

1925

NINA Rapport

# Bruk av lyd til overvåking av norsk natur - en mulighetsstudie

Carolyn M. Rosten, Frode Fossøy



## **NINAs publikasjoner**

### **NINA Rapport**

Dette er NINAs ordinære rapportering til oppdragsgiver etter gjennomført forsknings-, overvåkings- eller utredningsarbeid. I tillegg vil serien favne mye av instituttets øvrige rapportering, for eksempel fra seminarer og konferanser, resultater av eget forsknings- og utredningsarbeid og litteraturstudier. NINA Rapport kan også utgis på engelsk, som NINA Report.

### **NINA Temahefte**

Heftene utarbeides etter behov og serien favner svært vidt; fra systematiske bestemmelsesnøkler til informasjon om viktige problemstillinger i samfunnet. Heftene har vanligvis en populærvitenskapelig form med vekt på illustrasjoner. NINA Temahefte kan også utgis på engelsk, som NINA Special Report.

### **NINA Fakta**

Faktaarkene har som mål å gjøre NINAs forskningsresultater raskt og enkelt tilgjengelig for et større publikum. Faktaarkene gir en kort framstilling av noen av våre viktigste forskningstema.

### **Annen publisering**

I tillegg til rapporteringen i NINAs egne serier publiserer instituttets ansatte en stor del av sine forskningsresultater i internasjonale vitenskapelige journaler og i populærfaglige bøker og tidsskrifter.

# **Bruk av lyd til overvåking av norsk natur - en mulighetsstudie**

Carolyn M. Rosten  
Frode Fossøy

Rosten, C. M. & Fossøy, F. 2020. Bruk av lyd til overvåking av norsk natur. En mulighetsstudie. NINA Rapport 1925. Norsk institutt for naturforskning

Trondheim, Desember 2020

ISSN: 1504-3312

ISBN: 978-82-426-4701-6

RETTIGHETSHAVER

© Norsk institutt for naturforskning

Publikasjonen kan siteres fritt med kildeangivelse

TILGJENGELIGHET

Åpen

PUBLISERINGSTYPE

Digitalt dokument (pdf)

KVALITETSSIKRET AV

Odd Terje Sandlund

ANSVARLIG SIGNATUR

Forskningsjef Ingebrigt Uglem (sign.)

OPPDRAGSGIVER(E)/BIDRAGSYTER(E)

Miljødirektoratet

OPPDRAGSGIVERS REFERANSE

M-1869|2020

KONTAKTPERSON(ER) HOS OPPDRAGSGIVER/BIDRAGSYTER

Tomas Holmern

FORSIDEBILDE

Hydrofon mot vinterlandskap © Carolyn Rosten

NØKKEWORD

- lyd
- akustikk
- bioakustikk
- økoakustikk
- lydlandskap
- hydrofon
- mikrofon
- autonom
- naturovervåking
- biodiversitet
- artsmangfold
- økologisk tilstand

KONTAKTOPPLYSNINGER

**NINA hovedkontor**  
Postboks 5685 Torgarden  
7485 Trondheim  
Tlf: 73 80 14 00

**NINA Oslo**  
Sognsveien 68  
0855 Oslo  
Tlf: 73 80 14 00

**NINA Tromsø**  
Postboks 6606 Langnes  
9296 Tromsø  
Tlf: 77 75 04 00

**NINA Lillehammer**  
Vormstuguvegen 40  
2624 Lillehammer  
Tlf: 73 80 14 00

**NINA Bergen**  
Thormøhlens gate 55  
5006 Bergen  
Tlf: 73 80 14 00

[www.nina.no](http://www.nina.no)

## Sammendrag

Rosten, C. M. & Fossøy, F. 2020. Bruk av lyd til overvåking av norsk natur. En mulighetsstudie. NINA Rapport 1925. Norsk institutt for naturforskning.

Denne rapporten presenterer den første vurderingen av akustisk overvåking som metode for natur-overvåking i Norge. Akustikk er en ny metode og et nytt virkemiddel for å kunne overvåke både terrestriske og akvatiske miljøer på en rask og enkel måte. Et lydopptak fra et økosystem kan være nok for å kunne påvise fremmede eller trua arter, beskrive artsfenologi, eller dokumentere endringer i økologisk tilstand. Som en første introduksjon til akustisk overvåking presenterer vi her en kunnskapssammenstilling, samt resultater og erfaringer fra et pilot prosjekt og anbefalinger for veien videre.

Akustisk overvåking av arter, økosystemer og menneskelig aktivitet er en lovende metode for å effektivisere naturovervåking generelt, men også for å innhente ny kunnskap som øker forståelsen for hvordan naturen påvirkes av antropogene effekter. Metoden kan samle inn data kontinuerlig i sann-tid, noe som for eksempel muliggjør tidlig oppdagelse av fremmede arter. Lydloggerne kan implementeres som et autonomt system der data blir sendt gjennom mobilnettverket enten preprosessert eller som rådata. Et autonomt system krever ikke hyppig vedlikehold eller gjentatte besøk for innhenting av data og fremstår derfor som en ikke-invasiv metode. Akustisk overvåking fungerer også ved dårlig sikt, noe som gjør at metoden fungerer svært bra for overvåking i grumsete vann, tett skog, i tåke eller på natta. Bruksområdene er mangfoldige, men vi deler ofte studier inn i to kategorier, enten overvåking av enkeltarter (bioakustikk) eller overvåking av hele økosystemer (økoakustikk).

Erfaringer fra et pilotprosjekt basert på ikke-autonome lydloggere viser at utregning av økosystem indekser fra relativt enkle lydopptak varierer mellom habitater, årstider og tid på døgnet. Ulike indekser kan belyse ulike økologiske problemstillinger, men er som oftest knyttet til diversitet av lyd, og antar at et variert lydsignal er knyttet til et mer variert økosystem. En indeks som viser menneskelyd relativt til naturlig lyd er noe høyere i semi-naturlig mark sammenlignet med skog, og de fleste økoakustikk indeksene er i samsvar med biodiversitet resultater fra DNA-metastrekkoding av insekter fra Malaisefeller fra de samme habitatene. Praktiske erfaringer fra felt og logistikk viser at ikke-autonome systemer er svært sårbare for menneskelige feil, og at de krever forholdsmessig mye manuelt arbeid for behandling av dataene.

Den store utviklingen i datateknologi, digitalisering og kunstig intelligens gir store muligheter for å videreutvikle og komplettere dagens metoder for datainnsamling og analyser. Vi erfarer imidlertid at finansieringsmulighetene til slik metodeutvikling er begrenset. Som en ny metode, er det behov for en del utvikling for å tilpasse akustisk overvåking til norsk naturforvaltning. Behovet for utvikling er hovedsakelig (i) å få på plass en fungerende pipeline med en teknisk autonom løsning inkludert datahåndtering, (ii) å utvikle analysemetoder relevant for Norge, inkludert hensyn til personvern, (iii) å utvikle et standardisert overvåkingsdesign tilpasset norske forhold, og (iv) øke antall lydopptak av norske nøkkelarter i referansedatabaser. I denne rapporten har vi lagt frem anbefalinger for hvordan utviklingen bør skje og presentert en oversikt over hvor mye en slik utvikling vil koste.

Akustiske metoder kan allerede nå tas i bruk i stor skala til overvåking og forvaltning i Norge. Tilnærmingerne bioakustikk og økoakustikk kan nå anvendes som verktøy for overvåking av både arter og økosystemer. Anbefalingene vi presenterer viser veien videre for å utvikle akustisk overvåking som en metode tilpasset behovet til norske naturovervåkingsprogrammer.

Carolyn Rosten ([carolyn.rosten@nina.no](mailto:carolyn.rosten@nina.no)) NINA, Postboks 5685 Torgarden, 7485 Trondheim.  
Frode Fossøy ([frode.fossoy@nina.no](mailto:frode.fossoy@nina.no)) NINA, Postboks 5685 Torgarden, 7485 Trondheim.

# Innhold

<b>1 Innledning</b> .....	<b>7</b>
<b>2 Bioakustikk som forvaltningsverktøy i Norge</b> .....	<b>10</b>
2.1 Behov for akustikk som forvaltningsverktøy i Norge .....	10
2.2 Applikasjoner for akustisk overvåking i Norge .....	10
2.3 Utviklingsbehov.....	11
2.3.1 Teknologisk løsning for autonom, kontinuerlig akustikkovervåking .....	11
2.3.2 Datahåndtering pipeline.....	11
2.3.3 Personvern.....	11
2.3.4 Analysemetoder tilpasset Norge.....	12
2.3.5 Standardisert overvåkingsdesign tilpasset Norge .....	12
2.3.6 Referansedatabaser for norsk arter.....	12
2.4 Anbefalinger.....	13
2.5 Kostnader.....	14
<b>3 Kunnskapssammenstilling akustisk overvåking</b> .....	<b>15</b>
3.1 Akustisk overvåking i terrestriske miljøer .....	15
3.2 Akustisk overvåking i marine miljøer .....	16
3.3 Akustisk overvåking i ferskvannsmiljøer.....	17
<b>4 Overvåking ved hjelp av lyd</b> .....	<b>19</b>
4.1 Overvåking av enkeltarter - bioakustikk .....	19
4.2 Overvåking av artssamfunn - økoakustikk .....	19
4.3 Overvåking av menneskelig påvirkning.....	19
<b>5 Bruksområder for akustikk i forvaltning</b> .....	<b>21</b>
5.1 Forekomst.....	21
5.2 Fenologi .....	22
5.3 Bestandsestimat .....	22
5.4 Biologisk mangfold.....	23
5.5 Økologisk tilstand.....	23
5.6 Akustisk tidskapsel .....	24
<b>6 Metoder for innsamling og analysering av lyd data</b> .....	<b>25</b>
6.1 Sensor teknologi .....	25
6.2 Sampling design .....	26
6.3 Databehandling.....	27
6.4 Analyse av akustisk data .....	27
6.4.1 Bioakustikk.....	27
6.4.2 Økoakustikk .....	28
6.5 Synergier med andre metoder.....	28
6.6 Framtidsutsikter .....	29
<b>7 Erfaringer basert på feltforsøk</b> .....	<b>30</b>
7.1 Nasjonal overvåking av insekter.....	30
7.2 Oppsett av lydloggere.....	31
7.3 Resultater fra bioakustiske analyser av lydloggere.....	32
7.4 Praktisk erfaring fra felt og logistikk.....	33
<b>8 Konklusjon</b> .....	<b>38</b>
<b>9 Referanser</b> .....	<b>39</b>

## Forord

Naturmangfoldet minker raskere enn noen gang over hele verden, og helsetilstanden til mange økosystemer som vi mennesker og andre arter er avhengig av reduseres stadig raskere. Dette er den sterke advarselen som IPBES (Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services) legger frem i sin rapport. Imidlertid, er ikke biologisk mangfold eller økosystemfunksjoner tilstrekkelig dokumentert eller forstått i mange av verdens økosystemer.

Akustikk er en ny metode og et nytt virkemiddel for å kunne overvåke både terrestriske og akvatiske miljøer på en rask og enkel måte. Et lydopptak fra et økosystem kan være nok for å kunne påvise fremmede eller truede arter, beskrive artsfenologi, eller dokumentere økologisk tilstand. I denne rapporten har vi på oppdrag fra Miljødirektoratet laget en kunnskapssammenstilling om bruk og nytten av akustisk overvåking for naturforvaltningen i både terrestriske og akvatiske miljøer. I tillegg har vi gjort en pilotstudie med analyse og erfaringsvurdering på uttesting av akustisk overvåking i forbindelse med prosjektet nasjonal overvåking av insekter. Med dette studiet har vi evaluert hvorvidt akustisk overvåking kan gi et vesentlig bidrag i kartleggingen og overvåkingen hos forvaltningen.

En stor takk rettes til Miljødirektoratet og spesielt Tomas Holmern for å anerkjenne behovet for denne mulighetsstudien. I tillegg vil vi takke Per Johan Salberg (Miljødirektoratet), John Reidar Mathiassen (SINTEF Ocean) og John Potter (NTNU) for god diskusjon.

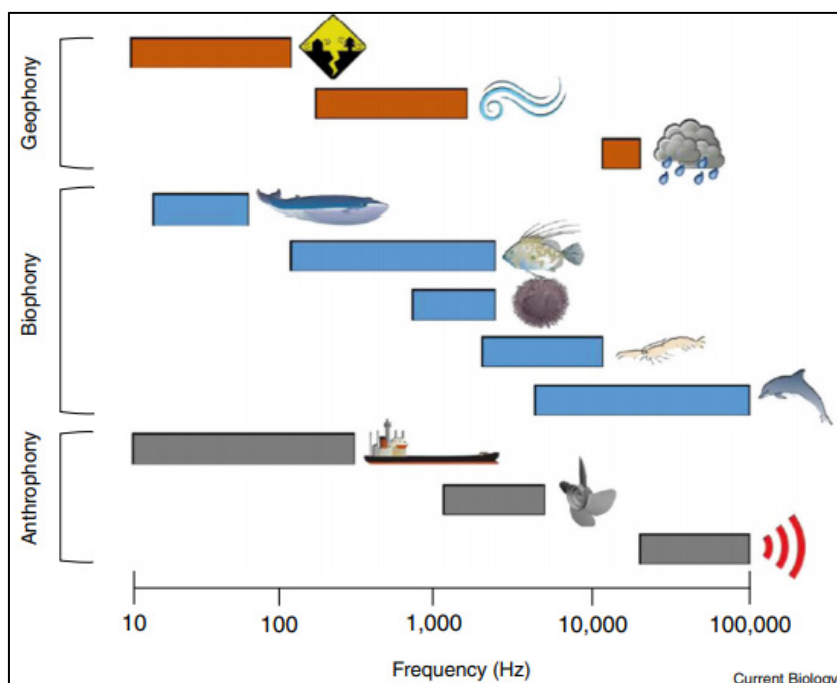
Flere personer har bidratt til dette prosjektet og vi vil takke Jens Åstrøm for muligheten til å samarbeide med prosjektet nasjonal overvåking av insekter og bruk av deres feltpersonell, og en stor takk rettes til John Gunnar Dokk (NINA) og Solveig Haug for deres innsats i felt.

10 desember, Trondheim  
Carolyn Rosten



# 1 Innledning

I en tid med raske miljøendringer er fjernmålingsmetoder spesielt viktige for overvåking og naturforvaltning fordi de produserer kontinuerlig datastrømmer som kan analyseres over forskjellige romlige og tidsmessige skalaer (Nagendra mfl. 2013). Passiv akustisk overvåking er en metode for å karakterisere og evaluere økosystemer ved hjelp av lyd. Autonome lydopptak kan oppdage en rekke lyder produsert av naturlige og fysiske fenomener. 'Lydlandskapet' inkluderer alle lyder som kommer fra et hvilket som helst habitat, og det kan klassifiseres med hensyn til deres kilde: geofoni er lyder relatert til klima og geofysikk, biofoni er lyder fra dyr og antropofoni er lyder knyttet til menneskelige aktiviteter (Pijanowski mfl. 2011b) (Figur 1). Autonome lydopptak ble først utviklet for bruk i det marine miljøet (Tavolga 2012) og kan oppdage en rekke lyder produsert av naturlige og fysiske fenomener (Krause 1987). Analyse og overvåking av disse forskjellige bidragene til et lydlandskapet kan gi en rask vurdering av biologisk mangfold så vel som helse og stabilitet i et økosystem (f.eks. (Blumstein mfl. 2011, Pijanowski mfl. 2011b, Fuller mfl. 2015, Bertucci mfl. 2016, Staaterman mfl. 2017, Deichmann mfl. 2018)).



**Figur 1.** Diagram for marint lydlandskap som viser frekvensområder for vanlige kilder til abiotiske, biotiske og antropogene lyder: geofoni (oransje): jordskjelv, bølger og regn; biofoni (blå): hvaler, fisk, kråkeboller, reker og delfiner; antropofoni (grå): skip, båtmotorer og sonar. Fra Montgomery og Radford (2017).

Akustisk overvåking har klare fordeler som gjør den komplementær til andre prøvetakingsmetoder. I likhet med kamerafeller kan akustisk overvåking brukes både på land og i vann, og i alle typer habitater. Fordelen med akustisk overvåking er at den kan fange en bred romlig rekkevidde, og at den er mye mindre påvirket av hindringer enn visuelle metoder. Man kan også gjøre opptak kontinuerlig eller regelmessig over lang tid, og kan samle informasjon om mange arter samtidig da den fanger opp alle lyder i et gitt miljø. Disse egenskapene gjør det mulig med en intensiv prøvetaking med en ganske lav teknisk investering (Hill mfl. 2018b). Tekstboks 1 gir definisjoner for flere ofte brukte ord innen akustisk overvåking.

I mange studier blir akustiske data analysert manuelt eller ved hjelp av enkle algoritmer, og hvor hensikten er målrettet overvåking av enkeltarter (Dawson mfl. 2006, Digby mfl. 2013). Slike

lydopptak inneholder imidlertid også en stor mengde økologisk informasjon, som for eksempel arters fravær eller forekomst, bestandstetthet, bestandsstruktur, landskapsarkitektur, fenologi, reproduksjonsperiode, trekk mønstre, interaksjoner mellom arter og økosystemfunksjoner. Mange av disse økologiske mønstrene blir først tydelige gjennom store studier og datasett. Veksten i omfanget av akustisk datainnsamling og prosessering de siste tiårene åpner opp for en endring: fra akustisk overvåking av enkeltarter til overvåking av hele økosystemer med lyd som informasjonskilde. Dette er målet med økoakustikk (Sueur & Farina 2015).

Økoakustiske metoder kan dekke alle typer miljø, fra dyphav til tropisk skog, og er komplementær til andre teknikker for overvåking av biologisk mangfold som for eksempel kamerafeller, LiDAR, satellittbasert fjernmåling og miljø-DNA. Forskning i økoakustiske metoder har hatt stor vekst det siste tiåret, og det er utviklet ny metodikk innen maskinvare, signalbehandling, maskinlæring og visualisering (se Sugai mfl. (2019)). Spesielt viktig er skiftet fra grunnleggende til anvendt forskning innen

## Tekstboks 1 – Definisjoner

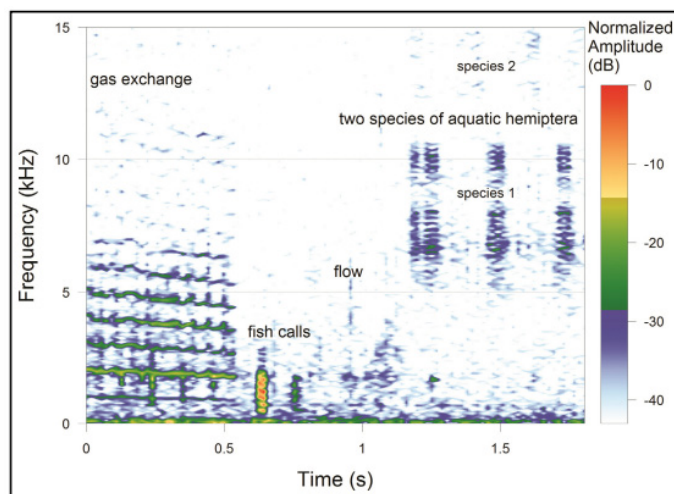
**Lydlandskap** Summen av biologisk, geofysisk og antropogen lyd i et landskap som varierer over tid og rom, og som reflekterer økosystem-prosesser og menneskelige aktiviteter.

**Passiv akustisk overvåking (PAM)** En ikke-invasiv metode for opptak av lyd ved bruk av akustiske teknologier som mikrofoner eller hydrofoner, eller andre autonome lydloggere

**Bioakustikk** Studier av lyd produsert av levende organismer, ofte med fokus på enkeltarter

**Økoakustikk** Studier av lydlandskap (lyd generert av hele økosystemer) for å undersøke økosystem-prosesser, økologisk tilstand og menneskelig påvirkning.

**Spektrogram** En visuell fremstilling av frekvensen av et signal som funksjon av tid. Se figur under.



økoakustikk, og implementering av slike metoder i praktisk bevaringsbiologi og økosystemovervåking (f. eks. Znidersic mfl. (2020)).

En stor del av den siste teknologiske utviklingen har vært innenfor signalanalyse og lydklassifisering, med fokus på henholdsvis signalbehandling for representasjon og transformasjon av lyddata (Sueur mfl. 2014), og akustiske indekser og bruk av dyplæring (maskinlæring) for autonom klassifisering av lyder (Stowell & Plumbley 2014). På sensornivå har den viktigste fremgangen vært utvikling av billigere løsninger (Hill et al. 2018), og hovedutfordringen er nå å utvikle tilkoblede sensorer slik at datastrømmer kan registreres kontinuerlig (Roch mfl. 2016, Sethi mfl. 2018), eller integrerte systemer som kan kjøre signalanalyser og gjøre klassifiseringer helt autonomt.

Akustiske metoder kan nå i stor skala overføres til praktisk bruk, og i større grad brukes til overvåking og forvaltning, og det er nå fullt mulig å bruke bioakustikk og økoakustikk som et verktøy for overvåking av arter og økosystemer. Akustiske sensorer bør inkluderes i stor skala i overvåkingsprogrammer (dvs. nasjonale og internasjonale), og som et komplementært tillegg til eksisterende metoder. Denne rapporten presenterer bakgrunnen og rammene som er nødvendige for å starte implementering av akustisk overvåking i norsk naturovervåking. Vi beskriver først behovet og mulige applikasjoner for akustisk overvåking i Norge, nødvendig metodeutvikling og anbefalinger med kostnader for å kunne ta i bruk metoden (Seksjon 2). Deretter presenterer vi en kunnskapssammenstilling om bruk av akustikk i overvåking i akvatiske og terrestriske miljøer med eksempler på bruksområder (Seksjoner 3 – 5). I Seksjon 6 beskriver vi i detalj om metodikk fra data innsamling, til data lagring og analyse. Til slutt presenterer vi egne erfaringer fra felt forsøk i 2020 (Seksjon 7).

## 2 Bioakustikk som forvaltningsverktøy i Norge

### 2.1 Behov for akustikk som forvaltningsverktøy i Norge

Naturen står overfor stadig større trusler fra påvirkning fra menneskelig aktivitet, både i Norge (Jakobsson & Pedersen 2020) og globalt (IPBES 2019). Vi mennesker er avhengige av natur og det den bidrar med naturgoder, men også erkjennelsen av at naturen har en egenverdi (NOU 2013). Det er derfor nødvendig med økt kunnskap om hvordan menneskelig aktivitet bidrar til å påvirke økosystemenes tilstand og dermed dens evne til å produsere naturgoder. Arbeidet med å sikre god økologisk tilstand gjennom utarbeidelse av helhetlige forvaltningsplaner i ferskvann og marint er godt i gang, jfr. Vannforskriften (Miljødirektoratet 2020) og havforvaltningsplanene (Meld. St. 20. 2019-2020), mens arbeidet med helhetlige forvaltningsplaner i terrestriske økosystemer er i sin spede oppstart. I terrestriske økosystemer danner fagsystem for fastsetting av god økologisk tilstand grunnlaget for å vurdere tilstanden (Nybø & Evju 2017).

Kunnskap om økosystemenes tilstand ligger til grunn for utarbeidelse av forvaltningsplanene, og mer kunnskap må framskaffes. Det økte kunnskapsbehovet fordrer at man både utnytter eksisterende data bedre, bl.a. ved hjelp av økt tilgjengelighet på relevante tidsserier om biodiversitet (e-infrastruktur), men også bedre statistiske metoder og modeller. I tillegg er det behov for utvikling av overvåkingsmetodikk, bl.a. ved hjelp av fjernmåling og bakkebaserte sensorer (se kap. 5, (Nybø & Evju 2017). Akustisk overvåking av fauna og av menneskelig aktivitet er en lovende metode for å effektivisere overvåking, men også for å få inn ny kunnskap som øker forståelsen for hvordan naturen påvirkes av menneskelig aktivitet. Metodene er i sin spede oppstart, og denne rapporten gir en oversikt over muligheter og potensiale til akustisk overvåking.

Den store utviklingen i datateknologi, digitalisering og kunstig intelligens gir store muligheter for å videreutvikle og komplettere dagens metoder for datainnsamling og analyser. Vi erfarer imidlertid at finansieringsmulighetene til slik metodeutvikling er begrenset. Forskningsinstituttene kan benytte grunnbevilgningen til å gjøre innledende arbeid med utvikling av ny metodikk, men en realisering av potensialet til metodene er ikke mulig uten ekstra finansiering fra relevante oppdragsgivere eller Norges forskningsråd.

### 2.2 Applikasjoner for akustisk overvåking i Norge

Akustikk er en svært anvendbar metode for mange problemstillinger og NINA leder eller deltar i mange nasjonale overvåkingsprosjekter hvor både bioakustikk og økoakustikk kunne bidra med ny og viktig informasjon. I denne rapporten presenterer vi resultater fra et pilotprosjekt der vi drar nytte av eksisterende logistikk i prosjektet nasjonal overvåking av insekter til innsamling av lyddata. I dette prosjektet er insekter hovedfokus (Åström mfl. 2020), men ANO (arealrepresentativ naturovervåking (Tingstad mfl. 2019)) samt et prosjekt på uttesting av miljø-DNA og jordprøver (Hotspot prosjektet (Olsen mfl. 2021)) er knytta til de samme geografiske rutene. Med lyd som et tillegg vil det også eksempelvis være mulig å få indekser for helhetlig økologisk tilstand og menneskelig påvirkning samt identifisering av fugler, amfibier og pattedyr, samt fenologiske endringer innen og mellom år. Inkludering av lyd kan derfor gi verdifull ekstra informasjon og et mye bredere datagrunnlag for å vurdere biodiversitet og helsetilstanden i disse økosystemene.

TOV (program for terrestrisk naturovervåking: [www.nina.no/Våre-fagområder/Miljøovervåking-på-land/Naturovervåking-TOV](http://www.nina.no/Våre-fagområder/Miljøovervåking-på-land/Naturovervåking-TOV)), SEAPOP (overvåking og kartlegging av sjøfugl: [www.nina.no/Miljøovervåking/Sjøfugl/SEAPOP](http://www.nina.no/Miljøovervåking/Sjøfugl/SEAPOP)) og COAT (overvåking av klimaendringer i Arktis: [www.nina.no/Våre-fagområder/Prosjekter/COAT](http://www.nina.no/Våre-fagområder/Prosjekter/COAT)) er andre terrestriske overvåkingsprogrammer hvor akustikk kan gi viktig

tilleggsinformasjon. For eksempel kan fugler gjenkjennes automatisk ved hjelp av maskinlæring (Priyadarshani mfl. 2018, Stowell mfl. 2019) og det er også mulig å bruke lydopptak til å estimere bestandsendringer (Abrahams 2019).

For akvatiske miljøer vil overvåkingsprogrammer som f.eks. ØKOFERSK, ØKOSTOR og FIST (basisovervåking relatert til vannforskriften: [www.nina.no/Vare-fagomrader/Miljoovervaking-i-vann/Vannforskriften](http://www.nina.no/Vare-fagomrader/Miljoovervaking-i-vann/Vannforskriften)) ha stor nytte av å inkludere akustikk som et tillegg i verktøykassa. Tidlig oppdagelse av fremmed ferskvannfisk ([www.nina.no/fremmede-ferskvannsfisk](http://www.nina.no/fremmede-ferskvannsfisk)) kan gjøres autonomt og kontinuerlig i sanntid.

De fleste overvåkingsprogrammene nevnt over for både terrestriske og akvatiske miljøer skal dekke et nasjonalt nivå, og noen programmer besøker hver lokalitet hvert år, mens andre programmer er økonomisk begrenset til å kun besøke hver lokalitet innenfor en omløpstid på fem år. Dette betyr at man ikke klarer å fange opp sesongvariasjoner innen år, og i mange tilfeller heller ikke variasjon mellom påfølgende enkeltår. Med autonome akustiske loggere kan man ha kontinuerlig overvåking og fange opp fenologiske endringer, fremmede arter og endringer i økologisk tilstand innen og mellom år uten en stor tilleggsinnsats i feltarbeid.

Denne kontinuerlige overvåkingen gjør metoden også svært anvendbar der man er interessert i å måle endringer over tid, som eksempelvis før, under og etter utbyggingsprosjekter, eller ved restaureringsprosjekter, eller for å måle klimaendringer over lengre tid.

## 2.3 Utviklingsbehov

Mens akustisk overvåking har mange fordeler sammenlignet med andre metoder, og kan være komplementær til mange eksisterende metoder, finnes det naturligvis noen utviklingsbehov som må adresseres. Gjennom litteratur gjennomgangen (Seksjon 3-6) og erfaringer i felt (Seksjon 7), har vi identifisert følgende utviklingsbehov:

### 2.3.1 Teknologisk løsning for autonom, kontinuerlig akustikkovervåking

Semi-autonome lydlogger løsninger, der batterier og minnekortet byttes periodevis, er utsatt for menneskelige feil, som kan føre til tap av data. Slike løsninger er også ofte begrenset av minnekapasitet og kan dermed ikke gjøre opptak kontinuerlig, men må programmeres til å ta opp mindre perioder gjennom døgnet. Sethi mfl. (2020c) har utviklet en autonom lydlogger som er drevet av solcellebatterier og som sender hele datasettet over mobilnettverk. Disse har vært testet i Borneo som en 'proof-of-concept' og i løpet av våren 2021 vil disse bli masseprodusert for kommersielt salg. *Disse autonome lydloggerne bør testes og utvikles for anvendelse på storskala i Norge.*

### 2.3.2 Datahåndtering pipeline

Langsiktig og storskala anvendelse av den akustiske tilnærmingen vil uunngåelig gi en massiv mengde informasjon, med tilhørende utfordringer i databehandling og analyse (Pieretti & Danovaro 2020). En effektive automatiserte pipeline for lagring av lyd og metadata, automatisk fjerning av menneskestemmer for personvern og lydbehandling, er derfor en forutsetning for å kunne skalere opp akustiske overvåkingsstudier. Erfaringer i NINA fra viltkamera overvåking er at dette kan by på utfordringer. Innen akustisk overvåking eksisterer allerede en slik ramme for denne pipelinen, publisert av Sethi mfl. (2020c) og som er åpent tilgjengelig for nedlasting. *Denne pipelinen for automatisk lagring og prosessering av akustisk data bør testes og utvikles for anvendelse i Norge.*

### 2.3.3 Personvern

Lydloggere tar opp all lyd, inkludert menneskestemmer. For å kunne opprettholde personvern, må alle opptak av menneskestemmer fjernes, eller gjøres ugjenkjennbar automatisk ved hjelp av en

algoritme før den blir gjort tilgjengelig for forskere/forvaltere). Flere mulige løsninger eksisterer i form av forskjellige typer analyser/algoritmer, men disse må tilpasses vår behov. Algoritmer for fjerning av menneskestemmer av opptak for personvern hensyn må utvikles og tas i bruk som en del av datahåndterings pipelinen.

### 2.3.4 Analysemetoder tilpasset Norge

I samarbeid med Miljødirektoratet og andre brukere, må prioriterte områder og problemstillinger for bruk av akustisk overvåking prioriteres. Ut ifra prioriteringene kan hensiktsmessige maskinlæringsanalyser utvikles. Når slike metoder er utviklet, kan de tas i bruk for automatisert analyse av datasettene som samles inn. Automatiserte maskinlæringsalgoritmer bør utvikles og tas i bruk for prioriterte problemstillinger i norsk naturforvaltning.

### 2.3.5 Standardisert overvåkingsdesign tilpasset Norge

En integrert del av ethvert fremvoksende felt er å etablere et felles rammeverk slik at data kan sammenlignes mellom studier. I akustikk, inkluderer dette standardisering av prøvetakings-/opptaksmetoder, beregninger og indekser som brukes i dataanalyse, visualiseringsverktøy, sensorkalibrering og validering av metoder. Et standardisert overvåkingsdesign må utvikles, testes og tas i bruk slik at all overvåkingsdata uansett plassering i tid og rom kan brukes av forvaltningen på et senere tidspunkt.

### 2.3.6 Referansedatabaser for norske arter

Flere databaser for lyd eksisterer allerede for tilgjengeliggjøring av bioakustiske eller økoakustiske lydopptak (f. eks. The Macaulay Library; <https://www.macaulaylibrary.org>, xeno-canto; <https://www.xeno-canto.org> og BioAcoustica; <http://bio.acousti.ca>). Men kun 21% av bioakustiske opptak beskrevet i litteraturen er lagret i en åpent tilgjengelig lyddatabase, og veldig få økoakustiske opptak (Baker & Vincent 2019). Dette hindrer bruk av automatisk gjenkjenning for bioakustiske datasett. Noen norske arter finnes i referansedatabaser (f.eks 43 norske fuglearter i xeno-canto), mens andre må tas opp og inkluderes i referansedatabaser. Referansedatabaser bør utvides til å inkludere forvaltningsrelevante norske arter.

## 2.4 Anbefalinger

Basert på utviklingsbehovene beskrevet i 2.3 gir vi her en punktvis oversikt over anbefalinger for videre utvikling av akustikk som en kostnadseffektiv metode for norsk forvaltning.

- 1. Utvikle og teste hel-autonom lydlogger teknologi tilpasset bruk i Norge:**
  - Utvikle riktig kombinasjon av batteri, solcelle og lydlogger.
  - Teste utstyret og lydopptakinnstillinger under kontrollert forhold
- 2. Etablere data-håndterings pipeline med følgende stadier:**
  - Data logging
  - Data overføring via mobilnettverk
  - Database struktur og lagringskapasitet
- 3. Utvikle metoder for å opprettholde personvern:**
  - Utvikle algoritmer for fjerning/anonymisering av menneskestemmer
- 4. Tilpasse analysemetoder til norske behov:**
  - Sammenstilling av treningsdatasett
  - Modellutvikling/tilpasning
- 5. Etablere referansedatabaser for norske arter:**
  - Skrivebordsstudie for å identifisere forvaltningsrelevante arter
  - Ta i bruk eksisterende datasett/samle inn nye data
  - Modellutvikling/tilpasning
- 6. Utvikle standard overvåkingsdesign for norske forhold (dvs. relativt artsfattige økosystemer og dermed relativt liten akustisk aktivitet) med fokus på:**
  - Romlig plassering av lydloggere
  - Temporalt design
  - Lydinnstillinger
- 7. Gjennomføre en pilotstudie for å ta i bruk og teste utviklet teknologi og tilnærminger:**
  - En slik studie bør være knyttet til eksisterende prosjekter som f.eks. insektovervåking, SCANDCAM, TOV osv. for å kunne sammenligne og validere biologiske tolkninger av resultatene.
  - Installering av lydlogger enheter utviklet i punkt 1.
  - Applikasjon av datahåndterings pipeline utviklet i punkt 2.
  - Bruk av personvern metoden utviklet i punkt 3.
  - Innsamling av data som kan brukes til å validere metodene i punkt 4-6.

## 2.5 Kostnader

De fleste typer lydloggere tilgjengelig på markedet i dag er semi-autonome. Det vil si at batterier og minnekort må byttes manuelt etter noen dager eller uker med opptak. I pilotstudien presentert i denne rapporten har vi benyttet den rimelige semi-autonome lydloggeren AudioMoth ([www.openacousticdevices.info/audiomoth](http://www.openacousticdevices.info/audiomoth) (Hill mfl. 2018a)). Enhetsprisen for AudioMoth er per i dag cirka 3 000 NOK inkludert batterier, minnekort og vanntett bokser. I tillegg kommer timekostnader for feltpersonell for å besøke hver lokalitet ca. hver annen uke, og for å laste opp data fra minnekortene til en sentral server.

Mens AudioMoths er gode, fleksible løsninger for forskning, krever de forholdsmessig mye vedlikehold og er for sårbar for menneskelige feil til å være et driftssikkert forvaltningsverktøy. Vi anser at det er nødvendig å oppgradere til en hel-autonom løsning for å kunne ta i bruk akustisk overvåking i stor skala i norsk naturforvaltning. Dette er mulig å gjennomføre ved å tilpasse systemet beskrevet i Sethi mfl. (2018) til norske forhold. Enhetsprisen for dette systemet er per i dag ca. 4 000,- inkludert vanntett boks, dersom man har strømtilgang. Med batteri og solcellepanel blir totalprisen ca. 10 000,- pluss timer til kostnader for montering. Men timekostnadene blir betydelig mindre for vedlikehold og datahåndtering sammenlignet med AudioMoth loggeren. Som ny teknologi under utvikling, er ikke levetiden til de nye enhetene formelt beskrevet enda. Enheter testet i regnskogen (Sethi mfl. 2020a) hadde en levetid på over to år, noe som kan forventes å øke i tempererte klimaer slik som i Norge.

Anbefalinger lagt frem i kapittel 2.4, gir et veikart for å kunne ta i bruk passiv akustisk overvåking som et verktøy i norsk naturforvaltning. Dette veikartet er basert på tilpassing av Sethi's lydloggere og datahåndteringspipeline. Et Gantt chart er gitt i **Tabell 1**. Det er estimert at Trinn 1 har en kostnad av 2.2 mil NOK.

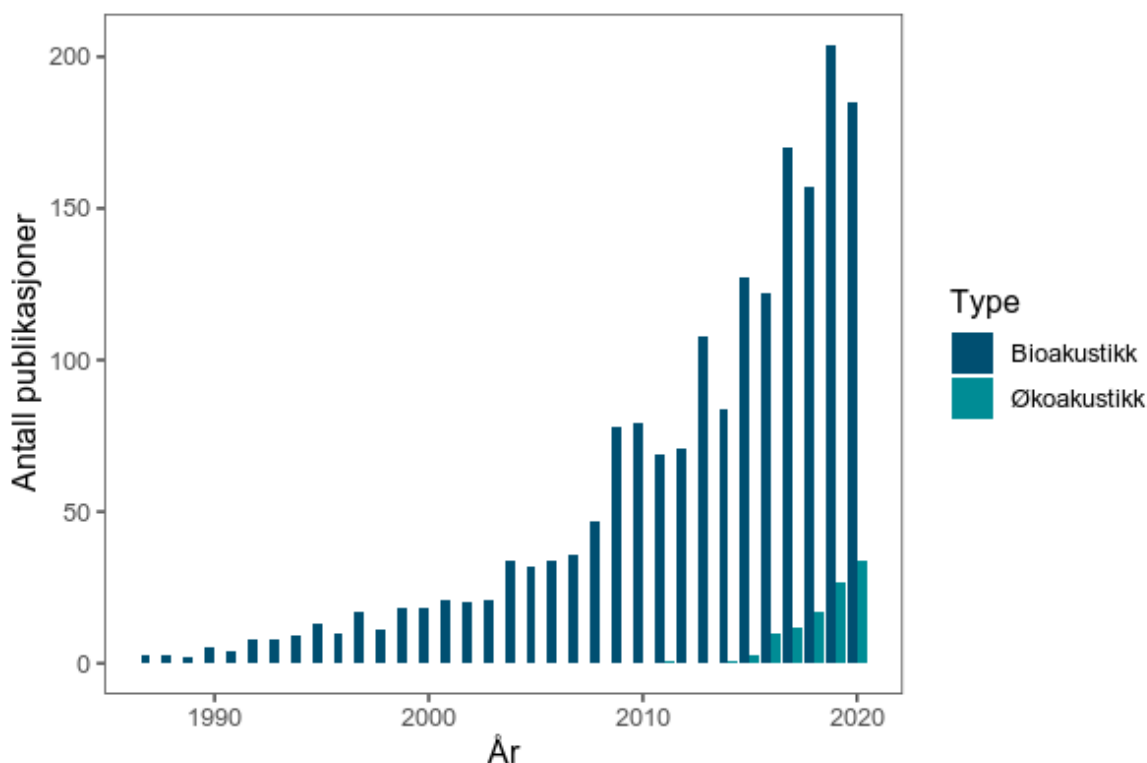
**Tabell 1.** Tidslinje for å utvikle en metode for akustisk overvåking i norsk naturforvaltning

	Trinn 1				Trinn 2			
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
1. Utvikle hel-autonom lydlogger utstyr tilpasset bruk i Norge	■							
2. Utvikle data-håndterings pipeline		■						
3. Metoder for å opprettholde personvern		■						
4. Analysemetoder tilpasset Norge					■			
5. Referansedatabaser for norske arter					■			
6. Utvikle standard overvåkingsdesign for norske forhold					■			
7. Pilotstudie		■						



### 3 Kunnskapssammenstilling akustisk overvåking

Et mylder av organismer, inkludert krepsdyr, edderkoppdyr, insekter, fisk, amfibier, reptiler, fugler og pattedyr produserer artsspesifikke akustiske signaler som del av deres daglige aktivitet (Bradbury & Vehrencamp 1998). De etterlater med det et informativt spor som kan registreres og undersøkes videre for å avsløre artenes tilstedeværelse og andre aspekter ved deres økologi og atferd (Blumstein mfl. 2011). Dermed kan passiv akustisk overvåking av biologiske lyder på en ikke-invasiv måte gi langsiktige og standardiserte data om sammensetningen og dynamikken i dyresamfunn. Økologisk forskning ved bruk av akustisk overvåking blir i økende grad benyttet både i terrestriske og akvatiske økosystemer (Linke mfl. 2018, Sugai mfl. 2019), og det har vært en kraftig økning av vitenskapelige publikasjoner det siste tiåret (Figur 2). Akustisk overvåking er blitt brukt til å gjennomføre raske akustiske undersøkelser i prioriterte bevaringsområder, for å oppdage tilstedeværelse av kryptiske arter og for å avdekke endringer i artsmangfold, fenologi og distribusjon (Laiolo 2010, Sueur & Farina 2015). Akustisk overvåkings opptak kan utvide mulighetene for å overvåke populasjoner og samfunn over tid (Farina 2014, Deichmann mfl. 2017) og rom (Llusia mfl. 2013, Lomolino mfl. 2015), og kan forbedre vår kapasitet til å vurdere økologiske prosesser i stor skala (Sugai mfl. 2019).

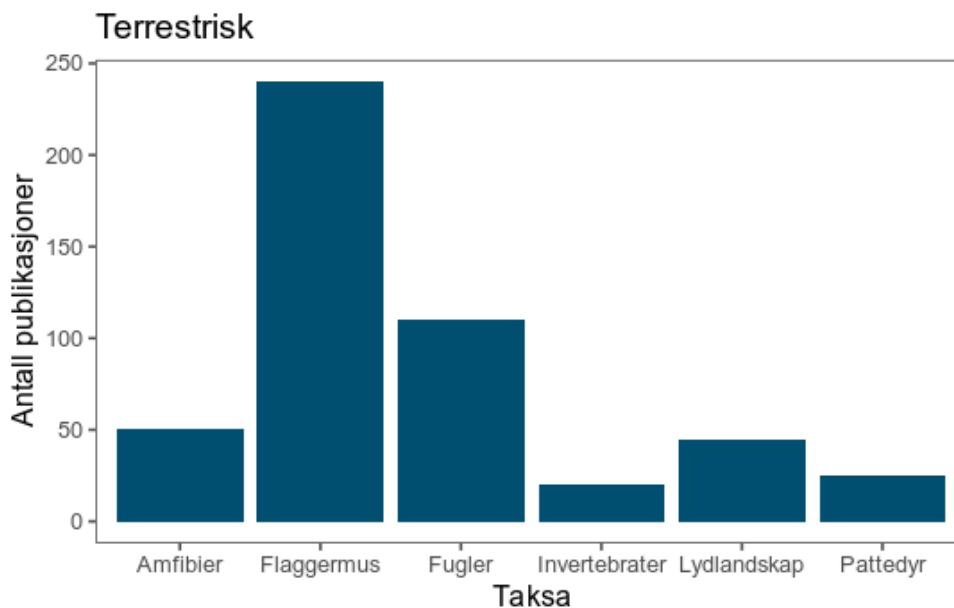


**Figur 2.** Utviklingen i antall publikasjoner per år for henholdsvis bioakustikk og økoakustikk. Data er samlet fra et søk på Web of Science for «bioacoustic\*» og «ecoacoustic\*» den 1.12.2020.

#### 3.1 Akustisk overvåking i terrestriske miljøer

Passiv akustisk overvåking har utviklet seg til å bli et potensielt kraftig verktøy for overvåking av biologisk mangfold. Metoden kan støtte et bredt spekter fra økologiske til atferdsmessige, samt bevaringsmessige applikasjoner. På tross av dette er bruk av akustisk overvåking i terrestriske miljøer fortsatt relativt begrenset. Flaggermus er den desidert mest studerte dyregruppen basert på antall vitenskapelige publikasjoner (50% av artiklene, **Figur 3**). Det har også vært en stor fokus på akustisk overvåking av fugler i terrestriske miljøer og det eksisterer store referansedatabaser på fuglesang

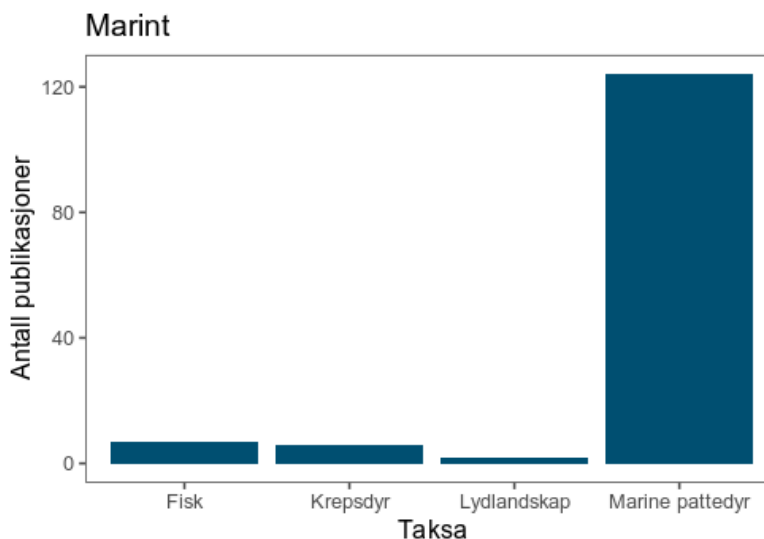
(f.eks. Xeno-Canto med nesten 600 000 opptak fra over 10 000 arter hvorav 43 arter er norske; <https://www.xeno-canto.org>).



**Figur 3.** Antall publikasjoner fordelt på taksa og generelt lydlandskap for terrestriske studier (fra Sugai mfl. 2019).

### 3.2 Akustisk overvåking i marine miljøer

Lydlandskaper under vann er dynamiske og varierer i tid og rom, og mellom habitater. Lydlandskapene kan bestå av bidrag fra menneskelig aktivitet (f.eks. skipsfart, seismiske undersøkelser), naturlige abiotiske prosesser (f.eks. vind, regn, is), ikke-akustiske biotiske faktorer (f.eks. bevegelse av dyr), og akustiske bidrag fra lydproduserende, biologiske kilder (f.eks. sjøpattedyr, fisk og krepsdyr) (Howe mfl. 2019). De aller fleste vitenskapelige publikasjonene som handler om akustikk i det marine miljøet fokuserer på pattedyr (**Figur 4**).



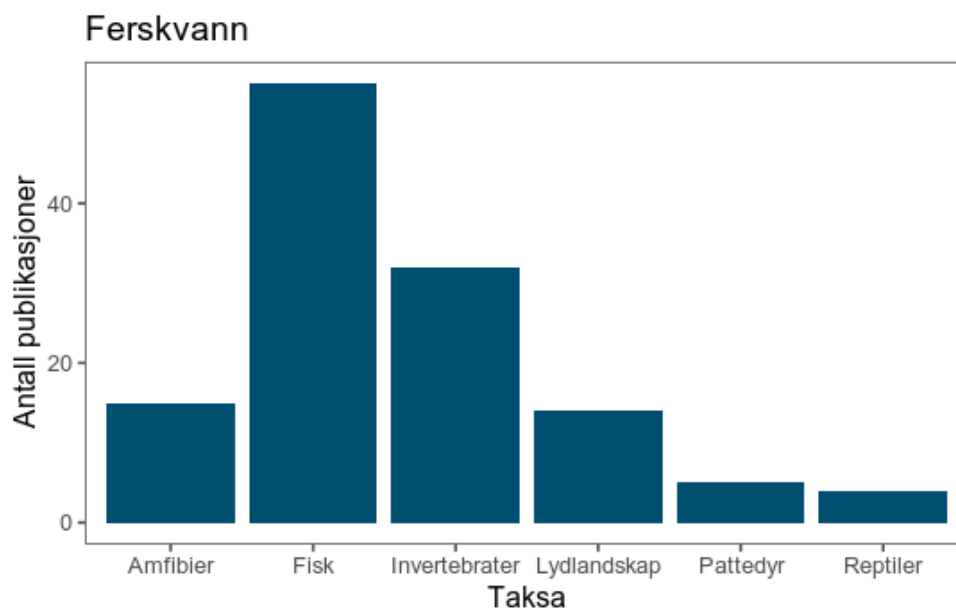
**Figur 4.** Antall publikasjoner fordelt på taksa og generelt lydlandskap for marine studier (fra Pieretti2020).

Lyd forplanter seg mye raskere i vann enn i luft (Urlick 1983), spesielt sammenlignet med lys, som er grunnlaget for mange visuelle og tradisjonelle undersøkelsesmetoder. Opptak av lydlandskaper kan brukes under en rekke forhold når syn og andre observasjonsmetoder er begrenset, som for eksempel i dyphavet (Bolgan & Parmentier 2020) og i mørkt og grumsete vann (Lammers mfl. 2008, McCauley mfl. 2017). Videre finnes det nå en rekke avanserte passive akustiske opptakere som tillater kontinuerlige, langvarige opptak under vann på en kostnadseffektiv måte, og som i stor grad utvider bredden av brukere og applikasjoner. Det lar seg også gjøre å overvåke steder i flere måneder uten menneskelig tilstedeværelse eller forstyrrelser. Langvarige opptak kan være spesielt nyttig for å sammenligne biologisk mangfold før og etter spesifikke naturlige eller menneskeskapt hendelser, som for eksempel stormer (orkaner (Locascio & Mann 2005, Biggs mfl. 2018)), nedbrytning av habitat (oljeutslipp, konstruksjon (Ackleh mfl. 2012)), klimarelaterte endringer (temperaturøkning (Tittensor mfl. 2010) eller oppretting av marine verneområder (Rayment mfl. 2009)).

### 3.3 Akustisk overvåking i ferskvannsmiljøer

Det biologiske mangfoldet i ferskvannsmiljøet reduseres raskere enn i noen andre typer miljøer (Dudgeon 2020). Dette er hovedsakelig et resultat av menneskelige aktiviteter. I de fleste overvåkingsstudier er prøvetakingsstrategien stort sett avhengig av å samle inn dyre- og planteprøver. Selv om disse teknikkene produserer verdifulle data, er de invasive, tidkrevende og tillater vanligvis bare begrenset romlig og tidsmessig replikasjon. Det er behov for utvikling av mer effektive metoder. Som for andre økosystemer, finnes det dyr som lager lyder også i ferskvannsmiljøer, enten til bruk for kommunikasjon eller som et biprodukt av aktivitet. Så langt er det fisk og invertebrater som er mest studert i vitenskapelige studier (**Figur 5**). Selv om mange fisker og invertebrater ikke produserer lyd for kommunikasjon, er det viktig å forstå at tilfeldig lydproduksjon kan forekomme ved fysiologisk og atferdsmessig aktivitet (f.eks. lyder knyttet til svømming eller næringsopptak). Disse akustiske kjennemerkene kan brukes til å vurdere tilstedeværelsen av individer av en bestemt art og kan derfor innlemmes i PAM-overvåkingsprosedyrer (Rountree 2019). De viktigste lyd dannende gruppene i ferskvann er amfibier, fisk og makroinvertebrater (hovedsakelig Coleoptera og Hemiptera, men også noen Decapoda, Odonata og Trichoptera). Biofysiske prosesser som strømhastighet eller sedimenttransport produserer også lyder, så vel som menneskelige aktiviteter i akvatiske økosystemer.

Passiv akustisk overvåking representerer et relativt uutnyttet alternativ for å studere ferskvannøkosystemer. Akustisk deteksjon er ikke-invasiv og har ingen merkbar negativ innvirkning på levende organismer. Det er kort tid siden passive akustisk overvåking først ble tatt i bruk i ferskvannsmiljøer, og dermed er metoden mindre utviklet i dette miljøet sammenlignet med terrestriske og marine miljøer. Bruk av akustisk overvåking i ferskvann er for tiden begrenset av manglende referanselyder for individuelle ferskvannarter (men for noen eksempler se Greenhalgh mfl. (2020)). Det pågår arbeid med å beskrive og dokumentere flere arter, men fremgangen er langsom (Rountree mfl. 2019). En av fordelene med bruk av bioakustikk i Norge er at ferskvannsmiljøene er relative artsfattige, og dermed er ikke veien frem til at de fleste arter er beskrevet så lang. Vi ser i dag en økt bruk av økoakustikk, blant annet fordi den ikke krever store referansedatabaser (Greenhalgh mfl. 2020).



**Figur 5.** Antall publikasjoner fordelt på taksa og generelt lydlandskap for ferskvann studier (fra Grennhalgh et al. 2019).

## 4 Overvåking ved hjelp av lyd

### 4.1 Overvåking av enkeltarter - bioakustikk

Bioakustikk (bioacoustics) er studien av hvordan mennesker og andre dyr bruker lyd og akustisk oppfatning, og hvordan deres forskjellige akustiske tilpasninger gjenspeiler forholdet til habitat og omgivelser. Det skjer nå en rask utvikling av bioakustisk overvåking innen naturforvaltning, godt støttet av de nyeste teknologiske og analytiske fremgangene (Snaddon mfl. 2013). I motsetning til det beslektede feltet økoakustikk, fokuserer bioakustikk på akustiske signaler fra individer og arter, snarere enn på bredere økologiske prosesser eller habitater (Sueur & Farina 2015). Bioakustisk overvåking blir stadig mer populært for å registrere tilstedeværelse av arter (Sebastian-Gonzalez mfl. 2015), atferd (Obrist mfl. 2010) og fenologi (Farnsworth & Russell 2007), og gjennomføre populasjonsestimater (Borker mfl. 2014). Kapittel 4 omhandler disse applikasjonene mer detaljert. Bioakustikk er avhengig av referanselyd-databaser for gjenkjenning av arter, noe som kan være en begrensning i noen grupper av dyr (fugler er best dokumentert), eller geografiske områder der få arter er dokumentert. Økoakustikk unngår denne begrensningen ved å ikke fokusere på enkelte lyder, men heller hele landskapet.

### 4.2 Overvåking av artssamfunn - økoakustikk

Økoakustikk (ecoacoustics) ble først formelt definert i 2015 (Sueur & Farina 2015). Det undersøker naturlige og antropogene lyder og deres forhold til miljøet over flere skalaer av tid og rom (Farina & Gage 2017). Lydbildet er sammensatt av akustiske signaler fra tre typer kilder som må skilles fra hverandre for å forstå økologiske signaler, biofoni, geofoni og antrofoni (se **Tekstboks 2**).

---

#### *Tekstboks 2 – Komponenter av lydbildet*

<i>Biofoni</i>	Biotiske lyder, som kan oppstå fra dyrekommunikasjon eller som et biprodukt av andre aktiviteter, for eksempel fra bevegelse.
<i>Geofoni</i>	Naturlige abiotiske prosesser som f.eks. vind, bølger, turbulens, seismikk, is.
<i>Antrofoni</i>	Menneskegenererte lyder som f.eks. båter, biler, skudd, seismikkmåling, snøscotere.

---

Økoakustikk bruker alle lyd-kildene i lydlandskapet for å formidle viktig informasjon om økosystemers økologiske tilstand på (Sueur & Farina 2015). I stedet for å prøve å gjenkjenne artsspesifikke lyder, bruker økoakustikk hele artssamfunn i stedet for enkeltarter for å vurdere biomangfold. Lydendringer i tid og rom gjør det mulig å estimere endringer i økosystemets funksjonalitet (Pijanowski mfl. 2011b, Sueur mfl. 2014, Sueur & Farina 2015, Risch & Parks 2017). Dette oppnås ved prøvetaking på store observasjonsskalaer og ved å bruke biomangfoldindekser eller automatiserte algoritmer som er utviklet for å identifisere intensiteten, mangfoldet eller kompleksiteten av biologiske lyder (Sueur mfl. 2014).

### 4.3 Overvåking av menneskelig påvirkning

Akustisk overvåking kan brukes for å evaluere menneskelig påvirkning på to måter. Man kan kvantifisere menneskelig aktivitet i sanntid (f.eks. antall biler, snøskutere eller skudd), og for eksempel gi

verdifull informasjon til forvaltningen av freda områder og hindre ulovlig snøskuterkjøring eller kryptskyting (Wall mfl. 2014, Buxton mfl. 2018). Eller man kan måle effekten av menneskelig aktivitet på arter eller økosystemer (f.eks. endret utbredelse av en art som følge av menneskelig inngrep som habitatfragmentering). Google AudioSet er en storskala database av manuelt beskrevne (manually annotated) lyder (<https://research.google.com/audioset/>). Denne databasen kan brukes som en referansedatabase for menneskelyd. Som et eksempel på kvantifisering av menneskelig aktivitet ved bruk av Google AudioSet, utviklet (Sethi mfl. 2020b) en helautomatisert analyse av lydbildet for å muliggjøre en rask og skalerbar økologisk overvåking. De brukte et nevralt nettverk for å beregne fingeravtrykk av lydlandskaper fra en rekke økosystemer. Fra disse akustiske fingeravtrykkene kunne de nøyaktig forutsi habitatkvalitet og biologisk mangfold på tvers av flere skalaer, og automatisk identifisere unormale lyder som skudd og motorsag.

## 5 Bruksområder for akustikk i forvaltning

Klimaendringer, nedbrytning av habitat, invasjon av fremmede arter og overutnyttelse er trusler mot biologisk mangfold som alle kan undersøkes ved hjelp av en akustisk tilnærming. Forandringer i fenologien til plante- og dyrepopulasjoner kan føre til endringer i lydlandskapet gjennom året, knyttet til mange forskjellige økologiske funksjoner (f.eks. reproduksjon, gyting, predasjon eller migrasjon). Nedbrytning av habitat, eutrofieringshendelser eller overutnyttelse kan forårsake endringer i mengden av lyder fra både terrestriske og akvatiske arter. Fremmede arter kan identifiseres ved plutselig tilstedeværelse av lydtyper som tidligere ikke var vanlig (Pieretti & Danovaro 2020). Overvåking av både enkeltarter og hele økosystemer kan gi viktig informasjon for forvaltningen. De følgende avsnittene gir en rekke eksempler på dette.

### 5.1 Forekomst

Akustisk overvåking er spesielt godt egnet for utilgjengelig miljøer (f.eks. under dårlige lysforhold, vanskelig tilgjengelig områder, miljøer dekket av snø eller av vann) eller i miljøer med kryptiske arter. For eksempel har akustisk overvåking blitt brukt til å estimere tilstedeværelse og tetthet av afrikanske skogelefanter (*Loxodonta cyclotis*) som lever i tette regnskoger i Sentral-Afrika (Wrege mfl. 2017), en kryptisk fiskeart i tropiske kysthabitater (Staaterman mfl. 2017) og en endemisk og truet fugleart i Puerto Ricos fjell (Campos-Cerqueira & Aide 2016). Invasive arter av fisk (Rountree & Juanes 2017) og skadeinsekter (Mankin mfl. 2010) har også blitt påvist ved bruk av akustisk overvåking. På samme måte kan man med akustisk overvåking påvise tap av arter fra et sted etter naturkatastrofe, sykdom eller andre forstyrrelser (Deichmann mfl. 2018).

Bioakustiske data kan effektivt brukes til modellering av tilstedeværelse ('occupancy modelling') ved gjentatte undersøkelser (Abrahams & Geary 2020). Denne modelleringen tar hensyn til at ingen observasjonsmetode er perfekt og at det dermed ikke er mulig å påvise alle arter ved lav tetthet. Metoden bruker hierarkiske Bayesiske analyser til å skille mellom sannsynligheten for at en art blir oppdaget i en undersøkelse og sannsynligheten for at en art faktisk er tilstede. Man kan dermed estimere usikkerheten for tilstedeværelse av enkeltarter eller grupper av arter ut ifra et stort komplekst datasett. En slik modellering av bioakustiske data er allerede tatt i bruk både for enkeltarter (f.eks. en endemisk og truet fugleart i Puerto Ricos fjell (Campos-Cerqueira & Aide 2016)) og store sammenhengende datasett (f.eks. (Staaterman mfl. 2017, Sethi mfl. 2020b)). Metoden er avhengig av at man har repeterte målinger over tid og rom, og at man har noen målinger der man ikke observerer arten eller artsgruppen man ønsker å modellere. Med kontinuerlig overvåking kan man dele inn observasjonene i ulike tidsrom for å skape repeterte målinger, samt analysere hvordan lengden på undersøkelsen påvirker sannsynligheten for å påvise en art.

Muligheten for kontinuerlig overvåking vil øke sannsynligheten for å oppdage både sjeldne og fremmede arter sammenlignet med tradisjonelle metoder. Gjennom 'edge computing' (lokal databehandling i opptaksenheter), kan forekomsten kalkuleres i sanntid og automatisk varsles til en sentral. Passiv akustikk brukes rutinemessig til å oppdage og kartlegge forekomsten av en invasiv padde (agapadde, *Bufo marinus*) i Australia ved hjelp av et trådløst akustisk sensornettverk (Hu mfl. 2009). I Australia blir også invasjonen av stær (*Sturnus vulgaris*) automatisk lokalisert og sporet på denne måten (Campbell mfl. 2016). Passive akustiske verktøy er også blitt brukt i ferskvannøkosystemer for å oppdage tilstedeværelsen og den potensielle introduksjonsveien til en invasiv fiskeart (freshwater drum, *Aplodinotus grunniens*), i Hudson River (Rountree & Juanes 2017, Juanes 2018).

Når en invasiv art er oppdaget, kan aktiv akustikk (dvs. avspilling) også brukes til å påvirke artens adferd for å forhindre videre spredning eller for å effektivisere fangstsuksess som et kontrolltiltak. Fremmede sølvkarper (silver carp, *Hypophthalmichthys molitrix*) i Mississippi River viser negativ phonotaxis (dvs. flukt vekk fra lydilden) til f.eks. undervannsoptak av båtmotorer, noe som

dermed kan utnyttes til å påvirke artens bevegelser (Vetter mfl. 2017). Avspilling av lyden fra en hann av agapadde tiltrekker andre padder ved phonotaxis (dvs. lyden virker tiltrekkende). Hvis det akustiske tiltrekkingsmiddelet er plassert inne i en felle, kan man øke fangsteffektiviteten for hunnpadder, noe som antyder at dette kan forbedre effektiviteten til tiltak som skal kontrollere utbredelsen (Yeager mfl. 2014). Tilsvarende kan invasiv ekorn (Pallas's squirrel, *Callosciurus erythraeus*) tiltrekkes ved hjelp av avspilling av mobbing eller parringslyder (Noriko mfl. 2013) og stær blir fanget ved hjelp avspilling av deres fôrings- og varsellyder (Juanes 2018).

## 5.2 Fenologi

Naturovervåking ved hjelp av satellittobservasjoner av klima og vegetasjon kan forbedres og gjøre mer finmasket ved å ta i bruk bioakustiske nettverk. Denne tilnærmingen kan muliggjøre global forståelse av hvordan klimaendringer påvirker fenomener som ankomst- og avreisetidspunkt for trekkelige arter (f.eks. fugler, fisk, pattedyr). Hüppop mfl. (2006) og Farnsworth og Russell (2007) brukte akustisk overvåking for å identifisere trekkfuglarter og beskrive mønstre i nattlig vandringsaktivitet. Slike data er det neppe mulig å samle inn uten akustisk overvåking på grunn av ineffektiviteten til visuelle metoder om natten (Blumstein mfl. 2011).

Kontinuerlig overvåking, som er nødvendig for å identifisere endringer i fenologi, genererer enorme datasett. Automatiserte analyser, som er nødvendige for å håndtere disse datasettene, har blitt utviklet og testet de siste årene. Imidlertid er det få eksempler på studier som viser fenologiendringer over lengre tidsperioder (f.eks. som en konsekvens av klimaendringer) på grunn av behovet for langtids dataserier. I et av få eksempler fant Narins og Meenderink (2014) indikasjoner på en økning i lydfrekvensen og en forkortelse i parringsropet hos froskearten *Eleutherodactylus coqui* langs en høydegradient som en konsekvens av temperaturøkning over en periode på 23 år i Puerto Rico. I et annet eksempel, kunne et datasett som strekker seg fra 1900 til i dag fra Ithaca, NY, vise at fire froskearter nå starter å kvekke 10 til 13 dager tidligere om våren, to arter er uendret, mens ingen arter starter kvekkingen senere. Dette antas å være et resultat av varmere klima (Gibbs & Breisch 2001).

Analytiske tilnærminger kan også utvikles i påvente av langsiktige datasett. Oliver mfl. (2018) utviklet automatisert signalbehandling og maskinlæring for å estimere datoene for når flokker av sangfugler ankom arktiske hekkeplasser. Datoene som ble estimert med akustikk stemte godt overens med datoene de kom frem til via tradisjonelle undersøkelser, og estimatene var sterkt relatert til det tidspunktet det ble snøfritt. De fant at miljøforhold hadde en sterk påvirkning på daglig variasjon i sangfuglenes sangaktivitet, spesielt før egglegging. Denne nye tilnærmingen gjør det mulig å oppdage variasjon i fuglevandringene med liten innsats i felt. Storskala naturovervåking vil kunne gi den nødvendige dekningen i tid og rom for å vurdere og forutsi endringer i vandringspunktet for en rekke dyregrupper i møtet med klimaendringene (Oliver mfl. 2018).

## 5.3 Bestandsestimat

Passiv akustikk brukes også i økende grad til å estimere dyretetthet. Estimert tetthet basert utelukkende på akustiske data er allerede presentert for noen taksonomiske grupper, inkludert insekter (Fischer mfl. 1997), hvaler (Marques mfl. 2013), fugler (Adi mfl. 2010) og elefanter (Thompson mfl. 2010). Akustiske estimater av tetthet viser seg å korrelere med resultatene fra tradisjonelle metoder for flere sjøfuglarter (Borker mfl. 2014), maned ulver (*Chrysocyon brachyurus*) (Rocha mfl. 2015), delfinartene *Cephalorhynchus heavisidii* og *Lagenorhynchus obscurus* (Martin mfl. 2020), og den nordamerikanske trefrosken *Lithobates sylvaticus* (Crump et al 2017).



## 5.4 Biologisk mangfold

I terrestriske miljøer kan akustiske indekser (Tekstboks 4), som et fullstendig og mangfoldig lydspekter, være en indikator for biologisk mangfold (Sueur mfl. 2009, Pijanowski mfl. 2011b). For eksempel, viste en undersøkelse av lydlandskapet i en skog i Costa Rica (Sueur 2002, Sueur mfl. 2009) at akustisk mangfold korrelerte sterkt med vertikal kompleksitet i skogsstruktur, noe som antyder at akustisk overvåking kan være en effektiv metode for å identifisere skogholt som inneholder høyt biomangfold (Pekin mfl. 2012). Sammenhengen mellom økologisk tilstand og lydbilder gjelder også akvatiske miljøer. Desjonqueres mfl. (2018) identifiserte en kobling mellom konnektivet i ulike deler av elva og det akustiske invertebratsamfunnet i et elvesystem. Vi ser vellykkede eksempler på hvordan biologisk mangfold og økoakustikk er knyttet sammen også i marine miljøer, for eksempel korallrev og tareskog. Sunne korallrev og tareskoger gir stort biologisk mangfold, og produserer et generelt lydbilde rikt på tidsmessige og spektrale signaturer skapt av kakofonien til vokaliserende dyr, alt fra lavfrekvente fiskerop til høyfrekvente bredbåndsllyder fra noen arter av reker (Staaterman mfl. 2014, Staaterman mfl. 2017). Tareskoger i New Zealand har vist døgn-, måne- og sesongmessige trender i lydproduksjon, de mest intense lydene oppstår ved soloppgang, i skumringen og i sommermånedene når tallet på kråkeballer, reker og lydproduserende fisk er høyest (Radford mfl. 2008). I dette systemet var det et godt samsvar mellom målinger av akustikk og tradisjonelle data for biodiversitet innsamlet av dykkere, noe som illustrerer den potensielle verdien av akustiske beregninger for overvåking og vurdering av biologisk mangfold i tareskoger (Harris mfl. 2016a).

## 5.5 Økologisk tilstand

Forvaltningstiltak og forskningsmetoder fokuserer i økende grad på økosystemnivået. Få tradisjonelle undersøkelses- eller overvåkingsmetoder er i stand til å omfatte hele spekteret av økosystemkomponenter, og nye metoder som miljø-DNA og akustikk blir derfor stadig viktigere. Økoakustikk gjør det mulig å ta opp og vurdere hele spekteret av biologiske (biofoni), geologiske (geofoni) og antropogeniske (antrofoni) økosystemkomponenter (se tekstboks 2) i et enkelt og lett innsamlet datasett. Siden lydopptaksteknologi nå tillater automatisert, kontinuerlig datainnsamling, er detaljerte datasett fra fjerntliggende eller utilgjengelige økosystemer (f.eks. fjell, dyphavet, Arktis) nå et realistisk mål. Tidsperioden for overvåking kan økes betydelig for alle økosystemer, og kontinuerlig akustisk overvåking kan brukes som et tidlig varslingsystem, som dermed indikerer endringer og behov for mer detaljerte undersøkelser.

Mens analytiske tilnærminger fortsatt er under rask utvikling på dette nye området (se pkt. 5.3), finnes det allerede mange eksempler på vellykket anvendelse av økoakustikk når det gjelder spørsmål om økologisk tilstand. Egenskaper ved lydlandskaper har identifisert forskjeller mellom avvirket og uforstyrret skog (Burivalova mfl. 2019), eutrofiert og upåvirkede tørre gressletter (Blumstein mfl. 2011), indonesiske oljepalmeplantasjer og omkringliggende naturlige skoger (Hayashi mfl. 2020). Lyd er særlig egnet til å spore endringer i biologisk mangfold på tvers av store habitattyper, for eksempel i Amazonas (Do Nascimento mfl. 2020). I akvatiske miljøer, utviklet Elise mfl. (2019) en optimalisert passiv akustisk prøvetaking for å se på forskjeller i korallrevenes økologiske tilstander. Dette ble gjort ved hjelp av akustiske indekser utført på forskjellige frekvensbånd og prøvetakingsperioder. I tillegg til å klassifisere korallrevøkosystemer i ulike tilstander, kunne de også karakterisere økosystemfunksjoner for et område. Dette gjør det mulig å påvise funksjonelle forstyrrelser i temporale og romlige skalaer som følge av klimaendringer (Elise mfl. 2019).

Økoakustikktilnærminger analyserer raskt store akustiske datasett, og kan brukes til å sammenligne effekten av habitatrestaurering mot referanseområder. Analyse av lydbildeopptak med lang varighet kan gi en rask, skalerbar vurdering av restaureringsresultater målt mot referanseforholdene som brukes til beslutningstaking (Borker mfl. 2020). Økoakustikk har blitt brukt til å overvåke forbedring

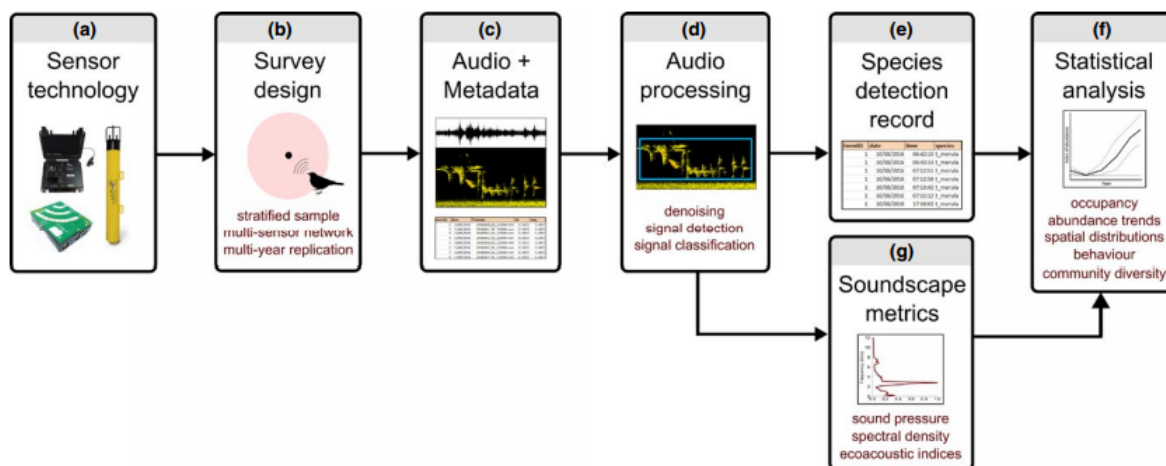
i økologisk tilstand ved restaureringstiltak i terrestriske økosystem (Buxton & Jones 2012), i marine økosystem (Becerra 2012) og i ferskvannsmiljøer (Buxton & Jones 2012, Linke mfl. 2018).

## 5.6 Akustisk tidskapsel

Automatiserte akustiske loggere blir i økende grad brukt til å overvåke arter og lydbilder over hele planeten, og de genererer en voksende og verdifull lydsamling fra dagens økosystemer. En slik samling kan bli et målestokk for fremtidig økologisk forskning, og den vil kaste lys over forståelsen vår av global endring. Allerede nå kan akustisk overvåking bidra til økologisk forskning, og øke sjansene for at en art blir oppdaget, beskrevet og dermed beskyttet. For fremtiden vil den innsamlede tidsserien med lydopptak danne «bioakustiske tidskapsler» som gir enestående historisk informasjon om strukturen og dynamikken i tidligere økosystemer, og om aktiviteten til utdødd fauna (akustiske fossiler) (Sugai & Llusia 2019). Det vil gjøre det mulig for oss å se tilbake i tid for å definere tidspunktet for hendelser, som for eksempel innvandringen av ulike fremmede arter. Digitale arkiver er relativt billige å lagre og forvalte, og åpner for muligheter for å anvende fremtidige analytiske tilnærminger ved å foredle og øke informasjon hentet fra historiske data.

## 6 Metoder for innsamling og analysing av lyd data

De fleste akustiske overvåkingsstudier involverer en pipeline som ligner på den som er presentert i **Figur 6**. Sensortechnologi og undersøkelsesdesign påvirker typen og kvaliteten på dataene som samles inn. Godt organisert, automatisert databehandling og lagring er avgjørende for å maksimere produksjonen og minimere kostnader knyttet til databehandling. Automatiserte analysemetoder er å foretrekke for å håndtere de store datasettene som genereres under akustiske studier, men en kombinasjon med manuelle metoder kan være nødvendig inntil automatiserte tilnærminger er ferdig utviklet. Avsnittene nedenfor beskriver detaljene for hvert trinn.



*Figur 6. Pipeline for innsamling, lagring og analysing av lyd dag (Fra Gibb 2018).*

### 6.1 Sensor teknologi

I motsetning til tidlige akustiske overvåkingsstudier basert på ombygde feltopptakere (Riede & Kroker 1995), er kommersielle akustiske sensorer nå sammenlignbare med kamerafeller i holdbarhet og brukervennlighet. Forbedret batterilevetid og lagring, innsamling av metadata om bord og programmerbare tidsplaner gir mulighet for utvidete autonome lydloggere med fleksible prøvetakingsregimer (Aide mfl. 2013). Men kostnadene har lenge vært høye, og modeller som Wildlife Acoustics Song Meters har ofte vært vesentlig dyrere enn tilsvarende spesifiserte kamerafeller. Men alternativer med åpen kildekode har nylig kommet på markedet. Disse reduserer kostnadene, og øker dermed tilgjengeligheten for akustiske loggere. For eksempel kan AudioMoth masseproduseres for å redusere enhetskostnadene til rundt 3000 NOK inkludert alt tilhørende utstyr (Hill mfl. 2018b), og dermed drastisk redusere de økonomiske hindringene for store multisensorundersøkelser, også selv om vedlikeholdskostnadene (f.eks. regelmessig utskifting av batterier og SD-kort) kan øke betydelig i større prosjekter. I noen tilfeller kan bruk av billige komponenter (f.eks. mikro-elektromekaniske systemer (MEMS) mikrofoner) innebære avveininger mellom sensor-kostnader og data-kvalitet, for eksempel hvis disse viser inkonsekvent frekvensrespons, lavere signal-til-støy-forhold, eller er sårbare for miljøskader. Et avgjørende spørsmål er hvor mye data-kvalitet som kan ofres uten å gå på akkord med muligheten til å utlede tilstrekkelig informasjon fra lyden (det vil si nøyaktig artsidentifikasjon).

For tiden innebærer langsiktig utplassering i felt av sensornettverk vedvarende vedlikehold og regelmessig datahentning. Det er ofte betydelig innsats og kostnader forbundet med å opprettholde et slikt nettverk, spesielt i mer logistisk utfordrende miljøer som marine områder eller fjellområder. I fremtiden har trådløse sensorer koblet i nettverk, med data som automatisk overføres til en sentral server, potensial til å redusere kostnadene betydelig. Sethi mfl. (2018) beskriver den fullstendige implementeringen av et autonomt akustisk overvåkingsnettverk som de utplasserte i tropiske regnskoger på Borneo. Sanntidslyd lastes opp eksternt fra feltet, indekseres av en sentral database, og

leveres til et offentlig nettsted ([https://sarabsethi.github.io/autonomous\\_ecosystem\\_monitoring](https://sarabsethi.github.io/autonomous_ecosystem_monitoring)). Åpen kildekode er tilgjengelig for lydloggere, databasen og nettstedet, noe som muliggjør reproduserbarhet. Den akustiske loggeren de beskriver kjører på et solcelledrevet batteri, og akustiske data overføres over telefonnettverket via et SIM-kort. Slik vi vurderer teknologien vil den i driftsfasen kun trenge betjening to ganger i året, men dette må evalueres gjennom hyppigere besøk i oppstartsfasen. Denne teknologien åpner døren for en virkelig autonom, kontinuerlig akustisk overvåking.

## 6.2 Sampling design

Etablering av standarder for datainnsamling av akustisk overvåking vil forbedre sammenlignbarheten mellom prosjekter og lokaliteter, og dermed kvaliteten på beslutninger basert på datasettet. Når opplegget for prøvetaking skal designes må en vurdere; (i) romlig design, (ii) temporalt design, (iii) nivå av akustisk aktivitet og (iv) lydinnstillinger.

Den enkleste romlige designen er en enkelt lydlogger på et gitt sted. Mer komplekse design inkluderer transekter, rutenett, 'arrays' som muliggjør triangulering, eller loggere montert på bevegelige kjøretøy som glidere (Aguzzi 2020, Bolgan & Parmentier 2020). En frittstående opptaker per sted langs en økologisk gradient eller over ulike habitattyper kan brukes for å kunne ta hensyn til miljømessig heterogenitet (Wrege mfl. 2017), for eksempel for å bestemme påvirkning av romlig strukturerte miljøfaktorer på et lydbilde, biologisk mangfold, modellering av forekomst eller atferdsendringer på tvers av habitater (Depraetere mfl. 2012, Llusia mfl. 2013, Campos-Cerqueira & Aide 2016, Campos-Cerqueira mfl. 2020). Imidlertid kan det være nødvendig med mer enn en enkelt opptaker på et område for å oppdage en indikatorart eller for å karakterisere romlig variasjon i lydbildet. For eksempel, kan flere opptakere være ønskelig for å studere populasjoner med lav tetthet (Haselmayer & Quinn 2000, Pérez-Granados mfl. 2018). I tillegg endrer den fysiske strukturen til hvert habitat muligheten til å påvise en art, blant annet er trær i skogkledde områder hindringer som reduserer sannsynligheten for påvisning (Enari mfl. 2017, Ribeiro Jr mfl. 2018).

Ideelt sett vil all akustisk overvåking registrere kontinuerlig over tid. Men for de fleste tilgjengelige lydloggere, kan autonomien ofte optimaliseres ved å planlegge og gjøre opptak på bestemte tidspunkt på døgnet. Kontinuerlig opptak i gitte perioder er derfor for tiden den vanligste overvåkingspraksisen (Sugai mfl. 2019). Hyppigheten og varigheten av registreringer påvirker oppløsningen av data i tid, og påvirker også arter og mønsterdeteksjon. Økosystemer med lavere akustisk aktivitet, som for eksempel norske skoger, krever mer intensiv prøvetaking for å identifisere økoakustiske mønstre enn tropiske skoger med mye høyere akustisk aktivitet. Av den grunn kan pilotstudier med kontinuerlige 24-timers lydopptak gi viktige tidlige estimater for effektiviteten av ulike opptaksplaner for et gitt mål (Bradfer-Lawrence mfl. 2019b).

Valg av lydinnstillinger på akustiske sensorer bestemmer kvaliteten på opptakene fra akustisk overvåkingsprogrammer (Obrist mfl. 2010, Villanueva-Rivera mfl. 2011). To nøkkelfaktorer for å vurdere kvalitet er samplingsfrekvens og «Gain». Samplingsfrekvens er antall lydampplituder fanget per sekund av en mikrofon og måles i Hertz (Hz). Samplingsfrekvensen må være minst dobbelt så høy som den maksimale tiltenkte frekvensen som skal registreres (Nyquist–Shannon samplingteoremet) for å sikre riktig registrering av signalet. Et bredt spekter av vokaliseringer fra de fleste terrestriske virveldyr og noen virvelløse dyr kan registreres med standard mikrofoner som er følsomme i frekvensområdet for menneskelig hørsel (20 Hz–20 kHz) ved hjelp av 48 kHz samplingsfrekvens. Noen pattedyr (f.eks. gnagere) og de fleste virvelløse dyr krever derimot opptak ved høyere samplingsfrekvenser og bruk av ultralydmikrofoner (f.eks. 96–192 kHz). Lydforsterkning modulerer lydampplituden til det innspilte signalet ved å forsterke eller dempe det med en konstant hastighet. Slik forsterking av lyden øker sannsynligheten for å ta opp en fjern eller svak lyd og dermed deteksjonsrommet. Det øker imidlertid også bakgrunnsstøy og øker sjansen for lydutklipp (det vil si amplituder som

overskrider enhetens maksimale rekkevidde), noe som resulterer i forvrengninger som kan gjøre videre analyser vanskeligere (Obrist mfl. 2010).

### 6.3 Databehandling

For studier med fokus på bestemte arter, eller taksonomiske grupper, må målllyder identifiseres fra opptak (Aide mfl. 2013), noe som krever rutiner for å behandle lydfiler og metadata og som produserer nyttige data (f.eks. dyrellyder, lokasjon, nøyaktig dato / klokkeslett). For studier som bruker økoakustikk for å identifisere lydlandskapmønstre, er det behov for en rutine som behandler lydfiler og metadata og som forklarer mønstre over tid og rom. Utført manuelt er denne prosessen svært tidkrevende og åpen for menneskelige feil eller subjektivitet, for eksempel skjevheter knyttet til analytikerens kunnskapsnivå for å identifisere individuelle arter (Heinicke mfl. 2015). Effektive automatiserte systemer er derfor en forutsetning for å kunne skalere opp akustiske overvåkingsstudier, med innovasjoner i maskinlæring som et viktig grunnlag for både bioakustiske og økoakustiske analytiske tilnærminger (Aide mfl. 2013, Heinicke mfl. 2015). Eksempler på slike rutiner finnes allerede og kan tilpasses og implementeres for norske akustiske overvåkingsbehov (f.eks. (Kasten mfl. 2012, Roch mfl. 2016).

Etter hvert som beregningskraften til datamaskiner øker, kan mengden data som må lagres og analyseres reduseres ved bruk av deteksjons- og klassifiseringsalgoritmer i de akustiske loggerne. Dette åpner for overvåking og varsling av hendelser i sanntid, med mange potensielle applikasjoner (f.eks. tidlig varsel om fremmede arter og varsling av skudd i jaktfrie områder).

En viktig del av behandling av rå lyd opptak er det å fjerne, eller maskere menneske stemmer. For å kunne ta hensyn til personvern, må menneske stemmer være gjort ugjenkjennbart av automatiske algoritmer allerede før forskere/forvaltere har tilgang til opptakene. Metoder eksisterer (e.g. Sethi mfl. (2020c)) som kan tilpasses til denne bruken.

### 6.4 Analyse av akustisk data

Når lyddata er samlet inn, må relevant økologisk informasjon hentes ut fra opptakene. Evalueringen av lydbilde som et verktøy for å vurdere biologisk mangfold er under rask utvikling. Det er i dag ikke én enkelt metode som er allment ansett som standarden for å kvantifisere biologisk mangfold akustisk. Noen av de akustiske teknikkene som utvikles og brukes er skissert nedenfor.

#### 6.4.1 Bioakustikk

Analyse ved hjelp av bioakustikk består vanligvis i å oppdage og klassifisere enkelte lyder som er av interesse. Deteksjon innebærer å finne ut hvor slike lyder er i opptaket, klassifisering innebærer deretter å tilordne dem til en kategori (f.eks. arter). Manuell analyse er arbeidsintensivt for større datasett, og nøyaktigheten kan bli påvirket av analytikerens ferdighetsnivå (Heinicke mfl. 2015). Nøyaktighet og effektivitet for automatiserte analyseverktøy er imidlertid blitt raskt forbedret på grunn av innovasjoner innen signalbehandling og maskinlæring (Digby mfl. 2013, Stowell & Plumbley 2014). Dette har ført til stadig mer bruk av signaldeteksjon og klassifisering av dyreliv. Ved å legge til rette for automatisert eller halvautomatisk analyse med manuelle metoder, forbedrer dette raskt gjennomførbareheten av store og langsiktige akustiske undersøkelser og overvåking.

Nåværende automatiserte lyddeteksjons- og klassifiseringsverktøy bruker hovedsakelig maskinlæring og relaterte metoder, inkludert kunstige nevralt nettverk (Riede mfl. 2006), såkalt random forest (Zamora-Gutierrez mfl. 2016), Hidden Markov Models (Zilli mfl. 2014) og støttevektor maskiner (Heinicke mfl. 2015). Slike metoder innebærer vanligvis å bruke et bibliotek med kjente artsspesifikke lyd signaler for å trene algoritmer til å oppdage og klassifisere ukjente lyder i nye opptak. For tiden er nøyaktigheten av automatiserte klassifiseringsmetoder sjelden høy nok til å muliggjøre

helautomatisk analyse, og de fleste studier involverer en kombinasjon av automatisert behandling og manuell validering (f.eks. Kalan mfl. (2016)). En rekke nye metoder, inkludert såkalt 'unsupervised feature extraction' (Stowell & Plumbley 2014), 'dynamic time warping based feature representations' (Stathopoulous et al., 2017) og 'deep convolutional neural networks' (LeCun et al., 2015, Goeau et al., 2016) kan sortere direkte fra spektrogramdata, noe som potensielt forbedrer robustheten for analyser av støyende, heterogene akustiske overvåkingsdatasett.

Bioakustikk krever uansett utvikling av deteksjons- og klassifiseringsverktøy og omfattende validerte lydbiblioteker av interessearter, ideelt sett med data registrert i en rekke situasjoner med ulik omgivelseslyd. Slike biblioteker eksisterer i dag mest fra tempererte regioner (Zamora-Gutierrez mfl. 2016) og for virveldyr (Lehmann mfl. 2014). Samlingene av lyder er ofte små, og det begrenser nytten de kan ha som treningsdata for moderne og grundige læringsmetoder som krever store treningsdatasett. Denne mangelen på tilgjengelige ressurser er en flaskehals for utviklingen av metoden.

### 6.4.2 Økoakustikk

Nylig arbeid med økoakustikk tar i økende grad en global tilnærming (Pijanowski mfl. 2011a, Sueur & Farina 2015, Harris mfl. 2016b). I løpet av de siste 10 årene er det utviklet en pakke med akustiske indekser som oppsummerer de akustiske egenskapene til lydopptak (anmeldt i Sueur mfl. (2014)). Forskning som bruker akustiske indekser for å utlede økologiske trender, forutsetter generelt at mengden biotisk lyd i et opptak (beregnet enten som lydtrykksnivå i et frekvensbånd som tilsvarer biotisk lyd, eller som en viss grad av akustisk kompleksitet (Sueur mfl. 2014) er korrelert med mangfoldet av vokaliserende dyr i opptak (Pijanowski mfl. 2011a, Pijanowski mfl. 2011b, Sueur & Farina 2015, Harris mfl. 2016b).

Moderne maskinlæringsteknikker tilbyr alternative metoder for å trekke ut detaljert informasjon fra lydbildet. En ny studie brukte konvolusjonelle nevralt nettverk til å skille og kvantifisere biotisk og antropogen lyd i urbane lydopptak, og dermed eksplisitt omgå spørsmålet om bakgrunnsstøyfølsomhet (Fairbrass mfl. 2019). En annen lovende vei innebærer uovervåket læring av akustiske mønstre direkte fra undersøkelsesdata. (Eldridge mfl. 2016) brukte sparsom koding for å isolere periodiske lydkomponenter i fuglelydopptak, som sjekker korrelasjoner med bestemte lydtyper eller artsspesifikke signal. Selv om slike tilnærminger er på et svært tidlig stadium, muliggjør dette estimering av vokaliserende artsmangfold uten å kreve omfattende auto-ID-verktøy (Gibb mfl. 2019). En annen metode som også virker lovende innebærer å bruke store, åpent tilgjengelige folkeforskningsdatabaser av menneskelige lyder (<https://research.google.com/audioset>) for å identifisere disse lydene i økosystemopptak (Sethi mfl. 2020c). Sethi mfl. (2020c) brukte vanlig lært funksjonsinnbygging, avledet fra et stort datasett av ikke-økosystem lyddata. De var i stand til å overvåke ulike økosystemer på et bredt spekter av romlige og temporale skalaer, og kunne forutsi biologiske beregninger av økologisk tilstand med mye høyere nøyaktighet enn det som tidligere har vært mulig ut fra økoakustiske data. Videre brukte de den samme funksjonsbaserte tilnærmingen for å oppsummere store mengder data, og til å identifisere uregelmessige hendelser som forekommer i store datasett over lange tidsperioder på en uovervåket måte. Denne tilnærmingen bygger bro fra uforutsigbare håndlagde økoakustiske indekser og svært taksonomisk spesifikke deteksjons- og klassifiseringsmodeller til en virkelig generaliserbar tilnærming til lydbildeanalyse.

## 6.5 Synergier med andre metoder

Det er bred internasjonal interesse for å forbedre overvåking av biologisk mangfold, inkludert innsatsen fra 'Group on Earth Observations Biodiversity Observation Network' (GEO BON) for å harmonisere målinger av biologisk mangfold på tvers av rom og tid som 'Essential Biodiversity Variables' (EBVs). Suksessen til EBVs med å utvide omfanget av rutinemessig overvåking avhenger helt av fremskritt i distribuert overvåkingsteknologi med økt taksonomisk dekning, inkludert DNA-metastrekoding, kamerafeller og økoakustiske undersøkelser. Siden det meste av jordens

taksonomiske mangfold ikke er synlig fra lufta eller rommet, kan slike høygjennomstrømningsobservasjoner av biologisk mangfold utfylle romlig omfattende jordobservasjoner for å overvåke trender for biologisk mangfold i politisk relevant og ønsket omfang (Bush mfl. 2017).

Nye fjernmålingsverktøy, som LiDAR, DNA-metastrekking og akustisk overvåking, kan støtte målet om å utvide omfanget av overvåking av biologisk mangfold og antropogene påvirkningsfaktorer ved å samle inn data på tvers av taksonomiske, romlige og temporale domener på en kostnadseffektiv og ikke-invasiv måte. LiDAR gir detaljert, tredimensjonal (3D) informasjon om habitatstruktur, og LiDAR-avledede informasjon om skogstruktur har blitt brukt til å vurdere mønstre av artsmangfold og utbredelse i skogkledde miljøer (f.eks. Goetz et al., 2007; Bergen et al., 2009). Flybaserte LiDAR-data med høy tetthet fanger opp fine endringer fra menneskelig aktivitet i skogstrukturen, med 3D-data over hundrevis til tusenvis av hektar som trengs for å støtte undersøkelser i landskapskala (Longo et al., 2016; Rappaport et al., 2018). Økoakustiske undersøkelser og DNA-metastrekking gir komplementære perspektiver. DNA-metastrekking gir en svært detaljert katalog over dyresamfunnet, noe som gir eksepsjonelt detaljert informasjon for et gitt sted og tidspunkt. Økoakustikk muliggjør derimot direkte observasjoner av endringer i dyresamfunnet over døgn, sesong og årlige tidsskalaer. Eksterne akustiske undersøkelser har potensial til å spore mange dyregrupper (f.eks. fugler, amfibier, insekter, pattedyr, flaggermus) og påvirkningsfaktorer (f.eks. skudd, snøskutere, biler, båter, turgåere på tursti, vindturbiner) samtidig, og i motsetning til tradisjonelle feltmetoder (f.eks. punkttellinger), kan det akustiske miljøet kartlegges samtidig på flere steder med mange opp-takere som dekker store geografiske områder (Gibb mfl. 2019, Rappaport mfl. 2020).

Fremtidig innovasjon knyttet til akustisk overvåkingsteknologi og applikasjoner vil sannsynligvis komme i form av å kombinere akustisk overvåking med andre metoder, for eksempel ved å kombinere optiske (f.eks. kamerafeller, fenokamera), akustiske (f. eks. bioakustikk, økoakustikk) og DNA-baserte metoder (f. eks. DNA-metastrekking) (Buxton mfl. 2018, Howe mfl. 2019, Stowell & Sueur 2020). **Tabell 2** sammenligner tre vanlige metoder.

**Tabell 2.** Komplementaritet av ulike overvåkingsmetoder.

	Bioakustikk	Viltkamera	Miljø-DNA
Detaljnivå	Middels	Lav	Høy
Autonomi	Høy	Høy	Lav
Tidsdimensjon	Kontinuerlig	Punkter over tid	Punkt
Sanntid	Ja	Ja	Nei
Distanse dekket	Regulerbar – nært/lang distanse	Nært	Nært
3D Posisjonering	Ja	Nei	Nei

## 6.6 Framtidsutsikter

Nye nettverkssensorer og innebygde rutiner for analyser (f.eks. Sethi mfl. (2020c)) vil i tiden fremover øke muligheten for å bruke data fra akustisk overvåking for sanntidsovervåking og adaptiv styring. Påvisninger fra sensornettverk kan gi svært detaljerte romlige og temporale data om dyreliv og påvirkningsfaktorer (f.eks. Londons Nature-Smart Cities overvåkingsnettverk for flaggermus: <https://naturesmartcities.com>). Sanntids datastrømmer kan for eksempel brukes til å justere urbane belsningsregimer for å redusere påvirkningen på aktiviteten til flaggermus, til å redusere konflikter mellom mennesker og dyreliv, omdirigere skipstrafikken på kort varsel for å unngå truede hvalpopulasjoner (Van Parijs mfl. 2009, Davis mfl. 2017), eller til å rapportere om ulovlig hogst eller jakt (Astaras mfl. (2017), Rainforest Connection <https://rfcx.org>).



## 7 Erfaringer basert på feltforsøk

### 7.1 Nasjonal overvåking av insekter

I løpet av sommeren 2020 ble det igangsatt en kontinuerlig generell insektovervåking i Norge (Åström mfl. 2020). Det ble etablert 10 nye overvåkingslokaliteter i hver av to ulike habitater, skog og seminaturlig mark, i sør-øst Norge (Figur 7). Det forventes at prosjektet oppskaleres til totalt 50 lokaliteter per år per habitat nasjonalt de kommende fire årene, der nye lokaliteter vil undersøkes hvert år med en omløpstid på 5 år. Det vil si at hele 250 lokaliteter per habitat vil undersøkes nasjonalt over denne perioden. Økosystemene skog og semi-naturlig mark ble prioritert, da disse står for en stor andel av insektenes biodiversitet, danner betydelige naturgoder og er under stort press fra menneskelig aktivitet. Skoglokalitetene ble samlokalisert med ANO-kartleggingen (arealrepresentativ naturovervåking). ANO sine lokaliteter er basert på SSB sitt 500x500 m grid og besøkes med et rullerende skjema som passer sammen med insektovervåkingen. Behovet for økt kunnskap om insekters status, og nødvendigheten av å etablere en kontinuerlig, robust overvåking poengteres stadig oftere, både i akademiske tidsskrifter og i politiske kanaler (Åström mfl. 2020).

Prosjektet bruker en kombinasjon av Malaisefeller og vindusfeller for å fange insekter, sammen med DNA-metastrekking for å identifisere artene. Dette gir mulighet for å identifisere alle taksonomiske grupper og det ble identifisert over 10.000 arter i 2020. Når man antar at Norge innehar ca. 20.000 arter av insekter totalt er dette et imponerende tall.



Figur 7. Kart over lokaliteter for innsamling av insekter i 2020 (figur hentet fra (Åström mfl. 2020)).



## 7.2 Oppsett av lydloggere

Som del av logistikken for overvåkingsprosjektet ble alle lokaliteter besøkt hver 14. dag for å tømme fellene. Dette gav en unik mulighet for å teste lydloggere, ikke bare med hensyn til den eksisterende logistikken, men også med tanke på sammenligningsgrunnlaget av biodiversitetsdata for insekter. Med en økoakustisk tilnærming kunne vi da sammenligne generell diversitet av lyd mot diversitet av insekter i hver lokalitet. Vi gjorde derfor et egenfinansiert innkjøp av mange rimelige lydloggere av typen AudioMoth

([www.openacousticdevices.info/](http://www.openacousticdevices.info/)) slik at en lydlogger kunne plasseres ut på hver eneste lokalitet brukt av overvåkingsprosjektet. Disse lydloggerne er i utgangspunktet ikke vanntette, og vi tilpasset vanntette bokser og ekstra batterier slik at de kunne brukes i felt (**Figur 8**).



**Figur 8.** En Audiomoth lydlogger montert med ekstra batterier i en vanntett boks.

Lydloggerne ble plassert på teltstangen til Malaisefella sammen med termometer og lysloggere (**Figur 9**). Batteri- og minnekapasitet for lydloggerne ble estimert til å vare i mer enn 14 dager, slik at disse kunne skiftes samtidig med at fellene ble besøkt for innsamling av insekter. De første fellene ble satt opp på noen lokaliteter i 17 juni for en første test, mens alle loggerne var montert og aktive 10 juli.



**Figur 9.** Oppsett av Malaisefeller med montering av lydlogger (svart boks) på fella. Foto fra SEMINAT8.

I dette prosjektet var vi interessert i å måle både biologisk diversitet og menneskelig påvirkning og vi fokuserte derfor på morgen (klokka 5-8), dag (klokka 12-14) og kveld (klokka 18-22) med tanke på fuglesang og trafikk på morgenen, generell diversitet og arbeidstøy midt på dagen og dyrelyder og støy fra fritidsaktiviteter på kvelden. Vi programmerte loggerne til å ta opp 10 minutter fra hver time i disse tidsrommene.

Data fra minnekortene ble lastet opp på NINAs interne servere for sikker lagring. Vi analyserte i første omgang generelle økoakustiske indekser (**Tekstboks 4**, modifisert fra (Bradfer-Lawrence mfl. 2019a) ved hjelp av pakken 'soundecology' (Villanueva-Rivera & Pijanowski 2018) i R (R Core Team 2020).

#### Tekstboks 4 – Akustiske indekser

<i>Acoustic Diversity Index (ADI)</i>	Diversitet av lyd basert på Shannon indeksen også mye brukt i konvensjonelle biodiversitetsstudier. Negativt korrelert med AEI. Høye verdier angir stor diversitet av lyder uten at enkeltlyder dominerer. Men et jevnt signal helt uten lyd kan også gi høye verdier.
<i>Acoustic Evenness Index (AEI)</i>	Jevnhet av lyd basert på Gini indeksen. Negativt korrelert med ADI. Høye verdier angir dominans av enkeltlyder.
<i>Acoustic Complexity Index (ACI)</i>	Diversitet av lyd basert på forskjeller i amplitude mellom ulike tidsintervaller. Utviklet for å fange opp diversitet uten påvirkning av dominante enkeltlyder. Høye verdier angir høyere diversitet.
<i>Bioacoustic Index (BI)</i>	Diversitet av lyd som funksjon av både amplitude og frekvensband, og relativ til den det stilleste 1 KHz-båndet. Høye verdier angir større forskjell mellom den mest stille og mest bråkete lyden.
<i>Normalized Difference Soundscape Index (NDSI)</i>	Menneskelig påvirkning på lydlandskapet basert på en teoretisk inndeling der man antar at antroponi kun består av lyder under 2 KHz og biofoni fra 2-11 KHz. Varierer mellom -1 og +1, der -1 er ren antroponi, og +1 er ren biofoni.
<i>Acoustic entropy (H)</i>	Entropi av lyd som viser jevnhet. Varierer mellom 0 og 1, der 1 er et jevnt signal (som kan være veldig bråkete eller helt stille) og 0 er dominans av en helt rent tone.

### 7.3 Resultater fra bioakustiske analyser av lydloggere

**Figur 10** viser de ulike indeksene for alle lokalitetene fra de to habitatene for sommer (juni og juli) og høst (september/oktober), mens **Figur 11** viser hvordan indeksene varierer gjennom døgnet for to lokaliteter fra hvert habitat og **Figur 12** viser hvordan indeksene varierer gjennom sesongen for en enkelt lokalitet fra seminaturlig mark.

For flere av indeksene ser vi en klar forskjell mellom lokaliteter, habitater, sesong og døgn (**Figur 10**). Men vi ser også at det er store variasjoner innenfor relativt kort tid for enkelte indekser som f.eks. ADI og AEI, mens det er mindre variasjon for ACI og NDSI (**Figur 11**). ADI-indeksen kan være litt vanskelig å tolke her, da et homogent lydløst signal gir høyere verdier. Altså, et lydløst habitat kan se ut som om det har veldig høy diversitet. Dette kan vi se fra **Figur 10** der ADI er høyere i skog enn i seminaturlig mark, men AEI viser at en veldig lite variasjon i signalet (spesielt for høst) og ACI viser at kompleksiteten er lav. Skogshabitatene er nok veldig stille, og denne indeksen er da vanskelig å benytte her med de opptaksinnstillingene som er valgt i dette studiet.

Fra **Figur 12** ser vi at indeksene ACI og H gir svært konsistente resultater gjennom hver sesong. Her vil man altså med et relativt kort opptak reflektere en representativ verdi. Men for H er alle verdiene nær 1, noe som antyder et veldig jevnt signal. Vi ser likevel en klar endring i denne indeksen rundt 21. september, som tyder på mer variasjon i lydsignalet, men vi har dessverre ingen informasjon som kan forklare denne endringen.

En av de mest interessante indeksene for insektovervåkingsprosjektet er NDSI, som angir et estimat på menneskelig påvirkning, der et lavere tall betyr mer menneskelyd i forhold til naturlig lyd (**Tekstboks 4**). Vi ser da fra **Figur 10** at vi finner generelt lavere NDSI for seminaturlig mark enn i skog, noe som stemmer med forventningene om mer menneskepåvirkning. Vi ser også at det er mer menneskelyd midt på dagen sammenlignet med morgen og kveld (**Figur 11**), og at dette mønsteret vedvarer gjennom både sommer og høst (**Figur 12**).

Generelt sett ser vi at seminaturlige lokaliteter har mer variasjon og mer diversitet ut ifra lydopptakene. Dette stemmer bra med data fra DNA-metastrekkoding av fangstene fra Malaisefellene i insektovervåkingsprosjektet, der vi finner jevnt over flere arter i seminaturlig mark sammenlignet med skog (**Figur 13**). Dessverre er ikke fangstene fra Malaisefellene fra høsten analysert enda, og vi kan derfor ikke gjøre en mer grundig sammenligning av lyddata og DNA-metastrekkoding data på det nåværende tidspunktet.

I dette studiet programmerte vi loggerne til å ta opp 10 minutter hver time. I og med at de norske habitatene vi studerer her er relativt lydfattige sammenlignet med tropiske strøk, er det mest sannsynlig nødvendig med lengre kontinuerlige opptak. I følge et nylig publisert studie er det nødvendig med hele 120 timer kontinuerlig opptak for å stabilisere variasjonen i indeksene (Bradfer-Lawrence mfl. 2019a).

For dataene vi har presentert her har vi valgt ut dager uten regn. Regn, og delvis vind, kan påvirke resultatene for estimering av lydlandskapsindekser (Bradfer-Lawrence mfl. 2019a). Inkludering av en nedbørslogger sammen med lydloggerne kan derfor være til stor hjelp for å automatisk ekskludere tidspunkter med mye regn ved utregning av slike indekser. Samtidig, er dette et kjent utfordring og automatiske metoder er under utvikling for å kunne redusere omfanget av effekten av regn på lydopptak (Sanchez-Giraldo mfl. 2020).

## 7.4 Praktisk erfaring fra felt og logistikk

Erfaringen med bruk av denne typen logger har vært litt blandet. Loggerne er billige, relativt stabile og enkle i bruk, men vi ser at det er mange muligheter for menneskelige feil i en slik løsning. Ved batteriskifte blir loggeren nullstilt, og man er avhengig av å ta med en PC for å resette klokka på loggeren. Dette skapte en del problemer ved de første batteriskiftene, da PC ikke ble tatt med i felt eller at man glemte å gjøre denne tilkoplingen. Vi opplevde også at minnekortene ble satt i feil vei ved bytte, og at man har glemt å merke minnekortene med korrekt lokalitet og dato. I tillegg ser vi også at arbeidet i etterkant med å laste opp data fra minnekortene er en tidkrevende jobb. Selv om lydfiler er relativt plassbesparende i forhold til foto og videofiler, tar opplastingen en god del tid og det blir etter hvert et problem med lagringsplass på servere med mange minnekort over lang tid.

**Figur 10.** Oversikt over ulike indekser kalkulert for ulike lokaliteter innen to habitater, seminattlig mark og skog, for sommer og høst. Se Tekstboks 4 for detaljer rundt hver indeks.

ADI:

Acoustic Diversity Index

AEI:

Acoustic Evenness Index

BI:

Bioacoustic Index

ACI:

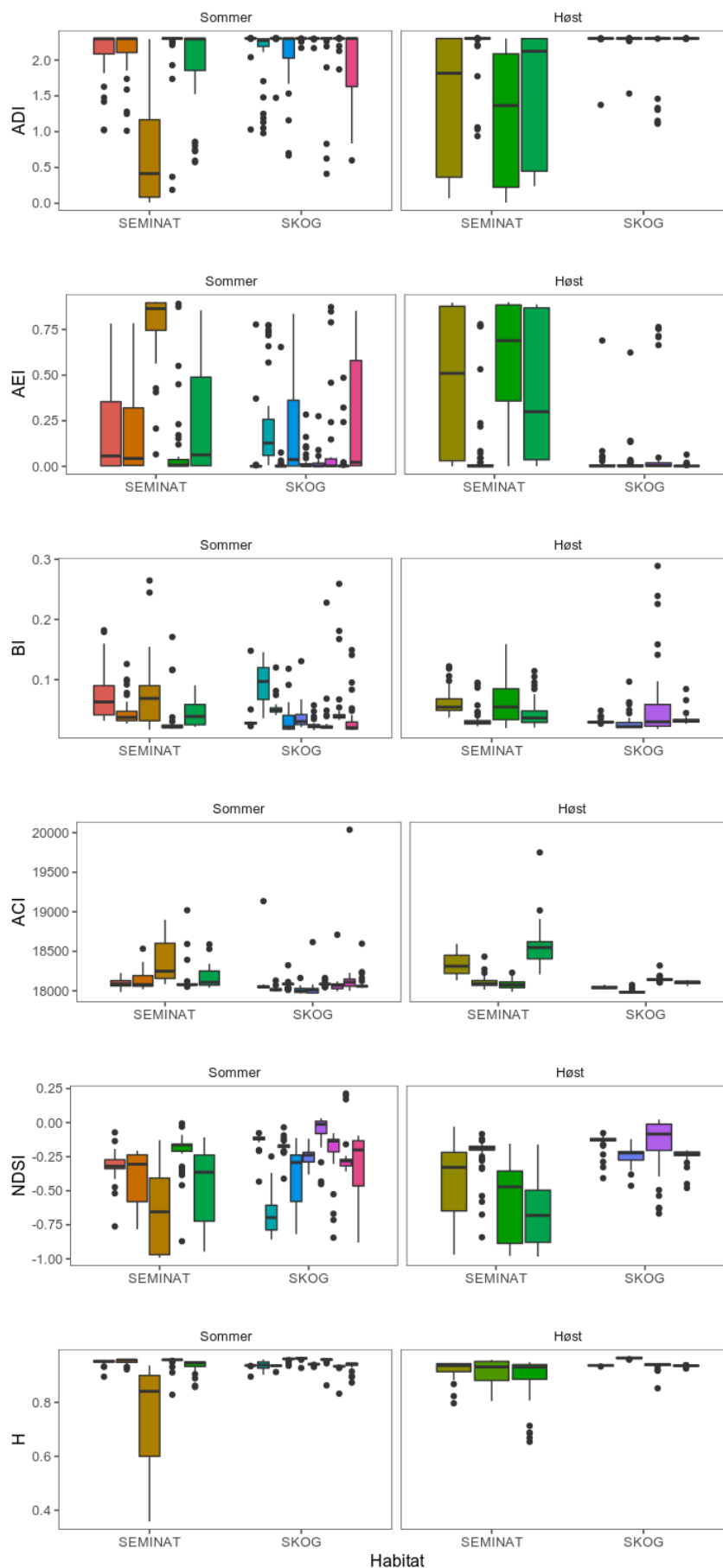
Acoustic Complexity Index

NDSI:

Normalized Difference Sound-scape Index

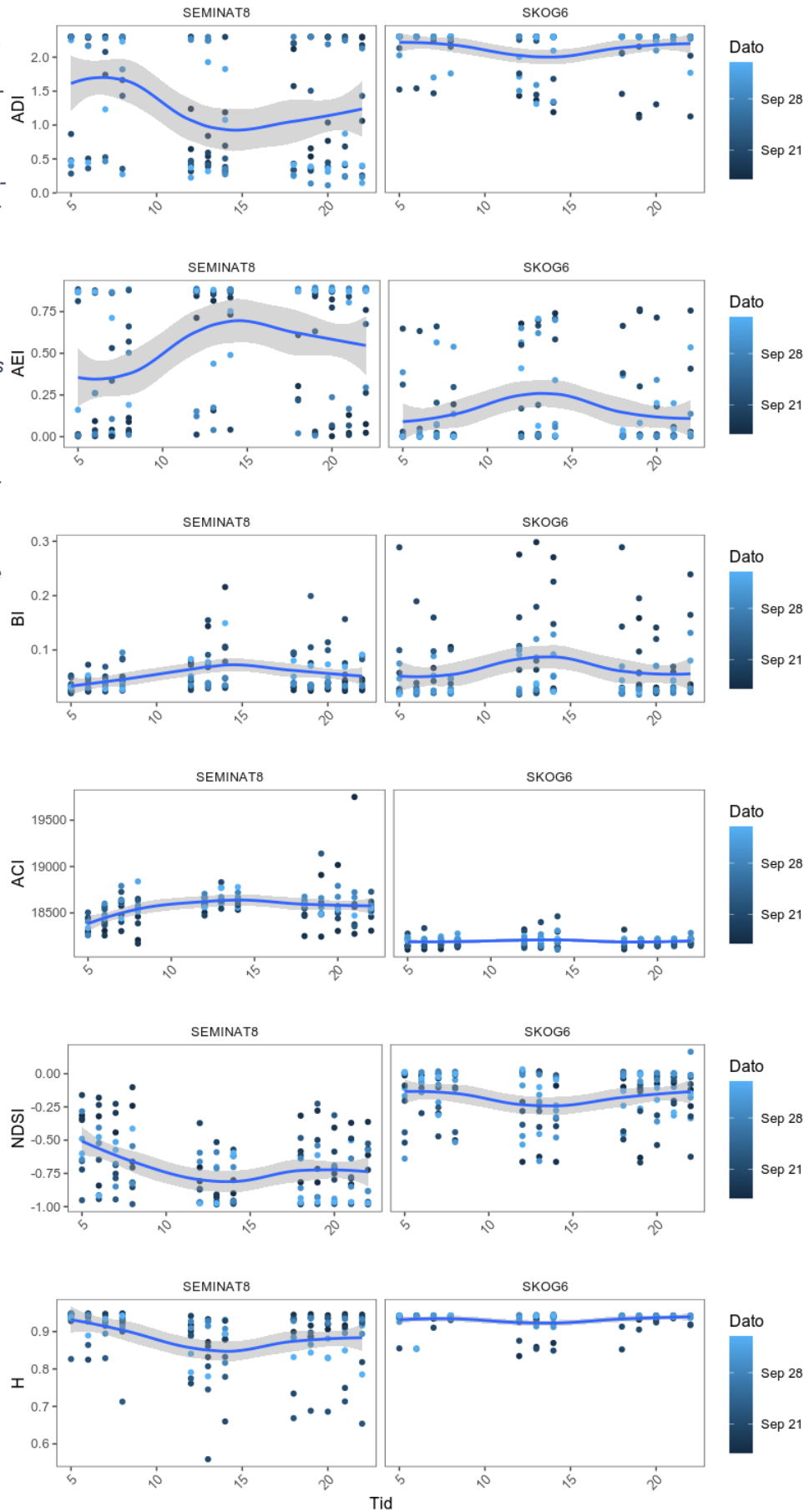
H:

Acoustic entropy



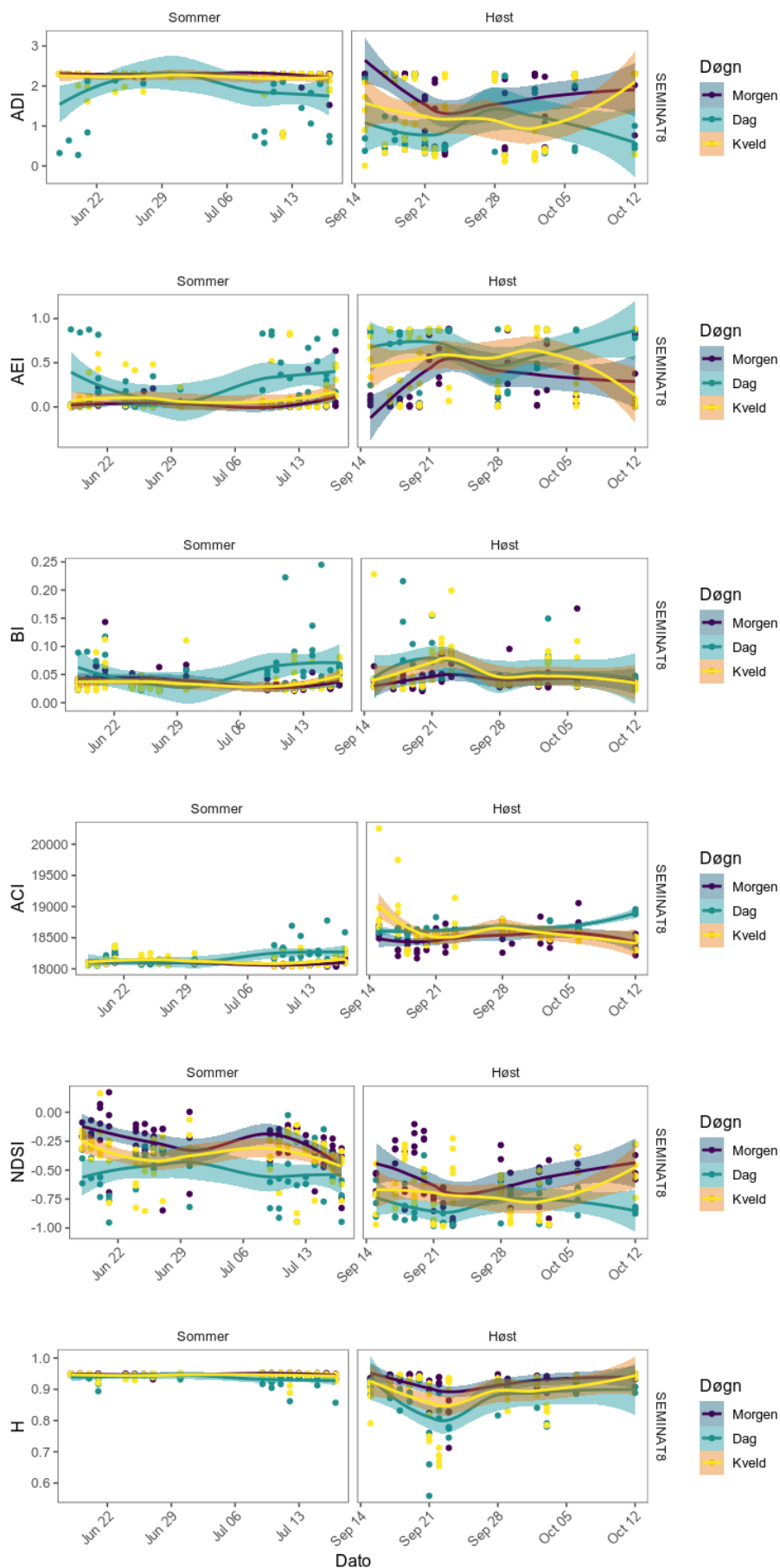
**Figur 11.** Døgnvariasjon for ulike indekser for to lokaliteter i to habitater, seminaturlig mark og skog. Se Tekstboks 4 for detaljer rundt hver indeks.

- ADI:  
Acoustic Diversity Index
- AEI:  
Acoustic Evenness Index
- BI:  
Bioacoustic Index
- ACI:  
Acoustic Complexity Index
- NDSI:  
Normalized Difference Sound-scape Index
- H:  
Acoustic entropy

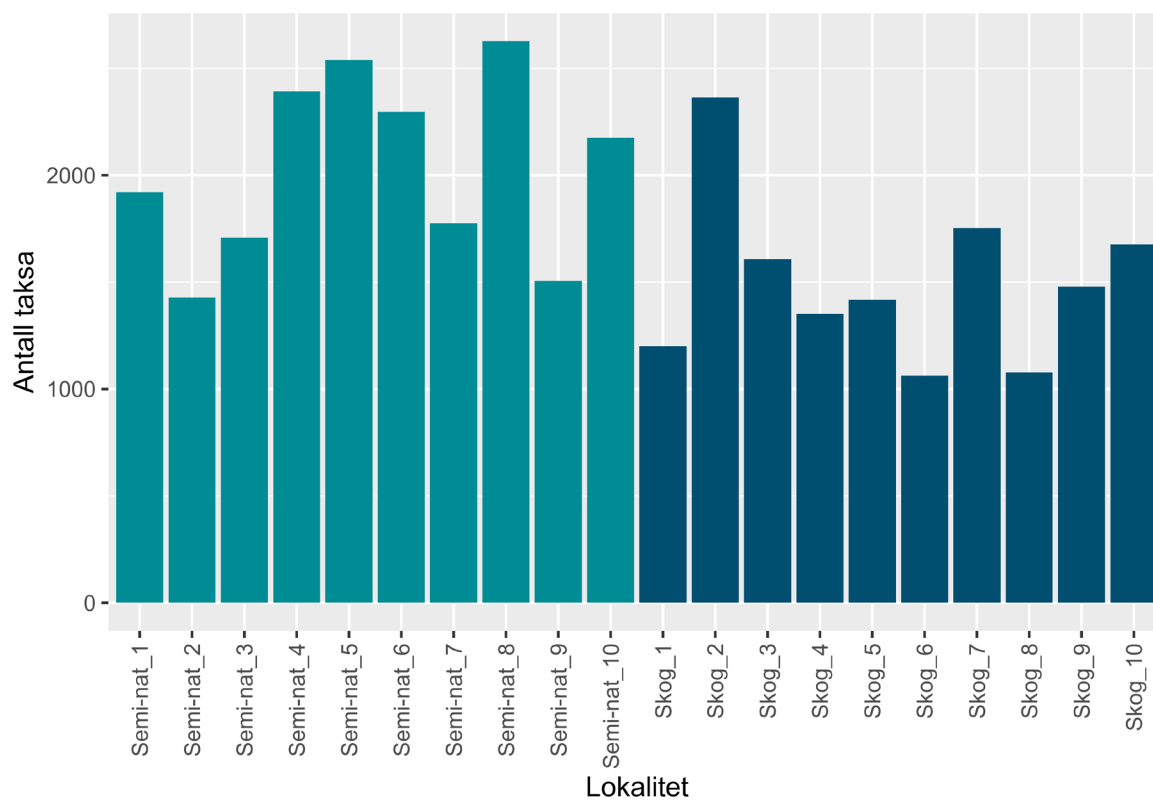


**Figur 12.** Sesongvariasjon for ulike indekser i forhold til tid på døgnet for sommer og høst for en lokalitet i seminaturlig mark. Se Tekstboks 4 for detaljer rundt hver indeks.

ADI:  
Acoustic Diversity Index  
AEI:  
Acoustic Evenness Index  
BI:  
Bioacoustic Index  
ACI:  
Acoustic Complexity Index  
NDSI:  
Normalized Difference Sound-scape Index  
H:  
Acoustic entropy







Figur 13. Kumulativ artsantall fanget i Malaisefeller per 2020-09-04. Antallet identifiserte separate taksa tilsvarer i høy grad riktige arter, men flere av dem er ikke identifisert til art (figur hentet fra Åström mfl. (2020)).

## 8 Konklusjon

Akustisk overvåking er en lovende metode for å effektivisere dagens overvåking av naturen, og som samtidig kan innhente ny kunnskap som øker forståelsen for hvordan naturen påvirkes av antropogene effekter. Bruksområdene er mange og svært varierte, fra påvisning av arter og artsgrupper, registrering av fenologiske endringer, estimering av populasjonsstørrelser og beregning av økologisk tilstand til estimering av menneskelig påvirkning.

Selv om teknologien har vært brukt til studier av enkeltarter i lang tid er det først de siste årene at akustikk har fått et bredere bruksområde. Den store utviklingen i datateknologi, digitalisering og kunstig intelligens gir store muligheter for å videreutvikle og komplettere dagens metoder for datainnsamling og analyser. Praktiske erfaringer fra felt og logistikk viser at ikke-autonome systemer er svært sårbare for menneskelige feil, og at de krever forholdsmessig mye manuelt arbeid for behandling av dataene. Autonome systemer krever en del utvikling og validering opp mot konvensjonelle metoder og vi foreslår i denne rapporten hva som bør gjøres før metoden kan tas i bruk for en effektiv overvåking av norsk natur:

1. Utvikle og teste hel-autonome lydloggere i Norge
2. Etablere pipelines for automatisk datalagring og prosessering
3. Utvikle metoder for å opprettholde personvern
4. Tilpasse analysemetoder for norske behov
5. Etablere referansedatabaser for norske arter
6. Opprette standard overvåkingsdesign for norske forhold
7. Gjennomføre en pilotstudie for å teste teknologien for praktisk bruk i Norge

Vi anbefaler at naturforvaltningen snarest mulig setter i gang et eget prosjekt for å gjennomføre disse forslagene og påskynde utviklingen av akustikk som et kostnadseffektivt overvåkingsverktøy i Norge.



## 9 Referanser

- Meld. St. 20. 2019-2020. Helhetlige forvaltningsplaner for de norske havområdene. Barentshavet og havområdene utenfor Lofoten, Norskehavet, og Nordsjøen og Skagerrak.
- Abrahams, C. 2019. Comparison between lek counts and bioacoustic recording for monitoring Western Capercaillie (*Tetrao urogallus L.*). *Journal of Ornithology* 160(3): 685-697.
- Abrahams, C & Geary, M. 2020. Combining bioacoustics and occupancy modelling for improved monitoring of rare breeding bird populations. *Ecological Indicators* 112.
- Ackleh, AS, Ioup, GE, Ioup, JW, Ma, B, Newcomb, JJ, Pal, N, Sidorovskaia, NA & Tiemann, C. 2012. Assessing the Deepwater Horizon oil spill impact on marine mammal population through acoustics: endangered sperm whales. *J Acoust Soc Am* 131(3): 2306-14.
- Adi, K, Johnson, MT & Osiejuk, TS. 2010. Acoustic censusing using automatic vocalization classification and identity recognition. *Journal of the Acoustical Society of America* 127(2): 874-883.
- Aguzzi, JC, D.; Francescangeli, M.; Marini, S.; Bonofiglio, F.; del Rio, J.; Danovaro, R. . 2020. The hierarchic treatment of marine ecological information from spatial networks of benthic platforms. *Sensors* 20: 1751.
- Aide, TM, Corrada-Bravo, C, Campos-Cerqueira, M, Milan, C, Vega, G & Alvarez, R. 2013. Real-time bioacoustics monitoring and automated species identification. *Peerj* 1: e103.
- Astaras, C, Linder, JM, Wrege, P, Orume, RD & Macdonald, DW. 2017. Passive acoustic monitoring as a law enforcement tool for Afrotropical rainforests. *Frontiers in Ecology and the Environment* 15: 233-234.
- Baker, E & Vincent, S. 2019. A deafening silence: a lack of data and reproducibility in published bioacoustics research? *Biodiversity Data Journal* 7.
- Becerra, HPZ. 2012. Passive acoustics as a monitoring tool for evaluating oyster reef restoration. MSc. Florida Atlantic University
- Bertucci, F, Parmentier, E, Lecellier, G, Hawkins, AD & Lecchini, D. 2016. Acoustic indices provide information on the status of coral reefs: An example from Moorea Island in the South Pacific. . *Scientific Reports* 6.
- Biggs, CR, Lowerre-Barbieri, SK & Erisman, B. 2018. Reproductive resilience of an estuarine fish in the eye of a hurricane. *Biology Letters* 14(11).
- Blumstein, DT, Mennill, DJ, Clemins, P, Girod, L, Yao, K, Patricelli, G, Deppe, JL, Krakauer, AH, Clark, C, Cortopassi, KA, Hanser, SF, McCowan, B, Ali, AM & Kirschel, ANG. 2011. Acoustic monitoring in terrestrial environments using microphone arrays: applications, technological considerations and prospectus. *Journal of Applied Ecology* 48(3): 758-767.
- Bolgan, M & Parmentier, E. 2020. The unexploited potential of listening to deep-sea fish. *Fish and Fisheries* 21(6): 1238-1252.
- Borker, AL, Mckown, MW, Ackerman, JT, Eagles-Smith, CA, Tershy, BR & Croll, DA. 2014. Vocal activity as a low cost and scalable index of seabird colony size. *Conservation Biology* 28(4): 1100-1108.

- Borker, AL, Buxton, RT, Jones, IL, Major, HL, Williams, JC, Tershy, BR & Croll, DA. 2020. Do soundscape indices predict landscape-scale restoration outcomes? A comparative study of restored seabird island soundscapes. *Restoration Ecology* 28(1): 252-260.
- Bradbury, J & Vehrencamp, S. 1998. *Principles of Animal Communication*. Sinauer.
- Bradfer-Lawrence, T, Gardner, N, Bunnefeld, L, Bunnefeld, N, Willis, S & Dent, D. 2019a. Guidelines for the use of acoustic indices in environmental research. *Methods in Ecology and Evolution* 10.
- Bradfer-Lawrence, T, Gardner, N, Bunnefeld, L, Bunnefeld, N, Willis, SG & Dent, DH. 2019b. Guidelines for the use of acoustic indices in environmental research. *Methods in Ecology and Evolution* 10(10): 1796-1807.
- Burivalova, Z, Purnomo, Wahyudi, B, Boucher, TM, Ellis, P, Truskinger, A, Towsey, M, Roe, P, Marthinus, D, Griscom, B & Game, ET. 2019. Using soundscapes to investigate homogenization of tropical forest diversity in selectively logged forests. *Journal of Applied Ecology* 56(11): 2493-2504.
- Bush, A, Sollmann, R, Wilting, A, Bohmann, K, Cole, B, Balzter, H, Martius, C, Zlinszky, A, Calvignac-Spencer, S, Cobbold, CA, Dawson, TP, Emerson, BC, Ferrier, S, Gilbert, MTP, Herold, M, Jones, L, Leendertz, FH, Matthews, L, Millington, JDA, Olson, JR, Ovaskainen, O, Raffaelli, D, Reeve, R, Rödel, M-O, Rodgers, TW, Snape, S, Visseren-Hamakers, I, Vogler, AP, White, PCL, Wooster, MJ & Yu, DW. 2017. Connecting Earth observation to high-throughput biodiversity data. *Nature Ecology & Evolution* 1(7): 0176.
- Buxton, RT & Jones, IL. 2012. Measuring nocturnal seabird activity and status using acoustic recording devices: applications for island restoration. *Journal of Field Ornithology* 83(1): 47-60.
- Buxton, RT, McKenna, MF, Clapp, M, Meyer, E, Stabenau, E, Angeloni, LM, Crooks, K & Wittemyer, G. 2018. Efficacy of extracting indices from large-scale acoustic recordings to monitor biodiversity. *Conservation Biology* 32(5): 1174-1184.
- Campbell, S, Roberts, EJ, Craemer, R, Pacioni, C, Rollins, L & Woolnough, AP. 2016. Assessing the economic benefits of starling detection and control to Western Australia. *Australasian Journal of Environmental Management* 23(1): 81-99.
- Campos-Cerqueira, M & Aide, TM. 2016. Improving distribution data of threatened species by combining acoustic monitoring and occupancy modelling. *Methods in Ecology and Evolution* 7: 1340-1348.
- Campos-Cerqueira, M, Mena, JL, Tejada-Gómez, V, Aguilar-Amuchastegui, N, Gutierrez, N & Aide, TM. 2020. How does FSC forest certification affect the acoustically active fauna in Madre de Dios, Peru? *Remote Sensing in Ecology and Conservation* 6(3): 274-285.
- Davis, GE, Baumgartner, MF, Bonnell, JM, Bell, J, Berchok, C, Bort Thornton, J, Brault, S, Buchanan, G, Charif, RA, Cholewiak, D, Clark, CW, Corkeron, P, Delarue, J, Dudzinski, K, Hatch, L, Hildebrand, J, Hodge, L, Klinck, H, Kraus, S, Martin, B, Mellinger, DK, Moors-Murphy, H, Nieu Kirk, S, Nowacek, DP, Parks, S, Read, AJ, Rice, AN, Risch, D, Širović, A, Soldevilla, M, Stafford, K, Stanistreet, JE, Summers, E, Todd, S, Warde, A & Van Parijs, SM. 2017. Long-term passive acoustic recordings track the changing distribution of North Atlantic right whales (*Eubalaena glacialis*) from 2004 to 2014. *Scientific Reports* 7(1): 13460.
- Dawson, MRW, Bloomfield, LL, Charrier, I & Sturdy, CB. 2006. Statistical classification of black-capped (*Poecile atricapillus*) and mountain chickadee (*Poecile gambeli*) call notes. *Journal of Comparative Psychology* 120(2): 147-153.

- Deichmann, JL, Hernandez-Serna, A, Delgado, JA, Campos-Cerqueira, M & Aide, TM. 2017. Soundscape analysis and acoustic monitoring document impacts of natural gas exploration on biodiversity in a tropical forest. *Ecological Indicators* 74: 39-48.
- Deichmann, JL, Acevedo-Charry, O, Barclay, L, Burivalova, Z, Campos-Cerqueira, M, d'Horta, F, Game, ET, Gottesman, BL, Hart, PJ, Kalan, AK, Linke, S, Do Nascimento, L, Pijanowski, B, Staatterman, E & Aide, TM. 2018. It's time to listen: there is much to be learned from the sounds of tropical ecosystems. *Biotropica* 50(5): 713-718.
- Depraetere, M, Pavoine, S, Jiguet, F, Gasc, A, Duvail, S & Sueur, J. 2012. Monitoring animal diversity using acoustic indices: Implementation in a temperate woodland. *Ecological Indicators* 13(1): 46-54.
- Desjonqueres, C, Rybak, F, Castella, E, Llusia, D & Sueur, J. 2018. Acoustic communities reflects lateral hydrological connectivity in riverine floodplain similarly to macroinvertebrate communities. *Scientific Reports* 8.
- Digby, A, Towsey, M, Bell, BD & Teal, PD. 2013. A practical comparison of manual and autonomous methods for acoustic monitoring. *Methods in Ecology and Evolution* 4(7): 675-683.
- Do Nascimento, LA, Campos-Cerqueira, M & Beard, KH. 2020. Acoustic metrics predict habitat type and vegetation structure in the Amazon. *Ecological Indicators* 117.
- Dudgeon, D. 2020. *Freshwater biodiversity: status, threats and conservation*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Eldridge, A, Casey, M, Moscoso, P & Peck, M. 2016. A new method for ecoacoustics? Toward the extraction and evaluation of ecologically-meaningful soundscape components using sparse coding methods. *PeerJ* 4.
- Elise, S, Urbina-Barreto, I, Pinel, R, Mahamadaly, V, Bureau, S, Penin, L, Adjeroud, M, Kulbicki, M & Bruggemann, JH. 2019. Assessing key ecosystem functions through soundscapes: A new perspective from coral reefs. *Ecological Indicators* 107.
- Enari, H, Enari, H, Okuda, K, Yoshita, M, Kuno, T & Okuda, K. 2017. Feasibility assessment of active and passive acoustic monitoring of sika deer populations. *Ecological Indicators* 79: 155-162.
- Fairbrass, AJ, Firman, M, Williams, C, Brostow, GJ, Titheridge, H & Jones, KE. 2019. CityNet-Deep learning tools for urban ecoacoustic assessment. *Methods in Ecology and Evolution* 10(2): 186-197.
- Farina, A. 2014. *Soundscape Ecology*. Springer, Dordrecht.
- Farina, A & Gage, SH. 2017. *Ecoacoustics: the ecological role of sounds*. John Wiley and Sons.
- Farnsworth, A & Russell, RW. 2007. Monitoring flight calls of migrating birds from an oil platform in the northern Gulf of Mexico. *Journal of Field Ornithology* 78(3): 279-289.
- Fischer, FP, Schulz, U, Schubert, H, Knapp, P & Schmöger, M. 1997. Quantitative assessment of grassland quality: acoustic determination of population sizes of orthopteran indicator species. *Ecological Applications* 7(3): 909-920.
- Fuller, S, Axel, AC, Tucker, D & Gage, SH. 2015. Connecting soundscape to landscape: Which acoustic index best describes landscape configuration? *Ecological Indicators* 58: 207-215.
- Gibb, R, Browning, E, Glover-Kapfer, P & Jones, KE. 2019. Emerging opportunities and challenges for passive acoustics in ecological assessment and monitoring. *Methods in Ecology and Evolution* 10(2): 169-185.

- Gibbs, JP & Breisch, AR. 2001. Climate warming and calling phenology of frogs near Ithaca, New York, 1900–1999. *Conservation Biology* 15(4): 1175-1178.
- Greenhalgh, JA, Genner, MJ, Jones, G & Desjonqueres, C. 2020. The role of freshwater bioacoustics in ecological research. *Wiley Interdisciplinary Reviews-Water* 7(3).
- Harris, SA, Shears, NT & Radford, CA. 2016a. Ecoacoustic indices as proxies for biodiversity on temperate reefs. *Methods in Ecology and Evolution* 7(6): 713-724.
- Harris, SA, Shears, NT & Radford, CA. 2016b. Ecoacoustic indices as proxies for biodiversity on temperate reefs. *Methods in Ecology and Evolution* 7: 713-724.
- Haselmayer, J & Quinn, JS. 2000. A comparison of point counts and sound recording as bird survey methods in Amazonian Southeast Peru. *The Condor* 102(4): 887-893.
- Hayashi, K, Erwinsyah, Lelyana, VD & Yamamura, K. 2020. Acoustic dissimilarities between an oil palm plantation and surrounding forests: Analysis of index time series for beta-diversity in South Sumatra, Indonesia. *Ecological Indicators* 112.
- Heinicke, S, Kalan, AK, Wagner, OJJ, Mundry, R, Lukashevich, H & Kuhl, HS. 2015. Assessing the performance of a semi-automated acoustic monitoring system for primates. *Methods in Ecology and Evolution* 6(7): 753-763.
- Hill, AP, Prince, P, Piña Covarrubias, E, Doncaster, CP, Snaddon, JL & Rogers, A. 2018a. AudioMoth: Evaluation of a smart open acoustic device for monitoring biodiversity and the environment. *Methods in Ecology and Evolution* 9(5): 1199-1211.
- Hill, AP, Prince, P, Pina~Covarrubias, E, Doncaster, CP, Snaddon, JL & Rogers, AD. 2018b. AudioMoth: Evaluation of a smart open acoustic device for monitoring biodiversity and the environment. *Methods in Ecology and Evolution* 9: 1199–1211.
- Howe, BM, Mikis-Olds, J, Rehm, E, Sagen, H, Worcester, PF & Haralabus, G. 2019. Observing the ocean acoustically. *Frontiers in Marine Science* 6.
- Hu, Y, Zhang, D, Zheng, HR & Gong, XF. 2009. Chirp excitation technique to enhance microbubble displacement induced by ultrasound radiation force. *Journal of the Acoustical Society of America* 125(3): 1410-1415.
- Hüppop, O, Dierschke, J, Exo, K, Fredrich, E & Hill, RJI. 2006. Bird migration studies and potential collision risk with offshore wind turbines. *Ibis* 148: 90-109.
- IPBES. 2019. Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. E. S. Brondizio, J. Settele, S. Díaz, and H. T. Ngo (editors) IPBES secretariat.
- Jakobsson, S & Pedersen, B. 2020. Naturindeks for Norge 2020. Tilstand og utvikling for biologisk mangfold. NINA Rapport 1886. Norsk institutt for naturforskning, Trondheim
- Juanes, F. 2018. Visual and acoustic sensors for early detection of biological invasions: Current uses and future potential. *Journal for Nature Conservation* 42: 7-11.
- Kalan, AK, Piel, AK, Mundry, R, Wittig, RM, Boesch, C & Kuhl, HS. 2016. Passive acoustic monitoring reveals group ranging and territory use: a case study of wild chimpanzees (*Pan troglodytes*). *Frontiers in Zoology* 13.

- Kasten, EP, Gage, SH, Fox, J & Joo, W. 2012. The remote environmental assessment laboratory's acoustic library: An archive for studying soundscape ecology. *Ecological Informatics* 12: 50-67.
- Krause, B. 1987. Bio-acoustics: Habitat ambience and ecological balance. *Whole Earth Reviews* 57: 14-17.
- Laiolo, P. 2010. The emerging significance of bioacoustics in animal species conservation. *Biological Conservation* 143(7): 1635-1645.
- Lammers, MO, Brainard, RE, Au, WWL, Mooney, TA & Wong, KB. 2008. An ecological acoustic recorder (EAR) for long-term monitoring of biological and anthropogenic sounds on coral reefs and other marine habitats. *The Journal of the Acoustical Society of America* 123(3): 1720-1728.
- Lehmann, GUC, Frommolt, KH, Lehmann, AW & Riede, K. 2014. Baseline data for automated acoustic monitoring of Orthoptera in a Mediterranean landscape, the Hymettos, Greece. *Journal of Insect Conservation* 18(5): 909-925.
- Linke, S, Gifford, T, Desjonqueres, C, Tonolla, D, Aubin, T, Barclay, L, Karaconstantis, C, Kennard, MJ, Rybak, F & Sueur, J. 2018. Freshwater ecoacoustics as a tool for continuous ecosystem monitoring. *Frontiers in Ecology and the Environment* 16(4): 231-238.
- Llusia, D, Márquez, R, Beltrán, JF, Benítez, M & do Amaral, JP. 2013. Calling behaviour under climate change: geographical and seasonal variation of calling temperatures in ectotherms. *Global Change Biology* 19(9): 2655-2674.
- Locascio, JV & Mann, DA. 2005. Effects of Hurricane Charley on fish chorusing. *Biology Letters* 1(3): 362-365.
- Lomolino, MV, Pijanowski, BC & Gasc, A. 2015. The silence of biogeography. *Journal of Biogeography* 42(7): 1187-1196.
- Mankin, RW, Hodges, RD, Nagle, HT, Schal, C, Pereira, RM & Koehler, PG. 2010. Acoustic indicators for targeted detection of stored product and urban insect pests by inexpensive infrared, acoustic, and vibrational detection of movement. *Journal of Economic Entomology* 103(5): 1636-1646.
- Marques, TA, Thomas, L, Martin, SW, Mellinger, DK, Ward, JA, Moretti, DJ, Harris, D & Tyack, PL. 2013. Estimating animal population density using passive acoustics. *Biological Reviews* 88(2): 287-309.
- Martin, MJ, Gridley, T, Roux, J-P & Elwen, SH. 2020. First abundance estimates of heaviside's (*Cephalorhynchus heavisidii*) and dusky (*Lagenorhynchus obscurus*) dolphins off Namibia using a novel visual and acoustic line transect survey. *Frontiers in Marine Science* 7: 800.
- McCauley, RD, Thomas, F, Parsons, MJG, Erbe, C, Cato, DH, Duncan, AJ, Gavrilov, AN, Parnum, IM & Salgado-Kent, CP. 2017. Developing an underwater sound recorder: The long and short (time) of it. *Acoustics Australia* 45(2): 301-311.
- Miljødirektoratet. 2020. Vannportalen. <https://www.vannportalen.no/>. Besøkt 8 desember 2020.
- Montgomery, JC & Radford, CA. 2017. Marine bioacoustics. *Current Biology* 27(11): R502-R507.
- Nagendra, H, Lucas, R, Honrado, JP, Jongman, RHG, Tarantino, C, Adamo, M & Mairota, P. 2013. Remote sensing for conservation monitoring: Assessing protected areas, habitat extent, habitat condition, species diversity, and threats. *Ecological Indicators* 33: 45-59.
- Noriko, T, Tatsuya, K, Masato, K, Nozomu, M, Mayumi, S, Yusuke, S, Fumiaki, Y, Masateru, M, Tomoka, T, Susumu, O, Nami, H & Makoto, W. 2013. Sound playback surveys to reveal the distribution of invasive alien Pallas's squirrels, *Callosciurus erythraeus*. *Mammal Study* 38(2): 97-103.

- NOU. 2013. Naturens goder - om verdier av økosystemtjenester. Norges offentlige utredninger 2013:10.
- Nybø, S & Evju, M. 2017. Fagsystem for fastsetting av økologisk tilstand. Forslag fra et ekspertråd. Fagsystem for fastsetting av god økologisk tilstand - regjeringen.no. Trondheim.
- Obrist, MK, Pavan, G, J., S, Riede, K, Llusia, D & Marquez, R. 2010. Bioacoustics approaches in biodiversity inventories. In J. Eymann, J. Degreef, C. Häuser, J. C. Monje, Y. Samyn, & D. VandenSpiegel (Eds.), ABC Taxa. Manual on Field Recording Techniques and Protocols for All Taxa Biodiversity Inventories (pp. 68-99).
- Oliver, RY, Ellis, DPW, Chmura, HE, Krause, JS, Perez, JH, Sweet, SK, Gough, L, Wingfield, JC & Boelman, NT. 2018. Eavesdropping on the Arctic: Automated bioacoustics reveal dynamics in songbird breeding phenology. *Science Advances* 4(6).
- Olsen, SL, Bartlett, J, Davey, M, Odden, J, Fossøy, F, Linnell, JDC, Nordén, J, Sandercock, B & Thorsen, NH. 2021. Kartlegging av biologisk mangfold med ny teknologi: miljø-DNA og kamerafeller. NINA Rapport. Norsk institutt for naturforskning.
- Pekin, BK, Jung, J, Villanueva-Rivera, LJ, Pijanowski, BC & Ahumada, JA. 2012. Modeling acoustic diversity using soundscape recordings and LIDAR-derived metrics of vertical forest structure in a neotropical rainforest. *Landscape Ecology* 27(10): 1513-1522.
- Pérez-Granados, C, Bota, G, Giralt, D & Traba, J. 2018. A cost-effective protocol for monitoring birds using autonomous recording units: a case study with a night-time singing passerine. *Bird Study* 65(3): 338-345.
- Pieretti, N & Danovaro, R. 2020. Acoustic indexes for marine biodiversity trends and ecosystem health. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 375(1814): 20190447.
- Pijanowski, BC, Farina, A, Gage, SH, Dumyahn, SL & Krause, BL. 2011a. What is soundscape ecology? An introduction and overview of an emerging new science. *Landscape Ecology* 26(9): 1213-1232.
- Pijanowski, BC, Villanueva-Rivera, LJ, Dumyahn, SL, Farina, A, Krause, BL, Napoletano, BM, Gage, SH & Pieretti, N. 2011b. Soundscape Ecology: The Science of Sound in the Landscape. *Bioscience* 61(3): 203-216.
- Priyadarshani, N, Marsland, S & Castro, I. 2018. Automated birdsong recognition in complex acoustic environments: a review. *Journal of Avian Biology* 49(5): jav-01447.
- R Core Team. 2020. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Radford, CA, Jeffs, AG, Tindle, CT & Montgomery, JC. 2008. Temporal patterns in ambient noise of biological origin from a shallow water temperate reef. *Oecologia* 156(4): 921-929.
- Rappaport, DI, Royle, JA & Morton, DC. 2020. Acoustic space occupancy: Combining ecoacoustics and lidar to model biodiversity variation and detection bias across heterogeneous landscapes. *Ecological Indicators* 113.
- Rayment, W, Dawson, S & Slooten, L. 2009. Use of T-PODs for acoustic monitoring of *Cephalorhynchus* dolphins: a case study with Hector's dolphins in a marine protected area. *Endang Species Res* 10: 333-339.
- Ribeiro Jr, JW, Siqueira, T, Brejão, GL & Zipkin, EF. 2018. Effects of agriculture and topography on tropical amphibian species and communities. *Ecological Applications* 28(6): 1554-1564.

- Riede, K & Kroker, A. 1995. Bioacoustics and niche differentiation in 2 cicada species from Bornean lowland forest. *Zoologischer Anzeiger* 234(1): 43-51.
- Riede, K, Nischk, F, Dietrich, C, Thiel, C & Schwenker, F. 2006. Automated annotation of Orthoptera songs: first results from analysing the DORSA sound repository. *Journal of Orthoptera Research* 15(1): 105-113.
- Risch, D & Parks, S. 2017. Overview: Ecoacoustics for monitoring freshwater and marine biodiversity. *The Journal of the Acoustical Society of America* 141(5): 3937-3937.
- Roch, MA, Batchelor, H, Baumann-Pickering, S, Berchok, CL, Cholewiak, D, Fujioka, E, Garland, EC, Herbert, S, Hildebrand, JA, Oleson, EM, Van Parijs, S, Risch, D, Sirovic, A & Soldevilla, MS. 2016. Management of acoustic metadata for bioacoustics. *Ecological Informatics* 31: 122-136.
- Rocha, LHS, Ferreira, LS, Paula, BC, Rodrigues, FHG & Sousa-Lima, RS. 2015. An evaluation of manual and automated methods for detecting sounds of maned wolves (*Chrysocyon brachyurus* Illiger 1815). *Bioacoustics-the International Journal of Animal Sound and Its Recording* 24(2): 185-198.
- Rountree, RA & Juanes, F. 2017. Potential of passive acoustic recording for monitoring invasive species: freshwater drum invasion of the Hudson River via the New York canal system. *Biological Invasions* 19(7): 2075-2088.
- Rountree, RA, Bolgan, M & Juanes, F. 2019. How can we understand freshwater soundscapes without fish sound descriptions? *Fisheries* 44(3): 137-143.
- Sanchez-Giraldo, C, Bedoya, CL, Moran-Vasquez, RA, Isaza, CV & Daza, JM. 2020. Ecoacoustics in the rain: understanding acoustic indices under the most common geophonic source in tropical rainforests. *Remote Sensing in Ecology and Conservation* 6(3): 248-261.
- Sebastian-Gonzalez, E, Pang-Ching, J, Barbosa, JM & Hart, P. 2015. Bioacoustics for species management: two case studies with a Hawaiian forest bird. *Ecology and Evolution* 5(20): 4696-4705.
- Sethi, SS, Ewers, RM, Jones, NS, Orme, CDL & Picinali, L. 2018. Robust, real-time and autonomous monitoring of ecosystems with an open, low-cost, networked device. *Methods in Ecology and Evolution* 9(12): 2383-2387.
- Sethi, SS, Ewers, RM, Jones, NS, Signorelli, A, Picinali, L & Orme, CDL. 2020a. SAFE Acoustics: An open-source, real-time eco-acoustic monitoring network in the tropical rainforests of Borneo. *Methods in Ecology and Evolution* 11: 1182-1185.
- Sethi, SS, Ewers, RM, Jones, NS, Sleutel, J, Shabrani, A, Zulkifli, N & Picinali, L. 2020b. Soundscapes predict species occurrence in tropical forests. *bioRxiv*: 2020.09.24.311381.
- Sethi, SS, Jones, NS, Fulcher, BD, Picinali, L, Clink, DJ, Klinck, H, Orme, CDL, Wrege, PH & Ewers, RM. 2020c. Characterizing soundscapes across diverse ecosystems using a universal acoustic feature set. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 117: 17049-17055.
- Snaddon, J, Petrokofsky, G, Jepson, P & Willis, KJ. 2013. Biodiversity technologies: tools as change agents. *Biology Letters* 9(1).
- Stowell, D & Plumbley, MD. 2014. Automatic large-scale classification of bird sounds is strongly improved by unsupervised feature learning. *PeerJ* 2.

- Stowell, D, Wood, MD, Pamuła, H, Stylianou, Y & Glotin, H. 2019. Automatic acoustic detection of birds through deep learning: The first Bird Audio Detection challenge. *Methods in Ecology and Evolution* 10(3): 368-380.
- Stowell, D & Sueur, JM. 2020. Ecoacoustics: acoustic sensing for biodiversity monitoring at scale. *Remote Sensing in Ecology and Conservation* 6(3): 217-219.
- Staaterman, E, Paris, CB, DeFerrari, HA, Mann, DA, Rice, AN & D'Alessandro, EK. 2014. Celestial patterns in marine soundscapes. *Marine Ecology Progress Series* 508: 17-32.
- Staaterman, E, Ogburn, MB, Altieri, AH, Brandl, SJ, Whippo, R, Seemann, J, Goodison, M & Duffy, JE. 2017. Bioacoustic measurements complement visual biodiversity surveys: preliminary evidence from four shallow marine habitats. *Marine Ecology Progress Series* 575: 207-215.
- Sueur, J. 2002. Cicada acoustic communication: potential sound partitioning in a multispecies community from Mexico (Hemiptera: Cicadomorpha: Cicadidae). *Biological Journal of the Linnean Society* 75(3): 379-394.
- Sueur, J, Pavoine, S, Hamerlynck, O & Duvail, S. 2009. Rapid acoustic survey for biodiversity appraisal. *PLOS ONE* 3(12): e4065.
- Sueur, J, Farina, A, Gasc, A, Pieretti, N & Pavoine, S. 2014. Acoustic indices for biodiversity assessment and landscape investigation. *Acta Acustica United with Acustica* 100(4): 772-781.
- Sueur, J & Farina, A. 2015. Ecoacoustics: the ecological investigation and interpretation of environmental sound. *Biosemiotics* 8(3): 493-502.
- Sugai, LSM & Llusia, D. 2019. Bioacoustic time capsules: Using acoustic monitoring to document biodiversity. *Ecological Indicators* 99: 149-152.
- Sugai, LSM, Silva, TSF, Ribeiro, JW & Llusia, D. 2019. Terrestrial passive acoustic monitoring: review and perspectives. *Bioscience* 69(1): 15-25.
- Tavolga, WN. 2012. Listening backward: early days of marine bioacoustics. *Effects of Noise on Aquatic Life* 730: 11-14.
- Thompson, ME, Schwager, SJ, Payne, KB & Turkalo, AK. 2010. Acoustic estimation of wildlife abundance: methodology for vocal mammals in forested habitats. *African Journal of Ecology* 48(3): 654-661.
- Tingstad, L, Evju, M, Sickel, H & Töpper, J. 2019. Utvikling av nasjonal arealrepresentativ naturovervåking (ANO). Forslag til gjennomføring, protokoller og kostnadsvurderinger med utgangspunkt i erfaringer fra uttesting i Trøndelag. NINA Rapport 1642. Norsk institutt for naturforskning.
- Tittensor, DP, Mora, C, Jetz, W, Lotze, HK, Ricard, D, Berghe, EV & Worm, B. 2010. Global patterns and predictors of marine biodiversity across taxa. *Nature* 466(7310): 1098-1101.
- Urick, RJ. 1983. Principles of underwater sound. McGraw-Hill, New York.
- Van Parijs, S, Clark, C, Sousa-Lima, R, Parks, S, Rankin, S, Risch, D & Van Opzeeland, I. 2009. Management and research applications of real-time and archival passive acoustic sensors over varying temporal and spatial scales. *Marine Ecology Progress Series* 395: 21-36.
- Vetter, BJ, Calfee, RD & Mensinger, AF. 2017. Management implications of broadband sound in modulating wild silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) behavior. *Management of Biological Invasions* 8(3): 371-376.



- Villanueva-Rivera, LJ, Pijanowski, BC, Doucette, J & Pekin, B. 2011. A primer of acoustic analysis for landscape ecologists. *Landscape Ecology* 26(9): 1233.
- Villanueva-Rivera, LJ & Pijanowski, BC. 2018. soundecology: Soundscape Ecology. R package version 1.3.3. <https://CRAN.R-project.org/package=soundecology>.
- Wall, J, Wittemyer, G, Klinkenberg, B & Douglas-Hamilton, I. 2014. Novel opportunities for wildlife conservation and research with real-time monitoring. *Ecological Applications* 24(4): 593-601.
- Wrege, PH, Rowland, ED, Keen, S & Shiu, Y. 2017. Acoustic monitoring for conservation in tropical forests: examples from forest elephants. *Methods in Ecology and Evolution* 8(10): 1292-1301.
- Yeager, A, Commito, J, Wilson, A, Bower, D & Schwarzkopf, L. 2014. Sex, light, and sound: location and combination of multiple attractants affect probability of cane toad (*Rhinella marina*) capture. *Journal of Pest Science* 87(2): 323-329.
- Zamora-Gutierrez, V, Lopez-Gonzalez, C, MacSwiney Gonzalez, MC, Fenton, B, Jones, G, Kalko, EKV, Puechmaile, SJ, Stathopoulos, V & Jones, KE. 2016. Acoustic identification of Mexican bats based on taxonomic and ecological constraints on call design. *Methods in Ecology and Evolution* 7(9): 1082-1091.
- Zilli, D, Parson, O, Merrett, GV & Rogers, A. 2014. A hidden markov model-based acoustic cicada detector for crowdsourced smartphone biodiversity monitoring. *Journal of Artificial Intelligence Research* 51: 805-827.
- Znidarsic, E, Towsey, M, Roy, WK, Darling, SE, Truskinger, A, Roe, P & Watson, DM. 2020. Using visualization and machine learning methods to monitor low detectability species-The least bittern as a case study. *Ecological Informatics* 55.
- Åström, J, Birkemoe, T, Davey, M, Ekrem, T, Fossøy, F, Hanssen, O, Laugsand, A, Staverløkk, A, Sverdrup-Thygeson, A & Ødegaard, F. 2020. Insektovervåking på Østlandet 2020 – Rapport fra første feltsesong. NINA Rapport 1878. Norsk institutt for naturforskning.





*Norsk institutt for naturforskning, NINA, er en uavhengig stiftelse som forsker på natur og samspillet natur–samfunn.*

*NINA ble etablert i 1988. Hovedkontoret er i Trondheim, med avdelingskontorer i Tromsø, Lillehammer, Bergen og Oslo. I tillegg driver NINA Sæterfjellet avlsstasjon for fjellrev på Oppdal, og forskningsstasjonen for vill laksefisk på lms i Rogaland.*

*NINAs virksomhet omfatter både forskning og utredning, miljøovervåking, rådgivning og evaluering. NINA har stor bredde i kompetanse og erfaring med både naturvitere og samfunnsvitere i staben. Vi har kunnskap om artene, naturtypene, samfunnets bruk av naturen og sammenhenger med de store drivkreftene i naturen.*

1925

NINA Rapport

ISSN:1504-3312  
ISBN: 978-82-426-4701-6

## Norsk institutt for naturforskning

NINA Hovedkontor

Postadresse: Postboks 5685 Torgarden, 7485 Trondheim

Besøks-/leveringsadresse: Høgskoleringen 9, 7034 Trondheim

Telefon: 73 80 14 00, Telefaks: 73 80 14 01

E-post: [firmapost@nina.no](mailto:firmapost@nina.no)

Organisasjonsnummer 9500 37 687

<http://www.nina.no>



Samarbeid og kunnskap for framtidens miljøløsninger