
RAPPORT

Undervannsstøy i forbindelse med sprenging Kystsaksnr. 2021/1246 Stad Skipstunnel

OPPDRAKSGIVER

Kystverket

EMNE

Undervannsstøy i forbindelse med sprenging

DATO / REVISJON: 25 mars 2022 / 00

DOKUMENTKODE: 10226405-04-RIMT-RAP-001



Multiconsult

This report has been prepared by Multiconsult on behalf of Multiconsult or its client. The client's rights to the report are regulated in the relevant assignment agreement. If the client provides access to the report to third parties in accordance with the assignment agreement, the third parties do not have other or more extensive rights than the rights derived from the client's rights. Any use of the report (or any part thereof) for other purposes, in other ways or by other persons or entities than those agreed or approved in writing by Multiconsult is prohibited, and Multiconsult accepts no liability for any such use. Parts of the report are protected by intellectual property rights and/or proprietary rights. Copying, distributing, amending, processing or other use of the report is not permitted without the prior written consent from Multiconsult or other holder of such rights.

RAPPORT

OPPDRAG	10226405-04 Stad Skipstunnel	DOKUMENTKODE	10226405-04-RIMT-RAP-001
EMNE	Undervannstøy i forbindelse med sprengning og mudring	GRADERING	Åpen
OPPDRAGSGIVER	Kystverket	OPPDRAGSLEDER	Bård Øyvind Solberg
KONTAKTPERSON		UTARBEIDER	Tim Fristedt, Pär Jansson
KOORDINATER	Sone: 33 ØST: 2320 NORD: 6915140	ANSVARLIG ENHET	10235042 Marint miljø og havbruk
GNR./BNR./SNR.	STAD KOMMUNE		

SAMMENDRAG

I forbindelse med utdyping i Saltasundet og bygging av skipstunnel mellom Moldefjorden og Kjødepollen er det pålagt krav om undersøkelse av støy under vann som kan påvirke fisk og marine pattedyr. Multiconsult Norge AS er i denne forbindelse engasjert for å vurdere spredning av støy under vann ved sprengning og mudring, og hvordan dannet støy vil påvirke den marine faunaen i nærheten av planlagt arbeid.

Fire områder er indentifisert som tiltaksområder; ved **Saltasundet** er det planlagt utbedring av skipsfarled gjennom sprengning, og det beregnes fjerning av 50,000 m³ masser som skal dumpes i Moldefjorden (**Moldefjorden, deponi**). Ved **Indre Moldefjorden** og ved **Kjødepollen** er det planlagt entringsområde for skipstunnelen.

Det er indentifisert fire funksjonsområder som krever vurdering av undervannsstøy:

- Oppdrettsanlegg sør for Saltasundet, 13612 Rundreimstranda
- Oppdrettsanlegg i Kjødepollen, 12233 Stokkeneset
- Gytefelt for Torsk i Kjødepollen og Røysetfjorden, vest for Saltasundet.
- Beitefelt for Hestemakrell ved Kjødepollen.

I lys av den lange anleggstiden adresseres også effektene for viktige oppvekstområder for fisk helt allment, da det er indentifisert flere naturtypeområder i både Moldefjorden og Kjødepollen, som på flere steder er dominert av ålegressenger og tareskoger og dermed viktige oppvekstområder for fisk og dyreliv.

Denne rapporten beskriver beregning av støy under vann dannet av sprengninger og dumping av mudringsmasser. I tillegg er det gjort vurderinger med hensyn til verneverdige naturfunksjoner, basert på registreringer av naturtyper fra offentlige databaser, tidligere undersøkelser og observasjoner av naturtyper fra ROV-undersøkelser utført av Multiconsult i juni 2021.

00	23.03.2022	Endelig rapport	Tim Fristedt	Pär Jansson	Edmond Hansen
REV.	DATE	DESCRIPTION	PREPARED BY	CHECKED BY	APPROVED BY

Innhold

1	Innledning	5
1.1	Tiltaksspesifikke parameterer	6
2	Resultater	7
2.1	Sprengning og mudring i Saltasundet	7
2.2	Deponi Moldefjorden	9
2.3	Entringsområder Moldefjorden og Kjødepollen	9
3	Konklusjon	14
3.1	Mudring Saltasundet	14
3.1.1	Oppdrettsanlegg	14
3.1.2	Områder for beite og gyting	14
3.2	Deponi Moldefjorden	14
3.3	Entringsområder Moldefjorden og Kjødepollen	15
4	Referanser	16
Appendiks A. Definisjoner		17
Appendiks B. Akustikk i vann / Hydroakustikk		18
B.1	Trykkbeskrivelse av lyd	18
B.2	Spisstrykk og eksponering	18
B.3	Frekvensinnhold og støy	19
B.4	Partikkelbevegelse	19
Appendiks C. Metodebeskrivelse		20
C.1	Modellering av støyutbredning	20
C.2	Forbigående impulsiv lyd / Sprenging	20
C.3	Lydeksponering over tid	21
C.4	Kildestyrke	22
C.5	Refleksjon og transmisjon	22
Appendiks D. Risiko for fisk		24
D.1	Deteksjonsterskler	24
D.2	Død / Barometrisk trauma	24
D.3	Permanente og Temporære skader	25
D.4	Masking, frykt og stress	25
D.5	Partikkelbevegelse	26
D.6	Effekter på Populasjon	26
Appendiks E. Terskelverdier		27

1 Innledning

Formålet med bygging av Stad Skipstunnel er å sikre trygg seilas langs kysten, forbi Stadlandet. Det planlegges å utbedre skipsfarled gjennom Saltasundet og bygging av en skipstunnel mellom Moldefjorden og Kjøddepollen (Figur 1).



Figur 1. Planlagte tiltaksområder ved Stad er vist innenfor rød ramme. Kart: Multiconsult.

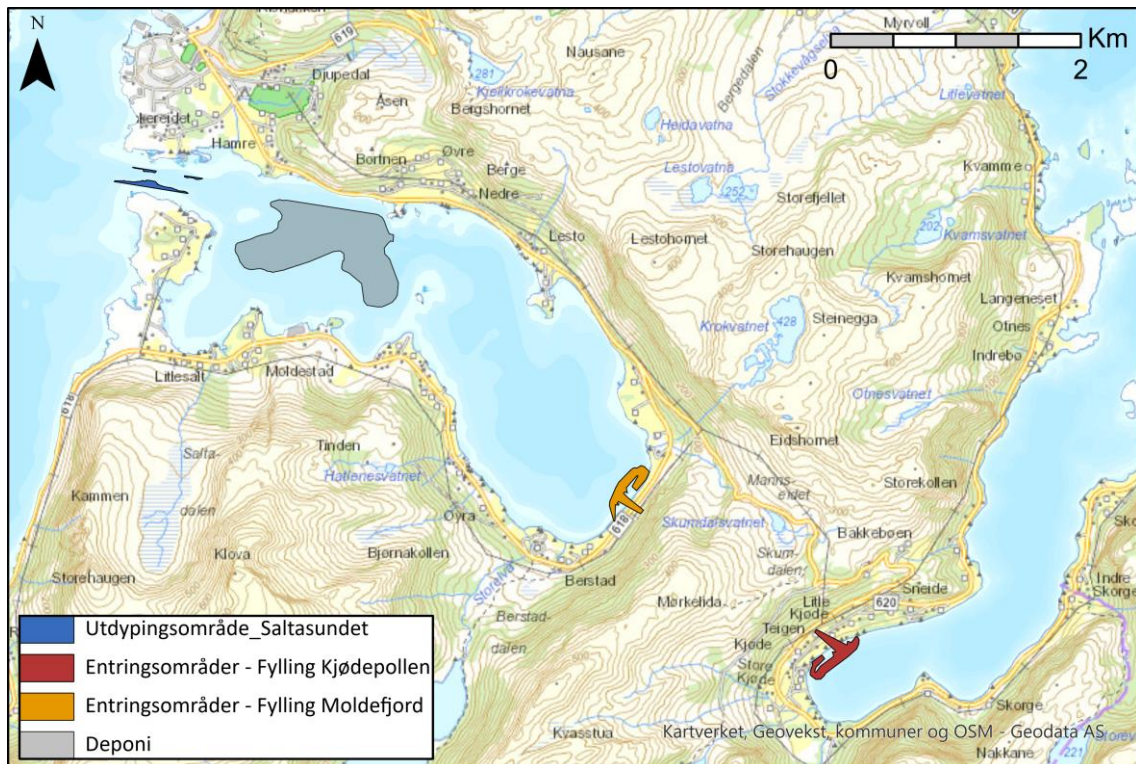
I forbindelse med bygging av skipstunnelen har Kystverket oppgitt et volum på uttak av faste masser på ca. 6,300,000 m³. I tillegg er det oppgitt et volum på 50,000 m³ fra utdypning ved Saltasundet. Mudringsmasser fra farledsutbedring dumpes ved Ytre Moldefjorden (Figur 2), mens masser fra tunnelbyggingen skal gjenbrukes, og dumpes i utgangspunktet ikke i fjordene.

Det forventes, i forbindelse med tiltakene, høye nivåer av støy under vann. Kortvarige intensive lydpuiser fra sprengning i forbindelse med sprengning for utdypning og tunneldriving må derfor vurderes. Da anleggstiden bedømmes til 5 år, bør i tillegg den samlede lydeksponeringen av aktiviteter i vann og i kystsonen (eks. dumping av mudringsmasser, graving og økt skipsaktivitet) tas med i risikovurderingen. Fire hovedområder forventes å bli påvirkete av planlagte tiltak (Figur 2):

1. Saltasundet i forbindelse med utbedring gjennom sprengning
2. Ytre Moldefjorden i forbindelse med dumping av mudringsmasser
3. Indre Moldefjorden i forbindelse med sprengning av tunnel
4. Indre Kjøddepollen i forbindelse med sprengning av tunnel

Det foreligger rapport fra Multiconsult som gjelder naturtyper ved tiltaksområdene og inntilliggende områder som beregnes å bli påvirket av tiltakene (10226827-01-RIM-RAP-001). Her er det blitt identifisert områder og tidspunkter med viktige økologiske funksjoner for forskjellige arter (Tabell 1). I tillegg er det to oppdrettsanlegg i nærheten av tiltaksområdene: Rundreimstranda (2.5 km fra tiltaksområde Saltasundet) og Stokkeneset (6 km fra entringsområde syd). Stokkeneset oppdrettsanlegg vurderes å ligge langt nok unna for å ikke bli påvirket av støy fra sprengning.

Undervannsstøy i forbindelse med sprengning og mudring



Figur 2. Planlagte tiltaksområder. Blå markerer utdyping i Saltasundet, grå markerer deponi i Moldefjorden, rød og oransje markerer entringsområder i henholdsvis Kjødepollen og Moldefjorden. Kart: Multiconsult.

Tabell 1. Ulike plasser og funksjonsområder som er identifisert som viktige gyte- og/eller beiteområder for forskjellige arter som vil bli påvirket av støy og dermed direkte kan bli påvirket av tiltakene.

Funksjonsområde	Funksjon	Assosiert tiltaksområde	Art	Tidspenode
Kjødepollen	Gyte	Indre Kjødepollen	Torsk	Februar - april
Kjødepollen	Beite	Indre Kjødepollen	Hestmakrill	Hele året
Saltastraumen	Gyte	Saltasundet	Torsk	Februar - april
Saltastraumen	Gyte	Saltasundet	Hyse	Mars - juni
Saltastraumen	Gyte	Saltasundet	Lysing	Juni - oktober
Saltastraumen	Beite	Saltasundet	Lysing	Hele året
Saltastraumen	Oppvekst	Saltasundet	Lysing	Hele året
Sildagapet	Gyte	Saltasundet	Lysing	Juli - oktober
Røysetfjorden	Gyte	Saltasundet	Lysing	Juli - oktober
Skorbøfjorden	Gyte	Saltasundet	Lysing	Juli - oktober
Vest for Selje	Gyte	Saltasundet	Lysing	Juli - oktober
Sildagapet	Gyte	Saltasundet	Rødspette	Desember - mars
Røysetfjorden	Gyte	Saltasundet	Rødspette	Desember - mars
Skorbøfjorden	Gyte	Saltasundet	Rødspette	Desember - mars
Vest for Selje	Gyte	Saltasundet	Rødspette	Desember - mars

1.1 Tiltaksspesifikke parameterer

De mest støydannende aktivitetene i sjø er sprengning, som fører til både sjokkbølger og lydeksponering, se Appendiks B og Appendiks C. Fra kart identifiseres omtrentlige punkter for

sprengning ifm. utdyping i Saltasundet og begge entringsområdene i Moldefjorden og Kjødepollen, se Tabell 2.

Tabell 2. Oversikt over plasseringer av ladninger som ble brukte i analysen av sprengninger. Koordinater er gitt i UTM33.

Tiltaksområde	Koordinater [UTM-33]		Enhetsladning	Fraksjon energi til trykk [%]
Saltasundet, sprengning	X: -3930	Y: 6915602	50 kg	10
Entringsområde Moldefjorden ¹	X: -50	Y:6912920	100 kg	3
Entringsområde Kjødepollen ²	X: 1580	Y:6911782	100 kg	3

Den langvarige lydeksponeringen forårsaket av dumping av masser (og ev. andre støydannende aktiviteter på grunn av økt sjøfart av eks. lekter eller annen fartøy) antas dannet ved midtpunktet i dumpeområdet (Tabell 3).

Tabell 3. Plassering og lydnivåer ved tiltaksområde for langvarig lydeksponering fra dumping. Koordinater er gitt i UTM33. X betegner østlig koordinat og y er nordlig koordinat.

Tiltaksområde	Koordinater [UTM-33]		S ₀ [dB]	Aktive timer	Duty cycle (%)
Deponi Moldefjorden	X: -2320	Y:6915138	190 ³	12	30

2 Resultater

2.1 Sprengning og mudring i Saltasundet

Figur 3 viser resultater fra analyse av sprengning i forbindelse med utbedring av skipsfarled ved Saltasundet. Ved utdyping av grunner og sprengning av fjell under vann anvendes ofte maksimalt 50 kg sprengvekt per intervall [1, 2], for å begrense trykkpåkjenningen i vannsøylen. Tidligere observasjoner viser at ca. 10% av energien fra sprengninger går til lydtrykk i vannet [1]. Analysen av støy nivået dannet av sprengning ved Saltasundet, ved 50 kg enhetsladning, viser at oppdrettsanlegget Rundreimstranda (UTM33: X = -5000; Y = 6913000) ligger nært grensen for der fisk kan reagere på lyd fra sprengningen (ca. 190 dB).

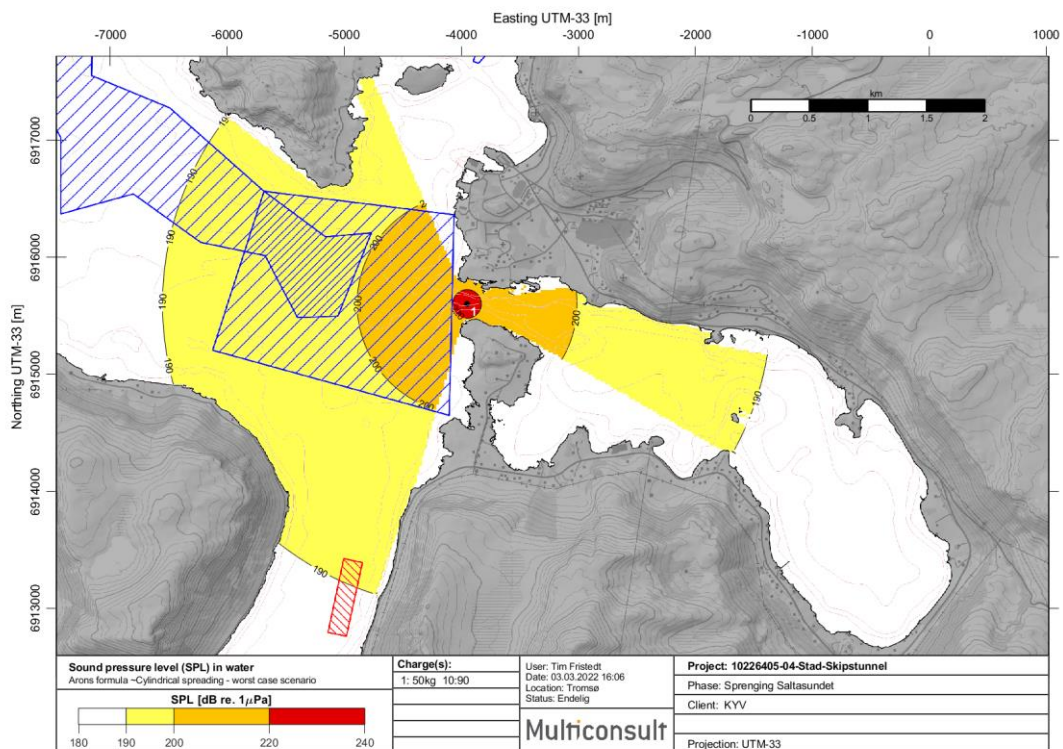
Lydnivåene for store deler av gyte- og beiteområdene vest for Saltasundet er beregnet til å være innenfor området der lyd fra sprengning kan forårsake «sannsynlig reaksjon» (Appendiks D.1) hos fisk, og omtrent halvparten av området er innenfor sonen «sannsynlig skade» (Appendiks D.2). Ingen deler av gyte- beiteområdet ser ut til å være innenfor området definert med risiko «meget sannsynlig skade» (Appendiks D.2).

I Figur 4, vises tilsvarende felt for partikkelbevegelse (basert på skalering der lydbølgen kan approksimeres til en plan bølge). Her vises til omtrent samme mønster som i Figur 3, der den umiddelbare nærheten til sprengningen gir meget kraftige hastigheter og omtrent halvparten av gyte- og beiteområdet er eksponert for en trykkbølge med «sannsynlig risiko for skade» (>6 mm/s). For laks i oppdrettsanlegget Rundreimstranda er det nesten ikke mulig å detektere sprengningene da støy nivåene ligger nært høreterskelen hos laks (noen få mm/s).

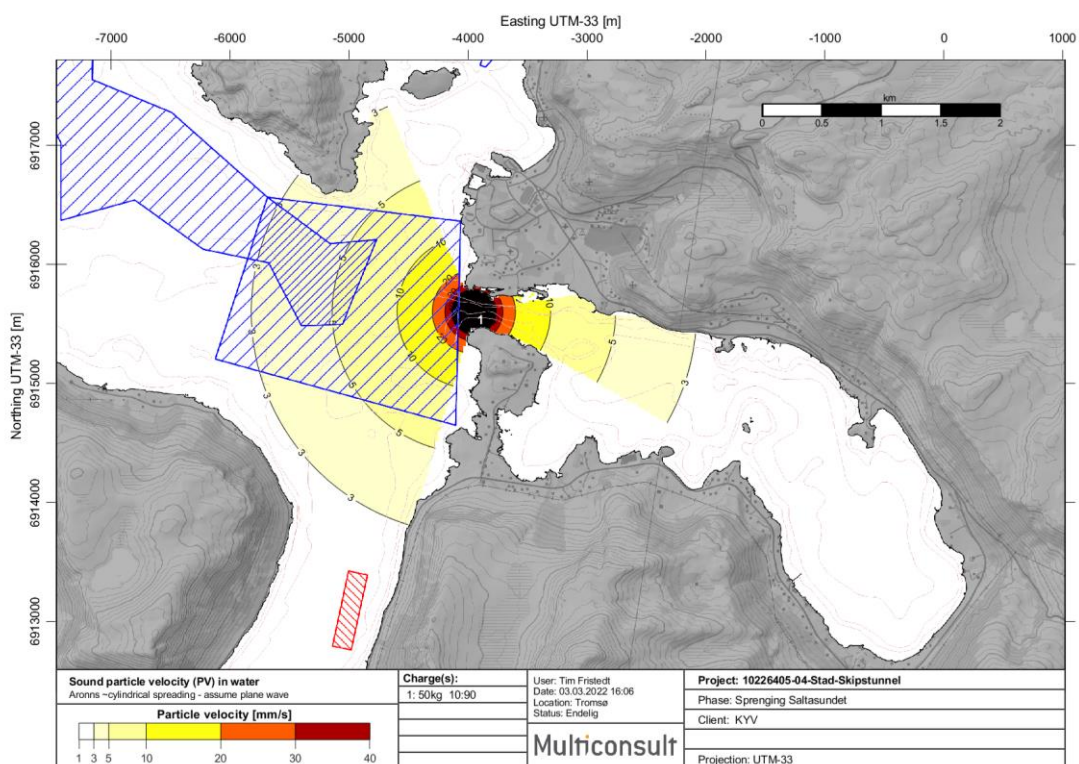
^{1,2} Ved sprengning i entringsområdene er det antatt at 30% av energien i trykkbølgen forplanter seg til sjøen.

³ Støy fra tipping av sprengestein. Kilde: Multiconsult, erfaringsmessig verdi

Undervannsstøy i forbindelse med sprengning og mudring



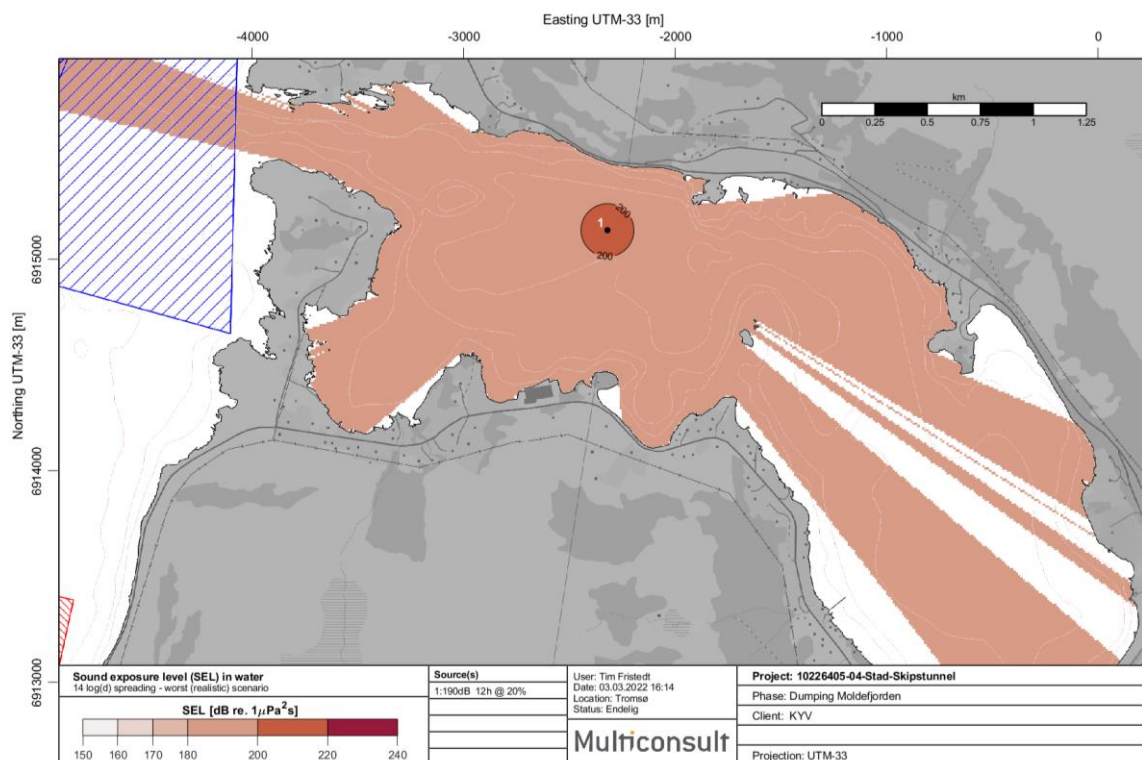
Figur 3. Resultat av analyse av sprengning i Saltasundet med 50 kg enhetsladning. Støynivå (dB relativt til 1 μPa), er vist i fargeskala. Skraverte blå områder markerer gytefelt.



Figur 4. Resultat av analyse av sprengning i Saltasundet med 50 kg enhetsladning. Partikkelbevegelse [mm/s] basert på støynivå, er vist i fargeskala. Skraverte blå områder markerer gytefelt.

2.2 Deponi Moldefjorden

Akkumulerte lydeksponeringsnivåer på døgnbasis, resulterende fra dumping av mudringsmasser i Moldefjorden, er vist i Figur 5. Her er det estimert en kilde med lydstyrke på 190 dB re 1 μPa , som er aktiv 12 timer per døgn, og frembringer lyd 20 % av denne tiden, som tilsvarer kontinuerlig dumping av stein i nesten 2.5 time. Til tross for at kilden kan anses relativt sterk er det kun ca. 100 m fra selve dumpinga at lydeksponeringen nærmer seg skadelige nivåer. Omtrent hele Moldefjorden vil bli eksponert for lydenergi mellom 180 og 200 dB re 1 mPa^2s , som kan medføre temporære terskelforskyvninger hos fisk. Vekter man disse tallene over døgnet reduseres lydeksponeringen i nesten hele Moldefjorden til $\text{SEL}_{24} < 150$ dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$, som gir gode forutsetninger for fisk å komme seg igjen etter eksponering av lyd fra hver enkelt dumping.



Figur 5. Beregnede lydeksponeringsnivåer rundt deponiet i Moldefjorden, resulterende fra dumping av masser fra utbedringsområdet ved Saltasundet. Støynivå (dB relativt til 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$), er vist i fargeskala. Skraverte blå områder markerer gyteloft.

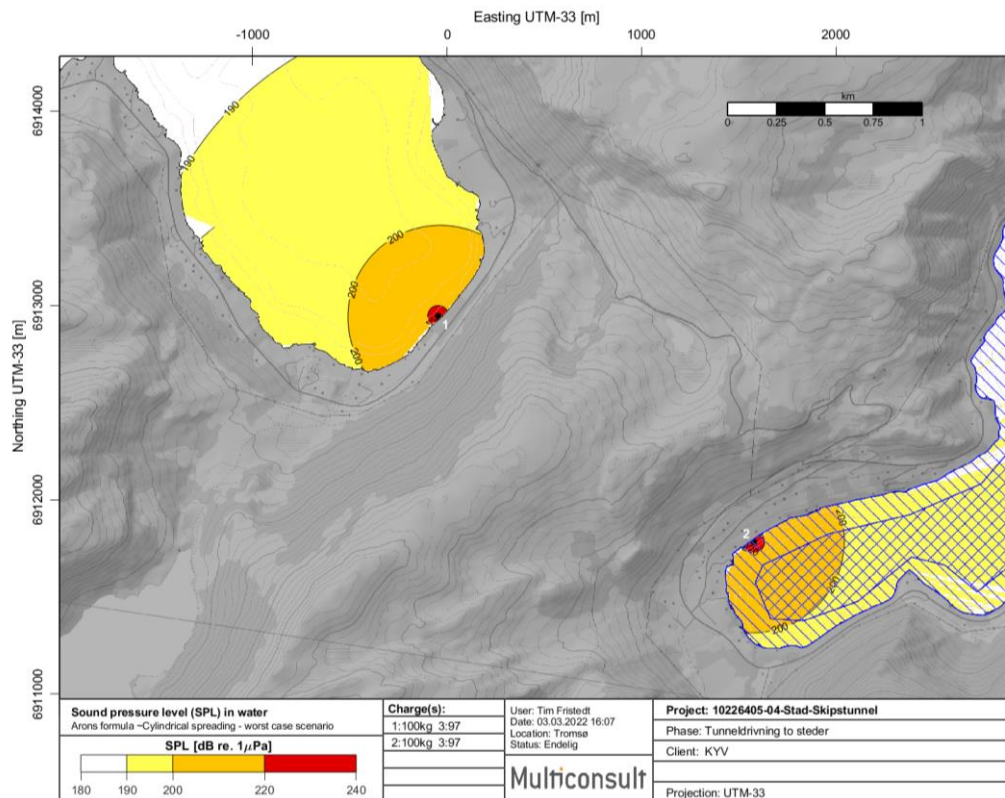
2.3 Entringsområder Moldefjorden og Kjødepollen

Ved entringsområdene vurderes støy som funksjon av avstanden mellom sjøkanten og hvor langt tunnelen er driven inn i fjellet. Man planlegger å utføre sprengningsarbeidene tørt, og beholde en vegg av fjell mot sjøen, for så å sprengne denne som siste drivingsmoment. For entringsområdene Indre Moldefjorden og Kjødepollen, er det modellert med 100 kg enhetsladninger, representativt for typisk tunneldriving. Det ble da antatt at 30 % av trykkbølgen forplanter seg fra fjell til vann og videre ut i fjordene (se Appendiks C), i tillegg til de 10% av sprengenergien som danner trykkbølgen og ikke knuser fjell.

I et område ca. 500 m ut fra sprengningsstedet foreligger det «sannsynlig risiko» for skade på fisk og ca. 50 m fra sprengningsstedet foreligger det «meget sannsynlig risiko» for skade på fisk. Fisk kommer med stor sannsynlighet til å reagere innenfor 1.5 km fra sprengningssted. Men, fordi at dette er isolerte sprengninger, vurderes risikoen for skade på fisk som følge av disse som minimale.

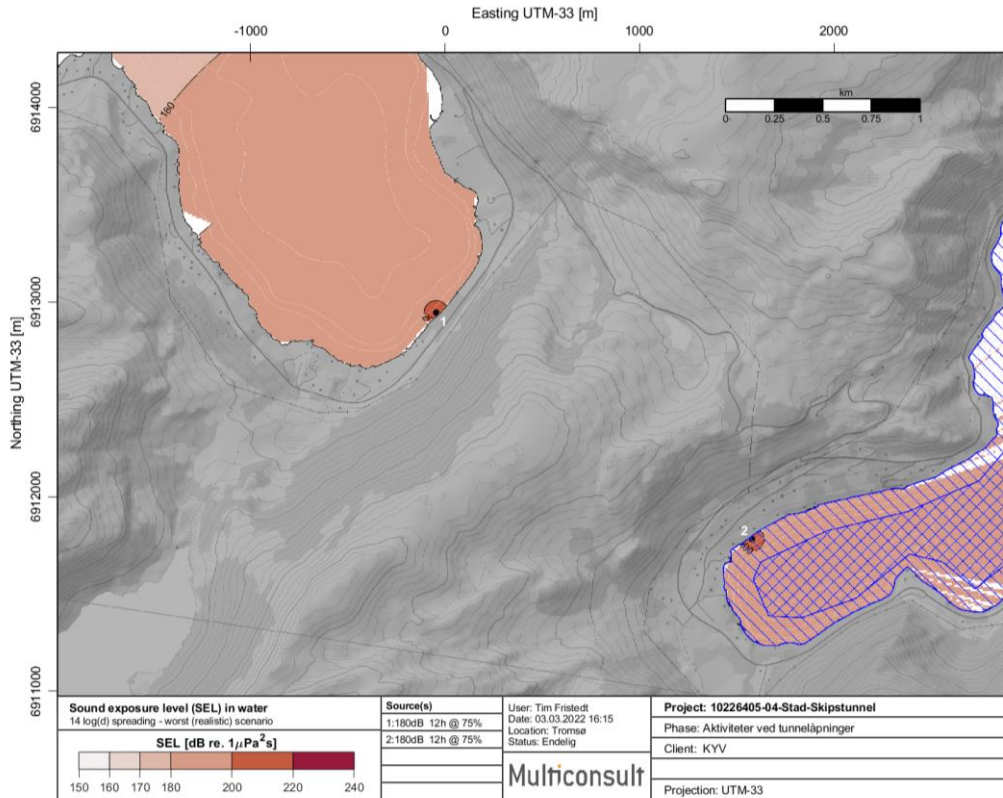
Undervannsstøy i forbindelse med sprengning og mudring

Lydeksponeringsnivåer på døgnbasis, resulterende fra aktiviteter ved entringsområdene er vist i Figur 7. Her er det estimert en kildestyrke på 180 dB re 1 μPa (erfaringsmessig nivå fra tilsvarende arbeider i kystsonen) som er aktiv under 12 timer per døgn og frembringer lyd 75 % av denne tiden (noe som tilsvarer 8 timer). Analysen viser at det forventes at fisk «sannsynligvis kan skades» knapt 2 km fra entringsområdene. Hvis SEL-verdiene vektet over døgnet så vises samme resultat som for støyen som assosieres til dumpingen i Moldefjorden (Figur 8). Fisk og dyreliv som eksponeres av lyd i løpet av arbeidstimene antas å ha gode muligheter for å komme seg igjen, da lydnivåene er så lave at fisk mest sannsynlig ikke hører eller evt. reagerer på støyen (døgnmidlet lydeksponering lavere enn 150 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$, foruten i et område ca. 100 m fra entringsområdet).

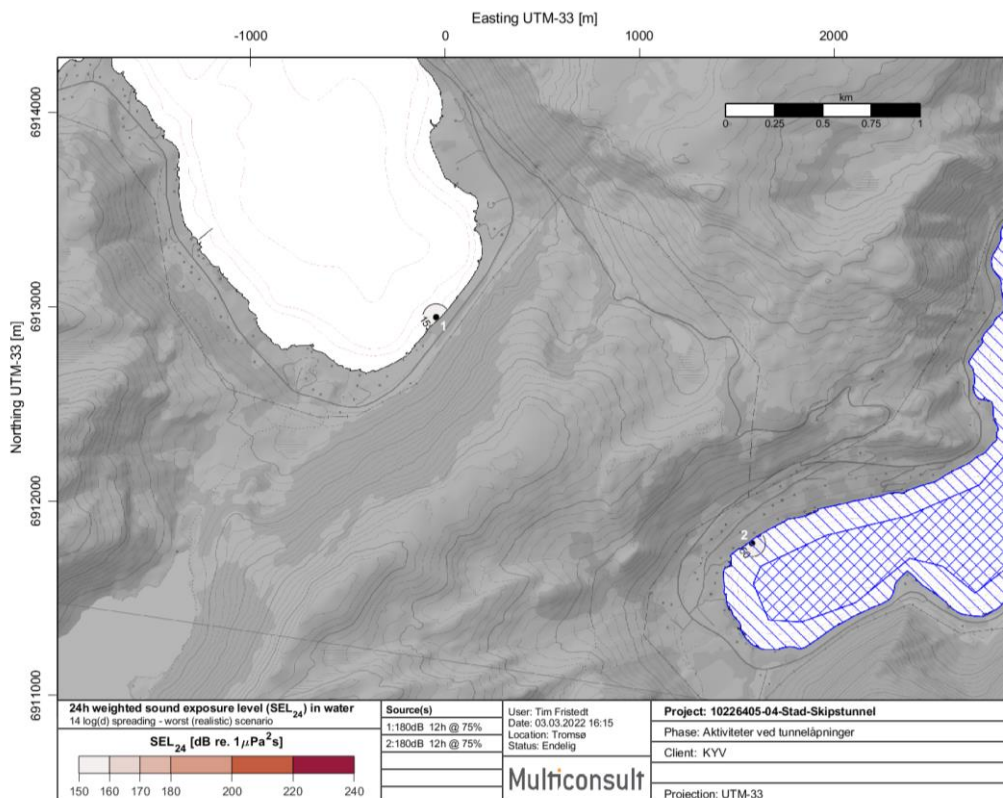


Figur 6. Modellert lydforplantning ved samtidig sprengning ved entringsområdene ved Indre Moldefjorden og Kjødepollen. Fargeskalaen viser spisstrykket, SPL i dB re 1 μPa . Skraverte blå områder markerer gytedefelt for torsk og beitedfelt for hestemakrell.

Undervannsstøy i forbindelse med sprengning og mudring



Figur 7. Beregnet lydeksponeringsnivå fra aktiviteter med en kildestyrke på 180 dB re 1 μPa , nær entringsområdene ved Indre Moldefjorden og Kjødepollen. Akkumulert lydeksponering (dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$), er vist i fargeskala. Skraverte blå områder markerer gytefelt for torsk og beitefelt for hestemakrell.



Figur 8. Beregnet døgnsvetket lydeksponeringsnivå SEL₂₄ [dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$] fra aktiviteter med en kildestyrke på 180 dB re 1 μPa , nær entringsområdene ved Indre Moldefjorden og Kjødepollen, er vist i fargeskala. Skraverte blå områder markerer gytefelt for torsk og beitefelt for hestemakrell.

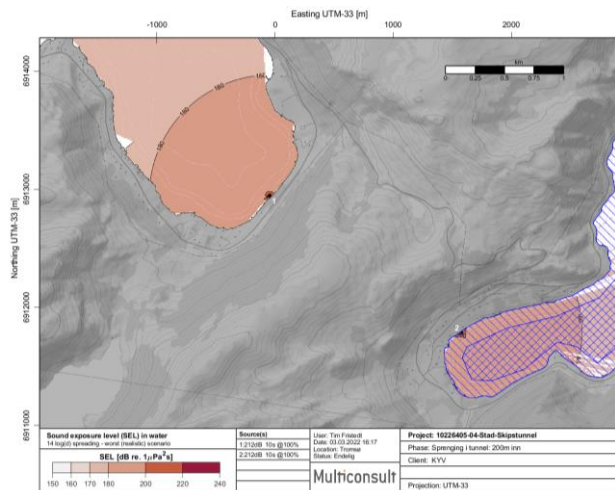
For tunneldriving antas at den samlede lydeksponeringen over tid kan beregnes som en funksjon av hvor langt inn i fjellet sprengingen skjer. Her er det antatt at 90 % av energien knuser fjell og 10 % av energien danner trykkbølge. Da bølgen går fra fjell til vann bevares den totale energien, og det skjer en partiell refleksjon/transmisjon der 70 % reflekteres og 30 % forplantes (se Appendiks C for utdypende beregning).

Det er antatt at det vil bli gjennomført omtrent én sprengning per døgn, og at aktivitetsperioden for hver sprengning er ca. 10 sekunder. Dette gir antallet timer (*work hours*) = $10/3600$ og arbeidssyklus (*duty cycle*) = 100 %. (Alternativt kan beregninger baseres på 1 sprengning annen hver dag, som ville gitt *duty cycle* på 50 %.) Videre er det antatt at lydforplantning skjer i henhold til modellen som er beskrevet i Appendiks C. Figur 9 viser fordelinger av døgnmidlet lydeksponering SEL og SEL₂₄ som funksjon av hvor langt inne i fjellet sprengingene skjer. Resultatene viser at det foreligger «sannsynlig risiko» for skade på fisk innenfor en avstand på ca. 1km fra entringsområdene for tunnelsprengninger på kortere avstand enn 200 m inn i fjellet. På døgnbasis vil den døgnmidlede lydeksponeringen SEL₂₄ være 150 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ i nesten hele fjordsystemet, og da finnes det store muligheter for å gjenopprette eventuelle temporære terskelforskyvinger. For sprenginger som skjer mellom 20 og 200 m inn i fjellet er den umiddelbare risikoen «meget sannsynlig gjenopprettbar skade» i store deler av fjordene, men døgnmiddelverdien SEL₂₄ ligger stort sett fortsatt under grensen på 160 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ som indikerer reaksjon/endret adferd.

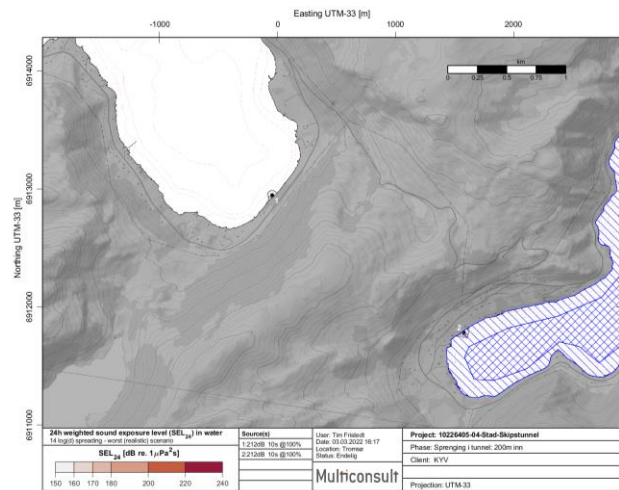
Det er først ved tunneldriving mindre enn 20 m inn i tunnelen at det oppstår risiko for «meget sannsynlig alvorlig skade» på fisk da SEL > 220 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$. I tillegg er det døgnvektede verdier (SEL₂₄) på noe over 160 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$, og sannsynligheten er økt for at fisk i middeltall skal reagere på støyen, og ikke gis mulighet til å gjenoppbygge motstandskraft mot mer lydeksponering.

Det skal bemerkes at selve sprengingsdelen er bedre karakterisert med spissstrykket SPL (Figur 6) og i forbindelse med dette noteres det at effekten fra sprengning mest sannsynlig er begrenset til «meget sannsynlig skade» innen 50 m fra sprengningsstedet. Den sammenlagte effekten fra tunneldrivingen gir mye lavere lydeksponering da disse må vektas over en viss tidsperiode. I dette fall har vi valgt 1 døgn, og da er det bare den siste sprengingen (når fjellveggen åpnes for å slippe inn vann) som gir lydtrykkseksponeringer som kan gi mer alvorlige skader enn temporære terskelforskyvinger.

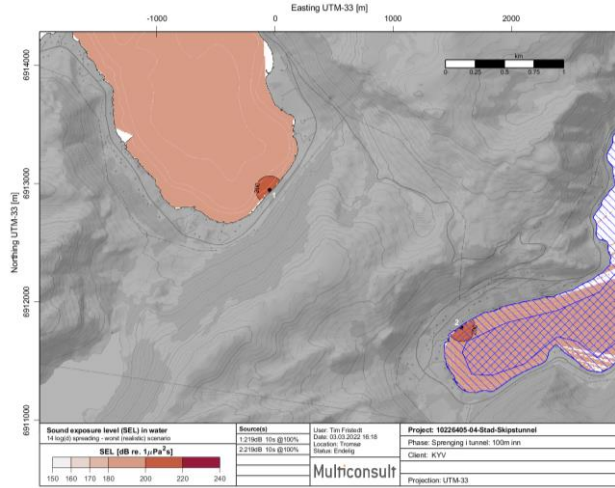
Undervannsstøy i forbindelse med sprengning og mudring



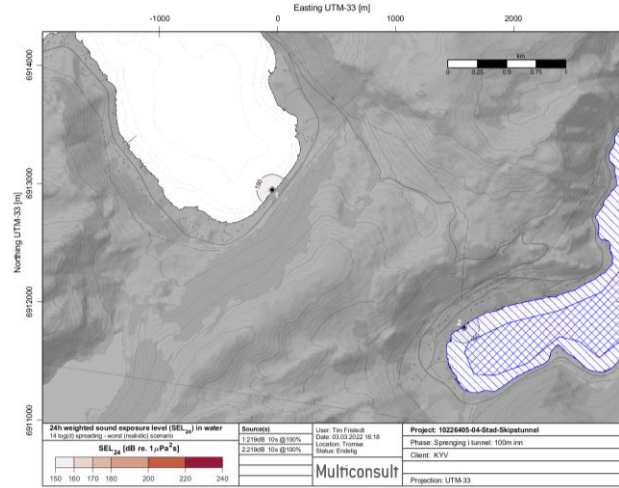
a) 200m, SEL



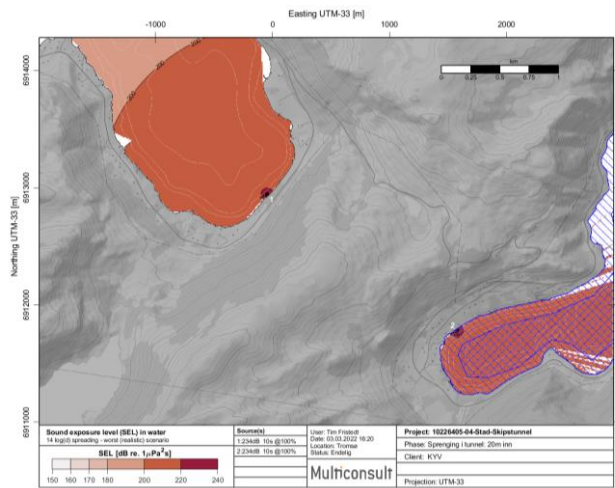
b) 200m, døgnsvetket SEL₂₄



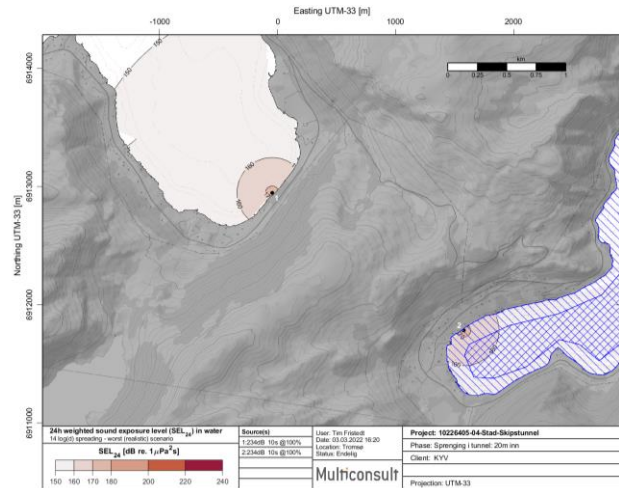
c) 100m, SEL



d) 100m, døgnsvetket SEL₂₄



e) 20m, SEL



f) 20m, døgnsvetket SEL₂₄

Figur 9. Beregnede lydeksponeringsnivåer fra tunneldriving for ulike avstander inn i fjellet. Panelene viser akkumulert SEL i dB re 1 μPa²s for a) 200m SEL, b) 200m SEL₂₄, c) 100m SEL, d) 100m SEL₂₄, e) 20m og f) 20m, SEL₂₄ ved entringsområdene ved Moldefjorden og Kjødepollen.

3 Konklusjon

Ifølge beregningsmodellen til Multiconsult er det liten risiko at fisk i oppdrettsanlegg skal påvirkes betydelig i forbindelse med utbedring ved Saltasundet og bygging av skipstunnelen.

Ved utbedring av fartøysfarled i Saltasundet er det vurdert økt risiko for skader på fisk i gyte- og beiteområdet vest for Saltasundet.

På slutten av arbeidet med sprengning av tunnel, da sprengning skjer helt inntil vannet er det forventet påvirkning på fisk i indre Moldefjorden og Indre Kjødepollen.

For de fleste aktivitetene er den kumulative lydeksponeringen relativt høy, men døgnvektede verdier er lave nok til at fisken skal gis god sjanse til å gjenopprette seg.

3.1 Mudring Saltasundet

3.1.1 Oppdrettsanlegg

Det vurderes med utgangspunkt fra en maksimal enhetsladning på 50 kg, at fisk i oppdrettsanlegget Rundreimstranda vil bli lite påvirket av lyd fra sprengningsarbeider ved Saltasundet, og at skader på fisk i anlegget er meget usannsynlig

3.1.2 Områder for beite og gyting

I nærhet til tiltaksområdet ved Saltasundet er det gyteområde for torsk, hyse, lysing og rødspette, som har gyteperioder henholdsvis i februar – april, mars – juni, juni – oktober, desember – mars. Videre er det beite og oppvekstområde for lysing hele året.

Gitt at det blir brukt sprengladninger på 50 kg, er det en del av Røysetfjord-feltet nærmest Saltasundet som ligger innafor sonen med lydnivåer som sannsynlig kan gi skader på fiskens hørselsorgan. For å unngå slike skader, spesielt i forbindelse med gyteperioden, bør tiltak planlegges for å minke påvirkningen. Primært kan mindre enhetsladninger (ca. 20 kg) brukes, og i tillegg bør man tette borehullene i den vestre halvparten av Saltasundet. Disse tiltak vurderes for å redusere den påvirkede delen av gytefeltet til ca. en tyvendedel av hele feltarealet. Hvis ikke dette er mulig kan man vurdere boblegardin, som effektivt skal kunne redusere støynivået slik at risikozonen vil ligge utenfor gytefeltet.

Det billigste alternativet er å kun spreng i november, men man risikerer da fortsatt skader på lysing, som vokser opp og beiter i området. Dette må veies i forhold til at lysing er vurdert som livskraftig i Europeiske farvann.

3.2 Deponi Moldefjorden

Ved dumping av mudringssmasser ved Moldefjorden deponi er det, ifølge forutsetninger gitt i modelloppsettet, kun i et område med en radius på ca. 100 m fra dumpingplassen som fisk kan bli momentant påvirket. På døgnbasis vurderes dumping som ufarlig for fisk da lydeksponeringen i nesten hele Moldefjorden reduseres til $SEL_{24} < 150$ dB re $1 \mu Pa^2s$, og det kan forventes at fisk ikke reagerer på lydstimuli.

3.3 Entringsområder Moldefjorden og Kjødepollen

Ved entringsområdene i både Moldefjorden og Kjødepollen, spesielt ved slutten av arbeidet med tunneldriving, er det estimert at lydnivåene nært kilden kan nå nivåer som er skadelige for fisken. Modellert sprenging, karakterisert med spissttrykket SPL, viser at risikoen «meget sannsynlig skade» kan oppstå innen 50 m fra sprengningsstedet.

Den sammenlagte effekten over tid (døgnvektet eksponering, SEL_{24}) fra tunneldrivingen gir mye lavere lydeksponering og det er bare den siste sprengingen (når fjellveggen åpnes for å slippe inn vann) som viser lydtrykkseksponeringer som kan gi skader som er mer alvorlige enn temporære terskelforskyvinger. I forbindelse med dette kan man vurdere å minke ladningsvekten per intervall, hvilket skulle minke lydtrykket og eksponeringen ytterligere.

Fisk innenfor 1 km radius fra entringsområdet vil trolig kunne høre og reagere på sprengingsaktivitet inn til 200 m inn i fjellet, men nivåene kommer mest sannsynlig til å være begrenset til temporære terskelforskyvinger med god forutsetning for rask gjenoppretning (døgnvektede middelverdier for SEL_{24} er å anse som generelt lave). Moldefjorden har ikke noen regulering for fisk eller beskyttede arealer, men hele Kjødepollen er gytefelt for torsk og beitefelt for hestemakrell. Derfor anbefales det å planlegge tunneldrivingen slik at de siste 20 - 30 m av tunneldrivingen skjer utenfor gyteperioden for torsk (februar – april). Dette for å minske risikoen for skader eller at fisk blir skremt i gyteperioden.

Hvis man ønsker å redusere trykkpåkjenningen ytterligere kan det brukes boblegardin som skjermer området og demper trykkbølgen med opptil 10 - 20 dB [3]. Dette har vist seg å fungere meget godt i forbindelse med en SMS-styrt boblegardin plassert i Universeum sine akvarier⁴ for å dempe trykkpåkjenning av fisk da det drives tunnel i sentrale Göteborg. I tillegg til å dempe trykkbølgen har boblegardinen en beroligende effekt på fisken, fordi den blir forberedt på sjokkbølgen.

Videre vil det, ifølge modellen, i indre delen av både Moldefjorden og Kjødepollen, bli lydnivåer som fisk kan høre og reagere på under hele anleggsfasen. Hva dette vil si for populasjonene i området er svært vanskelig å vurdere i detalj. Larver og egg er mer motstandskraftige mot lyd og vibrasjoner enn voksne fisk. De har naturlig stor dødelighet, og for populasjonene kanskje den ekstra lydbelastningen ikke spiller noen betydelig rolle. Juvenil fisk er mer følsom fysiologisk, og er i større grad mer habitatavhengige enn voksne fisk. Både Moldefjorden og Kjødepollen har store områder med tare og ålegress, og disse plassene er viktige oppvekstområder for en lang rekke arter. Det kan derfor ikke utelukkes at juvenile populasjoner i Moldefjorden og Kjødepollen vil rammes hardt ved langvarig og høy lydeksponering over flere gyte- og oppvekstsykler.

⁴ <https://www.trafikverket.se/nara-dig/Vastra-gotaland/vi-bygger-och-forbatttrar/Vastlanken---smidigare-pendling-och-effektivare-trafik/aktuellt-i-ditt-omrade/deletapp-korsvagen/nyheter-korsvagen/2020-06/luft-gor-livet-lattare-for-fiskarna/>

4 Referanser

- [1] T. Fristedt og O. Steinestø, «10224965-01 Innseiling Grenland - trykkmålinger Midtfjordbåen,» Multiconsult, 2021.
- [2] N. Ramstad, «Sprengning på grunne 19 og 21,» Multiconsult, 2016.
- [3] T. Fristedt, J. Vaardal-Lunde, D. Clorennec og C. Bois, «10225017-01 Hydroakustisk modellering innseiling Grenland,» Multiconsult, 2021.
- [4] M. H. Andersson, A. Nöjd og J. Carlström, «Kunnskapsunderlag om undervattens-explosjoner och marina djur, Teknisk rapport FOI-R--4413--SE,» *Totalförsvarets forskningsinstitut FOI*, 2017.
- [5] A. Fauske, «Undervannsprengning i nærheten av Oppdrettsanlegg – begrensninger og krav til gjennomføring,» Orica Mining Services, Fjellsprengningsteknikk, bergmekanikk/geoteknikk, 2007.
- [6] A. N. Popper og A. D. Hawkins, «The importance of particle motion to fishes and invertebrates,» 2018.
- [7] 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.
- [8] A. Arons, «Underwater explosion shock wave parameters at large distances from the charge,» *J. Acoust. Soc. Am.* 26(3), p. 343–346, 1954.
- [9] A. R. Richards og A. J. Moore, «Blast vibration course, measurement - assessment – control,» Terroc, 2005.
- [10] J. Swisdak og M. Michael, «Explosion effects and properties: Part II - Explosion effects in water, White Oak, Silver Spring,» 1987.
- [11] 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.
- [12] M. Wahlberg og H. Westerberg, «Hearing in fish and their reactions to sounds from offshore wind farms,» *Marine Ecology Progress Series*, 2005.
- [13] J. H. Miller, J. A. Nystuen og D. L. Bradley, «Ocean Noise Budgets,» *Bioacoustics*, 2008.
- [14] L. Hatch, C. Clark, R. Merrick, S. Van Parijs, D. Ponirakis, K. Schwehr, D. Wiley og ', «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.
- [15] M. H. Andersson, «Underlag för reglering av undervattensljud vid pålning, Vindval rapport,» Stockholm: Naturvårdsverket, 2016.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] E. Grimsbø og P. H. Kvalsheim, «Sprengningsarbeider i sjø -effekter på marint liv og mulige tiltak, Fjellsprengningsteknikk, Bergmekanikk/geoteknikk,» 2018.
- [19] A. D. Hawkins og K. J. Rasmussen, «The calls of gadoid fish,» *Journal of Marine Biology Association of the U.K.*, 1978.
- [20] J. T. Nordeide og E. Kjellsby, «Sound from spawning cod at their spawning grounds,» *ICES Journal of Marine Science*, 1999.
- [21] 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.
- [22] L. Hammar, A. Wikström og S. Molander, «Assessing ecological risks of offshore wind power on Kattegat cod,» *Renewable Energy*, 2014.
- [23] Popper og Hawkins, «An overview of fish bioacoustics and the impacts of anthropogenic sounds on fishes,» vol. 94, p. 692–713, 2019.

Appendiks A. Definisjoner

Tabell 4. Oversikt over definisjoner som brukes i forbindelse med lydbølger.

Term/ forkortning/uttrykk	Forklaring	Beskrivelse
SPL (Sound pressure level)	Spisstrykk	Kortvarig lydimpuls målt i dB. Blir ofte brukt i forbindelse med sprengning.
SEL (Sound exposure level)	Lydeksponering	Langvarig lydeksponering. Denne blir brukt i forbindelse med eksponering av lyd over tid, og angis i dB integrert over tid. Det er antatt at lyd produseres en tid av døgnet, for eksempel 12 timer og at lyd oppstår en viss prosent av tiden.
SEL₂₄	Døgnvektet Lydeksponering	Middelverdi av SEL over et døgn. Dette gir en mål for å bedømme langvarige effekter som repeteres under lang tid.
Duty cycle	Tidsfraksjon da lydkilde gir lyd	Fraksjon av tiden da 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 under et døgn. Er avhengig av hvor lang arbeidsdagen er.
Høreterskel		Terskelverdi for når en art kan oppfatte lyd (spisstrykk).
Respons		Noen fisker viser forendring i atferd, som endring i svømmemønster, orientering og skremme reaksjoner
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. 1µPa @ 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 innom korte tidsintervall (tennerintervall) for eksempel 15-30 millisekunder.
Enhetsladning	Mengden sprengmiddel som sprengs samtidig.	Total vekt på sprengladninger som detoneres innom et intervall.

Appendiks B. 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. Bølgefôrplantningen 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. Hvis den er hard (fjell, stein) reflekteres mye av energien tilbake til vannet og hvis den er myk (sediment, leire, sand), kan mye akustisk energi brytes ned i bunn og dermed absorberes mer effektivt.

B.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 at 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 noteres at for luftakustikk benyttes $p_{ref} = 20 \mu$ Pa, som representerer høreterskelen for mennesker. Dette gir at dB-nivåene i luft blir meget 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], hvilket betyr at trykkfeltet er definert 1 m fra kilden og er en karakteristisk egenskap for selve kilden, uavhengig av forplantningsveien fra kilde til mottakerposisjon.

B.2 Spisstrykk og eksponering

Det finns flere ulike metrikker for å karakterisere lydtrykket. Den vanligste og mest intuitive er spisstrykket (topptrykket eller Sound Pressure Level) SPL_{peak} hvilket er den maksimale avvikelsen fra det normale trykket (middeltrykket) på en plass under en fordefinert tid. Iblant brukes topp-til-topp verdien $SPL_{peak-peak}$ eller SPL_{pp} . I denne rapport brukes kun topptrykket SPL_{peak} da dette er vel egnet for å beskrive impulsive prosesser som sprengning, peling og spunting. I hele rapporten droppes derfor «peak» og bare SPL brukes som benevning på spisstrykket for å forenkle diskusjonen og fremheve innhold i rapporten.

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 [4, 5], og det er da hensiktsmessig at 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 i det et mål på energien i det akustiske feltet da enheten for SEL er Pa²s eller Jm⁻², dvs. energi per arealenhet.

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

Likt SPL så finnes det mange varianter på akustisk eksponering, f.eks. definisjon på en eneste peleslag (Single-strike-SEL) eller kumulative effekter som ibland anvendes for å karakterisere repetitive impulsive kilder Kumulative SEL, CSEL. I rapporten brukes benevningen SEL for lydeksponering da det

brukes en forenklet modell basert på arbeidssyklus (*duty cycle*) til det utstyr som danner lyden. Dette for å kunne se på aggregerte effekter fra flere ulike plasser og aktiviteter i et område over tid.

B.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 lyd en kombinasjon av mange forskjellige toner siden det alltid finns et innslag av tilfeldighet i lydfortplantning i naturen. Tonenes 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 en slik lydteppe. Lydnivået som utgjør den laveste basen i et spektrum kalles støynivå 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, osv.
- 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, eks. skipsfart, vibrasjoner fra bil, tog og bane, osv.

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

B.4 Partikkelbevegelse

Lyd danner materiell bevegelse som benevnes *partikkelbevegelse* og derivataen til denne 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 partikkelbevegelsen [6, 4], men fordi at ettersom 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 nært en detonasjon eller nært en grenseflate. Dessuten er rørelsen vektoriell, hvilket ytterligere kompliserer målingsprosessen. Selv om betydelsen av partikkelbevegelse før hørselen til fisk, er godt kjent, er det først under senere år lagt frem evidens for hvor mye fisk og marine dyr benytter seg av denne egenskap hos det akustiske feltet [7], da det inneholder informasjon om både avstand, retning og annen tilstand til mat, hot eller mulige partners.

Appendiks C. Metodebeskrivelse

C.1 Modellering av støyutbredning

Multiconsult har utviklet en metodikk for beregning, vurdering og visualisering av støynivåer under vann, med formål at 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, f.eks. 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. Grunnen i akustisk modellering er primært geometrisk spredning av trykkenergien. For dype forhold uten interaksjon med overflate eller bunn er forplantningen sfærisk og lydintensiteten oppviser ett kvadratsikt minkende som funksjon av avstand ($1/d^2$), eller uttrykt som dB-skala: $20 \log_{10}(d)$. Ved grunnere forhold spredes energien sylindrisk og da faller trykken isteden som $1/d$, eller $10 \log_{10}(d)$.

Det har vist seg at sylindrisk spredning er en altfor konservativ modell med for langsomt energitap. Man måler ofte, i kystnære sammenheng, opp en spredningsforløst 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 [4].

En realistisk lydforplantingsmodell i kystnære områder er altså en plass imellom sylindrisk og sfærisk spredning, og vi velger derfor at anvende $14 \log_{10}(d)$, som tapskoeffisient for lydeksponeeringsmodellen, for å sikre en realistisk, men konservativ modell for å estimere forplantning av lydenergi, et såkalt realistisk «worst case scenario».

Disse forutsetninger medfører at beregningene kan utføres kostnadseffektivt og gir oppdragsgivere og entreprenører relevant informasjon om hvilke maksimale enhetsladninger som kan brukes ved sprengning 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 lydeksponeering, *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.

C.2 Forbigående impulsiv lyd / Sprenging

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 da ladningen har 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) av pukkestein og forsinket tenning (hvert borehull sprenges for seg med en forsinkelse på cirka 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, [8], [9] og beskriver maksimalt overtrykk, p , som funksjon av ladevekt per intervall, Q [kg], avstand fra detonasjonen, d , og materialkonstanten A . Ifølge [4], og [10] 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 nevnes at for sylindrisk spredning av energi brukes $b = 1$, og for sfærisk spredning brukes $b = 2$.

Vi velger i analysen å sikre et konservativt estimat og setter $b = 1.13$, og $A = 52.4 \cdot 10^6$ Pa. Disse verdier er representative for emulsjon som sprengstoff [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 [2], [1].

Sprenging for utdyping av grunner utgjøres til store deler flå sprenging, hvilket reduserer borehullene og dermed ladevektene. Erfaringstall viser til typiske ladevekter på 30-50 kg per intervall med en repetisjon på ca. 1 - 2 sprenging per døgn. Disse tallene er sterkt beroende på dybde, bunntype, bølger, vind, strøm og naturligvis personell og borerigg.

For tunneldrivning følges en strikt rekkefølge (forinjeksjon, boring, ladning, sprenging, rensing og sikring) der ca. 5 m lange borehull lades med multiple tenningsintervall med typiske sprengvekter på 60 - 100 kg per intervall. For større tunneldrivingsprosjekter er målet at nå ca. 20 m per uke, hvilket gir ca. 1/2 salva per døgn. Drivning av mindre vegtunneler kan ibland nå opp til 2 salver per døgn.

C.3 Lydeksponering over tid

Lydeksponering, *sound exposure level*, SEL, som følge av langvarig lydkilde er definert som:

$$SEL_{dB} = 10 \log_{10} \left(\int \frac{p(t)^2}{p_{ref}^2} dt \right) \quad (5)$$

Ved å definere S_0 som den effektive bredbåndige kildestyrken [Pa] 1 meter fra kilden og anslår sylindrisk spredning (proporsjonal til d^{-1}) av den akustiske energien kan man estimere SEL_{dB} på distansen d fra kilden [m].

$$SEL_{dB} = 10 \log_{10} \left(\int \frac{S_0(t)^2}{d p_{ref}^2} dt \right) \quad (6)$$

Hvis tidsvariasjonen til kilden er kjent, alternativt definert til antallet timer drift per døgn (*work_hours*) med et utstyr som har en spesifikk arbeidssyklus (*duty_cycle* definert som prosentandel lydennende aktivitet av antall timer drift, kan integralet beregnes eksplisitt. Dette blir til slutt den integrerte verdien på lydeksponering SEL_{dB} for relevant for fauna i området:

$$SEL_{dB}(d) = 10 \log_{10} \left(\frac{3600 \cdot (work_hours) \cdot (duty_cycle) S_0^2}{d p_{ref}^2} \right) \quad (7)$$

Der *work_hours* er arbeidshagens 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. En annen måte at karakterisere lydeksponering over tid er at vekte SEL_{dB} over døgnet:

$$SEL_{dB24} = 10 \log_{10} \left(\frac{3600 \cdot (work_hours) \cdot (duty_cycle) S_0^2}{(24 \cdot 3600) d p_{ref}^2} \right) \quad (8)$$

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

C.4 Kildestyrke

Det er meget stor spredning i kildestyrker for ulike maskiner eller utstyr som danner undervannsstøy. Multiconsult har en meget stor 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;

$$I = \frac{p^2}{Z} = \frac{p^2}{c \rho} \quad (9)$$

, der Z er den akustiske impedansen. Krever man at intensitetene skal være samme i vann SPL_{dB} og luft SPL_{dBa} gir dette approksimativt:

$$SPL_{dBa} \approx SPL_{dB} - 62 \text{ dB} \quad (10)$$

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 stor konfidens kan anslå kildestyrker til utstyr som ofte anvendes av entreprenører i og rundt Norge.

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

C.5 Refleksjon og transmisjon

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

$$R^2 = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (11)$$

$$T^2 = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$

der Z_1 er den akustiske impedansen i opprinnelige mediet med innfallende og reflektert lydfelt og Z_2 er impedansen i mediet med det transmitterte feltet. Ifølge typiske verdier i Tabell 5, for lydhastighet og tetthet reflekteres ca. 70% av energien og ca. 30% forplantes ved en overgang mellom fjell og vann.

Tabell 5. Verdier som danner grunnlag for å beregne refleksjon og transmisjon gjennom en medieovergang mellom fjell (media 1) til vann (media 2).

Parameter	Media 1 Fjell/Knust fjell		Media 2 Vann	
	c_1	ρ_1	c_2	ρ_2
Typiske verdier	6000 m/s	2300-2800 kg/m ³	1500 m/s	1000-1030 kg/m ³

Appendiks D. Risiko for fisk

Ved håndtering av risiko anvendes spesielt to parameterer; SPL (Maximum Sound Pressure Level/ Spisstrykk) og SEL (Sound Exposure Level/ Lydeksposering). De spesifikke termene er forklart i definisjonslisten (Appendiks A, Tabell 4). I tillegg til denne har Miljødirektoratet publisert norske oversettelser for noen av termene som anvendes i rapporten, [11].

D.1 Deteksjonsterskler

Fisk har en stor spennvidde avseende 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 typer fisk som bruker hørselen som primært sinn. Fisk har generelt god hørsel for både trykk og partikkelbevegelse. De fleste fiskearter har dessuten et trykkfølsomt sidelinjeorgan. Men dette anvendes mest sannsynlig mindre for å detektere lyd og mer for jakt, flykt og stimkoordinering [12].

De vanlige artene aktuelle for Norske forhold, laksefisker (*Salmonidae*), torskfisker (*Gadidae*) og sildefisker (*Clupeidae*) har noe forskjellige høreterskler og oppfatter noe forskjellige frekvensomfang, se Tabell 6, Appendiks E. Laksefisker har åpen svømmeblære (som henger sammen med magtarmkanalen og dermed omgivende vann) og har en høreterskel på straks over 100 dB re 1 μ Pa. Torskfisker hør litt bedre med en terskel ca. 20 - 30 dB lavere enn laks. Dette beror på at disse har en lukket svømmeblære og fungerer som en resonanskammer og ligger dessuten nært hørselsorganene. Sild hører best av de tre vanlige artene med en terskel ca. 10 dB lavere enn torskfisker og oppfatter dessuten ett bredere spektrum. Mange sildarter har i tillegg gassfylte organer nært hørselsorganene hvilket gjør dem mer følsomme for lyd [4].

Disse terskler skal settes i relasjon til den bakgrunnsteppe av støy som finns i vannet med forskjellig amplitude og karakter døgnet rundt. Spennvidden her er meget stor, fra meget tyste områder uten antropogen innvirkning, der bare vær og vind påvirker støybakgrunnen (ca. 60 - 80 dB re 1 μ Pa) til meget støyutsatte områder nært f.eks. infrastruktur, havner, anløp eller tyngre industri, opp til mellom 120 og 140 dB re 1 μ Pa [13, 14].

For å beskrive risiko ved deteksjon blir det brukt begrepet «Sannsynlig reaksjon», basert på terskelnivåene for deteksjon (Tabell 6).

D.2 Død / Barometrisk trauma

Det mest relevante for fisk er kanskje at fisken dør eller blir permanent skadet. Dette skjer nesten utelukkende i «Nærfeltsonen/dødelighetssonen», men og til viss del i «Overgangssonen/Skadesonen». Grensene er litt flytende og er avhengig på art, størrelse, alder, kondisjon, avstand fra ladning 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 den dekompresjon 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 døden. Samme sak kan skje etter refleksjon av sjokkbølgen i en rolig overflate da en fassending kan inntrede og kompresjonen vendes til en dekompresjon.

For å bedømme risikoen for alvorlig barometrisk trauma er det passende at anvende den grøvre 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), [15, 16]. Det finnes mer finmaskete grenseverdier oppgitt i Tabell 6 og Tabell 7, Appendiks E, 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 grøvre risikoskalaen mer rimelige resultater og en mer passende tolking.

D.3 Permanente og Temporære skader

Den type skader som ikke leder til døden deles opp i to undergrupper: Permanente eller Temporære 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 spissttrykk nært grenseverdiene for «sannsynlig skade» (SPL > 200 dB re 1 μ Pa). For mer langvarig lydeksponeering 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 [17].

Vad gjelder denne typen av skader er spennvidden meget større enn for direkte barometrisk traume, da disse effektene kan gi sekundære skader, da f.eks. vann suges inn i svømmeblæren (spesielt arter med åpen svømmeblære som laks). Dette kan stresse fisken og gjøre at den skifter adferd til det semre. 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 lydeksponeeringen skaper [18]. Dette er sterkt koblet til repetert eksponering hvilket gjør at en til synes 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 at studere fange opp i eksperimenter og observasjoner.

D.4 Masking, frykt og stress

Hva som er enklere at fange opp i eksperimenter er endring av adferd. Det bør noteres at adferdsendringer er knyttet til art, bakgrunnstøy og situasjon for fisken. Generelt kan man si at for trykkpulser under ca. 200 dB re 1 μ Pa ikke kan 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 at går ned mot bunn da de eksponeres for lyd.) Etter noen repetisjoner blir fisken ibland vant til lyden og opphører med sin adferdsendring. Fisk, lukket inn i oppdrettsanlegg, har ikke mulighet til å svømme unna støyen, hvilket kan medføre økt stress og endret adferd slikt at det induseres en sekundær skade.

Andre aspekter på lyd dreier seg om masking av kommunikasjon eller annen adferd der fisken benytter seg av lyd. Torsk grynter ved gyting da hannene hevder seg og oppviser et aggressivt beteende. Disse gryntinger er relativt lavfrekvente og har en kildestyrke rundt SPL = 120-133 dB re 1 μ Pa [19, 20]. Det er langt ifra utrett hvis effektene av denne typen av lydforstyrrelse har noen innvirkning på selve gytingen eller i forlengelsen effektene på populasjonen. Det kan være, at hvis driverne er sterke nok, bytter fisken habitat.

D.5 Partikkelbevegelse

Den minst kjente måten for fisk at detektere lyd er den som de fleste fiskearter benytter seg av. Partikkelbevegelse og akselerasjon har først under 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 6, Appendiks E. Her ser man at for de vanlige artene i norske vann, laksefisker, torskfisker og sildefisker følger egenskapene for partikkelbevegelser dem for trykkdeteksjon. Sildefisker hører/føler best og deretter torskfisker og sist laksefisker. Regner man om dB-skalaen hamner man rundt 0.01 - 1 mm/s for hastighet og 1 - 50 mm/s² for akselerasjon. Det er lite evidens på hvilke nivåer som er skadelige for fisker. Regner man om grenseverdien for «sannsynlig skade» for SPL > 200 dB 1μPa (10 kPa) hamner man på en partikkelhastighet om ca. 6 mm/s og en akselerasjon på 40 mm/s². Det er mest sannsynlig at de mer følsomme artene (torskfisker og sildefisker) har lavere terskel for skade. Det er vert å notere at for partikkelbevegelse er skaleringen basert på en plan bølge og dette er ikke sant i alle tilfeller. Generelt kan sis at i midten av vannsøylen gjelder ofte denne approksimasjonen, men nært bunn skjer ofte en underestimering av partikkelbevegelsen assosiert med akustisk lydforplantning med opptil 10 dB re 1 mm/s [21]. Samme forfatter viser og at spesifikke kilder, eks. 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.

D.6 Effekter på Populasjon

Konsekvensene av støy for fiskepopulasjoner er meget uklare. Havet er åpent for flytting mellom ulike habitat, hvilket gjør det vanskelig å belegge at flytting eller atferdsendringer er relaterte til lydbildet. Det kan dokk nevnes at dødelighet for egg og larver også uten antropogen påvirkning vanligvis er stor. Derfor hevder mange forskere at intermittente perioder med høy støy eller sterk lydeksposering ikke har så mye å si for selve populasjonen [4, 22]. 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 E. Terskelverdier

Tabell 6. Terskelverdier for noen vanlige norske fiskearter ved deteksjon av lyd i form av trykk og partikkelbevegelse og partikkelakselerasjon [4, 23].

Type art	Svømmeblære	Trykk dB re 1 μ Pa	Partikkelbevegelse dB re 1 μ m s ⁻¹	Partikkelakselerasjon dB re 1 μ m ² s ⁻⁴
Plattfisk (Pleuronectiformes), Haier og Skater (Chondrichthyes)	-	90 - 130 dB 100 - 1000 Hz	30 - 70 dB (ca. 1 mm/s) 0.1Hz – 200 Hz	30 - 100 dB (ca. 40 μ m/s ²) 0.1-200 Hz
Laks (Salmonidae)	Åpen	95 - 130 dB 30Hz - 400Hz	30 - 70 dB (ca. 1 mm/s) 30 - 300Hz	50 - 100 dB (ca. 20 μ m/s ²) 30Hz - 300Hz
Hestmakrill (Carangidae)	Lukket	90-110 dB ⁵ 300Hz-2000Hz		
Torsk (Gadidae)	Lukket	75 - 100 dB 30Hz - 500Hz	10 - 40 dB (ca. 0.01 mm/s) 0.1Hz - 400Hz	10 – 75 dB (ca. 4 μ m/s ²) 0.1Hz – 400Hz
Sill (Clupeidae)	Åpen - men i tillegg gassfylte organ ved ørene.	70 - 75 dB 30Hz - 5kHz	10 - 20 dB (ca. 0.01 mm/s) 30Hz - 5 kHz	30 – 65 dB (ca. 2 μ m/s ²) 30Hz - 5 kHz

Tabell 7. Terskelverdier ved kort- og langvarig lydeksponering. Tabell basert på studier ved sprenging og peling [4, 17, 23, 5]. Spisstrykket, SPL er angitt i [dB re 1 μ Pa], og lydeksponering, SEL er angitt i [dB re 1 μ Pa²s].

Type art	Terskel for endret adferd / reaksjon		TTS - Temporær terskelforskyvning		Gjenopprettbar skade		Død		Partikkel- rørelse
	SPL	SEL	SPL	SEL	SPL	SEL	SPL	SEL	mm/s
Uten svømmeblåse	153 ⁶ /192 ⁷	-	206	186	213	216	229-234	219	~ 6 ⁸
Fisk m. svømmeblære ikke del av hørselorgan	153/192	-	206	186	207	203	229-234	210	< 6
Fisk med svømmeblære del av hørselorgan	153/189	160	206	173	207	203	229-234	207	< 6
Fisklarver / egg	-	-	-	-	-	-	217-242	-	13 ⁹

⁵ Ingen data tilgjengelig for Hestmakrill. Data gjelder en mindre slektning: *Trachurus japonicus*.

⁶ Ref: [23] Konvertert fra 150 dB_{rms} re 1 μ Pa

⁷ Ref: [5]

⁸ Basert på TTS 200 dB re 1 μ Pa

⁹ Ref: [3].