aquaculture Net-Pens Varies with Feeding Status of Atlantic Salmon (*Salmo Salar*)». I: *Aquaculture* 563. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0044848622010663?via%3Dihub>.
- Rountree, R. A., Juanes, F. og Bolgan, M. (2018). «Air Movement Sound Production by Alewife, White Sucker, and Four Salmonid Fishes Suggests the Phenomenon Is Widespread Among Freshwater Fishes». I: *PLoS One* 13.30235287. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204247>.
- Saheban, H. og Kordrostami, Z. (2021). «Hydrophones, Fundamental Features, Design Considerations, and Various Structures: A Review». I: *Sensors and Actuators A: Physical* 329, s. 112790. ISSN: 0924-4247. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112790>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424721002533>.
- Sand, O. og Hawkins, A. D. (1973). «Acoustic Properties of the Cod Swimbladder». I: *Journal of Experimental Biology* 58, s. 797–820.
- Satou, M., Shiraishi, A., Matsushima, T. og Okumoto, N. (1991). «Vibrational Communication During Spawning Behavior in the Him Salmon (Landlocked Red Salmon, *Oncorhynchus Nerka*)». I: *Journal of Comparative Physiology A* 168, s. 417–428.
- Schroder, M. B., Venås, B., Gåsnes, S. K., Gismervik, K., Harasimczuk, E., Rosten, C., Jónsdóttir, K. E., Volent, Z., Schellewald, C., Caharija, W., Føre, M., Mulelid, M. A. og Bondø, M. (jun.
-

-
- 2022). *OWITOOLS: Teknologiske Verktøy for Objektiv Dokumentasjon av Velferd hos Laksefisk ved Håndteringsoperasjoner*. Sluttrapport 2022:00663. Rapport. SINTEF.
- Scientific, Campbell (2024). *Ground Loops*. Sjekket: 2024-04-22. URL: <https://help.campbellsci.com/CR6/Content/shared/Maintain/Troubleshooting/ground-loops.htm>.
- Skogstad, L. (mai 2019). «Laks og Lyd: En Kartlegging av Lydmiljøet i Merdanlegg for Atlantisk Laks (*Salmo salar*)». Bachelor's Thesis. Norwegian University of Science og Technology.
- Sommerset, I., Wiik-Nielsen, J., Moldal, T., Oliveira, V. H. S., Svendsen, J. C., Haukaas, A. og Brun, E. (2024). «Fiskehelse rapporten 2023». I: *Veterinærinstituttets Rapportserie* nr.8a. ISSN: 1890-3290.
- Sound in the Sea, Discovery of (2024). *How Do Fish Produce Sounds*. URL: <https://dosits.org/animals/sound-production/how-do-fish-produce-sounds/> (sjekket 25. apr. 2024).
- Steven (2023). *What is the Fourier Transform and How Is It Used in Image Processing?* URL: <https://stemporium.blog/2023/04/13/what-is-the-fourier-transform-and-how-is-it-used-in-image-processing/> (sjekket 29. apr. 2024).
- Sutton, I. (2021). «Chapter 15 - Health». I: *Encyclopedia of Behavioral Neuroscience, Second Edition*. Red. av Koob, George F., Le Moal, Michel og Thompson, Richard F. San Diego, CA: Academic Press, s. 422. DOI: 10.1016/B978-0-12-809324-5.16015-2. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128128831000152?via%3Dihub> (sjekket 29. apr. 2024).
- The SciPy Project (2008-2024). *SciPy - Fast Fourier Transforms*. Sjekket: April 26, 2024. URL: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/tutorial/fft.html>.
- Theriot, K. (sep. 2022). *16-Bit Audio Recording - What the Heck Does It Mean?* Sjekket: 2024-04-25. URL: <https://www.homebrewaudio.com/8403/16-bit-audio-recording-what-the-heck-does-it-mean/>.
- Tricas, T. C. og Boyle, K. S. (2014). «Acoustic Behaviors in Hawaiian Coral Reef Fish Communities». I: *Marine Ecology Progress Series* 511 (1), s. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.3354/meps10930>.
- Universitetet i Oslo (2023). *Fourier Analysis and Applications to Sound Processing*. Online. Sjekket: 2024-04-15. Oslo, Norway: Universitetet i Oslo. URL: <https://www.uio.no/math/MAT-INF2360/part1>.
- University of Rhode Island (2021a). *Cylindrical vs. Spherical Spreading*. URL: <https://dosits.org/science/advanced-topics/cylindrical-vs-spherical-spreading/> (sjekket 25. apr. 2024).
- (2021b). *Sound Absorption*. URL: <https://dosits.org/science/movement/why-does-sound-get-weaker-as-it-travels/sound-absorption/> (sjekket 30. apr. 2024).
- (2021c). *Sound Spreading*. URL: <https://dosits.org/science/movement/why-does-sound-get-weaker-as-it-travels/sound-spreading/> (sjekket 26. apr. 2024).
- (2021d). *What is Sound*. URL: <https://dosits.org/science/sound/what-is-sound/> (sjekket 25. apr. 2024).
-

Volent, Z., Mathiassen, J. R., Jónsdóttir, K. E. og Rosten, C. M. (2022). *Bruk av Lydbilde for Velferdsovervåking ved Operasjoner i et Oppdrettsanlegg*. Fagrapport. ISBN: 978-82-14-07554-0. SINTEF.

Westcott, T. (2018). *Sampling: What Nyquist Didn't Say, and What to Do About It*. Wescott Design Services. URL: <https://www.wescottdesign.com/articles/Sampling/sampling.pdf>.

Data analyse A Vedlegg

0 - Importere forskjellige biblioteker som er nødvendig.

```
In [ ]: #Importing required libraries
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import wave
import os
import re
import scipy
import librosa
from matplotlib.colors import LogNorm
import matplotlib.pyplot as plt
import os
from scipy.io import wavfile
```

1 - Rammeverk for å håndtere wavfiler

```
In [ ]: #funksjon som legger til wav til en array med lydfiler.
def add_wav_files_to_list(directory):
    wav_files = []
    for filename in os.listdir(directory):
        if filename.endswith(".wav" or ".WAV"):
            wav_files.append(os.path.join(directory, filename))
            #print(f"Added {filename} to the list of WAV files")
        else:
            print("No WAV files found in the directory")

    #if no rec number is found, sort by filename
    if all(extract_rec_number(filename) is None for filename in wav_files):
        return sorted(wav_files)
    sorted_wav_files = sorted(wav_files, key=extract_rec_number)
    return sorted_wav_files

#funksjon som sorterer filer i korrekt rekkefølge
def extract_rec_number(filename):
    match = re.search(r"rec(\d+)", filename)
    return int(match.group(1)) if match else None

#legg til alle filene
c0f0_0 = add_wav_files_to_list("files/t1")
c0f0_1 = add_wav_files_to_list("files/t4")
c0f1_0 = add_wav_files_to_list("files/t2")
c0f1_1 = add_wav_files_to_list("files/t3")
c1f1_0 = add_wav_files_to_list("files/t5")
c1f1_1 = add_wav_files_to_list("files/t6")
c1f0_0 = add_wav_files_to_list("files/t7")

names = ["Small cage, no fish",
         "Small cage, no fish",
         "Small cage, with fish",
         "Small cage, with fish",
         "Large cage, with fish",
         "Large cage, with fish",
         "Large cage, no fish"]
```

2 - Fouriertransformasjon og utregning psd_average

```
In [ ]: def calculate_psd_stft(file_path, nperseg=2**12):
    with wave.open(file_path, 'r') as wav_file: #flytte informasjon fra wave til genrelle pyth
        sample_rate = wav_file.getframerate()
        n_channels = wav_file.getnchannels()
        n_frames = wav_file.getnframes()
```

```

frames = wav_file.readframes(n_frames)
audio_data = np.frombuffer(frames, dtype=np.int16)

if n_channels == 2:                                     #konvertere stereo til mono
    audio_data = np.mean(audio_data.reshape(-1, 2), axis=1)

f, t, Zxx = scipy.signal.stft(audio_data,              #kalkulere STFT av lydsignalet
                              fs=sample_rate,
                              nperseg=nperseg,
                              window='hann',
                              noverlap=nperseg//2,
                              boundary=None)

psd = np.abs(Zxx)**2                                    #Kalkulere PSD
psd_average = 10 * np.log10(np.mean(psd, axis=1))      #Kalkulere PSD/tidssteg

return f, psd_average

```

3 - PSD-Plot

```

In [ ]: def plot_all_wav_files(wav_files, name, nperseg=2**14, xmax=10000, wav_files2 = None):
    plt.figure(figsize=(12, 8))
    psds = []

    # Calculate and store PSDs
    for file_path in wav_files:
        f, psd = calculate_psd_stft(file_path, nperseg=nperseg)
        psds.append(psd)

    # Compute the average PSD
    avg_psd = np.mean(psds, axis=0)

    # Plot the difference of individual PSD from average
    for i, psd in enumerate(psds):
        if i == 10:
            plt.plot(f, psd, label=os.path.basename(wav_files[i]), ls='--' )
        else:
            plt.plot(f, psd, label=os.path.basename(wav_files[i]))

    if wav_files2 is not None:
        psds2 = []
        for file_path in wav_files2:
            f, psd = calculate_psd_stft(file_path, nperseg=nperseg)
            psds2.append(psd)
        avg_psd2 = np.mean(psds2, axis=0)
        for i, psd in enumerate(psds2):
            if i == 10:
                plt.plot(f, psd, label=os.path.basename(wav_files2[i]), ls='--' )
            else:
                plt.plot(f, psd, label=os.path.basename(wav_files2[i]))

    plt.title(f'Power Spectral Density Difference for {name}')
    plt.xlabel('Frequency (Hz)')
    plt.ylabel('Power/Frequency (dB/Hz)')
    plt.legend(bbox_to_anchor=(1.05, 1.0), loc='upper left')
    plt.tight_layout()
    plt.xlim(0, xmax)
    plt.ylim(-35, 40)
    plt.grid()
    plt.savefig(name, dpi=400)
    plt.show()
    plt.clf()

    return avg_psd

#eksmepel gjennomkjøring
plot_all_wav_files(c1f1_0, names[4], wav_files2 = c1f1_1)

```

4 - Klikkelyd - oksygenplot - lite kar

```
In [ ]: import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

# Eksempeldata
data_rec2 = {
    'Tid': [0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 4.50],
    'Oksygen1': [8.62, 8.62, 8.62, 8.54, 8.52, 8.54, 8.56, 8.58, 8.60, 8.60, 8.60, 8.60, 8.60, None],
    'knitre1': [1, 2, None, 2, 9, 9, 11, 19, 8, 7, 5, 4, None, None],
    'Oksygen2': [8.2, 8.2, 8.15, 7.98, 7.87, 7.89, 8.00, 8.05, 8.08, 8.12, 8.15, 8.20, None, None],
    'knitre2': [9, 7, None, 9, 19, 11, 35, 34, 25, 25, 21, 21, None, None],
    'Oksygen4': [10.12, 10.12, 10.12, 10.12, 10.12, 10.12, 10.12, 10.12, 10.12, 10.12, None, None, None, None],
    'knitre4': [1, 1, None, None, None, None, None, None, None, None, None, None, None, None],
    'Oksygen3': [10.28, 10.29, 10.29, 10.30, 10.31, 10.31, 10.32, 10.32, 10.32, 10.33, 10.33, 10.34, None, None],
    'knitre3': [None, None, 3, None, 1, 2, None, 1, 1, 1, 1, 1, None, None],
    'Hendelser': [None, None, "Startet med stressperiode", "Stressperiode over", "Slenging med
}

df = pd.DataFrame(data_rec2)

# Normaliser 'knitre' dataene ved å dele med 5
df['knitre1'] = df['knitre1'] / 5
df['knitre2'] = df['knitre2'] / 5
df['knitre3'] = df['knitre3'] / 5
df['knitre4'] = df['knitre4'] / 5

# Plot setup
fig, axs = plt.subplots(2, 2, figsize=(10, 8)) # 2x2 subplot grid

# Configure each plot
for i, (ox_label, knit_label, title) in enumerate([
    ('Oksygen1', 'knitre1', 'Lite Kar med Fisk Opptak 1 (T2)'),
    ('Oksygen2', 'knitre2', 'Lite Kar med Fisk Opptak 2 (T3)'),
    ('Oksygen3', 'knitre3', 'Lite Kar uten Fisk Opptak 3 (T1)'),
    ('Oksygen4', 'knitre4', 'Lite Kar uten Fisk Opptak 4 (T4)')]):
    ax = axs[i//2, i%2] # Correct indexing for a 2x2 grid
    color = 'tab:red'
    ax.set_title(title)
    ax.set_xlabel('Tid [min]')
    if i == (2 or 3):
        ax.set_ylim(10, 10.5)
    if i == (3):
        ax.axvspan(40, 60, alpha=0.2, color="tab:grey", hatch="//")
    ax.set_ylabel('Oksygen [mg/l]', color=color)
    ax.plot(df['Tid'], df[ox_label], color=color, linestyle=':')
    ax.set_xlim(0, 55)
    ax.tick_params(axis='y', labelcolor=color)
    ax.axvspan(10, 15, alpha=0.2, color="tab:red") # Highlight the stress period

    ax2 = ax.twinx()
    ax2.set_ylim(0, 8)
    ax2.set_ylabel('Knitring per minutt [n/min]', color='tab:blue')
    ax2.step(df['Tid'], df[knit_label], where='post', color='tab:blue')

fig.tight_layout(rect=[0, 0, 1, 0.99])
plt.show()
```

5 - Klikkelyd - oksygenplot - Stort kar

```
In [ ]: import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

# Eksempeldata
data_rec3 = {
    'Tid': [0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 4.50],
    'OksygenT5': [9.9, 10.1, 10.2, 10, 10.1, 10.1, 10.2, 10.2, 10.3, 10.2, 10.2, 10.3, None, None],
    'knitreT5': [1, None, None, None, None, 1, None, None, 1, None, None, 1, None, None],
    'OksygenT6': [10.1, 10.2, 10.3, 10.2, 10.1, 10.1, 10.3, 10.1, 10.2, 10.3, 10.2, 10.2, None, None],

```

```

'knitreT6': [1, None, 1, None, None, 1, None, None, None, 1, 1, None, None, None],
'OksygenT7': [11.9, 11.8, 11.8, 11.8, 11.8, 11.8, 11.8, 11.8, 11.8, 11.8, 11.8, 11.8, None, None],
'knitreT7': [None, None, None, None, None, None, None, None, None, None, None, None, None, None],
'Oksygen3': [10.28, 10.29, 10.29, 10.30, 10.31, 10.31, 10.32, 10.32, 10.32, 10.33, 10.33, 10.34, None, None],
'knitre3': [None, None, None, None, None, None, None, None, None, None, None, None, None, None],
'Hendelser': [None, None, "Startet med stressperiode", "Stressperiode over", "Slenging med
}

df = pd.DataFrame(data_rec3)

# Normaliser 'knitre' dataene ved å dele med 5
df['knitreT5'] = df['knitreT5'] / 5
df['knitreT6'] = df['knitreT6'] / 5
df['knitreT7'] = df['knitreT7'] / 5

# Plot setup
fig, axs = plt.subplots(2, 2, figsize=(10, 8)) # 2x2 subplot grid

# Configure each plot
for i, (ox_label, knit_label, title) in enumerate([
    ('OksygenT5', 'knitreT5', 'Stort Kar med Fisk, Opptak 1, (T5)'),
    ('OksygenT6', 'knitreT6', 'Stort Kar med Fisk, Opptak 2, (T6)'),
    ('OksygenT7', 'knitreT7', 'Stort Kar uten Fisk Opptak 3 (T7)'),
    ('knitre3', 'knitre3', 'Ingen Opptak'),
]):
    ax = axs[i//2, i%2] # Correct indexing for a 2x2 grid
    color = 'tab:red'
    ax.set_title(title)
    ax.set_xlabel('Tid [min]')
    ax.set_ylim(9.9, 11.9)
    if i == (3):
        ax.axvspan(0, 60, alpha=0.2, color="tab:grey", hatch="//")
    ax.set_ylabel('Oksygen [mg/l]', color=color)
    ax.plot(df['Tid'], df[ox_label], color=color, linestyle=':')
    ax.set_xlim(0, 55)
    ax.tick_params(axis='y', labelcolor=color)
    if i != (3):
        ax.axvspan(45, 50, alpha=0.2, color="tab:red") # Highlight the stress period

    ax2 = ax.twinx()
    ax2.set_ylim(0, 8)
    ax2.set_ylabel('Knitring per minutt [n/min]', color='tab:blue')
    ax2.step(df['Tid'], df[knit_label], where='post', color='tab:blue')

fig.tight_layout(rect=[0, 0, 1, 0.99]) # Adjust the rectangle in which to fit subplots
plt.show()

```

```
In [ ]: import sounddevice as sd
import numpy as np
import wave
import matplotlib.pyplot as plt
import datetime as dt
from scipy.signal import spectrogram

samplerate = 88200 # Hertz

def record_audio(duration, samplerate=samplerate, channels=2):
    print(f"Recording for {duration} seconds...")
    recording = sd.rec(int(duration * samplerate),
                       samplerate=samplerate,
                       channels=channels,
                       dtype='int16')
    sd.wait() # Wait until recording is finished
    print("Recording finished.")
    return recording

def save_wave_file(filename, data, samplerate=samplerate, channels=2):
    if not filename.endswith('.wav'):
        filename += '.wav'

    with wave.open(filename, 'wb') as wf:
        wf.setnchannels(channels)
        wf.setsampwidth(2) # Number of bytes, int16 -> 2 bytes
        wf.setframerate(samplerate)
        wf.writeframes(data)

def get_input_devices():
    print("Available input devices:")
    print(sd.query_devices())

def get_filename(filename, recnumber):
    return filename + dt.datetime.now().strftime("%H-%M-%S") + "_rec" + str(recnumber)

def print_time_now():
    print(dt.datetime.now().strftime("%H-%M-%S"))

def main():
    get_input_devices()
    device = int(input(f"Enter the input device index: "))
    duration = 10
    filename = input("Enter the filename to save the recording: ")

    sd.default.device = device

    for i in range(12):
        print(f"TIME={print_time_now()} Recording {i+1} of 12")
        record_data = record_audio(duration)
        print("Recording finished.")
        save_name = get_filename(filename, i+1)
        print(f"Saving to {save_name}")
        save_wave_file(save_name, record_data)
        print(f"Saved to {save_name}")
        print(".....")

main()
```

B Vedlegg

