
RAPPORT

GoliatVIND

OPPDRAKSGIVER

Goliatvind AS

EMNE

Vurdering av undervannsstøy

DATO / REVISJON: 9. desember 2024 / 02

DOKUMENTKODE: 10255025-01-RIMT-RAP-01



Multiconsult

Dette dokumentet har blitt utarbeidet av Multiconsult på vegne av Multiconsult Norge AS eller selskapets klient. Klientens rettigheter til dokumentet er gitt for den aktuelle oppdragsavtalen eller ved anmodning. Tredjeparter har ingen rettigheter til bruk av dokumentet (eller deler av det) uten skriftlig forhåndsgodkjenning fra Multiconsult. Enhver bruk av dokumentet (eller deler av det) til andre formål, på andre måter eller av andre personer eller enheter enn de som er godkjent skriftlig av Multiconsult, er forbudt, og Multiconsult påtar seg intet ansvar for slikt bruk. Deler av dokumentet kan være beskyttet av immaterielle rettigheter og/eller eiendomsrettigheter. Kopiering, distribusjon, endring, behandling eller annen bruk av dokumentet er ikke tillatt uten skriftlig forhåndssamtykke fra Multiconsult eller annen innehaver av slike rettigheter.

Forside: Flytende havvindturbin (illustrasjon: Goliatvind AS)
Bilder og figurer: Multiconsult Norge AS om annet ikke er oppgitt

RAPPORT

OPPDRAAG	GoliatVIND	DOKUMENTKODE	10253018-01-RIMT-RAP-01
EMNE	Vurdering av undervannsstøy	TILGJENGELIGHET	Åpen
OPPDRAAGSGIVER	Goliatvind AS	OPPDRAAGSLEDER	Bjørn Christian Bjørnsen
KONTAKTPERSON	Inger Johanne Hagen	UTARBEIDET AV	Sindre Fritzner og Tim Fristedt
		ANSVARLIG ENHET	10105090 Vindkraft

SAMMENDRAG

Goliatvind AS planlegger å etablere flytende havvindturbiner tilknyttet Goliat FPSO (Floating Production Storage and Offloading) utenfor Hammerfest. I forbindelse med dette er Multiconsult engasjert for å utrede konsekvenser av tiltaket. Denne rapporten behandler delene rundt undervannsstøy og mulige effekter på dyreliv og biota i området.

Det er beregnet generering og forplantning av undervannsstøy fra anleggsfase, driftsfase og rivefase basert på antakelser fra litteratur og erfaringer rundt denne typen tiltak. For de planlagte vindturbine er det brukt en konservativ antagelse på 159 dB re 1 μPa @1m i kildestyrke. Basert på resultatene vil man for driftsfasen muligens kunne forvente endret adferd hos fisk og pattedyr i en radius på 20 km fra turbinene, mens temporær terskelforskyvning (TTS) vil kun kunne skje i innenfor en radius på 1 km. Det skal fremholdes at dette er et meget konservativt estimat og baseres på at dyrene blir værende i nærområdet rundt vindkraftverket 24 timer per døgn, hvilket er meget usannsynlig for både migrerende fisk og pattedyr.

Den største lydpåvirkningen oppstår ved festing av dragankrene når ankerhåndteringsfartøyene går for full maskin under lengre perioder for å feste ankerene. Utsendt døgnekivalent lydeksponering SEL_{dB24} er i disse periodene beregnet til 190 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ akkumulert lydtrykk i et område med 100 m radius fra fartøyet. Ved en radius på 5 km ligger lydnivået fra festing av dragankrene på 165 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$, og dette vil kunne føre til endret adferd og temporær terskelforskyvning hos både fisk og marine pattedyr. Denne aktiviteten er begrenset i tid og kommer med størst sannsynlighet ikke å tilføye noen skader for dyreliv i området. Forankringsmetode er ikke bestemt. Om det benyttes sugeankre unngås denne støybelastningen siden denne metoden er meget mer akustisk skånsom.

For marine pattedyr forventes det at kun de aller minste hvalene (som opererer innen høye frekvensbånd) kan bli påvirket på lengre avstander, ca. 15-20 km. Dette er i samsvar med observasjoner av at nise forlytter seg (flykter) fra områder med sterk støy (peling) og kan trekke seg flere titalls kilometer unna en peleoperasjon, men kommer tilbake når nivåene roer seg etter installasjonen.

Siden alle støyende kilder i området har en kildestyrke mindre 180 dB re 1 μPa @ 1m, kan man konkludere med at det ikke foreligger noen risiko for direkte fysiske (hverken permanente eller temporære) skader fra kortvarig eksponering av lyder, siden de fleste typer fisk, hval og sel tåler momentane lydpuiser opp til 185 dB re 1 μPa . Selv sild, som er en av de mest følsomme artene for lydforstyrrelser, klarer disse nivåene godt.

02	09.12.2024	Mindre revisjon etter gjennomgang av Goliatvind AS	Tim Fristedt	Hans Kristian Djuve	Vegard Meland
01	22.11.2024	Endringer iht. godkjent utredningsprogram fra ED	Tim Fristedt	Hans Kristian Djuve	Vegard Meland
00	12.09.2024	Utgave til Goliatvind AS	Sindre Fritzner	Tim Fristedt	Vegard Meland
REV.	DATO	BESKRIVELSE	UTARBEIDET AV	KONTROLLERT AV	GODKJENT AV

INNHOLDSFORTEGNELSE

1	Begreper og definisjoner.....	5
2	Tiltaket	6
2.1	Innledning	6
2.2	Beliggenhet	7
2.3	Turbinflyter og forankring.....	7
2.4	Aktivitetsfaser	8
2.4.1	Anleggsfasen	8
2.4.2	Drifts- og vedlikeholdsfasen.....	8
2.4.3	Riving og avslutning	8
2.5	Nullalternativet.....	8
3	Påvirkning av akustikk på forskjellige biotoper	9
3.1	Plankton, virvelløse dyr og bunndyr	9
3.2	Fisk	9
3.3	Sjøpattedyr	10
4	Beregninger av undervannsstøy og lydeksposering	11
4.1	Støy fra båttrafikk	11
4.2	Støy fra anleggsfasen	13
4.3	Driftsfasen.....	15
4.4	Lydeksposering under hele levetiden.....	17
5	Partikkelbevegelse.....	19
6	Konklusjon.....	20
	Referanser	21
Appendiks A.	Akustikk i vann / hydroakustikk.....	23
A.1	Trykkbeskrivelse av lyd	23
A.2	Spisstrykk og eksponering.....	23
A.3	Frekvensinnhold og støy	24
A.4	Partikkelbevegelse	24
Appendiks B.	Metodebeskrivelse	25
B.1	Modellering av støyutbredelse	25
B.2	Forbigående impulsiv lyd / sprengning	26
B.3	Lydeksposering over tid	27
B.4	Sylindrisk spredning	29
B.5	Kildestyrke	30
B.6	Refleksjon og transmisjon.....	31
B.7	Bellhop - simuleringsprogramvare.....	31
Appendiks C.	Risiko for fisk	32
C.1	Deteksjonsterskler	32
C.2	Død / barometrisk trauma	32
C.3	Permanente og temporære skader.....	33
C.4	Overdøying, frykt og stress	33
C.5	Partikkelbevegelse	34
C.6	Effekter på populasjon.....	34
Appendiks D.	Terskelverdier.....	35

1 Begreper og definisjoner

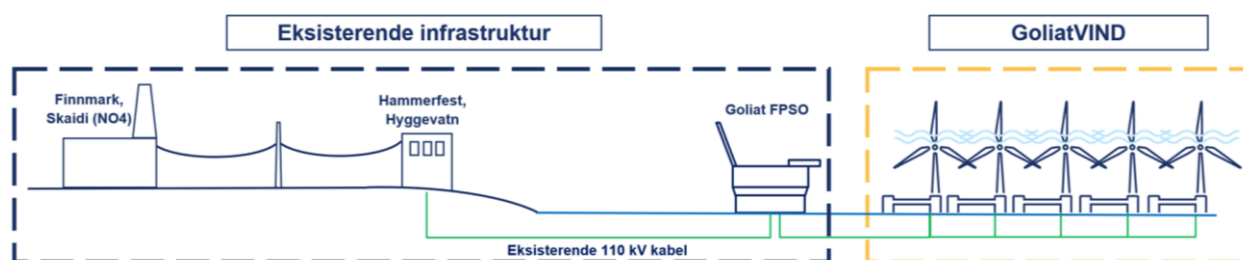
Term/forkortning/uttrykk	Forklaring	Beskrivelse
SPL (Sound pressure level)	Spisstrykk	Kortvarig lydimpuls målt i dB. Blir ofte brukt i forbindelse med sprengning. [Pa eller dB re 1 Pa]
SEL (Sound exposure level)	Lydeksposering	Langvarig lydeksposering. Denne blir brukt i forbindelse med eksponering av lyd over tid, og angis i dB integrert over tid. [Pa ² s eller dB re 1 Pa ² s]
SEL₂₄	Døgnvektet Lydeksposering	Gjennomsnitts SEL over et døgn. Dette gir et mål for å bedømme langvarige effekter som repeteres under lang tid.
Duty cycle	Tidsfraksjon da lydkilde gir lyd	Fraksjon av tiden en aktiv lydkilde faktisk gir lyd. For eksempel, gir en pelingsmaskin lyd opp til 15 % av tiden.
Work hours	Arbeidstid per døgn	Gjennomsnittlig tid per døgn som lydkilden er aktiv, for eksempel, antall timer en pelingsmaskin er i bruk gjennom et døgn.
Høreterskel		Terskelverdi for når en art kan oppfatte lyd (spisstrykk).
Respons		Noen fisker viser forandring i atferd, som endring i svømmemønstre, orientering og skremmereaksjoner.
Responsterskel		Lydstyrke (dB) som kreves for å observere respons hos fisk.
S₀, S_L, S_{L0}	Kildestyrke «Source level»	Styrken til lydkilden. Kilden karakteriseres med en kildestyrke i [dB re. 1 μPa @ 1m], hvilket betyr at trykkfeltet er definert 1 m fra kilden. En karakteristisk egenskap for kilden, uavhengig av forplantning fra kilde til mottaker ved 1 meter.
Intervall	Tidsintervall innenfor hvilket én enhetsladning tenner	Sprengninger er oftest utførte med flere mindre ladninger som detoneres innen korte tidsintervall (tennerintervall) for eksempel 15-30 millisekunder.
Enhetsladning	Mengden sprengladning som sprenges samtidig	Totalvekt på sprengladninger som detoneres innenfor et intervall.
TTS	Temporært terskelskift	Midlertidig hørselsskade / svekket hørsel.
PTS	Permanent terskelskift	Kronisk hørselsskade - uopprettelig svekkelse av hørselen.

2 Tiltaket

2.1 Innledning

Goliatvind AS planlegger å etablere flytende havvindturbiner tilknyttet Goliat FPSO (Floating Production Storage and Offloading) utenfor Hammerfest. I forbindelse med dette er Multiconsult engasjert til å utrede konsekvenser av tiltaket for ulike tema. Denne rapporten behandler delene rundt undervannsstøy og mulige effekter av dette på dyreliv og biota i området. En bredere oversikt over rammebetingelser og bakgrunn for tiltak og tiltakshavere er beskrevet i konsesjonssøknaden og rapporten om marint naturmangfold [1].

GoliatVIND er et demonstrasjonsanlegg for flytende havvindturbiner. Konseptet til GoliatVIND er å bruke allerede etablert infrastruktur til nettilknytning, slik at man unngår nye inngrep på land. Dette er skissert i figur 1, hvor blå ramme viser allerede etablert infrastruktur og gul ramme viser ny installasjon. Goliat FPSO er allerede forsynt med strøm fra en 110 kV-kabel fra Hyggevatn transformatorstasjon i Hammerfest, og denne kan også brukes til å frakte produsert strøm fra havvinnanlegget til land. Goliat FPSO sitt nettanlegg er koblet opp mot regionalnettet til Lucerna ved 132 kV samleskinne i Hyggevatn transformatorstasjon. Nøkkeldata for anlegget er vist i tabell 1.



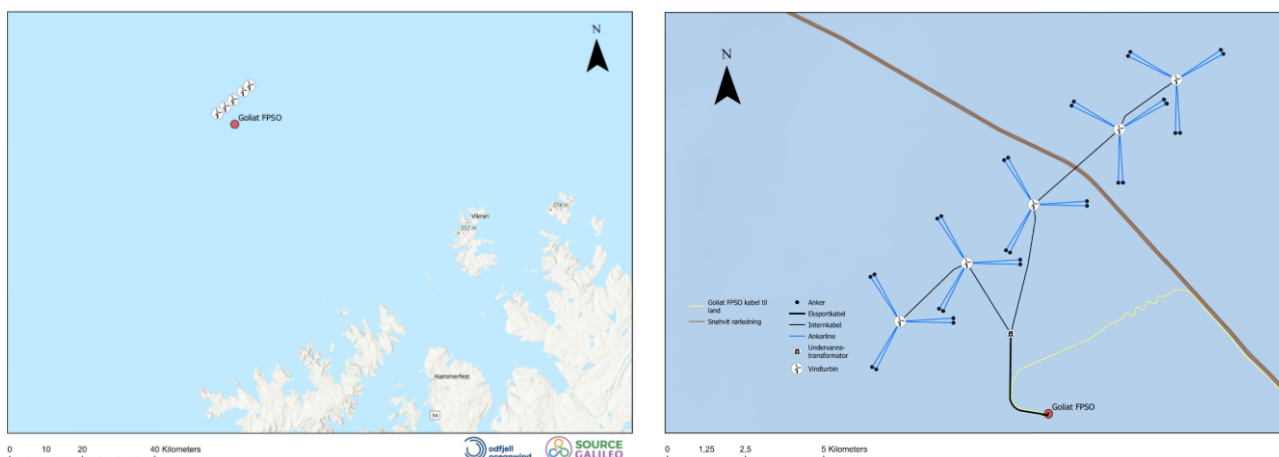
Figur 1. Skisse over planlagt tiltak. Blå ramme viser allerede etablert infrastruktur og gul ramme viser ny installasjon. I tillegg er det behov for en modifisering av anlegget på Goliat FPSO for å kunne ta imot ny kraft. Dette er kun en skisse, og kun ment for å illustrere konseptet (figur utarbeidet av Goliatvind AS).

Tabell 1. Nøkkeltall for GoliatVIND.

GoliatVIND – nøkkeltall	
Foreslått prosjektareal (dekker foreslått turbinplassering og installasjoner på havbunnen knyttet til tiltaket)	57 km ²
Avstand til nærmeste kyst	66 km (Sørøya)
Avstand fra Hammerfest	90 km
Avstand til Goliat FPSO	5–11 km
Havdybde (gjennomsnittlige dybde i parentes)	Ca. 300–400 m (355 m)
Gjennomsnittlig vindhastighet ved hub-høyde	9,4 m/s (NORA3)
Høyeste dimensjonerende signifikante bølgehøyde (50-års bølgehøyde)	15,5 m (NORA10)
Vindturbin type	14–18 MW
Type flyter	Halv nedsenket stålflyter (Odfjell Oceanwind Deepsea Star™)
Avstand mellom hver turbin	2–4 km
Horisontal avstand mellom turbin og anker	1,7 km
Netto kapasitetsfaktor	49
Total effekt	Inntil 90 MW
Forventet årlig energiproduksjon	320 GWh

2.2 Beliggenhet

GoliatVIND er planlagt lokalisert ca. 90 kilometer nordvest for Hammerfest og 5–11 kilometer nordvest for Goliat FPSO. Området har et vanddyb på ca. 300–400 meter. Plassering av demonstrasjonsanlegget vises til venstre i figur 2, mens planlagt plassering av turbiner og kabler vises til høyre. Anlegget er ikke endelig optimalisert, og mindre endringer i plassering av turbiner, forankring, kabler og eksportsystem (transformator og kabel fra transformator til Goliat FPSO) kan forekomme. Endelig konfigurasjon har liten effekt på risikovurderingen av undervannsstøy siden selve skalaen på anlegget er liten i forhold til størrelsen til hvor langt utsendt lyd kan detekteres av dyreliv.



Figur 2. Til venstre vises oversiktskart over GoliatVIND i relasjon til Goliat FPSO og Hammerfest. Høyre vises foreløpig prosjektskisse GoliatVIND. Avstand mellom turbinene er 2–4 km, og horisontal avstand mellom turbin og anker er ca. 1,7 km. Kryssing av Snøhvit-rørledning (markert med brun linje) vil håndteres i egen avtale med operatør av denne (figur utarbeidet av Goliatvind AS).

2.3 Turbinflyter og forankring

Flyterfundamentet som planlegges benyttet for GoliatVIND-prosjektet er Odfjell Oceanwinds Deepsea Star™, et halvt-nedsenkbart fundament med turbin plassert i sentrum, se figuren til høyre. Fundamentet er i stål og er designet som en trekant med lengde på omtrent 100 meter på hver av sidene. Hvert hjørne består av oppdriftssøyler som inkluderer ballast. Hver turbin er planlagt med 14–18 MW, med rotordiameter på mellom 220 og 260 meter. Høyden fra flyterfundamentet til navet i turbinen (senter i roteren) blir på mellom 135 og 170 meter.

Hvert fundament har seks ankre, hver med en ankerline med en horisontal lengde på rett under 2000 meter. Ankerliner består av fibertau med en øvre og en nedre kjettingdel. To typer anker vurderes: sugeanker eller draganker. Sugeanker gir ikke noen særlig bidrag til utsendt akustisk støy under forankringsoperasjonen, men når et draganker festes i bunn forventes høye støynivåer siden metoden krever at skipene kjører med stor kraft og høyt motorpådrag over lengre perioder.



Figur 3. Odfjell Oceanwinds Deepsea Star™ (figur utarbeidet av Odfjell).

2.4 Aktivitetsfaser

2.4.1 Anleggsfasen

Bygging av GoliatVIND medfører en forventet anleggsfase på 2–3 år. Her inngår både arbeid ved kai og til havs. Anleggsfasen ute i havet planlegges begrenset til sommerhalvåret i 2028 og 2029. Anleggsfasen vil innebære økt skipstrafikk som gir økt støy i området når materialer og strukturelle elementer skal fraktes til området. I tillegg vil installasjonen av vindturbinene føre til en generelt økt mengde støy i området. Vi antar her konservativt at det benyttes dragankere ettersom festing av dragankere er antatt å generere mye mer støy enn festing av sugeankere.

2.4.2 Drifts- og vedlikeholdsfasen

I drifts- og vedlikeholdsfasen forventes forhøyde akustiske effekter å bli generert fra selve vindturbinene og en mindre mengde lett vedlikehold i løpet av noen få vår- eller sommeruker hvert år. Denne komponenten domineres fullstendig av vindturbinenes driftsstøy siden denne er konservativt antatt å generere kontinuerlig 7 dager i uken, 24 timer per døgn i enhetenes 25-års levetid.

Hvis det blir behov for tyngre vedlikehold kan man legge til støy tilsvarende det som forekommer i anleggsfasen. Sannsynligheten for dette er normalt liten, men det er lagt inn én større vedlikeholdsaktivitet over to uker hvert år som strekker seg over to uker. Dette gir en konservativ tilnærming til generert undervannsstøy, og sikrer at generert støy fra denne fasen ikke underestimeres.

2.4.3 Riving og avslutning

Etter avsluttet driftsfase skal det vurderes effekter av demontering av vindkraftverket. I denne fasen vil det også være mer skipstrafikk enn hva som forekommer normalt i området. For denne fasen antar vi omtrent samme nivå på aktivitet som for anleggsfasen, men uten behov for festing av dragankere. Normalt antar man en litt kortere tid for riving og fjerning av anlegget enn for anleggsfasen, her er dekommisjonering konservativt antatt å vare to år [3].

2.5 Nullalternativet

Tiltaket sammenlignes mot et nullalternativ som er situasjonen i området i nær framtid. Fra dette kan vi ekstrapolere effekter fra mulige støyende aktiviteter som vi vet kan forekomme i fremtiden. Det ble påpekt i en rapport fra Havforskningsinstituttet at det kunne være vanskelig å detektere lyd fra flytende vindturbiner siden bakgrunnsnivået nært noen anleggsplasser er generelt høyt [4].

Klimaendringer og endrede økonomiske/politiske betingelser for olje og gass vil utgjøre de største faktorene for endrede forhold for utbygging i Barentshavet. Begge disse vil gi endringer uavhengig av utbygging av vindkraftverk til havs. Hva dette innebærer for nivåene for undervannsstøy er vanskelig å vurdere, men mest sannsynlig kommer endrede rammebetingelser å gi muligheter for en større utbygging av olje og gass og nye FPSO-installasjoner i Barentshavet. Disse typer installasjoner trekker med seg økt skipstrafikk og økt menneskelig aktivitet i området, som genererer omtrent samme type endrede forhold for undervannsstøy som et vindkraftanlegg.

Gruvedrift av sjøbunnsmineraler i Arktis og Norskehavet kan også bli en realitet. Dette kan gi en betydelig påvirkning på det marine miljøet. I første rekke gjennom endrede forhold for bunnlevende organismer, men en slik aktivitet vil også gi støy.

I tillegg har man målt en økning i støy over et bredt frekvensspekter fra økt skipstrafikk på omtrent 3 dB per tiår [5]. Konsekvensene av denne økning kommer vi mest sannsynlig ikke kunne vurdere før om 20–30 år, da de mulige akkumulerte effektene i populasjoner og endringer i dyreliv og samfunn både på bunn og i vannsøylen eventuelt kan blir synlige.

3 Påvirkning av akustikk på forskjellige biotoper

Gjennom Mareano-programmet (<http://www.mareano.no/kart/mareano.html>) er sårbare biotoper for ulike svamp-, sjøfjær- og korallsamfunn spesielt identifisert og modellert for forvaltningsområdet Barentshavet. Flere av disse artene er dokumentert med relativt tette forekomster i nærheten av området hvor GoliatVIND er tenkt plassert. For detaljer om disse og annen grunndata rundt marint naturmangfold, se [2].

Det direkte influensområdet kan deles inn i flere soner. Vi har valgt å dele det opp i fire hoved-områder som har ulike risikonivå for ulike typer skader og endret adferd, se Appendiks D. I nærfeltet (opp til omtrent 1 km) kommer lyd som dannes i forbindelse med anleggsaktiviteter til å forstyrre alle typer dyr. Vi vet at i liknende operasjoner flykter for eksempel marine pattedyr 10-50 km fra tiltaksområdet under anleggsfasen, men at de kommer de tilbake etter noen uker etter at aktiviteten er avsluttet [6, 7]. Det er rimelig sikkert at når et dyr (som kan bevege seg) opplever forstyrrelser, så flykter det unna til et område som ikke påfører det stress. Dyrene flytter seg til et område der stressnivået er akseptabelt, med de rammebetingelsene at miljøet ved den nye plassen ikke oppleves som betydelig dårlig for dyrene i henhold til andre parametere som tilgang på mat, lys, temperatur, saltholdighet etc.

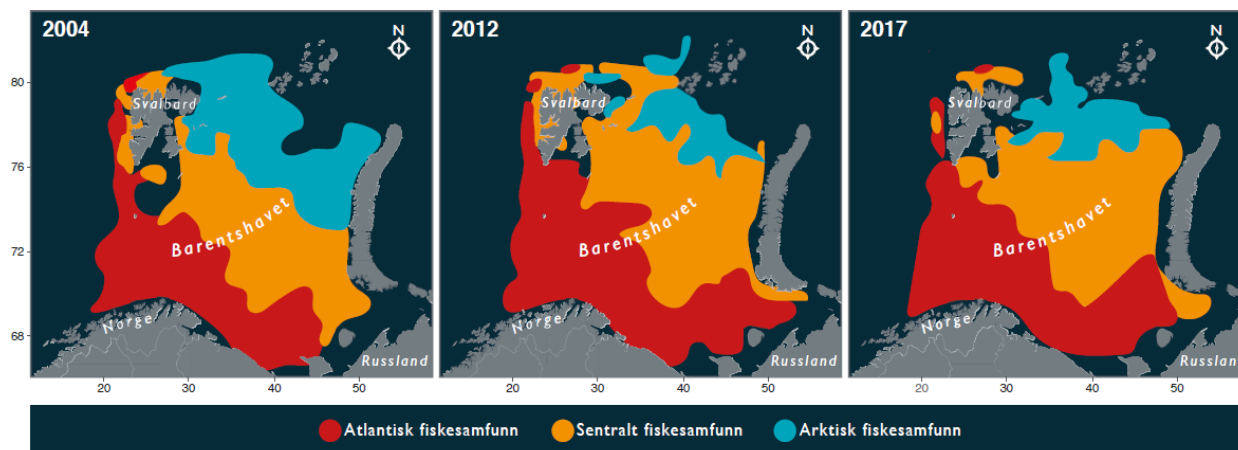
3.1 Plankton, virvelløse dyr og bunndyr

Utredningsområdet har gode næringssaltforhold i vinterperioden, noe som sikrer en høy primær-produksjon og planteplanktonbiomasse. Den høye produksjonen i de nederste leddene av næringskjeden skaper næringsgrunnlag også for et rikt mangfold av større arter innenfor gruppene fisk, sjøfugl og sjøpattedyr [8, 9, 10].

Høy produksjon i vannmassene vil også påvirke hele vannsøylen ned til sjøbunnen, selv på flere hundre meters dyp, der det i hovedsak lever filtrerende organismer eller dyr med predatoradferd. Flere nyere vitenskapelige artikler innen emnet peker på at virvelløse organismer kan blir mer påvirket av undervannslyder enn hva forskerne hittil har trodd, spesielt påvirkes evnen til å orientere seg i vannsøylen, som kan gi store konsekvenser for migrasjon i vannsøylen. Grenseverdier for denne typen dyr er per i dag uklare, og må derfor behandles i henhold til føre-var-prinsippet [11, 12, 13].

3.2 Fisk

I Barentshavet er det fremfor alt tre fiskearter som blir trukket frem i den trofiske dynamikken, lodde, torsk og sild. Utbredelseskart viser at GoliatVIND ikke kommer i direkte konflikt med registrerte gyteområder for disse tre artene, men det er gytevandring i nærheten og mest sannsynlig et tilsig av larver i influensområdet [2]. En god oversikt, som fortsatt mest sannsynlig er gjeldende, er godt beskrevet i konsekvensutredningen for Goliat fra 2008, selv om denne ikke fanget opp kollapsen i 2015 da fiske etter lodde igjen ble stoppet. Generelt virker det som arktiske arter har trukket seg litt tilbake nordover og gitt plass til sentrale fiskesamfunn, mens de atlantiske er mer eller mindre uforandret, se figur 4.



Figur 4. Endring fra 2004 til 2017 i utbredelse av atlantiske, sentrale og arktiske fiskesamfunn i Barentshavet (hentet fra Status for miljøet i Barentshavet [14]).

3.3 Sjøpattedyr

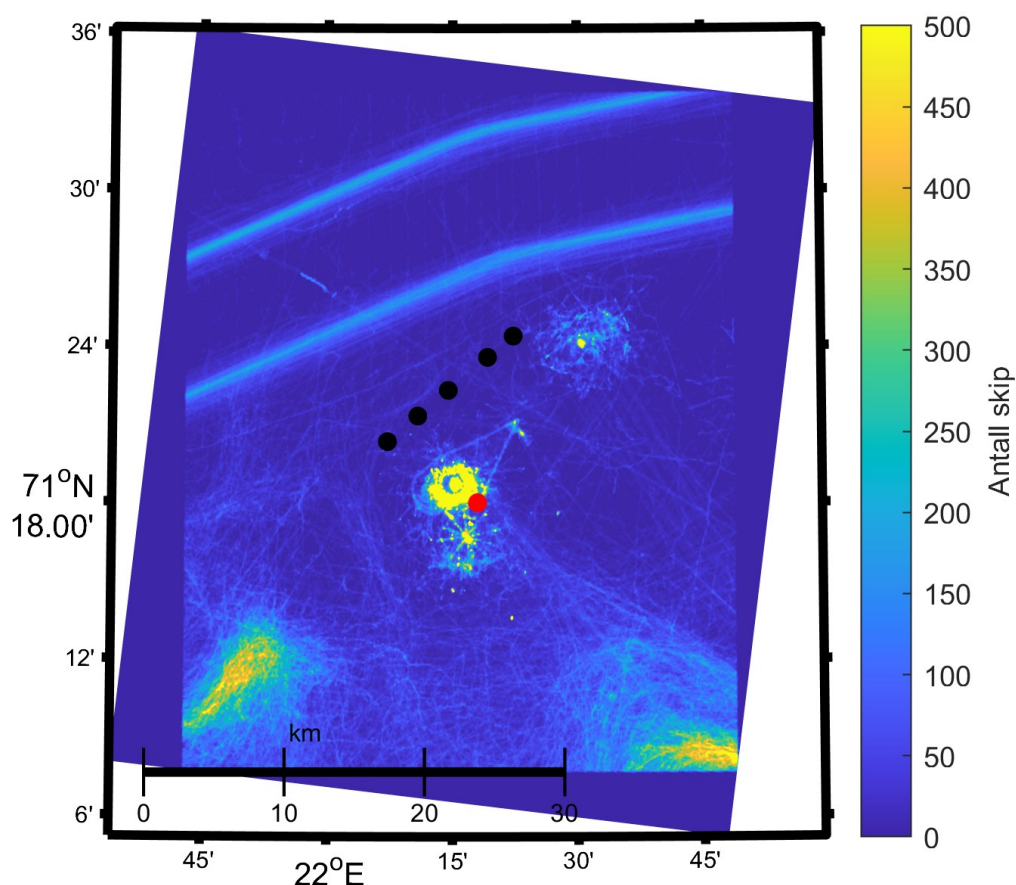
Når man ser på utbredelseskart for sjøpattedyr er det i hovedsak spekkhogger, knølhval, spermhval og vågehval som kan finnes i betydelig mengde i nærheten av det planlagte vindkraftanlegget [14]. Av selartene er det sannsynlig at steinkobbe og havert oppholder seg i området. Det faller inn under det generelle utbredelsesområdet til steinkobbe. For havert er området inkludert i felt der man regner med at mye vandring finner sted, og hyppigere besøk kan derfor forventes [10].

4 Beregninger av undervannsstøy og lydeksposering

Aktiviteter som bidrar til undervannsstøy ved vindkraftverkene er best representert som lydeksposering over tid. Definisjoner og begrep relatert til undervannsakustikk er omtalt i seksjon 1 «Begreper og Definisjoner». En oversiktlig sammenfatning av undervannslyder og relasjonen mellom spisstrykk og lydeksposering er redegjort for i Appendiks A og B. Risikoen for fisk (og mulige reaksjoner) diskuteres i Appendiks C og etablerte internasjonale grense- og risikonivåer tilpasset norske forhold vises i Appendiks D.

4.1 Støy fra båttrafikk

I området rundt det planlagte vindkraftområdet er det generelt mye båttrafikk. Et kart over all AIS-registrert båttrafikk for 2023 i området er gitt i figur 5. Båttrafikken danner relativt store mengder undervannsstøy i området over tid. For de lyseste områdene (i figur 5) er det mer enn fem hundre skipspasseringer i løpet av året, det tilsvarer i underkant av to passasjer per døgn. For dette prosjektet hvor støy foregår over tid er det naturlig å benytte lydeksposering (SEL, Sound exposure level) som diagnostisk variabel, se Appendiks B.3 for mer utfyllende informasjon. SEL (eller lydeksposering) er et mål på den akkumulerte energien i et punkt over en viss tid, som kommer fra det akustiske feltet, hvor enheten for SEL er Pa^2s eller Jm^{-2} , dvs. energi per arealenhet.



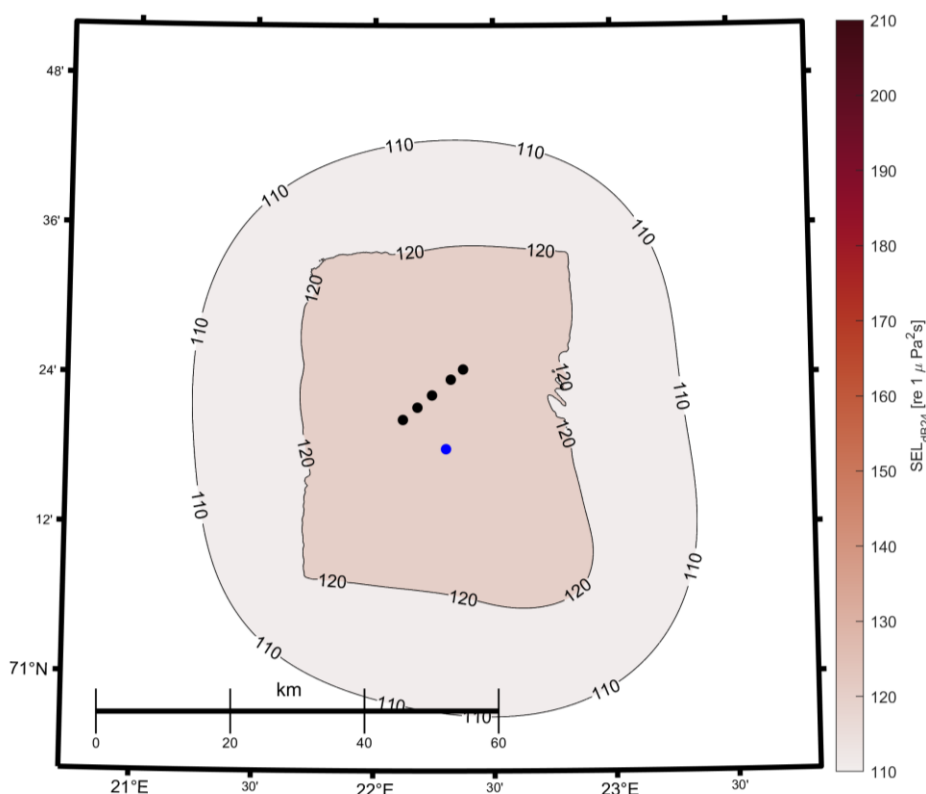
Figur 5. Oversikt over båttrafikk i området basert på AIS-observasjoner i 2023. De sorte prikkene angir planlagt plassering av vindturbinene og den røde prikken angir plassering av Goliat FPSO. Akser i geografiske koordinater.

Antatt støy (spisstrykk, SPL) generert av båttrafikk som funksjon av båt lengde er hentet fra Folegot med flere 2016 [15] og gjengitt i tabell 2, for en nærmere beskrivelse av lydutbredelse i vann se Appendiks A. For støyberegningene fra båtene er en kombinasjon av sfærisk og sylindrisk spredning benyttet, metoden er forklart nærmere i Appendiks B. Det akustiske nærfeltet fra en kompakt kilde er best representert som en punktkilde, og denne har omtrent sfærisk forplantning. Når den akustiske energien begynner å reflekteres mellom bunn og overflate endrer forplantningen seg, slik at den blir mer sylindrisk i sin karakter, se beskrivelse om dempet sylindrisk spredning (DCS-modellen) i Appendiks B.4. Kalibrering av denne modellen er gjennomført med modellsimulering med en etablert forplantningskode, Bellhop, som er beskrevet av Porter 2011 [16], en kort beskrivelse av denne er gitt i Appendiks B.7). Kalibreringen viser at de beregnede fjernfeltene med Bellhop og DCS sammenfaller meget godt og at forenklingen med en sfærisk forplantning gjelder til en avstand lik 3 ganger dybden og etter dette sprer lydenergien seg sylindrisk.

Tabell 2. Maksimalt lydtrykk (SPL) fra båter med forskjellig lengde ved 10 knop hastighet [15].

Båtlengde [m]	Støy [dB re 1 μ Pa]
< 20	140
20–50	150
50–100	160
100–200	165
200–300	170
> 300	180

Støyen generert av båttrafikken er kontinuerlig støy over tid, dette gjør at det her er naturlig å beregne akkumulert lydtrykk gitt i $\mu\text{Pa}^2\text{s}$, se Appendiks B.3 for en mer detaljert beskrivelse av lydeksposering over tid. Normalt er støy relatert til spisstrykk [Sound Pressure Level, *SPL*] beskrevet best som maksimalt lydtrykk «Pa», eller i desibel-skala: «dB re 1 μPa », men for kontinuerlig støy må man integrere over tid for få med seg variasjonene over tid. Integrasjonen gjøres map. p^2 og resultatet er enten « Pa^2s » eller i desibelskala «dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ », se «B.3 Lydeksposering over tid». En oversikt over daglig gjennomsnitt akkumulert undervannsstøy (SEL) fra båttrafikk basert på AIS-data fra 2023 i dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ for området er gitt i figur 6. Området med størst påvirkning er definert av omtrent 120 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ per døgn og strekker seg omtrent 20–40 km fra Goliat og planområdet.



Figur 6. Daglig gjennomsnitt støy (SEL_{dB24} re $1 \mu Pa^2 s$) fra båttrafikk i området basert på AIS-data for 2023. Sorte sirkler representerer vindturbinene og blå sirkel representerer Goliat. Akser i geografiske koordinater.

4.2 Støy fra anleggsfasen

Byggefasen til havs antas å ha en varighet på til sammen ett år, og vil involvere betydelige mengder ekstra båttrafikk i området. Det er konservativt antatt at det under hele anleggsfasen (både ved bygging og senere riving) vil være seks ekstra skip i området, hver med en kildestyrke på 160 dB (tilsvarende båt på 100 meter [15]) som opererer kontinuerlig under hele anleggsfasen.

Støyforplantningen er her beregnet med den avanserte metodikken (Bellhop – beskrevet i Appendiks B.7) som inkluderer bunntopografi, bunnforhold og tillater avstandsavhengighet [16]. Batymetri og hydrografi er hentet fra Barents-2.5 km modellen til Meteorologisk institutt [17]. Hydrografi er brukt fra en enkelt dag for å gi en indikasjon på hvordan lyd hastigheten varierer med posisjon og dyp.

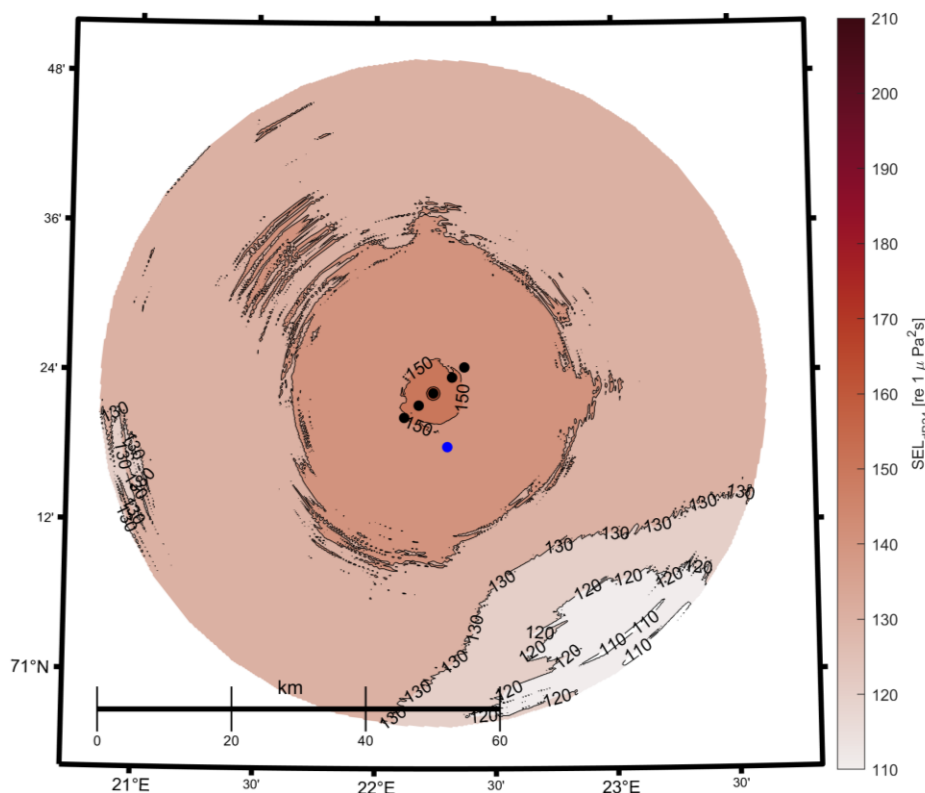
Sedimentene i området består av en blanding av grusholdig sand, grus og sandholdig slam (<http://www.mareano.no/kart/mareano.html>). For simuleringen med Bellhop har vi antatt at bunnen har akustiske egenskaper likt «Medium sand» gitt i tabell 3. Simuleringene er gjort med Gaussisk stråletype og modellen er kjørt som en 2.5D modell hvor horisontal variasjon er basert på individuelle simuleringer med 4 graders avstand mellom hver stråle. Det er antatt at strålene kommer fra 10 m dyp, med en spredning fra -20 til 20 grader vertikalt med totalt 100 stråler.

Tabell 3. Antatt bunnforhold i planområdet, verdier hentet fra [18].

Sedimenttype	Lyd hastighet	Tetthet	Dempning [dB/λ]
Medium sand	1797 m/s	2146 kg/m ³	0,88

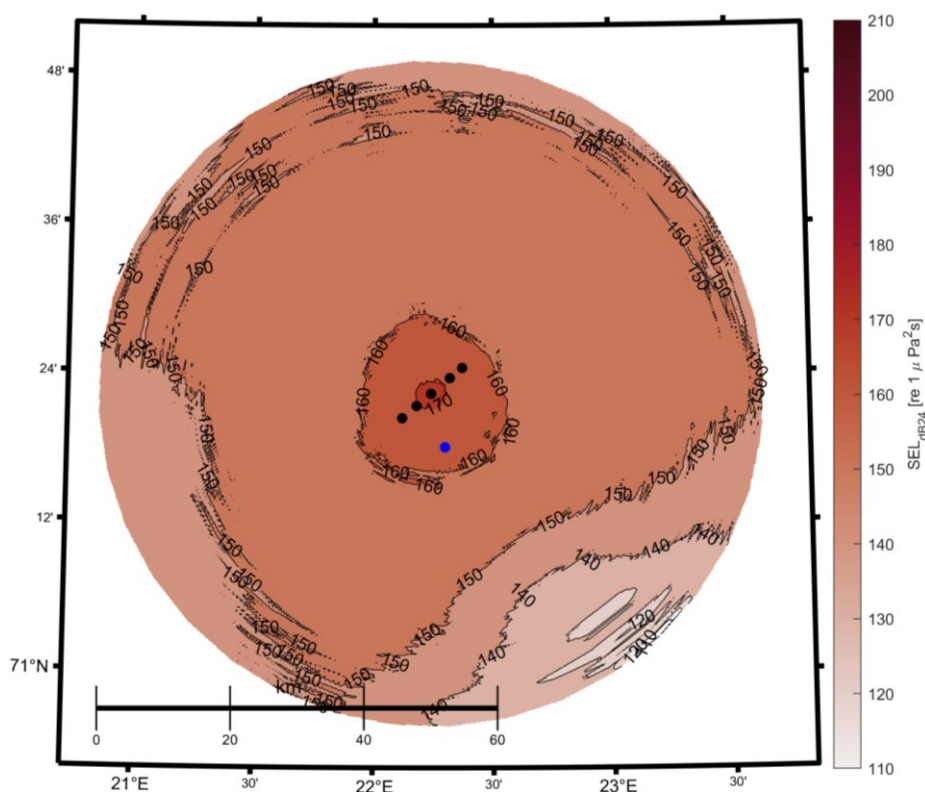
Det akkumulert støy nivået fra de seks båtene over tid i anleggsfasen vises i figur 7, båtene skaper et influensområde på omtrent fem km rundt tiltaksområder med en SEL_{dB24} -nivå over 150 dB re $1 \mu Pa^2 s$.

Notere at denne enhet igjen er trykkenergi integrert over tid [Pa^2s]. Dette er et samlet mål på hvor mye energi som er absorbert i hørselssansene til dyreliv i sjøen rundt tiltakspunktet. Energien er absorbert (slik ved en rock-konsert) som gjør at hørselen svekkes temporært, men hvis organismene er tillatt å hvile under døgnetts stille timer, minsker risikoen for skade dersom man ikke går over grensene til permanent skade, se Appendiks D.



Figur 7. Støy som følge av økt båttrafikk under konstruksjonsfasen (SEL_{dB24} re $1 \mu\text{Pa}^2\text{s}$). Sorte sirkler representerer vindturbinene og blå sirkel representerer Goliat. Akser i geografiske koordinater.

Den høyeste støykomponenten i løpet av byggefasen er antatt å være når dragankrene skal festes, det er da behov for båter som kjører med stor kraft over lenger tid. Vi har her antatt at støy som genereres ved å feste ankrene har et lydtrykk på 180 dB re $1 \mu\text{Pa}@1\text{m}$ (støy ved 1 meter avstand fra kilden) som tilsvarer lydtrykk fra en båt på > 300 m som kjører i 10 knop (tabell 2). Vi gjør også et konservativt anslag ved å anta at det er 3 båter som opererer samtidig og at festingen av ankrene tar totalt 90 dager med 16 timers kjøring hver dag. Støymessig karakteriseres dragankeraktiviteten gjennom å summere beregnet støy med feltene fra figur 7. De endelige støyfordeling generert fra denne aktiviteten vises i figur 8., der man ser at utsendt lydenergi øker SEL_{dB24} -nivåene til mer enn 170 dB re $1 \mu\text{Pa}^2\text{s}$ innenfor noen kilometer fra kilden i midten av figuren. De høyeste nivåene er rundt 190 dB re $1 \mu\text{Pa}^2\text{s}$ i en avstand innenfor 100 meter fra skipene. Sammenlignet med øvrig skipsaktivitet i anleggsfasen (figur 7) ser man at området som begrenses med 150 dB re $1 \mu\text{Pa}^2\text{s}$ øker drastisk og strekker seg mellom 50–60 kilometer ut fra vindturbinene.



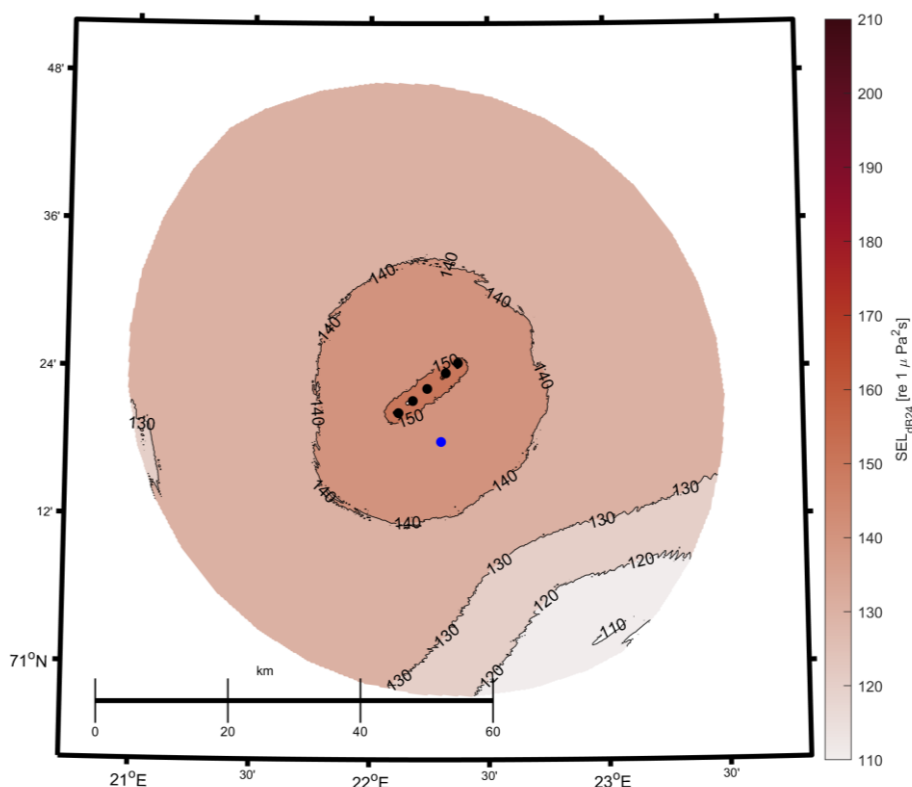
Figur 8. Daglig gjennomsnitt av akkumulert lydnivå ved festing av drageanker (SEL_{dB24} re $1 \mu Pa^2 s$). Sorte sirkler representerer vindturbinene og blå sirkel representerer Goliat. Akser i geografiske koordinater.

4.3 Driftsfasen

I driftsfasen antas det at vindturbinene genererer konstant støy gjennom hele perioden. Det er her antatt en driftslengde på 25 år. For flytende havvind er det gjort relativt få målinger for å karakterisere kildestyrken. Målinger utført ved Hywind Scotland (6 MW) og Kincardine (9,5 MW) ga kildestyrker på henholdsvis 145,4 og 148,8 dB re $1 \mu Pa$ @ 1m ved full drift i 15 m/s vind over et bredt frekvensspekter [7]. Dette er sammenlignbart med kildestyrker fra bunnfaste havvindturbiner der tilsvarende størrelse til Hywind Scotland (6 MW) har oppgitte nivåer rundt 140 dB re $1 \mu Pa$ @ 1m i full drift [19]. Dette indikerer at lyden forplanter seg gjennom den delen av vindturbinen som stikker ned i vannet og at det ikke er betydelig undervannsakustisk forskjell mellom flytende og bunnfaste vindturbiner. Samme rapport viser til en klar sammenheng mellom størrelse på vindturbinene og lydnivå. Siden det er planlagt turbiner for GoliatVIND på maksimalt 18 MW, kan vi ekstrapolere frem verdier på kildestyrke basert på disse tallene. Dette gir en kildestyrke på ca. 159 dB re $1 \mu Pa$ @ 1m for vindturbinene som er planlagt for GoliatVIND.

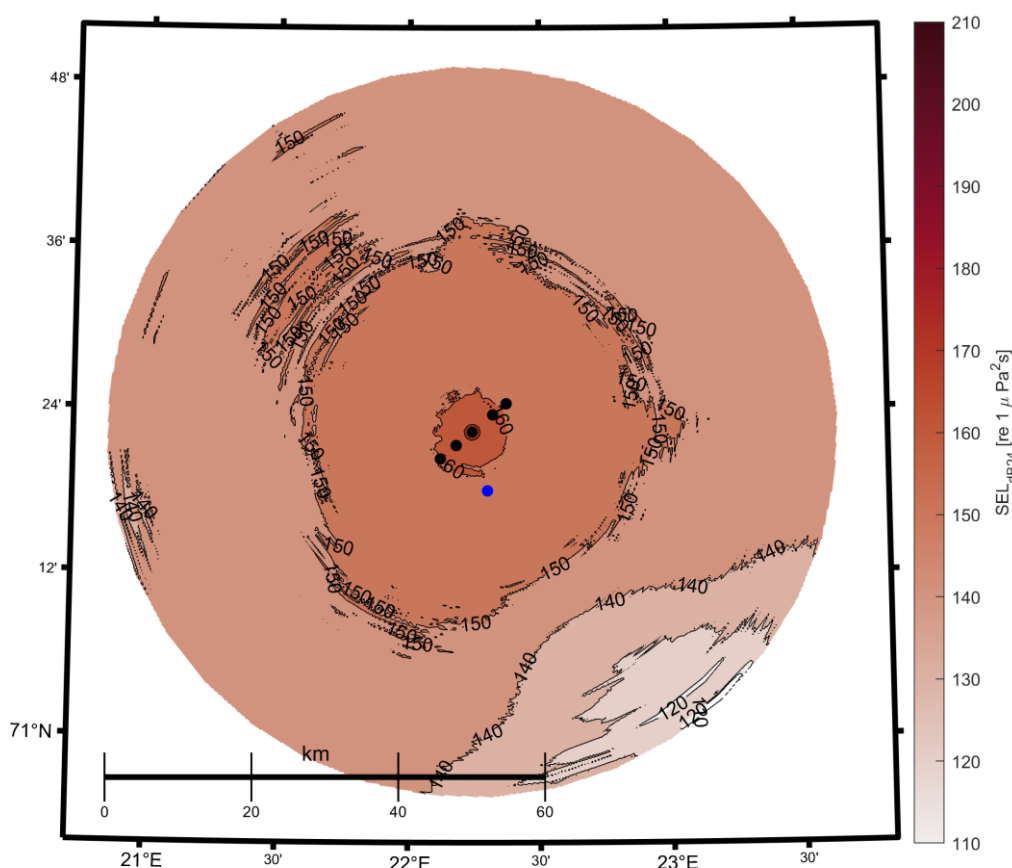
Fra målingene ved Hywind Scotland og Kincardine ble det også identifisert at støyen generert fra forføyningsdelene statistisk kan sammenlignes med et område med tett båttrafikk.

Med en kildestyrke på 159 dB re $1 \mu Pa$ @ 1m gjøres samme type beregning som for skipsstøy i anleggsfasen og resulterende døgnekivalente lydfelter for SEL_{dB24} vises i figur 9. Det er tydelig at de fem vindturbinene summerer støyen og resulterer i SEL_{dB24} -nivå på omtrent 150 dB re $1 \mu Pa^2 s$ noen km unna og omtrent 10 dB lavere i et område mellom 15–20 kilometer fra vindturbinene.



Figur 9. Akkumulert gjennomsnittlig lydeksponering i driftsfasen fra vindturbinene (18 MW) i SEL_{dB24} (dB re 1 μPa^2s). Sorte sirkler representerer vindturbinene og blå sirkel representerer Goliat. Akser i geografiske koordinater.

I driftsfasen vil det i tillegg være perioder hvor større vedlikehold skal gjennomføres. Større vedlikehold vil medføre økt båttrafikk, det er her antatt at denne typen aktivitet er lignende som den for festing av draganker, men at det blir brukt kun én båt istedenfor tre samtidig. Resulterende døgnekvivalente lydeksponeringsfelt i SEL_{dB24} vises i figur 10. Grunnet samme type aktivitet, selv om intensiteten er lavere, er feltene i figur 10 lignende de i «festing av drageanker» i figur 8. Influensområdet for SEL_{dB24} høyere enn 170 dB er her nesten helt borte og radiusen for området hvor SEL_{dB24} er høyere 150 dB blir halvert til 20–30 kilometer.



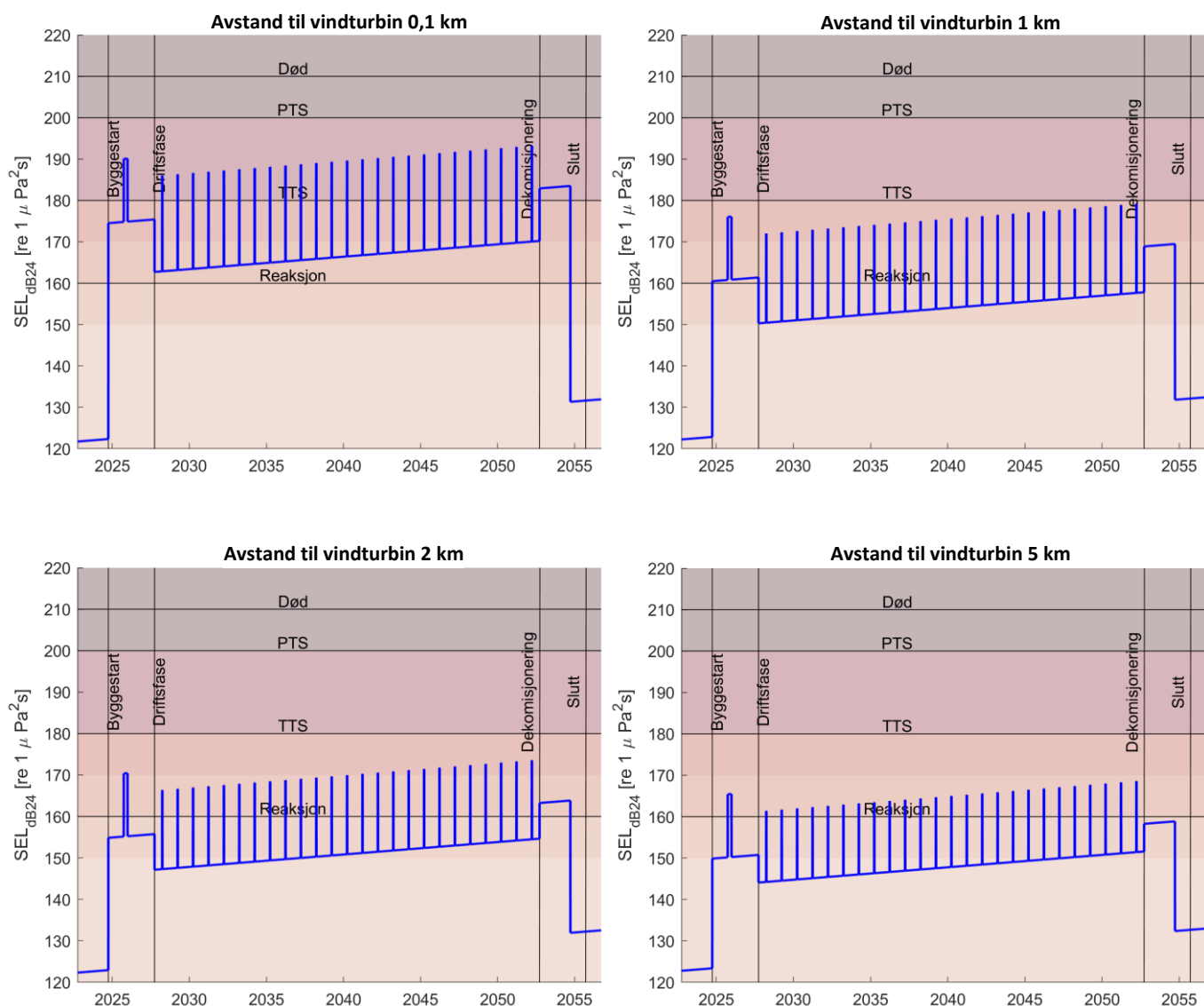
Figur 10. Støy i driftsfasen forbundet med større vedlikehold SEL_{dB24} (dB rel. $1 \mu Pa^2 s$). Sorte sirkler representerer vindturbinene og blå sirkel representerer Goliat. Akser i geografiske koordinater.

4.4 Lydeksponering under hele levetiden

Støynivåene angitt i foregående kapitler er lagt sammen i en tidsserie for å danne et oversiktlig bilde av hvordan støynivåene og utsendt lydenergi varierer i løpet av anleggets levetid. Gjennom å sette sammen resultatene fra støyberegningene for alle fasene kan vi se hvordan støypåvirkningen på ulike avstander endres med tid. I figur 11 vises tidsserien for SEL_{dB24} basert på de sammensatt nivåene på avstandene 100 m, 1 km, 2 km og 5 km fra sentrumpunktet for alle vindturbiner i retning vinkelrett mot hovedlinja langs turbinene. Horisontale linjer i figuren viser forskjellige reaksjoner for fisk, for en nærmere beskrivelse av disse se Appendiks C og Appendiks D. Basert på simulering av lyder fra driftsfasen (figur 9), er dette den beste retningen for å lage et konservativt estimat for lydpåvirkning. For å ytterligere heve terskelen for en konservativ vurdering legger vi til en generell økning på 3 dB/tiår som en lineær trend for å få med effekten av det økte nivået av bakgrunnsstøy i sjøen.

I figur 11 kommer det tydelig frem at innenfor 100 meters avstand finnes risiko for temporære skader (TTS) på fisk og marine pattedyr i faser som inneholder tungt vedlikehold eller når man fester ankrene i bunn. På avstanden 1 kilometer fra vindturbinene er risikonivået under TTS gjennom hele perioden, selv med 3 dB økning per tiår. Videre for 1 kilometers avstand er alle andre faser enn ankerfesting og dekommisjonering nesten under grenseverdien for reaksjon hos de fleste dyreartene unntatt små hvaler som for eksempel nise. For 2 og 5 kilometer er nivåene enda lavere, for 5 kilometer er utsendt lydenergi under grensen for reaksjon for hele levetidsforløpet unntatt perioder med tungt vedlikehold og festing av draganker, hvor lydnivåene mest sannsynlig er overestimerte og i tillegg er begrenset i tid.

Vurdering av undervannsstøy



Figur 11. Støy gjennom hele levetiden til vindturbinene i fire avstander; 100 m (øverst til venstre), 1 km (øverst til høyre), 2 km (nederst til venstre) og 5 km (nederst til høyre). Blå linje angir daglig gjennomsnittsstøy SEL_{dB24}. Vertikale sorte linjer angir de forskjellige fasene i prosjektet og sort horisontale linjer angir terskelverdier for fisk (generelt).

5 Partikkelbevegelse

En komponent av lydfeltet som har fått stor oppmerksomhet de siste ti årene er partikkelbevegelse (eller partikkelakselerasjon), se Appendiks A.4. Partikkelbevegelse er en effekt av koblingen mellom vann og trykkfeltet, og mange mener at denne komponenten mest sannsynlig kan være den primære hørselssansen til fisk [20, 21, 22].

Utvikling av havvindinstallasjoner har vist seg å medføre forhøyde nivåer av partikkelbevegelse, særlig knyttet til peling [23, 24]. En, for flytende havvind, viktigere komponent er nylige funn fra Havforskningsinstitutt [25, 26] som peker på at yngel blir attrahert i retning mot havvindturbiner i drift. For planområdet, med flat batymetri og sand/leirbunn, kan dette innebære at yngel blir attrahert til et område der det ikke finnes noe steder å gjemme seg. Dette kan muligens ha innvirkning på hele grunnlaget for yngler og småfisk som videre kan påvirke hele populasjoner ettersom vi vet at beitetrykket i området er høyt på både lodde og sild.

6 Konklusjon

Det er beregnet støy ved normal skipstrafikk i anleggsfasen og i driftsfasen ved det planlagte vindkraftanlegget. Det er funnet at den største lydpåvirkningen oppstår ved festing av draganker. Det er 190 dB re 1 μ Pa akkumulert lydtrykk i et område innenfor 100 meters radius fra vindturbinene. Her kan altså både temporære og permanente skader på både fisk og pattedyr opptre. Mest sannsynlig har dyr i denne sonen forlatt området lenge før nivåene blir så høye at de blir skadet av dem.

Innenfor en radius på 5 kilometer ligger lydnivået fra festing av dragankerene på 165 dB re 1 μ Pa (se figur 11). Basert på den samlede risikomatrisen i Appendiks D vil dette kunne føre til endret adferd og temporær terskelforskyvning hos både fisk og marine pattedyr, i tillegg vil det potensielt kunne være gjenopprettbar skade på fisk innenfor noen hundre meter opp til noen kilometer fra anleggsområdet (se Appendiks C for mer beskrivelser).

Det er funnet høyere lydtrykk (over tid) i driftsfasen enn fra normal båttrafikk. Lyd fra vindkraftverk i driftsfasen er normalt sett lavere enn fra skipstrafikk, men det skal noteres at denne lydeksponering er basert på et konservativt anslag på 159 dB re 1 μ Pa@1m for 18 MW turbiner, da det finnes lite eksisterende data på lydtrykk fra turbiner av denne størrelsen. Basert på resultatene vil man kunne forvente reaksjon hos både fisk og pattedyr i en radius på 15-20 kilometer fra vindturbinene, mens risiko for TTS (temporær terskel forskyvning) vil kunne forekomme i umiddelbar nærhet av vindturbinene innenfor 1 kilometer.

For marine pattedyr forventes det at det kun er de aller minste hvalene (som opererer innen høye frekvensbånd) som blir påvirket på lengre avstander. Dette er i samsvar med observasjoner av at nise forflytter seg (flykter) fra områder med sterk støy (for eksempel ved peling) og kan trekke seg flere titalls kilometer unna en peleoperasjon i sjø [6, 7]. For de større hvalene som kommuniserer ved lavere frekvenser er det kun risiko under de mest støyende aktivitetene som tungt vedlikehold og ankertrekking.

Siden alle støyende kilder i området har en kildestyrke mindre 180 dB re 1 μ Pa @ 1m, kan man konkludere at det ikke foreligger noen risiko for direkte fysiske (hverken permanente eller temporære) skader fra kortvarig eksponering av lyder, ettersom de fleste typer fisk, hval og sel tåler momentane lydpulser opp til 185 dB re 1 μ Pa [27]. Selv sild, som er en av de mest følsomme artene for lydforstyrrelser, klarer disse nivåene godt.

Referanser

- [1] Multiconsult, «GoliatVIND. Konsekvensutredning forurensning, avfall og vannmiljø & naturmangfold,» Multiconsultrapport 10253018-01-RIM-RAP-02, 2024.
- [2] T. A. Mooney, M. A. Andersson og J. Stanley, «Acoustic Impacts of Offshore Wind Energy on Fishery Resources: An Evolving Source and Varied Effects Across a Wind Farm's Lifetime,» *Oceanography*, vol. 33, nr. 4, pp. 82-95, 2020.
- [3] K. de Jong, H. Steen, T. N. Forland, H. Wehde, D. Nyqvist, A. C. U. Palm, K. T. Nilssen, J. Albretsen, T. Falkenhaus, M. Biuw, L. Buhl-Mortensen og L. D. Sivle, «Potensielle effekter av havvindanlegg på havmiljøet,» Norsk Havforskningsinstitutt, Bergen, 2020.
- [4] C. Erbe, S. A. Marley, R. P. Schoeman, J. N. Smith, L. E. Trigg og C. B. Embling, «The Effects of Ship Noise on Marine Mammals—A Review,» *Front. Mar. Sci.*, vol. 6, nr. 606, p. 21, 2019.
- [5] M. Dähne, A. Gilles, K. Lucke, V. Peschko, S. Adler, K. Krügel, J. Sundermeyer og U. Siebert, «Effects of pile-driving on harbour porpoises (*Phocoena phocoena*) at the first offshore wind farm in Germany,» *Environmental Research Letters*, vol. 8, p. 16, 2013.
- [6] D. Risch, G. Favill, B. Marmo, N. van Geel, S. Benjamins, P. Thompson, A. Wittich og B. Wilson, «Characterisation of underwater operational noise of two types of floating offshore wind turbines,» Scottish Association for Marine Science (SAMS) and Supergen Offshore Renewable Energy Hub., 2023.
- [7] Eni Norge AS, StatoilHydro ASA og Det norske oljeselskap ASA, «Goliat, Plan for utbygging og drift av Goliat. Del 2 Konsekvensutredning,» Sok.nr. 000096_DV_CD.HSE.0219.000_00, 2008.
- [8] A. Aglen, Y. Børsheim, M. Chierici, E. Eriksen, J. H. Fosså, C. vingel, E. Johannesen, L. Jørgensen, T. Knutsen, J. N. L. M. Skern-Mauritzen, J. Sundet og F. Vikebø, «Kunnskap om marine naturressurser i Barentshavet sørøst,» Rapport fra Havforskningen nr. 21, 2012.
- [9] P. Arneberg, G. I. v. d. Meeren, S. Frantzen og I. Vee, «Status for miljøet i Barentshavet - rapport fra Overvåkningsgruppen,» Fisker og Hav nr. 2020-13, 2020.
- [10] M. Sole, K. Kaifu, T. A. Mooney, S. Nedelec, F. Olivier, A. N. Radford, M. Vazzana, M. A. Wale, J. M. Semmens, S. D. Simpson, G. Buscaino, A. Hawkins, N. A. d. Soto, T. Akamatsu, L. Chauvaud, R. D. Day, Q. Fitzgibbon, R. McCauley og M. Andre', «Marine invertebrates and noise,» *Frontiers in Marine Science*, vol. 10, p. 34, 2023.
- [11] L. Weilgart, «The impact of ocean noise pollution on fish and invertebrates,» Oceancare & Dalhousie University, Dalhousie, 2018.
- [12] S. C. Anderson, J. M. Flemming, R. Watson og H. K. Lotze, «Rapid Global Expansion of Invertebrate Fisheries: Trends, Drivers, and Ecosystem Effects,» *PLOS One*, vol. 6, nr. 3, p. 9, 2011.
- [13] «Utbredelseskart fra Havforskningsinstituttet,» [Internett]. Available: <http://kart.hi.no/data/web/?0>.
- [14] T. Folegot, D. Clorennec, R. Chavanne og R. Gallou, «Mapping of ambient noise for BIAS,» Quiet-Oceans technical report QO.20130203.01.RAP.001.01B, Brest, France, 2016.
- [15] Porter M.B., «The BELLHOP Manual and Users's Guide: Preliminary draft, Hear, Light and Sound Research,» Inc. La Jolla, CA, USA, 2019.
- [16] J. Röhrs og flere, «Barents-2.5km v2.0: an operational data-assimilative coupled ocean and sea ice ensemble prediction model for the Barents Sea and Svalbard,» *Geosci. Model Dev.*, pp. 5401-5426, 2023.
- [17] E. Kasteel, «Underwater Piling Noise: Predicting sound levels in water with the Underwater Acoustic Simulator,» TU Delft, 2018.
- [18] J. Tougaard, L. Hermannsen og T. Madsen, How loud is the underwater noise from operating offshore wind turbines?, *J. Acoust. Soc. Am.* 148, 2885-2893, 2020.
- [19] A. N. Popper og A. D. Hawkins, «The importance of particle motion to fishes and invertebrates,» 2018.
- [20] M. H. Andersson, A. Nöjd og J. Carlström, «Kunnskapsunderlag om undervattens-explosioner och marina djur, Teknisk rapport FOI-R-4413--SE,» *Totalförsvarets forskningsinstitut FOI*, 2017.
- [21] S. L. Nedelec, J. Campbell, A. N. Radford, S. D. Simpson og N. D. Merchant, «Particle motion: The missing link in underwater,» *Methods in Ecology and Evolution*, 2016.
- [22] P. Sigraay, M. Linné, M. H. Andersson, A. Nöjd, L. K. Persson, A. B. Gill og F. Thomsen, «Particle motion observed during offshore wind turbine piling operation,» *Marine Pollution Bulletin*, vol. 180, p. 113734, 2022.

- [23] E. Jansen, M. Prior og E. Brouns, «On the conversion between sound pressure and particle motion,» *Proc. Mtgs. Acoust.*, p. 10.1121/2.0001280., 2019.
- [24] G. Zhang, A. Cresci og H. I. Browman, «Determining the directionality of anthropogenic noise using an underwater acoustic vector sensor: a case study in a Norwegian fjord,» *Acta Acustics*, vol. 7, nr. 46, p. 10, 2023.
- [25] A. Cresci, G. Zhang, T. Larsen, S. Shema, A. B. Skiftesvik og H. I. Browman, «Atlantic cod (*Gadus morhua*) larvae are attracted by low-frequency noise simulating that of operating offshore wind farms.,» *Communications Biology*, vol. 6, p. 10, 2023.
- [26] F. Oppedal, M. Vindas, L. D. Sivle, K. de Jong, T. Dempster, T. N. Forland og L. Barrett, «Lyd i lakseoppdrett,» Norsk Havforskningsinstitutt [ISSN:1893-4536], Bergen, 2024.
- [27] A. Fauske, «Undervannssprengning i nærheten av Oppdrettsanlegg – begrensninger og krav til gjennomføring,» Orica Mining Services, Fjellsprengningsteknikk, bergmekanikk/geoteknikk, 2007.
- [28] A. Arons, «Underwater explosion chock wave parameters at large distances from the charge,» *J. Acoust. Soc. Am.* 26(3), p. 343–346, 1954.
- [29] A. R. Richards og A. J. Moore, «Blast vibration course, measurement - assessment – control,» Terroc, 2005.
- [30] J. Swisdak og M. Michael, «Explosion effects and properties: Part II - Explosion effects in water, White Oak, Silver Spring,» 1987.
- [31] J. Jestel, J. von Pein, T. Lippert og O. von Estorff, «Damped cylindrical spreading model: Estimation of mitigated pile,» *Applied Acoustics*, vol. 184, pp. 108350 - 108357, 2021.
- [32] G. Jiménez-Arranz, N. Banda, S. Cook og R. Wyatt, «Review on existing data on underwater sounds produced by the oil and gas industry,» *Technical report P783 prepared by Seiche Ltd for E&P Sound & Marine Life*, p. 182, 2020.
- [33] K. Jødestøl, C. Østby og A. M. Vik-Green, «Vurdering av behovet for ytterligere regulering av seismikk for å ivareta hensynet til marine pattedyr,» Miljødirektoratet, 2021.
- [34] M. Wahlberg og H. Westerberg, «Hearing in fish and their reactions to sounds from offshore wind farms,» *Marine Ecology Progress Series*, 2005.
- [35] J. H. Miller, J. A. Nystuen og D. L. Bradley, «Ocean Noise Budgets,» *Bioacoustics*, 2008.
- [36] L. Hatch, C. Clark, R. Merrick, S. V. Parijs, D. Ponirakis, K. Schwehr og D. Wiley, «Characterizing the Relative Contributions of Large Vessels to Total Ocean Noise Fields: A Case Study Using the Gerry E. Studds Stellwagen Bank National Marine Sanctuary,» *Environmental Management*, 2008.
- [37] M. H. Andersson, «Underlag för reglering av undervattensljud vid pålning, Vindval rapport,» Stockholm: Naturvårdsverket, 2016.
- [38] B. M. Casper, M. B. Halvorsen, T. J. Carlson og A. N. Popper, «Onset of barotrauma injuries related to number of pile driving strike exposures in hybrid striped bass,» *The Journal of the Acoustical Society of America*, p. 4380–4387, 2017.
- [39] A. N. Popper, A. D. Hawkins, F. R. Richard, D. A. Mann, S. Bartol, T. J. Carlson, S. Coombs, W. T. Ellison, R. L. Gentry, M. B. Halvorsen, S. Løkkeborg, P. H. Rogers, B. L. Southall, D. G. Zeddies og W. N. Tavolga, «Sound Exposure Guidelines,» Springer, Cham, 2014.
- [40] E. Grimsbø og P. H. Kvalsheim, «Sprengningsarbeider i sjø -effekter på marint liv og mulige tiltak, Fjellssprengningsteknikk, Bergmekanikk/geoteknikk,» 2018.
- [41] A. D. Hawkins og K. J. Rasmussen, «The calls of gadoid fish,» *Journal of Marine Biology Association of the U.K.*, 1978.
- [42] J. T. Nordeide og E. Kjellsby, «Sound from spawning cod at their spawning grounds,» *ICES Journal of Marine Science*, 1999.
- [43] L. Hammar, A. Wikström og S. Molander, «Assessing ecological risks of offshore wind power on Kattegat cod,» *Renewable Energy*, 2014.
- [44] Multiconsult, «Propagation of sediments and noise from activities at Landfall in the OLP3 project,» Multiconsultnotat 10221687-01-TVF-NOT-003, 2022.
- [45] A. N. Popper og A. D. Hawkins, «An overview of fish bioacoustics and the impacts of anthropogenic sounds on fishes,» vol. 94, p. 692–713, 2019.
- [46] Multiconsult, «GoliatVIND. Konsekvensutredning for fagtema: Petroleum og lagring av CO2, Skipstrafikk, luftfart og radarer, Forsvarsinteresser, Elektronisk kommunikasjon, Beredskap og risiko, Samisk natur- og kulturgrunnlag, Kulturminner, Næringsliv og Friluftsliv,» Multiconsultrapport 10253018-01-RIM-RAP-01, 2024.

Appendiks A. Akustikk i vann / hydroakustikk

Lyd i vann kan på flere måter beskrives analogt med lyd i luft, men forskjellene er også store siden vann er betydelig tettere enn luft. Dette er en av grunnene til at man ikke direkte kan sammenligne lydtrykk i luft med lydtrykk i vann. Lydforplantningen i vann er på mange måter mer komplisert enn i luft, ettersom det skjer hyppige interaksjoner mellom lydfelt og grenseflatene (overflaten/bunn) i tillegg til modulasjon, refraksjon og dispersjon i selve mediet. Bølgeforplantningen er ca. 5 ganger raskere i vann enn i luft, i tillegg til at fordelingen av temperatur og salt kan gi betydelig brytning og refraksjon av lydfeltet. Lydens interaksjon med bunn avhenger i stor grad av bunntype. I hard bunn som fjell og stein reflekteres mye av energien tilbake til vannet. I myk bunn (sediment, leire, sand) kan mye akustisk energi brytes ned i bunnen, og dermed absorberes mer effektivt.

A.1 Trykkbeskrivelse av lyd

Normalt beskrives lyd som en trykkoscillasjon og dette er i de aller fleste tilfeller en helt tilstrekkelig tilnærming. Grunnet at trykk er angitt i Pascal [Pa] og oftest blir spredt over flere størrelsesordener er det hensiktsmessig å rapportere og visualisere støynivåer i den logaritmiske skalaen dB relativt til et referansetrykk:

$$p_{dB} = 20 \cdot \log_{10}(p/p_{ref}) \quad (1)$$

der p er trykket og p_{ref} er et referansetrykk (1 μ Pa). Her bør det noteres at for luftakustikk benyttes $p_{ref} = 20 \mu$ Pa, som representerer høreterskelen for mennesker. Dette gjør at dB-nivåene i luft blir mye lavere enn tilsvarende dB-nivå i vann, selv om kilden har samme energi/intensitetsnivå. Kilden karakteriseres med en kildestyrke i [dB re 1 μ Pa @ 1m], som betyr at trykkfeltet er definert 1 meter fra kilden og er en karakteristisk egenskap for selve kilden, uavhengig av forplantningsveien fra kilde til mottakerposisjon.

A.2 Spisstrykk og eksponering

Det finnes flere ulike metoder for å karakterisere lydtrykket. Den vanligste og mest intuitive er spisstrykket (topptrykket eller Sound Pressure Level) SPL_{peak} som er det maksimale avviket fra det normale trykket (middeltrykket) på et sted under en definert tid. Iblant brukes topp-til-topp verdien $SPL_{peak-peak}$ eller SPL_{pp} .

For prosesser med lengre utstrekning i tid og mindre impulsive karakter, som dumping, boring og skipsfart kan andre måletall defineres: for eksempel root-mean-square-verdier: SPL_{rms} . Det er i flere tilfeller vist at relativt lave lydtrykk over en lengere tid også kan gi varige skader [21] [28], og det er da hensiktsmessig å definere lydeksponering, Sound Exposure Level (SEL) som er integralet av kvadratet til lydtrykket over et angitt tidsintervall eller hendelse (for eksempel en akustisk puls).

Lydeksponeringsnivåer uttrykkes i dB re. 1 μ Pa²s. Lydeksponeringen er et mål på energien i det akustiske feltet hvor enheten for SEL er Pa²s eller Jm⁻², dvs. energi per arealenhet.

$$SEL_{dB} = 10 \log_{10} \left(\int \frac{p(t)^2}{p_{ref}^2} dt \right) \quad (2)$$

Som for SPL så finnes det mange varianter på akustisk eksponering, for eksempel definisjon på et enslig peleslag (Single-strike-SEL) eller kumulative effekter som kan brukes for å karakterisere repetitive impulsive kilder Kumulative SEL, CSEL. I rapporten brukes benevnningen SEL for lydeksponering da det brukes en forenklet modell basert på arbeidssyklus (*duty cycle*) til utstyret som forårsaker lyden for å kunne se på aggregerte effekter fra flere ulike plasser og aktiviteter i et område over tid.

A.3 Frekvensinnhold og støy

Trykkoscillasjonene kan beskrives som bølger, og har som alle andre bølger et spesifikt frekvensinnhold. En ren tone beskrives som en enkelt frekvens og en blanding av toner gir et spektrum. Normalt er alle naturlige lyder en kombinasjon av mange forskjellige toner siden det alltid finns et innslag av tilfeldighet i lydforplantning i naturen. Tones frekvenser blandes (ofte ikke-lineært) og fordeler sin energi over et spektrum. Dette kalles frekvensutvidelse og danner et lydteppe. Hvis en lydkilde skal kunne oppfattes på avstand, må lyden fra denne trenge igjennom et slikt lydteppe. Lydnivået som utgjør det laveste nivået i et spektrum kalles støy nivå og kan komme fra mange ulike lydkilder. Undervannsstøy kan beskrives som et kor, hvor lyder av forskjellig natur og opprinnelse blandes sammen:

- Naturlig støy eller geofoni er støy fra sprekker i jorden, bevegelse av marine sedimenter, vær og vind, brytende bølger, nedbør og så videre.
- Biologisk støy eller biofoni er støy av biologisk opprinnelse frembragt av marin fauna.
- Antropogen støy, eller antropofoni, er den menneskeskapte støyen som skapes av maritime aktiviteter, for eksempel skipsfart og petroleumsvirksomhet.

Disse lydene blandes med hverandre og danner lydkonteksten til et studieområde. Alle lydkilder bidrar til støy til omgivelsene med variabel vekt, avhengig av frekvens, miljøforhold, menneskelige aktiviteter og lokale forhold. For at en fisk skal kunne høre en spesifikk lyd må den overstige det akustiske bakgrunnsnivået.

A.4 Partikkelbevegelse

Lyd danner materiell bevegelse som benevnes *partikkelbevegelse* og dennes deriverte benevnes *partikkelakselerasjon*. Hastigheten til partikkelbevegelsen, u kan kobles til trykket p gjennom den akustiske impedansen $Z=c\rho$ i mediet, der c er lydhastigheten og ρ tettheten.

$$u = \frac{p}{Z} = \frac{p}{c \rho} \quad (3)$$

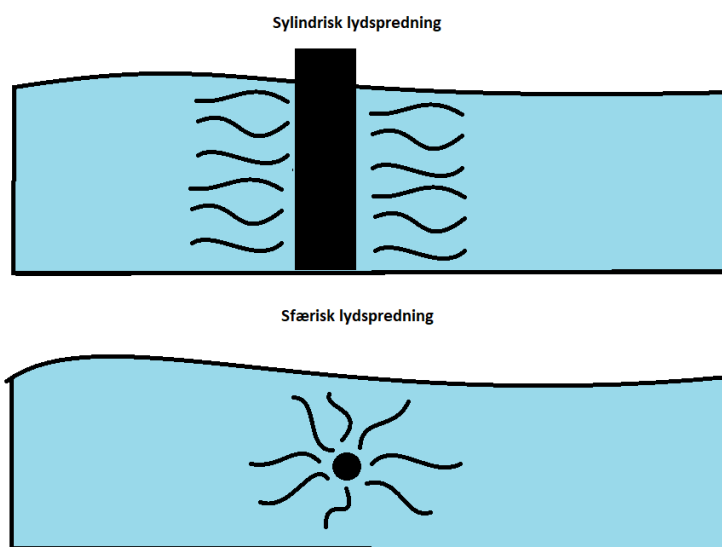
Det er vist at flere marine arter er sensitive til den fysiske energipåvirkningen fra partikkelbevegelse [20, 21], men fordi bevegelsen er meget vanskelig å måle er det ofte neglisjert, eller ikke nok undersøkt, i utredninger om akustisk støy i vann. Partikkelbevegelser er ofte meget små ($\sim \mu\text{m}$) og svake (ofte $< \text{mm/s}$), men kan være mye større nær en detonasjon eller en grenseflate. Dessuten er bevegelsen vektoriell, som ytterligere kompliserer målingsprosessen. Selv om betydningen av partikkelbevegelse for hørselen til fisk er velkjent, er det først i senere år lagt frem bevis for hvor mye fisk og marine dyr benytter seg av denne egenskapen til det akustiske feltet [22], da det inneholder informasjon om både avstand, retning og annen tilstand til mat, trusler eller mulige partnere.

Appendiks B. Metodebeskrivelse

B.1 Modellering av støyutbredelse

Multiconsult har utviklet en metodikk for beregning, vurdering og visualisering av støynivåer under vann, med formål å vurdere risikoen for skade på utvalgte marine dyrearter i nærheten av tiltaksområder. Lydenergi, som primært er en trykkbølge, forplanter seg i alle retninger, og den akustiske energien spres, absorberes, brytes, og reflekteres. Dette gjør at lydbølgen endrer sin signatur og, for eksempel en lydimpuls som ved kilden er kort og intens, modifiseres av det fysiske miljøet og kan på distanse oppleves mer langvarig i tid og mindre intens.

For å lage en risikovurdering er det lagt til grunn en forenklet metodikk basert på prediktering av horisontal spredning av lydbølger. Kjernen i akustisk modellering er primært geometrisk spredning av trykknenergi. For dype forhold uten interaksjon med overflate eller bunn er forplantningen sfærisk og lydintensiteten er kvadratisk minskende som funksjon av avstand ($1/d^2$), eller uttrykt som dB-skala: $20 \log_{10}(d)$. Ved grunnere forhold spres energien sylindrisk og da faller trykket i stedet som $1/d$, eller $10 \log_{10}(d)$. Overgangen fra sfærisk til sirkulær spredning forekommer ved at refleksjoner ved overflaten og bunnen legges sammen, sfærisk og sylindrisk spredning er gitt i figur 12.



Figur 12. Sylindrisk lydspredning (øverst) og sirkulær lydspredning (nederst).

Det har vist seg at sylindrisk spredning er en altfor konservativ modell med for langsomt energitap. Man måler ofte, i kystnære sammenheng, en spredningsfaktor mellom 14 og $17 \log_{10}(d)$, hvilket kan forklares av at energitapet, sammenlignet med sylindrisk spredning ($10 \log_{10}(d)$), øker på grunn av tap mot bunn og overflate samt i volumet [21].

Disse forutsetninger medfører at beregningene kan utføres kostnadseffektivt og gir tiltakshavere og entreprenører relevant informasjon om hvilke maksimale enhetsladninger som kan brukes ved sprenging eller hvilken effekt eller aktive arbeidstimer som kan brukes ved peling og spunting, for å unngå skader på fisk både fra et impulsivt og et eksponeringsperspektiv.

Eksponering for lyd er oppdelt i to metoder:

- Ved forbigående impulsiv lyd beregnes et spisstrykk, *sound pressure level*, SPL. Denne metoden blir brukt ved for eksempel sprengning.
- For lyd over tid beregnes lydeksposering, *sound exposure level*, SEL. Denne brukes for arbeider som foregår over tid, for eksempel peling, spunting, dumping av stein eller andre aktiviteter i sjøen eller rundt strandkanten.

B.2 Forbigående impulsiv lyd / sprengning

Når sprengning i fjell blir utført går noe av energien til å knuse fjell og noe går til å danne en sjokkbølge i vannet. I litteraturen beskrives stort sett fritthengende ladning i vann og i mindre grad når sprengning foregår med ladningen plassert i berg. Når ladningen bores ned i fjellet konsentreres trykket til å sprengne fjell og en mindre del av energien går til å danne trykkbølge. Dette er den fremste årsaken til at flere studier anbefaler tetting av borehull (fordemming) med pukkstein og forsinket tenning (hvert borehull sprenges for seg med en forsinkelse på sirka 20–50 ms til neste hull). Detaljene i sprengningsforløpet kan redegjøres forenklet som tre spreng-/risikosoner:

1. Nærfeltsonen/dødelighetssonen - Spisstrykket stiger i løpet av kort tid til flere MPa (> 240 dB), men toppverdien vil halveres igjen i løpet av 1 millisekund.
2. Overgangssonen/Skadesonen - Sannsynligheten for momentan dødelighet er liten. Fisk i overflaten eller nær bunnen kan dø. Spisstrykket er i denne sonen under 1 MPa (< 240 dB).
3. Fjernsonen - Lyden vil bestå av mange refleksjoner og pulstrykket vil være betydelig redusert.

For beregning av spisstrykket, *sound pressure level*, *SPL*, fra kortvarig lydimpuls anvendes:

$$p = A \left(\frac{d}{\sqrt[3]{Q}} \right)^{-b} \quad (4)$$

der A er en materialkonstant, karakteristisk for ulike sprengmidler og b er en reduksjonsekspONENT, representativ for eksponentiell spredning av trykkbølgen. Ligning (4) kalles allment Arons' formel, [29], [30] beskriver maksimalt overtrykk, p , som funksjon av ladevekt per intervall, Q [kg], avstand fra detonasjonen, d , og materialkonstanten A . Ifølge [21], og [31] varierer A mellom 50 og 60 MPa, og b mellom 1.13 og 1.19 for en lang rekke sprengstoffer og forhold. Som sammenligning kan det nevnes at for sylindrisk spredning av energi brukes $b = 1$, og for sfærisk spredning brukes $b = 2$.

Det bør noteres at p er trykksignaturen for en fritt hengende ladning. Normalt antar man at 90 % av sprengtrykket brukes til å knuse fjell og 10 % er igjen til trykkbølgen, hvilket er på linje med erfaringer fra tidligere sprengninger.

B.3 Lydeksponering over tid

Lydeksponering, sound exposure level, SEL, som følge av langvarig lydkilde er definert som trykkintegralet over en spesifikk tid t :

$$SEL = \int_0^t p(t)^2 dt. \quad (5)$$

Oftest er det mest hensiktsmessig å uttrykke SEL i dB relativ til et referansetrykk $p_{ref} = 1 \mu\text{Pa}^2\text{s}$;

$$SEL_{dB} = 10 \log_{10} \left(\int_0^t \frac{p(t)^2}{p_{ref}^2} dt \right). \quad (6)$$

Det finnes andre måter å definere dette for eksempel SEL_{1s} , der integralet i (6) evalueres løpende for hvert tidspunkt:

$$SEL_{1s}(t, 1s) = 10 \log_{10} \left(\int_t^{t+1s} \frac{p(t)^2}{p_{ref}^2} dt \right). \quad (7)$$

Ved å definere S_0 som den effektive kildestyrken [Pa] i frekvensspekteret v1 meter fra kilden og anslå sylindrisk spredning av den akustiske energien (trykket er omvendt proporsjonal til avstanden fra kilden) kan man estimere SEL_{dB} på distansen d fra kilden [m].

$$SEL_{dB} = 10 \log_{10} \left(\int \frac{S_0(t)^2}{d^2 p_{ref}^2} dt \right) \quad (8)$$

Hvis tidsvariasjonen til kilden er kjent mht. til antallet timer drift per døgn (*work_hours*) og med utstyr som har spesifikk arbeidssyklus (*duty_cycle*) definert som prosentandel lyd dannende aktivitet av antall timer drift, kan integralet beregnes eksplisitt. Dette gir den integrerte verdien på lydeksponering SEL_{dB24} relevant for fauna i området:

$$SEL_{dB24}(d) = 10 \log_{10} \left(\frac{3600 \cdot (\text{work_hours}) \cdot (\text{duty_cycle})}{d^2} \frac{S_0^2}{p_{ref}^2} \right) \quad (9)$$

Der *work_hours* er arbeidsdagens lengde angitt i timer, *duty_cycle* er fraksjon av tiden som lyd produseres av anvendt utstyr og S_0 er kildestyrken i [Pa] definert 1 meter fra kilden.

Dette gir et mål på hvilken lydeksponering som dyreliv i et område blir utsatt for i snitt per døgn og kan iblant være et mer relevante tall å sammenligne med grenseverdier når det foreligger tilfeller med lang eksponeringstid og lyden opphører og dyreliv kan komme seg igjen etter skadelig lydpåvirkning.

Formel (9) forutsetter at lydtrykket er konstant og likt S_0 da utstyret er aktivt. For kilder med tidsvariasjon innenfor den aktive tiden, for eksempel peling, kan man heller beregne single-strike lydeksponeringen, SEL_{ss} . Fordi at lydeksponeringen er definert som integralet av trykket i kvadrat (5), og at trykket dekker et bredt frekvensspekter, kan man anta at integralet er likt integralet av amplituden til trykket. Figur 13 viser et eksempel på lydtrykk fra en pelemaskin der man ser at trykkamplituden minker raskt etter hvert peleslag. Trykkamplituden er antatt å minke eksponentielt med tiden rett etter lyd pulsen og kan skrives:

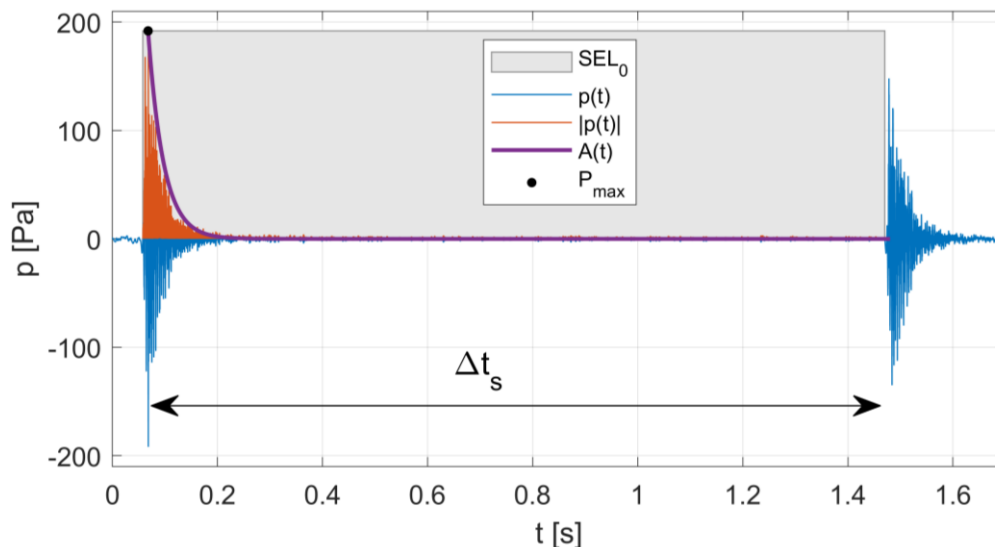
$$A(t) = P_{max} e^{-kt}, \quad (10)$$

Der k er en dempingskoeffisient, denne tilpasses slik at amplituden stemmer med det målte trykket (figur 14). P_{max} er høyeste absoluttverdien til trykket. I dette eksemplet stemmer amplituden godt da $k = 34$.

Dette gir at single-strike lydeksponeringen kan skrives:

$$SEL_{ss} = \int_0^{\Delta t_s} (P_{max} e^{-kt})^2 dt, \quad (11)$$

der Δt_s er tidsintervallet mellom lydimpulsene fra hvert peleslag.



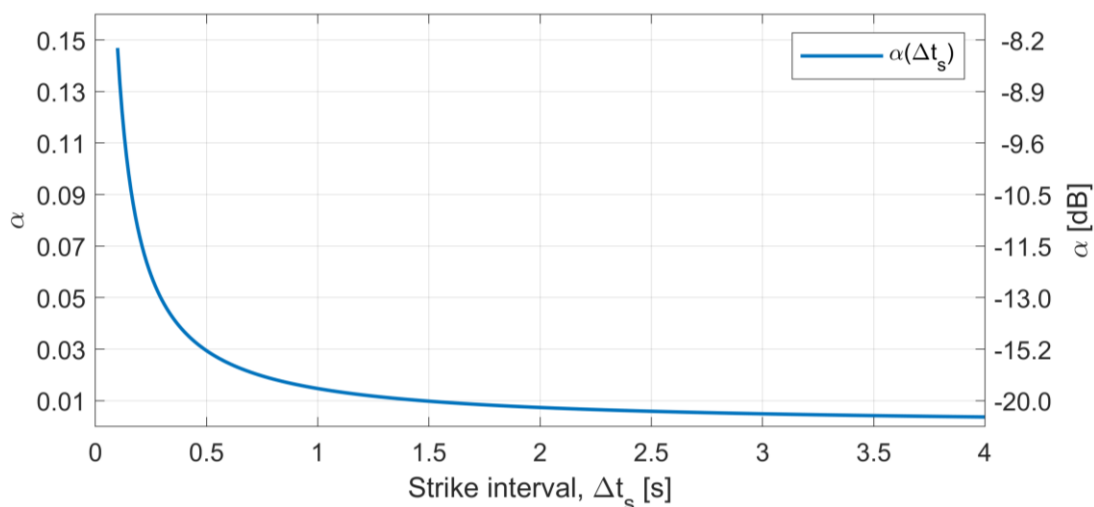
Figur 13. Eksempel på bredspektret lydtrykk fra peling. Blå indikerer momentant lydtrykk, rødt viser absoluttverdien av trykket og lilla viser tilpasset amplitude. Δt_s er intervallet mellom peleslagen og P_{max} viser maksimalt trykk. Grått området angitt lydeksponering i tilfelle konstant lydtrykk. Eksemplet er fra målinger i Hammerfest havn i forbindelse med peling.

I tilfeller der kildestyrken og dempingen er kjent fra målinger er det nyttig å definere fraksjonen α :

$$\alpha = \frac{SEL_{ss}}{SEL_0}, \quad (12)$$

der SEL_0 er lydeksponeringen fra en lydkilde med konstant styrke (grått felt i Figur 13).

Hvis man kjenner kildestyrken S_0 og dempingskoeffisienten k , er det mulig å beregne lydeksponeringen ut fra tidsintervallet mellom lydimpulsene, for eksempel fra peleslag. Figur 14 viser hvordan α er avhengig av slagintervallet Δt_s .



Figur 14. α som funksjon av lengde til slagintervall.

Lydeksponeringen fra intermittente lydkilder skal altså, om man tar utgangspunkt i lydeksponeringen fra en tenkt konstant kilde, reduseres i henhold til:

$$SEL = SEL_0 \cdot \alpha, \quad (13)$$

eller enklere:

$$SEL_{dB} = SEL_{0dB} + \alpha_{dB}, \quad (14)$$

der $\alpha_{dB} = 10 \cdot \log_{10}(\alpha)$.

I eksemplet fra Hammerfest havn, der man jobber med en pelemaskin med en slagfrekvens på 1.5 sekunder minkes lydeksponeringen, SEL med omtrent 20 dB re $1 \mu\text{Pa}^2\text{s}$ sammenlignet med SEL_{0dB} .

B.4 Sylindrisk spredning

For lydforplantning ved peling er kilden en linjekilde. For slike kilder foretrekkes å bruke en modell basert på dempet sylindrisk spredning, en såkalt DCS-modell, som innebærer en langsommere reduksjon av trykk og lydeksponering som funksjon av avstand sammenlignet med fra for eksempel sprengtrykk. En egnet formulering er gitt av [32], der spissttrykket SPL_{dB} beregnes som funksjon av avstand, d :

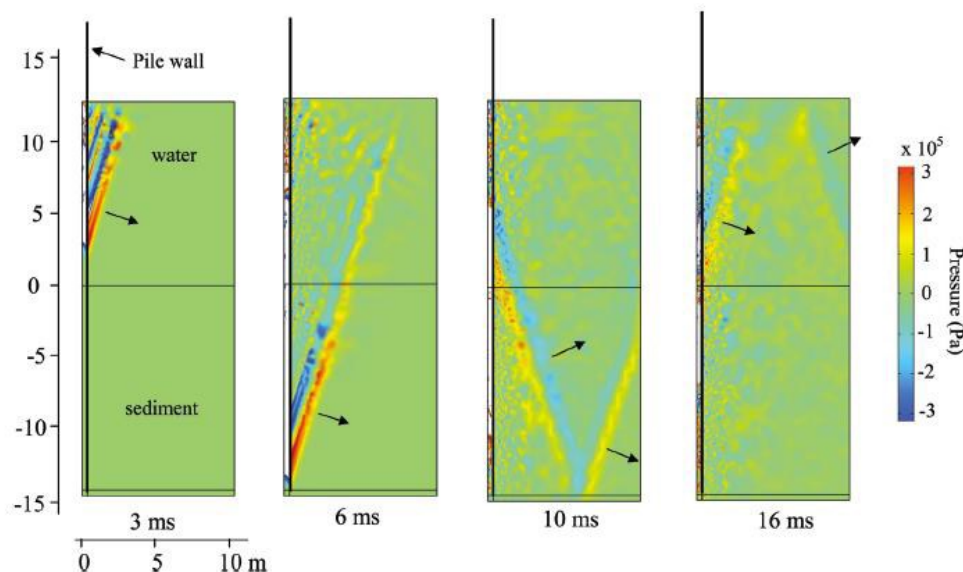
$$SPL_{dB}(d) = SPL_{dB}(d_0) - C \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) - \alpha_R(d - d_0) \quad (15)$$

$$\alpha_R = \frac{-C \log_{10}(|R|^2)}{2H \cot(\theta_M)}.$$

Her er d_0 en referanseavstand der spissttrykket $SPL_{dB}(d_0)$ er målt eller estimert. Minkingen med avstand går med $C \text{ dB}/\log_{10}(d/d_0)$ og α_R er en dempingskoeffisient som uttrykker reduksjonen av energien i lydbølgene da disse reflekteres i bunn. For sylindrisk spredning er $C = 10$ og for sfærisk spredning er $C = 20$. Refleksjonskoeffisienten R er avhengig impedansforskjellen mellom vann og bunn (se seksjon B.6) og $2H \cot(\theta_M)$ uttrykker hvor mange ganger lyden reflekteres før strålen kommer til målepunktet. Denne er avhengig av Mach vinkelen (θ_M) og dybden H . Mach vinkelen θ_M er vinkelen til den dominerende lydbølgen som har sin opprinnelse i pelen. Vinkelen er avhengig av forskjellen mellom lydhastighetene i pelen og i vannet (16), visualisert i figur 15:

$$\sin(\theta_M) = \frac{c_w}{c_p}, \quad (16)$$

der c_w er lydhastigheten i vannet og c_p er lydhastigheten i pelen.



Figur 15. Visualisering av Mach-lydbølge med opprinnelse i pelen (illustrasjon hentet fra Jiménez-Arranz med flere 2020 [33]).

B.5 Kildestyrke

Det er meget stor spredning i kildestyrker for ulike maskiner eller utstyr som danner undervannsstøy. Multiconsult har mye erfaring fra en lang rekke utstyr som danner lyd i luft, og dette bibliotek kan anvendes for å beregne relevante kildestyrker i vann, S_0 . For å sammenligne luftakustikk med undervannsakustikk benyttes en intensitetsbetraktning. Den momentane intensiteten I av en lydbølge er;

$$I = \frac{p^2}{Z} = \frac{p^2}{c \rho} \quad (17)$$

, der Z er den akustiske impedansen. Sammenhengen mellom intensitet i vann SPL_{dB} og luft SPL_{dBa} kan skrives som:

$$SPL_{dBa} \approx SPL_{dB} - 62 \text{ dB} \quad (18)$$

Denne ligningen kan anvendes for å estimere en realistisk hydroakustisk kildestyrke basert på våre samlede erfaringer over støykilder fra en lang rekke luftakustiske støyberegninger og støysonekart. Dette gjør at vi med høy konfidens kan anslå kildestyrker til utstyr som ofte anvendes av entreprenører i og rundt Norge.

Det understrekes også at de beregnede kildestyrkene S_0 sammenlignes og kalibreres med den informasjon som finnes i litteraturen. Dette øker også sikkerheten for at kildene er relevante for analysen.

B.6 Refleksjon og transmisjon

Når lyd går igjennom en grenseflate mellom medier med ulike akustisk impedans, skjer en deling av den akustiske energien. For en trykkbølge deler refleksjonskoeffisient R^2 og transmisjonskoeffisient T^2 energien slik:

$$\begin{aligned} R^2 &= \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2} \\ T^2 &= \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \end{aligned} \quad (19)$$

der Z_1 er den akustiske impedansen i det opprinnelige mediet med innfallende og reflektert lydfelt og Z_2 er impedansen i mediet med det transmitterte feltet. Ifølge typiske verdier i tabell 4, for lydhastighet og tetthet reflekteres ca. 70 % av energien og ca. 30 % forplantes ved en overgang mellom fjell og vann.

Tabell 4. Akustiske egenskaper for fjell, fylling 0/400 og sjøvann, som danner grunnlag for å beregne refleksjon og transmisjon gjennom en overgang mellom medier/grenseflate

Medium	Lydhastighet, c	Tetthet, ρ
Fast fjell	6000 m/s	2500–2800 kg/m ³
Fylling 0/400	2500 m/s	2000–2300 kg/m ³
Sjøvann	1500 m/s	1000–1030 kg/m ³

B.7 Bellhop - simuleringsprogramvare

For beregning av undervannsstøy under anleggs- og driftsfasen er det benyttet Bellhop-algoritmen i Acoustic toolbox i Matlab [16]. Bellhop er en strålesporingsmodell for å simulere lydtrykk i havet. Det er en utvidelse til 3D-miljøer av den populære BELLHOP-modellen og inkluderer refraksjon av lydstråler i horisontal planet og tillater kvasi-3D simuleringer ved å kjøre en enklere 2D-modell på en rekke retninger fra kilden. Dette er den såkalte Nx2D- eller 2.5D-tilnærmingen.

For å gjøre realistiske simuleringer kan man tilpasse horisontal variasjon i topp og bunn samt inkludere full 3D-variasjon i lydhastighetsprofilen. Den tillater også spesifisering av retningsavhengige kilder så vel som geoakustiske egenskaper for avgrensende media.

Appendiks C. Risiko for fisk

Ved håndtering av risiko anvendes spesielt to parametere; SPL (Maximum Sound Pressure Level/ Spisstrykk) og SEL (Sound Exposure Level / Lydeksposering). De spesifikke uttrykkene er forklart i definisjonslisten (se seksjon 1). I tillegg til denne har Miljødirektoratet publisert norske oversettelser for noen av uttrykkene som anvendes i rapporten [34].

C.1 Deteksjonsterskler

Fisk har en stor spennvidde for lyddeteksjon og har flere evner til å føle trykk. Da lyd forplantes langt under vann og det ofte er mørkt og grumsete, er det mange fiskarter som bruker hørselen som primær sans. Fisk har generelt god hørsel for både trykk og partikkelbevegelse. De aller fleste fiskearter har et trykkfølsomt sidelinjeorgan, men dette anvendes mest sannsynlig mindre for å detektere lyd og mer for jakt, flukt og stimkoordinering [35].

De vanlige artene aktuelle for norske forhold, laksefisker (*Salmonidae*), torskfisker (*Gadidae*) og sildefisker (*Clupeidae*), har noe forskjellige høreterskler og oppfatter noe forskjellige frekvensomfang. Laksefisker har åpen svømmeblære (som henger sammen med mage-tarmkanalen og dermed omgivende vann) og har en høreterskel på like over 100 dB re 1 μ Pa. Torskfisker hører litt bedre med en terskel ca. 20–30 dB lavere enn laks. Dette kommer av at disse har en lukket svømmeblære som fungerer som et resonanskammer, som dessuten ligger nært hørselsorganene. Sild hører best av de tre vanlige artene med en terskel ca. 10 dB lavere enn torskfisker og oppfatter dessuten et bredere spektrum. Mange sildearter har i tillegg gassfylte organer nært hørselsorganene hvilket gjør dem mer følsomme for lyd [21].

Disse tersklene skal settes i relasjon til bakgrunnsteppet av støy som finnes i vannet med forskjellig amplitude og karakter døgnet rundt. Spennvidden her er meget stor, fra meget stille områder uten antropogen innvirkning, der bare vær og vind påvirker støybakgrunnen (ca. 60–80 dB re 1 μ Pa) til meget støyutsatte områder, eksempelvis nær infrastruktur, havner, anløp eller tyngre industri, opp til mellom 120 og 140 dB re 1 μ Pa ([36] [37]).

For å beskrive risiko ved deteksjon blir det brukt begrepet «Sannsynlig reaksjon», basert på terskelnivåene for deteksjon, se tabell 5 og tabell 6.

C.2 Død / barometrisk trauma

Det mest relevante for fisk er at den dør eller blir permanent skadet. Dette skjer nesten utelukkende i «Nærfeltsonen/dødelighetssonen», men også til viss grad i «Overgangssonen/skadesonen».

Grensene er litt flytende og er avhengig av art, størrelse, alder, kondisjon, avstand fra støykilde samt orientering og plassering i vannsøylen. Det er primært indre organer som lever, nyrer eller gonader som skades ved barometrisk trauma. Særlig utsatte er luft- eller gassfylte organer, som svømmeblære og lunger (pattedyr). Trauma skjer ved at gasslommer ekspanderer da omgivende trykk faller ved dekompresjonen som følger etter den initiale kompresjonsbølgen. Dette skaper strekk av vev og muskulatur, og kan årsake rupturer, blødninger og andre skader. Dekompresjonen kan løse ut gass, og danne bobler i hjerte, gjeller, gonader, nyrer, øyne eller hjerne, hvilket kan hemme viktige funksjoner og føre til død. Det samme kan skje etter refleksjon av sjokkbølgen i en rolig overflate da en fasevending kan opptre og kompresjonen vendes til en dekompresjon.

For å bedømme risikoen for alvorlig barometrisk trauma er det passende å anvende den grovere skalaen: «sannsynlig skade» for SPL > 200 dB re 1 μ Pa (10 kPa) og «meget sannsynlig skade» SPL > 220

dB re 1 μ Pa (100 kPa), [38, 39]. Det finnes mer finmaskete grenseverdier oppgitt i [39, 40], hvilke anvendes da en høyere presisjonen er ønskelig.

Her viser man til at trykk over 229–234 dB re 1 μ Pa medfører en stor risiko for momentan død hos fisk. Det bør understrekes at feilkildene fortsatt er mange og beregningsresultatene er avhengige av kvalitet i grunnlagsdata. For en initial risikovurdering gir den grovere risikoskalaen mer rimelige resultater og en mer passende tolking.

C.3 Permanente og temporære skader

Den type skader som ikke leder til døden deles opp i to undergrupper: Permanente (kroniske) eller Temporære (midlertidige) skader. Begge typene er i prinsipp milde barometriske trauma som oppstår ved lavere trykkesponering. Det indikeres at både temporære og permanente terskelforskyvninger kan ramme fisk som blir eksponert for spisstrykk nært grenseverdiene for «sannsynlig skade» (SPL > 200 dB re 1 μ Pa). For mer langvarig lydeksposering kan temporære skader opptre for SEL > 180 dB re 1 μ Pa²s, og mer alvorlige (men gjenopprettbare) skader kan opptre over ca. 200 re 1 μ Pa²s [40].

For denne typen skader er spennvidden mye større enn for direkte barometrisk traume, da disse effektene kan gi sekundære skader, da for eksempel vann suges inn i svømmeblæren (spesielt arter med åpen svømmeblære som laks). Dette kan stresse fisken og gjøre at den skifter adferd. Langvarig stress som fisken ikke greier å adaptere seg til gir såkalt tertiær stressrespons og kan medføre større dødelighet som følge av den ekstrabelastningen som lydeksposeringen skaper [41]. Dette er sterkt koblet til gjentatt eksponering, hvilket gjør at en tilsynelatende lav trykkesponering over lang tid kan akkumulere signifikante skader hos fisk. Overstimulans av ørets hårceller eller nerver kan og gi temporær nedsetting av hørselen, men naturlig nok er denne typen av skade meget vanskelig å studere i eksperimenter og observasjoner.

C.4 Overdøving, frykt og stress

Endring av adferd er enklere å fange opp i eksperimenter. Det bør presiseres at adferdsendringer er knyttet til art, bakgrunnsstøy og situasjon for fisken. Generelt kan man si at for trykkipulser under ca. 200 dB re 1 μ Pa kan man ikke påvise skader på fisk fra observasjoner, men adferdsendringer observeres ned til drøyt 150 dB re 1 μ Pa. De fleste eksperimenter observerer at fisken hører lyden som dannes og gjør endringer i retning eller dyp, en refleksrespons. (Både laks og torsk pleier å gå ned mot bunn da de eksponeres for lyd.) Etter noen repetisjoner blir fisken iblant vant til lyden og opphører med sin adferdsendring. Fisk, lukket inn i oppdrettsanlegg, har ikke mulighet til å svømme unna støyen, dette kan medføre økt stress og endret adferd slik at det induseres en sekundær skade.

Andre lydaspekter dreier seg om overdøving av kommunikasjon eller annen adferd der fisken benytter seg av lyd. Torsk grynter ved gyting da hannene hevder seg og viser en aggressiv oppførsel. Disse gryntingene er relativt lavfrekvente og har en kildestyrke rundt SPL = 120–133 dB re 1 μ Pa [42] [43]. Det er sannsynlig at effektene av denne typen lydforstyrrelse, hvis den er utstrakt over lang tid, kan ha innvirkning på selve gytingen og i forlengelsen effektene på populasjonen. Det kan være at hvis driverne er sterke nok bytter fisken habitat.

C.5 Partikkelbevegelse

Den minst kjente måten for fisk å detektere lyd er den som de fleste fiskearter benytter seg av. Partikkelbevegelse og akselerasjon har først de siste 10–15 årene blitt identifisert som kanskje de viktigste delene av hørselssansen for fisk. Generelt omhandler partikkelbevegelse og akselerasjon lavere frekvenser enn det direkte trykksignalet, se tabell 5 og tabell 6. Her ser man at for de vanligste artene i norske vann, laksefisker, torskefisker og sildefisker følger egenskapene for partikkelbevegelser de samme som for trykkdeteksjon. Sildefisker hører/føler best og deretter torskefisker og sist laksefisker. Regner man om dB-skalaen havner man rundt 0.01–1 mm/s for hastighet og 1–50 mm/s² for akselerasjon. Det er lite forskning på hvilke nivåer som er skadelige for fisker. Regner man om grenseverdien for «sannsynlig skade» for SPL > 200 dB 1μPa (10 kPa) havner man på en partikkelhastighet rundt ca. 6 mm/s og en akselerasjon på 40 mm/s². Det er mest sannsynlig at de mer følsomme artene (torskefisker og sildefisker) har lavere terskel for skade. Det er verdt å notere at for partikkelbevegelse er skaleringen basert på en plan bølge og dette er ikke sant i alle tilfeller. Generelt så gjelder denne approksimasjonen i midten av vannsøylen, men nært bunn skjer ofte en underestimering av partikkelbevegelsen assosiert med akustisk lydforplantning med opptil 10 dB re 1 mm/s [24]. Samme forfatter viser og at spesifikke kilder, for eksempel peling og spunting (som er like linjekilder) har en bølgeforplantning som er meget lik en plan bølge og dermed kan beskrives godt fra ett partikkelbevegelsesperspektiv.

C.6 Effekter på populasjon

Konsekvensene av støy for fiskepopulasjoner er meget uklare. Havet er åpent for flytting mellom ulike habitat, som gjør det vanskelig å påvise at flytting eller atferdsendringer er relaterte til lydbildet. Det kan dog nevnes at dødelighet for egg og larver også uten antropogen påvirkning vanligvis er stor. Derfor hevder mange forskere at forbigående perioder med høy støy eller sterk lydeksposering ikke har så mye å si for selve populasjonen [21], [44]. Det finnes mange steder på jorden med et ekstremt høyt akustisk støynivå der fortsatt mange dyr kommer for å spise eller gyte, til tross at de sliter med både kommunikasjon og temporære skader.

Appendiks D. Terskelverdier

Tabell 5. Terskelverdier ved kort- og langvarig lydeksponering for marine pattedyr. Lav frekvens svarer til de større bardehvaler og det høye frekvensbåndet er representativt for mindre hvalarter, eksempelvis nise.

Art	Frekvensbånd (kHz)	Støytype			
		SPL [dB re 1µPa]		SEL [dB re 1µPa²s]	
		Ikke vektet		Vektet over 24 timer	
		TTS	PTS	TTS	PTS
Lavt frekvensbånd (LF)	0.2-19	213	219	168	183
Middels frekvensbånd (MF)	8.8-110	224	230	170	185
Høyt frekvensbånd (HF)	12-140	196	202	140	155
Phocids (seldyr)	1.9-30	212	218	170	185

Tabell 6. Terskelverdier ved kort- og langvarig lydeksponering. Verdiene er basert på studier ved sprengning og peling [21] [44] [40] [28]. Spisstrykket (SPL) er angitt i [dB re 1 µPa], og lydeksponering (SEL) er angitt i [dB re 1 µPa²s].

Type art	Terskel for endret adferd / reaksjon		TTS – Temporær terskelforskyvning		PTS – Permanent terskelforskyvning		Barometrisk trauma / død		Partikkelbevegelse
	SPL	SEL	SPL	SEL	SPL	SEL	SPL	SEL	mm/s
Uten svømmeblære	153 ¹ /192 ²	-	206	186	213	216	229-234	219	~ 6 ³
Fisk med svømmeblære som ikke er en del av hørselsorganet	153/192	-	206	186	207	203	229-234	210	< 6
Fisk med svømmeblære som en del av hørselsorganet	153/189	160	206	173	207	203	229-234	207	< 6
Fiskelarver/egg	-	-	-	-	-	-	217-242	-	13 ⁴
Terskelverdier brukt i denne rapport	190	160	200	180	210	200	220	210	6

¹ Ref: [46] Konvertert fra 150 dB_{rms} re 1 µPa

² Ref: [20]

³ Basert på TTS 200 dB re 1 µPa

⁴ Ref: [45]