

Støymålinger i Aspevågen

Måling av undervannsstøy og vurdering av boblegardin som avbøtende tiltak ved sprengning under vann i Aspevågen, Ålesund.



Dette er en blank side

Rapporttittel

Støymålinger Aspevågen

Forfatter(e):

Tormod H. Skålsvik
Guttorm N. Christensen
Magnus Aune
Dominique Clorennec*
Philippe Billand*
Carl Bois*
Thomas Folegot*

*Quiet-Oceans SAS, France.

Akvaplan-niva rapport: APN-61285 -1

Dato: 04-11-2019

Antall sider: 21 + 41

Distribusjon:

Gjennom oppdragsgiver

Oppdragsgiver:

Kystverket

Oppdragsg. referanse

Camilla A. Spansvoll

Prosjektleder

Magnus Aune

Kvalitetskontroll

Guttorm N. Christensen

Forsidefoto: Bilde fra Aspevågen med boblegardin i forgrunnen og mudringslekter i bakgrunnen. Foto: Kystverket.

INNHOLDSFORTEGNELSE

FORORD	2
SAMMENDRAG	3
1. INNLEDNING OG MÅLSETNING	5
2. MATERIALE OG METODER	7
2.1. Overvåkningsprogram	7
2.2. Plassering av akustiske målere	8
2.3. Akustisk instrumentering	9
2.4. Sprengningenes oppsett	10
2.5. Etablering av boblegardin	10
3. RESULTAT OG DISKUSJON	13
3.1. Registrerte støynivåer	13
3.2. Effekt av boblegardin	14
3.3. Estimert kilde nivå	17
3.4. Sammenligning med sprengninger i Båtsfjord	17
3.5. Støy forårsaket av boblegardin	19
3.6. Omgivelsesstøy	19
4. KONKLUSJON OG ANBEFALINGER	20
LITTERATUR	21

Forord

Denne rapporten gir et norskspråklig sammendrag av en studie gjort for å kartlegge støyspredning under vann i forbindelse med undervannssprengninger, samt effekten av å benytte en såkalt boblegardin for å redusere støyens utbredelse under vann. Sprengningene ble utført i Aspevågen i Ålesund i forbindelse med at farleden skal utdypes ned til 11 meter. Arbeidet som er utført inkludert metodikk, databehandling, litteraturreferanser og fortolkning er utførlig beskrevet av Quiet-Oceans i den engelskspråklige hovedrapporten (Clorennec et al. 2019).

Planlegging og gjennomføring av feltarbeid samt rapportering er gjennomført av Akvaplan-niva og det franske firmaet Quiet-Oceans. Akvaplan-niva stod for planlegging, tilrettelegging og koordinering av feltarbeidet, mens Quiet-Oceans var ansvarlige for måling i felt og analyse og tolkning av støydataene i etterkant av feltarbeidet.

Petter Anton Stadsnes bidro i feltarbeidet med sitt fartøy Bølgen, og vi ønsker å takke ham for særs profesjonelt, fleksibelt og hyggelig samarbeid underveis i feltarbeidet. Likeså vil vi takke leverandør av boblegardin, NUVA AB, for godt samarbeid, velvilje og kreativ problemløsning ved oppståtte utfordringer underveis i oppdraget.

Akvaplan-niva og Quiet-Oceans takker Kystverket for oppdraget.

Sammendrag

På bakgrunn av de ulike negative effektene undervannsstøy kan ha på marint liv ønsket Kystverket å utrede i hvilket omfang aktiviteter i deres regi forårsaker støy under vann, og hvordan dette kan minimeres. I denne forbindelse ble Akvaplan-niva AS engasjert til å gjennomføre en analyse av støyspredning ved sprengninger under vann, samt evaluere effekt av boblegardin som avbøtende tiltak. Quiet-Oceans, Akvaplan-niva sin samarbeidspartner ved måling av undervannsakustikk, stod for målinger i felt.

Prosjektet i Aspevågen anses som en videreføring av prosjektet "Vurdering av støy i forbindelse med undervannsekspløsjoner i Båtsfjord, april 2018" som Akvaplan-niva og Quiet-Oceans gjennomført for Kystverket i 2018 (Aune med fl. 2018). I prosjektet i Båtsfjord Havn ble det også gjennomført undervannsakustiske målinger i forbindelse med undervannssprengninger i april 2018. Hensikten med målingene var å studere støynivået i fjorden under sprengningene og vurdere dette i lys av mulige konsekvenser for marint liv, inkludert torsk som ble holdt i et torskehotell omtrent 900 meter unna sprengningspunktet.

Sprengningene ble utført i Aspevågen i Ålesund i forbindelse med at farleden skal utdypes ned til 11 meter. De undervannsakustiske målingene ble utført i perioden 3. til 5. september 2019. I løpet av denne perioden ble det gjennomført sju sprengninger i forskjellige konfigurasjoner med ulike ladninger av dynamitt i størrelsesorden 411 til 1715 kg. Ved fem av sprengningene var det satt ut en boblegardin ca. 300 meter fra sprengningsstedet for å undersøke dennes effekt som støydempende tiltak. Effekt av boblegardinen ble testet i både ringformet og rettlinjet konfigurasjon.

Målingene av undervannsakustikk ble utført med fire akustiske opptakssystemer som registrerte støy på ulike steder i en distanse som varierte fra omtrent 280 til 2500 meter fra sprengningsstedet. Målerne var satt opp slik at de kunne måle både de lave nivåene av omgivelsesstøy og de høye nivåer av støy fra eksplosjonene.

Måleresultatene viser at topp-til-topp-verdiene av lydtrykket nådde et maksimum på 220,4 dB ref. 1µPa og et maksimalt lydeksponeringsnivå på 189,9 dB ref 1µPa²s på en distanse på 300 meter fra sprengningsstedet, ved en total ladning på 915 Kg. Måleresultatene er sammenlignbare med målingene i Båtsfjord Havn der topp-til-toppverdiene for lydtrykket oppnådde maksimalt 216,8 dB ref 1µPa og et maksimalt lydeksponeringsnivå på 193 dB ref 1µPa²s i en avstand på 1100m fra sprengningsposisjonene. For den maksimale totalladningen brukt i Aspevågen på 1715 Kg ble det på samme lokasjon målt en reduksjon for lydtrykk og lydeksponeringsnivå på henholdsvis 8,5 og 3,3 dB sammenlignet med de høyeste registreringene. Det antas at de bestemmende faktorer for denne forskjellen er antallet grupper i ladningen, den maksimale gruppeladning i totalladningen, samt mikroforsinkelser mellom detonasjon av hver gruppe i totalladningen. Lydeksponeringsnivået, som representerer en måling av energien i eksplosjonen, viser liten variasjon mellom de ulike sprengninger (± 2 dB). Forskjellen skyldes trolig en kombinasjon av lokal batymetri (bunntopografi), måten ladningene er blitt organisert, størrelsen på enkeltladningene og varigheten på mikroforsinkelsene mellom sprengningene. Kunnskap om den totale størrelsen på ladningene er altså ikke tilstrekkelig for å kunne forutse støynivået i det marine miljø. Modellering tilsier et maksimalt kildenivå under sprengningene på 261,1 dB ref 1µPa @1m SPL topp-til-topp og SPL_{rms} på 230,6 dB ref 1µPa@1m.

Overvåkningsstrategien bak målingene gir mulighet for å kvantifisere effekten av å anvende boblegardin som støyreducerende tiltak. Den høyeste effekten av boblegardin (32 dB ved

frekvenser nær 600 Hz) ble målt ved de eksplosjoner der gardinen var plassert som en ring rundt målesonden. Dette skyldes at også lydrefleksjoner fra kystlinje, i tillegg til de direkte lydbølger, ble svekket av boblegardinen. Ved boblegardin satt ut i en rettlinjert konfigurasjon og ved lydfrekvenser høyere enn 400 Hz var effekten 12 dB lavere enn for gardin satt i sirkulær konfigurasjon. Boblegardinen gav en støydempende effekt på ca. 20 dB for frekvenser i området mellom 100Hz og 3 kHz. Disse verdien var konsistente gjennom studien og i god overenstemmelse med tidligere utførte studier.

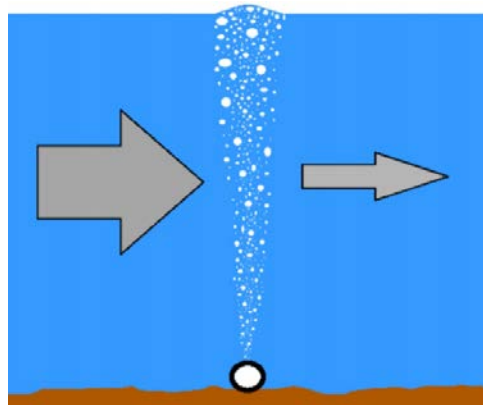
Denne rapporten er et norskspråklig sammendrag av den engelskspråklige hovedrapporten (Clorennec *et al.* 2019), der arbeidet som er utført inkludert metodikk, databehandling, referanser, fortolkning og definisjoner av fagtermer er beskrevet mer utførlig.



Fartøyet Bølgen ble benyttet ved utsett og opptak av målere, samt posisjonering av boblegardin.

1. Innledning og målsetning

For å tilrettelegge for en sikrere og mer effektiv innseiling til Ålesund havn har Kystverket igangsatt prosjektet "Innseiling Ålesund". Gjennom dette prosjektet skal det fjernes flere grunner i havnebassenget i Ålesund (Figur 2). Sprengning og bortføring av steinmasser utføres av det finske selskapet WASA Dredging. I forbindelse med arbeidet ønsker Kystverket å utrede hvordan støy fra sprengninger spres og påvirkes av undervannstopografi / batymetri. Videre ble det også undersøkt hvordan en såkalt boblegardin eller luftgardin kan bidra til å redusere støyens utbredelse. Boblegardinen skapes av et langt PE- rør som plasseres ut på havbunnen. Røret er tilkoblet en kompressor plassert på land som kontinuerlig forsyner røret med trykkluft. Luft som strømmer ut gjennom perforeringer i røret, bestående av 1 m.m. store hull, sørger for en «vegg» av bobler, heretter kalt boblegardin (Figur 1), i vannsøylen. Denne bobleveggen begrenser trykkpulsene fra sprengningen fra å forplante seg videre i sjøen ved at trykkpulsene dempes når den passerer luftboblene (Sivle *et al.* 2019). Boblegardinen i dette forsøket ble levert av NUVA AB. Gjennom utplasseringer av akustiske målesonder både foran og bak boblegardinen var det mulig å måle effekten av denne som avbøtende tiltak for å redusere utbredelse og nivå av støy i vannmassene.

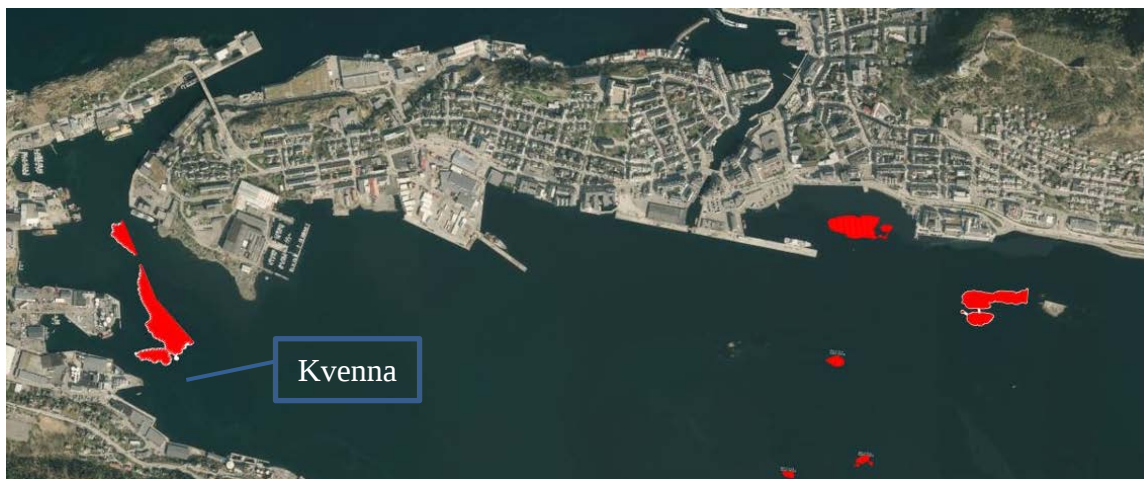


Figur 1 Boblegardin. Boblegardinen består av et perforert rør som forsynes med trykkluft. Luft som slipper ut gjennom perforeringene danner en sammenhengende vegg av bobler i vannsøylen.

Figur: Havforskningsinstituttet.

Alle standard mål på lydnivå inkludert topp-til-topp-verdier (SPL_{pk-pk}), 0-topp-verdier (amplitude, SPL_{0-pk}), 1-sekunds lydeksponeringsnivå (SEL) samt effektivverdier av trykk (SPL_{rms}) er registrert og presentert.

Likeså er kildenivået beregnet. Dette beskriver det akustiske produktet fra en kilde og kan ansees som en egenskap ved kilden selv, uavhengig av akustisk forplantningsvei. Kildenivået kalkuleres ut fra målte lydnivåer på et gitt punkt, hvorpå man beregner seg tilbake til kilden ved hjelp av forplantningsmodell som tar hensyn til variabler som påvirker lydoverføring gjennom vannet, slik som spredning, absorpsjoner og refleksjoner (Robinson *et al.* 2014).



Figur 2 Grunner i Aspevågen som skal gjøres dypere i prosjekt "Innseiling Ålesund"

2. Materiale og metoder

2.1. Overvåkningsprogram

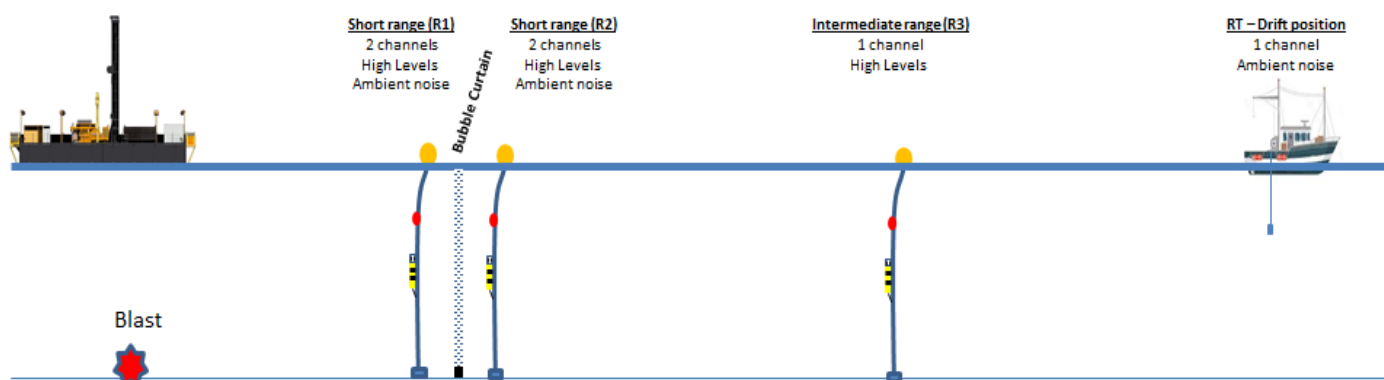
For å evaluere undervannsstøy som følge av undervannssprengninger på grunt vann og effekt av boblegardin, ble det benyttet akustiske undervannssopptakere (hydrofoner) ved fire ulike lokasjoner. Sprengningene ble utført i tilknytning til grunnen Kvenna i Aspevågen, og boblegardin ble satt ut på sjøbunnen rett utenfor Kvennaneset. Opptak av undervannsakustikk ble utført med opptakere plassert fra Kvenna og østover i Aspevågen. I løpet av forsøksperioden ble det gjennomført sju sprengninger med forskjellige ladninger og geografiske konfigurasjoner, men med like mikroforsinkelser mellom detonasjon av dynamittgruppene i hver ladning (25 μ s).

Målestrategien og instrumenteringen ble satt med tanke på kunne måle både de høye nivåer av støy forbundet med eksplosjonene og i tillegg de lavere nivåer av bakgrunnsstøy eller omgivelsesstøy på ulike distanser fra sprengningsstedet (Figur 3). Dette for å:

- estimere den akustiske bølgens forplantning i vannmassene;
- estimere nivå på omgivelsesstøy;
- reduserer eksperimentell risiko;
- estimere boblegardinens effekt som støydempende tiltak.

For å unngå metning av de akustiske instrumenter er det nødvendig å definere distanser og posisjoner med tanke på:

- ladningenes størrelse;
- design av ladningens plassering;
- reduksjon eksperimentell risiko;
- boblegardinens lokalisering og omkringliggende batymetri.

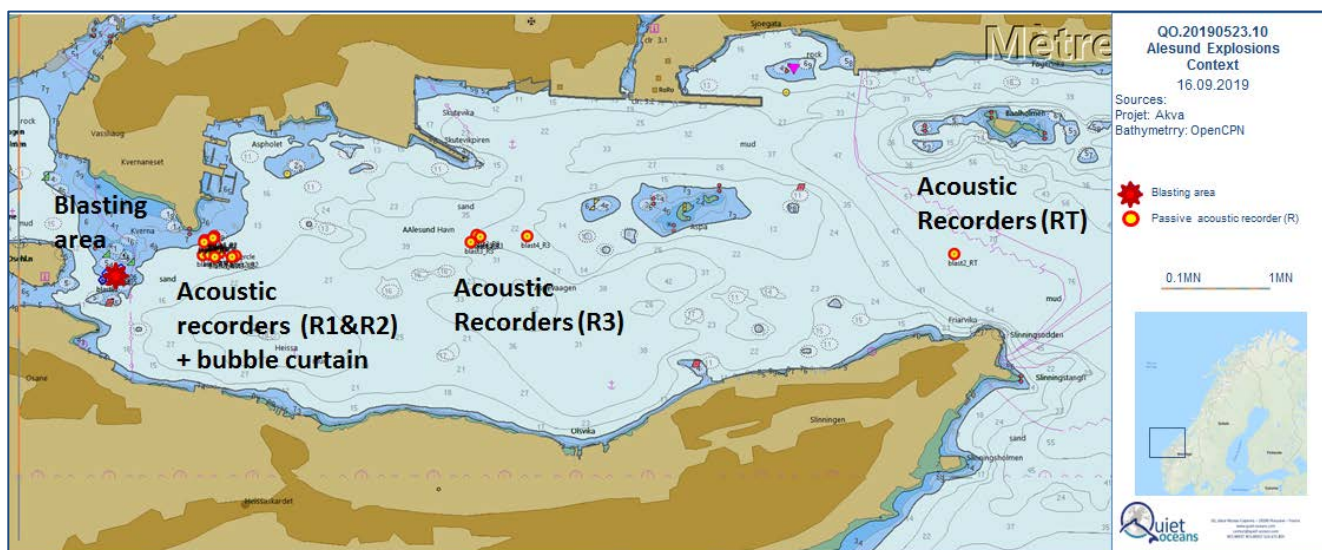


Figur 3. Skisse som viser plassering av målepunkter (R1-3 og RT) i forhold til sprengningsstedet (rød stjerne) og boblegardin (stiplet vertikal linje).

2.2. Plassering av akustiske målere

Ved sprengningene på Kvenna i den vestlige delen av Aspevågen ble det som nevnt benyttet fire akustiske opptakere som ble plassert i området østover i Aspevågen for å analysere den fysiske undervannsstøyen forårsaket av sprengningene (Figur 3). Utvelgelse av lokasjon for hvert av målepunktene ble basert på følgende:

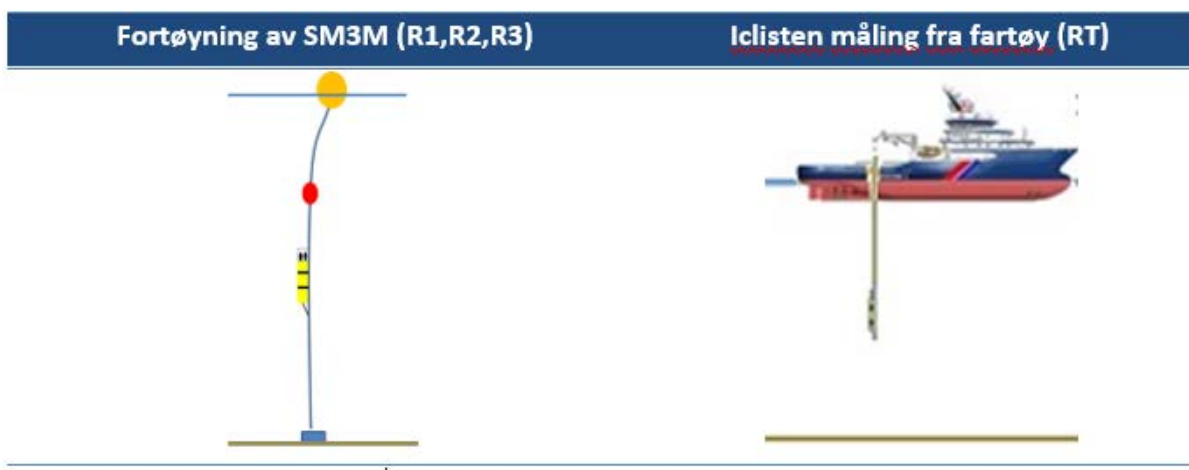
- Lokasjon R1: En første opptaker ble plassert på R1 nær Kvennanesets sørvestligste punkt, ettersom boblegardinen måtte plasseres nær land grunnet tekniske begrensninger. Formålet med dette målepunktet var å evaluere lydnivåer fra sprengningen og muliggjøre sammenligning med den andre opptakeren på R2, plassert rett på den andre siden av boblegardinen. Måleren ble plassert ca. 5 m over havbunnen ved ringformet gardin, og 6 meter over bunnen ved de øvrige målinger.
- Lokasjon R2: En andre opptaker ble plassert på R2, rett bak boblegardinen sett i forhold til sprengningsstedet, altså i «lydskyggen» av gardinen. Denne måleren var viet til å måle den direkte akustiske vei fra sprengning til måler, og dermed kvantifiseringen av boblegardinens lyddempende effekt. Avstanden fra R1 til R2 var ca. 50 meter, med boblegardinen midt mellom. Måleren ble plassert ca. 5 m over havbunnen ved ringformet gardin, og 6 meter over bunnen ved de øvrige målinger.
- Lokasjon R3: En tredje opptaker ble plassert på R3, ca. 1000 meter fra sprengningsstedet, for å måle lydforskjeller lenger ut i vågen. Måleren ble plassert ca. 5 meter over havbunnen ved sprengning D3_S02, og 15 meter over bunnen ved de øvrige sprengninger.
- Lokasjon RT: En fjerde lydmåling ble gjort fra drivende fartøy ved omtrent 2500 meter fra sprengningsstedet, for å kunne overvåke bakgrunnsstøy og støy fra sprengningene i sanntid. Måleren ble plassert 5 meter under havoverflaten ved alle målinger.



Figur 4 Plassering av målere R1-3 og RT i Aspevågen. Rød stjerne indikerer sprengningssted.

Ved forankring av målere ble disse festet i tau som ble knytt direkte fast i et anker, og med en undervanns flottørkule over måler for å holde målerens vertikale posisjon. Fra flottørkulen og opp til blåse var det beregnet ekstra tau for å unngå stramming av tau med påfølgende risiko for tilting av måler. For å unngå unødvendig lydforurensning som kunne påvirke målingene ble

det ikke benyttet kjetting eller unødige sjakler etc. Av samme hensyn ble måling gjort fra drivende fartøy uten maskineri i drift (Figur 4).



Figur 5 Utsettskonfigurasjon for akustiske instrumenter

2.3. Akustisk instrumentering

Den akustiske instrumenteringen som ble benyttet er fire uavhengige systemer, bestående av ulike typer målere (Figur 4) med ulike oppsett for å måle ulike støynivåer (Tabell 1):

- To stk. to-kanals SM3M autonome opptakere satt opp for å måle både omgivelsesstøy og intens støy i forbindelse med sprengning;
- En stk. enkeltkanals autonom opptaker satt opp for å måle intens støy i forbindelse med sprengninger.
- En stk. Iclisten autonom sanntidsmåler satt opp for å måle intens støy på lang avstand, samt omgivelsesstøy.

For ytterligere informasjon om instrumenter, se beskrivelser gitt av Clorennec et.al. (2019).



Figur 6. Iclisten (venstre) og SM3M (høyre) akustiske målere benyttet i studien.

Tabell 1: Minimum- og maksimumsnivå for lydtrykksnivå (SPL) for hver opptaker.

Instrument	Enkeltkanals SM3M	To-kanals SM3M		Enkeltkanals Iclisten
Akustisk måleområde	Høye nivåer	Høye nivåer	Omgivelsesstøy	Omgivelsesstøy
SPL min (dB ref 1µPa)	159	159	83	83
SPL max (dB ref 1µPa)	242	242	166	174
Målerens plassering	R3	R1 og R2		RT

2.4. Sprengningenes oppsett

Før hver sprengning ble det boret hull for plassering av ladningene ned i grunnen. Oppsettet for hver sprengning er satt sammen av et varierende antall hull med systematisk avstand som til sammen utgjør en brønn, hvor det ble plassert en gitt mengde eksplosiver i hvert hull (Tabell 2). Eksplosivene benyttet i forbindelse med denne studien hadde en relativ effektivitetsfaktor ekvivalent til 1,08 Kg TNT.

For hver sprengning ble det benyttet et ulikt antall hull per brønn, og disse er igjen inndelt i flere grupper av hull. Hullene tilhørende en gruppe detoneres samtidig, men mellom hver gruppe ble det lagt inn en såkalt mikroforsinkelse på 25 millisekunder. For hver sprengning ble all informasjon om sprengstoffmengde, antall hull, grupper og lignende systematisert for å muliggjøre en fortolkning av den akustiske signaturen forbundet med hver sprengning. Informasjon om dette er fremstilt av Clorennec *et al.* (2019).

Tabell 2 Hullgrupper og eksplosivmengder for sprengningene i studien

Spr. id	Dag	Tid UTC	Brønn id	Ant. grupper	Mikro-forsink. (ms)	Ant hull	Rad Id	Maks gr.ladn (Kg)		Totalladning (Kg)	
								Ekspl.	TNT-ekv.	Ekspl.	TNT-ekv.
D1_S01	2019/09/03	08:02	39	17	25	34	1 til 10	124	133,9	1 715,3	1 852,5
D1_S02	2019/09/03	17:32	40	12	25	20	1 til 4	74	79,9	630	680,4
D2_S01	2019/09/04	10:25	41	6	25	10	1 til 2	85	91,8	411,6	444,5
D2_S02	2019/09/04	19:02	42	13	25	21	1 til 5	128	138,2	1 082,2	1 168,8
D3_S01	2019/09/05	10:04	43	12	25	20	1 til 4	104	112,3	915,6	988,8
D3_S02	2019/09/05	15:29	44	8	25	20	1 til 2	135	145,8	684,6	739,4

2.5. Etablering av boblegardin

Etter at akustikkmålinger var gjennomført for to sprengninger ble det montert en boblegardin for å undersøke dennes effekt på lydets forplantning i vannmassene. Boblegardin i rettlinjet konfigurasjon (forsidefoto) ble benyttet for 2 av sprengningene, mens gardin i sirkulær konfigurasjon (Figur 6 og Figur 7) ble benyttet ved tre sprengninger (Tabell 3).

For å etablere boblegardin ble det benyttet et 72 meter langt polyetylen-rør hvor det var boret 6 hull pr meter, hvert hull med diameter 1 m.m. Rørets indre og ytre diameter var henholdsvis 60

og 75 mm. Røret ble forsynt med trykkluft (8.0 – 8.7 bar) gjennom en 120 meter lang 2-toms slange.

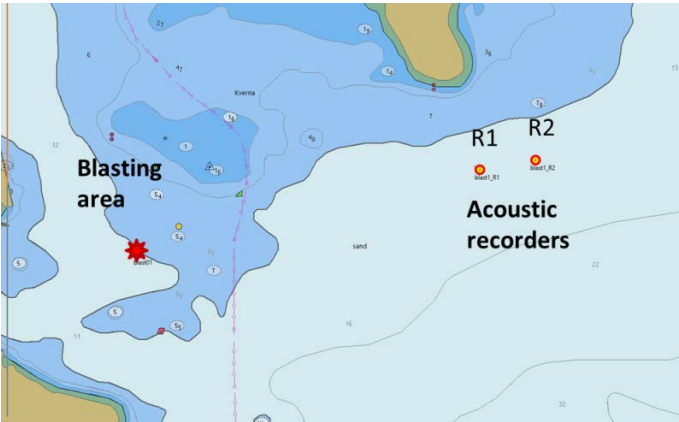
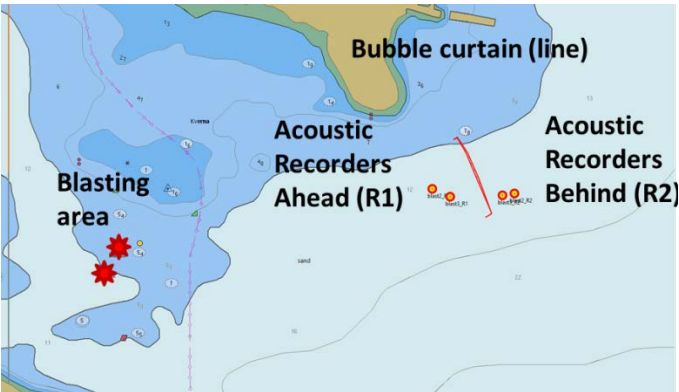
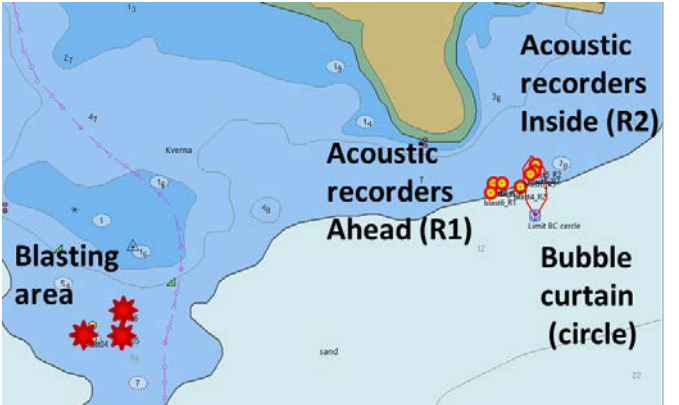


Figur 7 Montering av boblegardin i sirkulær konfigurasjon. Foto: Akvaplan-niva.



Figur 8 Boblegardin i drift i sirkulær konfigurasjon. Foto: Akvaplan-niva.

Tabell 3 Plassering av boblegardin og akustiske opptakere

Sprengnings-id	Boblegardin	Plassering
D1_S01	Av	
D1_S02	På (I linje)	
D2_S01		
D2_S02	På (I sirkel)	
D3_S01		
D3_S02		

3. Resultat og diskusjon

3.1. Registrerte støynivåer

Målte lydnivåer ved hvert målepunkt er gitt i Tabell 4. Tabellen gir for hvert punkt:

- Sprengningens id
- Anvendelse av boblegardin og dennes konfigurasjon. Ved boblegardin satt som linje, står måler R2 plassert bak boblegarden, altså i gardinens «lydskygge». Ved boblegardin i ringformet konfigurasjon står måler R2 inne i ringen.
- Distanse mellom måler og sprengningssted.
- Den totale mengden sprengstoff/eksplosiv.
- Målte verdier: Lydtrykksnivåets topp-til-topp-verdier (SPL_{pk-pk}), 0-topp-verdier (SPL_{0-pk}), effektivverdier av trykk (SPL_{rms}), og lydeksponeringsnivå (SEL).

Opptaker på posisjon R1 var systematisk plassert ca 280 – 300 meter fra sprengningsstedet. Målingene viser stor variasjon mellom lydtrykksverdiene ved ulike sprengningsoppsett. Maksimumsnivået ble oppnådd for sprengning D3_S01 med en SPL_{pk-pk} på 220.4 dB ref 1 μ Pa og en SEL på 189.9 dB ref 1 μ Pa²s. Disse verdiene ble ikke målt ved detonasjon av den største totalladningen på 1 715 Kg, men ved en ladning på 915 Kg. Maksimalt nivå for den største ladningen viste verdier for SPL_{pk-pk} og SEL som var henholdsvis 8.5 og 3.3 dB lavere enn for ladningen med de høyeste målte verdiene.

Sprengning D1_S01 har det høyeste antall hullgrupper med sine 17 grupper, og en maksimal gruppeladning på 124 Kg, mens sprengning D2_S01 har laveste antall grupper med sine 6 grupper, med en maksimal gruppeladning på 85 Kg. Variasjonen i lydnivå mellom disse konfigurasjonene som representerer ekstremitetene er ikke stor: forskjellen i SPL_{pk-pk} er 2.1 dB og forskjellen i SEL er 2 dB.

Tabell 4 Målte lydnivåer ved hvert målepunkt R1-R3 og RT for hver sprengning (spr.) D1_S01 - D3_S02.
 * = dB ref 1μPa ; ** = dB ref 1μPa²s.

Spr.id.	Opptaker	Måle- punkt	Bolbe- gardin	Dist. spr.- målepunkt	Tot. ekspl.- mengde (Kg)	SPL pk-pk* Uvektet	SPL 0-pk* Uvektet	SPL rms* Uvektet	SEL ** Uvektet
D1_S01	ENR-018	R1	Av	281 m	1 715,3	211,9	206,4	186,0	186,6
	ENR-015	R2	Av	326 m	1 715,3	210,0	204,3	188,0	184,2
	ENR-017	R3	Av	1024 m	1 715,3	202,4	196,7	177,9	178,7
	icl1719	RT	Av	-	1 715,3	182,3	177,3	155,9	155,9
D1_S02	ENR-018	R1	Linje	298 m	630,0	214,7	209,0	187,9	187,7
	ENR-015	R2	Linje	368 m	630,0	200,9	196,4	180,7	181,2
	ENR-017	R3	Linje	1026 m	630,0	193,3	187,6	167,6	168,9
	icl1719	RT	Linje	2322 m	630,0	187,3	181,4	166,6	160,5
D2_S01	ENR-018	R1	Linje	300 m	411,6	209,8	203,9	184,3	184,6
	ENR-015	R2	Linje	346 m	411,6	199,8	194,8	179,7	180,5
	ENR-017	R3	Linje	997 m	411,6	193,0	187,4	166,2	168,8
	icl1719	RT	Linje	3240 m	411,6	-	-	-	-
D2_S02	ENR-018	R1	Ring	263 m	1 082,2	213,2	207,7	186,6	185,2
	ENR-015	R2	Ring	278 m	1 082,2	194,4	188,5	175,2	175,5
	ENR-017	R3	Ring	2260 m	1 082,2	202,2	196,5	181,1	177,5
	icl1719	RT	Ring	-	1 082,2	-	-	-	-
D3_S01	ENR-018	R1	Ring	250 m	915,6	220,4	216,3	190,7	189,9
	ENR-015	R2	Ring	273 m	915,6	193,8	188,3	174,5	174,9
	ENR-017	R3	Ring	2187 m	915,6	207,3	201,5	186,1	180,9
	icl1719	RT	Ring	3510 m	915,6	-	-	-	-
D3_S02	ENR-018	R1	Ring	238 m	684,6	217,6	214,1	187,9	187,9
	ENR-015	R2	Ring	267 m	684,6	192,2	186,5	175,0	175,1
	ENR-017	R3	Ring	264 m	684,6	191,7	186,8	173,7	173,9

3.2. Effekt av boblegardin

Boblegardinens støydempende effekt i form av lydspektrum i tredje oktavs band (for definisjoner, se Clorennec *et al.* 2019) er grafisk fremstilt i Figur 9 for de tre tilfeller:

- A : Ingen boblegardin
- B : Boblegardin i rettlinjert konfigurasjon
- C : Boblegardin i sirkulær konfigurasjon

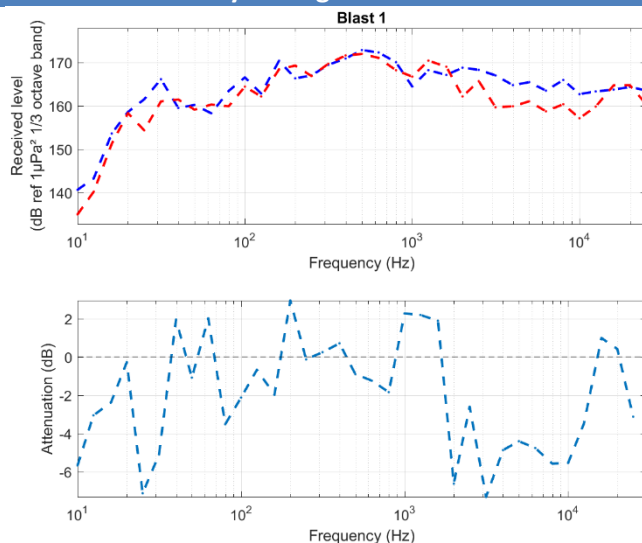
Det første tilfellet (A) viser variabilitet mellom to målinger med ca. 45 meters avstand. Denne variabiliteten som når et maksimum på 7dB og et gjennomsnitt på 2dB kan forklares av bunnforhold og batymetri på hver enkelt lokasjon.

Måleresultatene fra det andre (B) og det tredje (C) oppsettet viser at boblegardin har effekt som støydempende tiltak for begge tilfellene, men at effekten er best når gardinen er satt som en sirkel rundt den akustiske opptakeren. Ved denne konfigurasjonen har den en maksimal effekt på frekvenser nær 600 Hz, hvor den dempende effekten er på ca. 32 dB. Sjøpattedyr kan høre lyder i området fra 7 Hz opptil 180 kHz, mens mennesker kan høre i frekvensområdet fra 20 Hz til 20 kHz (Houser *et al.* 2017). Fisk kan også oppfatte lyd enten gjennom det indre øret eller svømmeblæren (Popper *et al.* 2014). Fisk kan detektere lyd innenfor frekvensområdet fra 10 Hz og opp til over 20 kHz, men i hvilket frekvensområde fisken kan oppfatte lyd varierer

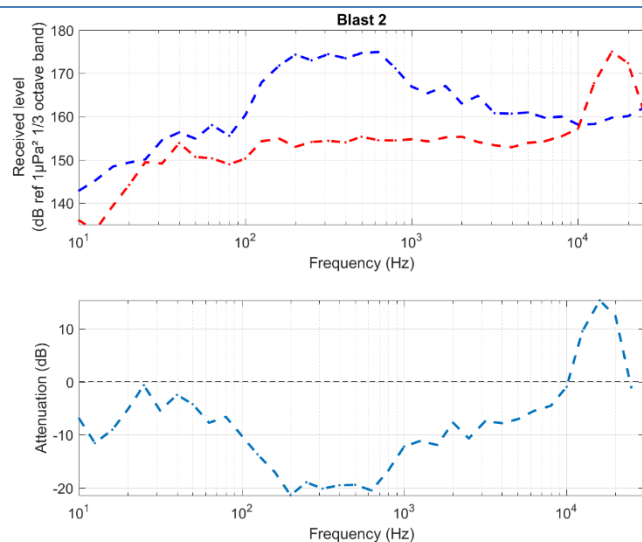
mellom arter (Mann et al. 1997, 2001). De fleste arter som for eksempel torsk oppfatter lyd fra under hundre Hz til noen tusen Hz. For frekvenser som er lavere enn 40 Hz virker boblegardin å ha liten eller ingen effekt, både ved rettlinjet og sirkulær konfigurasjon. Ved gardinenes maksimale effekt, ved frekvenser rundt og noe over 400 Hz, er forskjellen mellom de to konfigurasjoner ca. 12 dB. Årsaken til at boblegardin satt i rettlinjet konfigurasjon er mindre effektiv er mest sannsynlig at akustikkrefleksjoner fra land passerer forbi boblegardinen. Ut fra denne antagelsen er det sannsynlig at det vil være mindre forskjell i den dempende effekten mellom boblegardin i ring og i linje dersom de benyttes i åpnere farvann, hvor det vil være mindre refleksjoner fra kystlinjen. Dette vil dog bero på områdets batymetri, og må eventuelt undersøkes nærmere før det kan bekreftes. Resultater fra målingene med boblegardin i sirkulær konfigurasjon sammenfalt godt med lignende resultater rapportert tidligere.

Øvrige informasjon om tallgrunnlaget og detaljer rundt effekt av boblegardin er gitt av Clorennec *et al.* 2019.

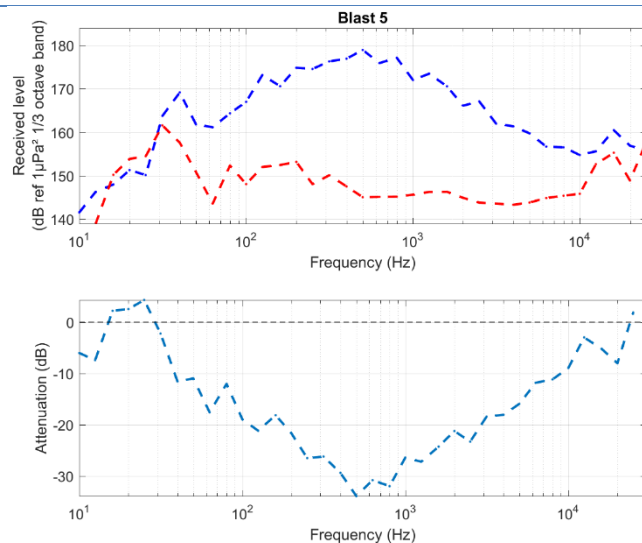
A:
Uten boblegardin



B:
**Med boblegardin i
rett linje**



C:
**Med boblegardin i
sirkel**



Figur 9: Støynivå (øverste graf) og boblegardinens støydempende effekt (nederste graf) for de tre tilfeller A, B og C. Blå linje: Målepunkt R1, foran boblegardin; rød linje: målepunkt R2, bak boblegardin. Merk forskjellige verdier langs y-aksene.

3.3. Estimert kildenivå

Målte verdier med kort avstand til sprengningsstedet (målepunkt R1) ble benyttet for å estimere lydets kildenivå ved sprengningen. Dette ble gjort ved beregning av lydets overføringstap med ligningen $K \cdot \log_{10}(r)$ hvor $K=17$ og r er avstanden fra sprengningsstedet. Under denne forutsetningen gir sprengning D3_S01 det høyeste kildenivået med 261,1 dB ref 1 μ Pa @1m SPL pk-pk og SPL_{rms} på 230.6 dB ref 1 μ Pa@1m.

For forbedret nøyaktighet kunne det vært benyttet en forplantningsmodell som estimerer overføringstapet for hver frekvens. Dette forutsetter innhenting av relevante data som batymetri og bunnforhold m.m.

3.4. Sammenligning med sprengninger i Båtsfjord

I forbindelse med sprengningsarbeider i Båtsfjord ble det i perioden 24. til 26. April 2018 gjennomført en studie av undervannsakustikk (Aune *et al.* 2018). I denne perioden ble det utført fem undervannssprengninger med ulike ladninger i størrelsen 56,7 til 529 Kg dynamitt i ulike konfigurasjoner (Tabell 5). Det ble ikke benyttet boblegardin eller noen annen form for støydempende tiltak. Sprengningsmediet var klassisk dynamitt med relativ effektivitetsfaktor 1,25.

Under studien i Båtsfjord var de maksimale kildenivåene 267,7 dB ref 1 μ Pa SPL@1m topp-til-topp og 247,7 dB ref 1 μ Pa@1m SPL_{rms}. Med andre ord viste målingene i Ålesund (se kap 3.3) en reduksjon i verdiene av SPL topp-til-topp og SEL på henholdsvis 6,6 og 17,1 dB til tross for betraktelige økninger i de maksimale størrelsene på både ladning per gruppe og total ladning per sprengning. Årsaken til denne reduksjonen i kildenivå er ikke undersøkt nærmere, men har sannsynligvis sammenheng med vanndybde og bunnsedimentets beskaffenhet. Videre er slike forskjeller også relatert til bruk av mikroforsinkelser mellom hver ladning, som har stor innvirkning på lydkildenivået (Aune m.fl., 2018).

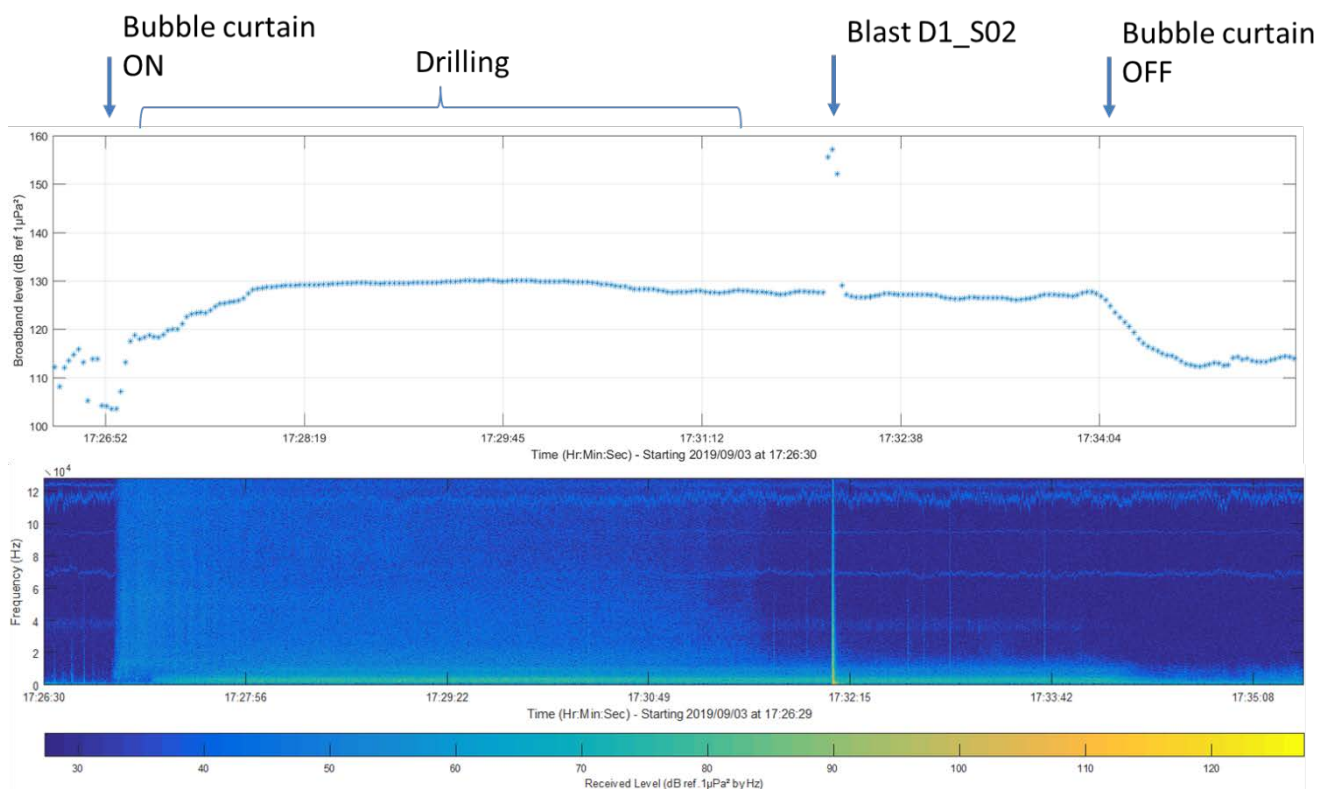
Undersøkelsen i Båtsfjord viste at støy fra sprengning gjennomgikk en sterk demping og brytning som følge fjordens topografi. For eksempel var støynivået ved merdene med torsk, som ligger delvis i le av en halvøy, langt lavere enn hva den korte avstanden fra sprengningspunktet skulle tilsi (35 til 40 dB under det som måles langs en direkte bane i samme avstand fra sprengningspunktet). I tillegg ble det ved merdene observert en betydelig større tidsmessig spredning av støy fra sprengningene enn på lokasjoner langs en direkte bane fra sprengningspunktet, som følge av både refleksjoner langs kysten og de ulike egenskapene til bunnsedimentene.

Tabell 5 Sprengninger gjennomført i Båtsfjord i 2018.

Spr. id	Dag	Tids- punkt	Brønn id	Ant grupper	Mikro- fors. (ms)	Ant hull	Rad id	Maks gruppeladning (Kg)		Totalladning (Kg)	
								Ekspl.	TNT-ekv.	Ekspl.	TNT-ekv.
D2_S01	2018/04/24	08:34	1	2	50	4	A	35,7	44,6	56,7	70,9
D2_S02	2018/04/24	12:34	1	2	50	5	B	44,1	55,1	75,6	94,5
D2_S03	2018/04/24	15:44	1	2	50	6	C	58,8	73,5	109,2	136,5
D3_S01	2018/04/25	19:33	2	15	25	29	1 to 5	44,1	55,1	529,2	661,5
D4_S01	2018/04/26	14:56	3	5	25	13	1 to 6	35,7	44,6	144,9	181,1

3.5. Støy forårsaket av boblegardin

Kontinuerlige akustiske målinger ble gjennomført på kort avstand fra boblegardinen både før og etter at denne ble satt i drift. Måler på R1 ble plassert ca. 40 meter fra boblegardin når denne var satt i rettlinjet konfigurasjon. Omgivelsesstøy før boblegardin ble satt i drift lå på ca 112 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$. Noen minutter etter start av boblegardin hadde støynivået økt med ca 18 dB. Det maksimale lydtrykksnivået lå deretter stabilt på rundt 130 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$, men sank med omtrent 3dB et par minutter for sprengning, noe som trolig skyldes at maskineri /utsyr som gravemaskin og slepebåt ble stoppet (Figur 9).



Figur 10 Akustisk måling ved R1 før, under og etter drift av boblegardinen i rettlinjet konfigurasjon.

3.6. Omgivelsesstøy

Bortsett fra støy forbundet med boring og sprengning ble omgivelsesstøy målt ved lokasjon RT ytterst (lengst øst) i Aspevågen. Resultatene viser et støynivå som ligger mellom 99 og 142 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ med en medianverdi på 122 dB ref. $1\mu\text{Pa}^2$.

Til sammenligning ligger tidligere rapporterte medianverdier for omgivelsesstøy for ulike områder på:

- Offshore sjøområder: 100 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$;
- Kystområder: 105 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$;
- Stor havn: 100 to 105 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$.

Omgivelsesstøyen i Aspevågen ligger i gjennomsnitt 15 til 20 dB høyere enn i andre havneområder sammenlignbare med en fjord og 2 dB høyere enn i Båtsfjord. Faktorer som påvirker dette er sannsynligvis kombinasjonen av at det til enhver tid var et fartøy under drift for maskin i nærheten, og at vågen har bunnforhold med høyere refleksjonsegenskaper enn i de andre områder benyttet som referanse.

4. Konklusjon og anbefalinger

Anvendelse av boblegardin gav en betydelig reduksjon i støy sammenlignet med fravær av boblegardin. Høyeste effekt av boblegardin (32 dB ved frekvenser nær 600 Hz) ble målt i de tilfeller da boblegardin plassert som en ring rundt målesonden. En reduksjon av støy i dette frekvensområdet vil kunne være med på å redusere effektene på arter som blant annet torsk, da både torsk og andre fiskearter oppfatter lyd i dette frekvensområdet.

Basert på målte lydnivåer og effekt av boblegardin anbefales følgende for ulike målsetninger.

For å minimere støynivå:

- Om mulig, benytt ladninger med minst mulig eksplosivmengde. Dette da reduksjon av selve støykilden er ansett som et viktig tiltak for å begrense støy i havet (Sivle m.fl., 2019). Dette må imidlertid sees i sammenheng med lokalitetens beskaffenhet med tanke på topografi og bunnforhold, da disse parametere viser stor innvirkning på støynivået.
- Del opp totalladningen i flere detonasjonsgrupper med mikrosforsinkelser (25 ms eller mer) mellom hver detonasjon. Dette må imidlertid sees opp mot de sprengningsfaglige vurderinger knyttet til hvilke krav som stilles til ladningene.
- Ved oppstart av sprengningsarbeid kan det om mulig utføres innledende målinger for å kvantifisere de ulike parametere med innvirkning på støyens kildenivå og spredning, slik at dette kan hensyntas i det videre arbeidet.
- Benytt støydempende tiltak som boblegardin (e.l.) plassert rundt sprengningsstedet for å unngå spredning av støy, eller benytt boblegardin i linje for å beskytte et spesifikt område.

For å redusere skadepotensiale eller forstyrrelser på fisk eller marine pattedyr:

- Utfør estimering av akustisk påvirkning for å avgjøre hvorvidt det er forbundet risiko med den planlagte aktiviteten, og kvantifiser risikoen.
- Benytt en såkalt *soft-start* eller *ramp-up* prosedyre hvor støynivået gradvis økes opp til maksimalt lydnivå. Hensikten er å sende en advarsel til dyr i området og gi dem tid til å søke bort fra kilden. Dette har vist seg å være effektivt med tanke på å skremme bort pattedyr, men mindre effektivt for fisk (Sivle *et al.* 2019).
- Gjennomfør sanntids passiv akustisk og visuell overvåkning i minst 30 minutter etter støy for å undersøke for eventuell unormal aktivitet hos marint liv.

Litteratur

Aune, M., Clorennec, D., Chopret, J., Billand, P., Bois, C., Folegot, T. og G. Christensen. 2018. Vurderinger av støy i forbindelse med undervannsekspløsjoner i Båtsfjord, april 2018. Akvupalan-niva rapport 60306.01.

D. Clorennec, P. Billand, C. Bois and T. Folegot (2019). Characterisation of the efficiency of a bubble curtain in the context of the assessment of underwater explosions in Ålesund Technical Report QO.20190523.10.RAP.001.014A

Sivle, L.D., Forland, T.N. Nyqvist, D., de Jong, K. og Grimsbø, E. (2019). Havforskningsinstituttets rådgivning for menneskeskapt støy i havet: seismikk, elektromagnetiske undersøkelser og undersjøiske sprengninger. Rapport fra havforskningen 2019-10.

Robinson, S.P., Lepper, P. A. and Hazelwood, R.A. Good Practice Guide for Underwater Noise Measurement, National Measurement Office, Marine Scotland, The Crown Estate, NPL. Good Practice Guide No. 133, ISSN: 1368-6550, 2014.

Litteraturhenvisninger gitt av Clorennec et.al. (2019) er ikke gjentatt i denne rapporten.



Characterisation of the efficiency of a bubble curtain in the context of the assessment of underwater explosions in Ålesund

Technical Report

Identification

Document reference	QO.20190523.10.RAP.001.05A
Main contractor	Kystverket
Customer	Akvaplan-niva
Contract number	
Costumer contact	Guttorm Christensen, guttorm.christensen@akvaplan.niva.no

PROJET	DOC	CHRONO	VER	IND	CLIENT	ACRO	DATE	TYPE	CLASS
QO.20190523.10	RAP	001	05	A	AKVA	ÅLESUND	16.10.2019	PROD	DR



Document history

Version	Ind.	Author	Validation	Date	Released	Description
01	A	CRC, BLD, CBS	FLT	24.09.2019	24.09.2019	Initial version
02	A	C. Bois	FLT	02.10.2019	02.10.2019	Insertion of Ambient noise map of Ålesund area in section III.7.
03	A	C. Bois	FLT	07.10.2019	07.10.2019	Details on the bubble curtain
04	A	C. Bois	FLT	16.10.2019	16.10.2019	E-mails T. H. Skålsvik 8 & 14.10.19
05	A	C. Bois	FLT	29.11.2019	29.11.2019	Communications with T. H. Skålsvik end of November 2019

Citation

D. Clorennec, P. Billand, C. Bois and T. Folegot (2019), Characterisation of the efficiency of a bubble curtain in the context of the assessment of underwater explosions in Ålesund, Technical Report, Quiet-Oceans, QO.20190523.10.RAP.001.05A



525, avenue Alexis de Rochon – 29280 Plouzané – France

www.quiet-oceans.com

contact@quiet-oceans.com

RCS BREST 524 673 803

Table of content

Table of content	3
Glossary	4
Reference documents	7
List of Figures.....	8
List of Tables.....	8
Executive summary.....	9
Chapter I. Context and objectives	10
I.1. Context of the study	10
I.2. Objectives and Scope of Work.....	10
I.3. Definition of the metrics used in the report.....	10
I.4. Source level.....	11
Chapter II. Description of the dataset available	12
II.1. Acoustic monitoring strategy.....	12
II.2. Acoustic deployments.....	12
II.3. Periods of recording.....	17
II.4. Support vessel for the measurement	19
II.5. Blasting information	19
II.6. Bubble curtain information	24
II.7. Acoustic instrumentation deployed	25
II.8. Deployment setup	27
Chapter III. Physical analysis of blasting	28
III.1. Objective	28
III.2. Received levels.....	28
III.3. Efficiency of the bubble curtain	33
III.4. Estimation of the source levels.....	36
III.5. Comparison with Båtsfjord blasting	36
III.6. Noise induced by bubble curtain	37
III.7. Ambient noise.....	38
Chapter IV. Recommendations.....	39
Chapter V. Bibliography.....	40

Glossary

This section defines the technical terms used in the report.

Ambient noise

The part of the total noise background observed with a non-directional hydrophone, which is not due to the hydrophone and its mooring (self-noise), or to some identifiable localized source of noise.

Environmental background noise not of direct interest during a measurement or observation; may be from sources near or far, distributed and discrete, but excludes sounds produced by measurement equipment, such as cable flutter.

For a specified signal, all sound in the absence of that signal except that resulting from the deployment, operation or recovery of the recording equipment and its associated platform.

Ambient noise is the sum of natural noise and maritime traffic noise (to differentiate it from ambient natural noise produced by environmental conditions)

Bandwidth

The frequency range within a recording system is sensitive. The frequency range (in Hertz - Hz) is obtained by subtracting the lower from the upper cut-off frequency.

BDT

Behaviour Disturbance Threshold

Broadband level

The sound pressure level obtained over a wide frequency range with defined bandwidth.

Centre frequency

The geometric mean of the lower and upper cut-off frequencies. Please note that the intensities should be averaged before converted into decibels.

Continuous sound

Imprecise term meaning a sound for which the mean square sound pressure is approximately independent of averaging time.

A sound with no clear definable beginning or end, with no bandwidth restrictions, and a large time bandwidth produced when the frequency range is broadband. Continuous sounds have finite power, but may have infinite or at least undefined energy.

Decibel (dB)

Decibel (dB) is a measure of the level of acoustic pressure. It quantifies the perception of sound level. It is a logarithmic scale that describes a multiple of a reference value. As the sound volume doubles, the value in decibel increases by 3 dB. In marine acoustics, the reference level of decibel is 1 μ Pa (micro Pascal).

Using decibel is the standard in marine acoustics. The reason is that it can handle both with low and high values thanks to its logarithmic scale. The Pascal unit alone cannot easily represent the variation of sound levels from low to high and is therefore not used in marine acoustics.

Footprint (Ocean Noise Footprint)

The ocean noise footprint is the representation of noise levels due to maritime activities that affect a portion of sea. It includes the description of the noise sources, their distribution, and the propagation of sound in the ocean environment. It can be represented as a noise map [1] [2] .

ICI

ICI (Inter-Click Interval) refers to the time interval (in millisecond) between two consecutive clicks (impulsive signals) usually emitted by marine mammals.

LAT

Lowest Astronomical Tide, used as reference on bathymetric charts.

Natural ambient noise

Ambient noise in the absence of any contribution from anthropogenic sources.

Noise

Noise is in direct contrast to signals, but is always depending on receiver and context. What one receiver considers noise may be a signal to another. Even for the same receiver the exact same sound can be either signal or noise, depending on context.

“Noise” can be used in a more restrictive meaning where adverse effects of sound are specifically described or when referring to specific technical distinctions such as “masking noise” or “ambient noise”.

Percentile level

A percentile corresponds to the proportion of time and space for which the noise exceeds a given level. This concept is widespread even in everyday life. For example, the average income of the top 10% of income earners, or the “income threshold corresponding to the 90th or to the 95th percentile”, i.e. the income earned by the poorest individual among the top 10% or top 5% richest individuals. Meanwhile, the 50th percentile corresponds to the median salary. For underwater noise, the percentile, or exceedance level, is meant to describe the noise level occurring at least half of the time.

In the context of underwater noise, it is defined as the level L_N that is exceeded N percent of the time interval considered. For example, L_1 is the level that is exceeded 1% of the time.

The L_1 is a measure for the maximum level. It is a more robust estimate than taking just the maximum observed level, since the latter may be an outlier caused by a single event, such as rattling of the anchoring system or other types of self-noise. Accordingly, L_{99} and L_{95} are used to describe the minimum level. L_{50} is the median level.

PTS

Permanent Threshold Shift

Reference pressure

1 μ Pa in underwater acoustics.

Sound

The term “sound” is used to refer to the acoustic energy radiated from a vibrating object, with no particular reference for its function or potential effect. “Sounds” include both meaningful signals and “noise” (defined below), which may have either no particular impact or a range of adverse effects.

Sound pressure

Instantaneous pressure at time t.

$p(t)$ in [Pa].

Sound Exposure

The integral of the square of the sound pressure over a stated time interval or event.

E in [μ Pa²s], $E = \int_0^T p(t)^2 dt$, with T being the time period of the event of interest.

Sound Pressure Level

SPL in [dB re 1 µPa]

$$SPL = 10 \cdot \log_{10} \frac{1/T \int_0^T p(t)^2 dt}{p_0^2} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{p_{rms}}{p_0} \right)^2 = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{p_{rms}}{p_0} \right)$$

With T = integration time.

Sound Exposure Level

SEL in [dB re 1 µPa²s]

$$SEL = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{E}{p_0^2 T_0} \right) = SPL + 10 \log_{10}(T)$$

When the reference time T_0 is set to 1 s, the notation is 1sec-SEL or SEL.

When the T_0 is the time period of the event of interest in seconds, the notation is Tsec-SEL.

Third-octave frequency band

A frequency band with one third of an octave bandwidth. One octave is a doubling of frequency, whereas one third of an octave is a frequency ratio of $2^{1/3}$ (≈ 1.26) between the highest and the lowest. [3] [4] .

TTS

Temporary Threshold Shift

T_{90}

For pulsed sound (e.g. airguns, pile driving, explosive), the pulse length $T_{90\%}$ is taken as the time between the 5% and the 95% points on the cumulative energy curve. $SPL_{rms90\%}$ is computed by integrating $p(t)^2$ from $T_{5\%}$ to $T_{95\%}$

Reference documents

- [1] QO.20190523.10.MEM.003.01A.AKVA.Ålesund.Coordination
- [2] QO.20190523.10.MEM.002.01A.AKVA.Ålesund.protocol
- [3] Aune, M.; Clorennec, D.; Chompret, J.; Billand, P.; Bois, C.; Folegot, T.; Christensen, G.N. (2018), Vurdering av støy i forbindelse med undervannsekspløsjoner i Båtsfjord, april 2018, Rapport for Kystverket, Akvaplan niva, Tromsø

List of Figures

Figure 1: Measurement strategy	12
Figure 2: Context of the experiment.	13
Figure 3: Support vessel used for the experiment.	19
Figure 4: Schematic vertical view of the blasting location	20
Figure 5: Schematic representation of each well (red stars correspond to holes actually blasted)	20
Figure 6: Bubble curtain in line configuration in the foreground and blast location (Source: Kystverket)	24
Figure 7: Iclisten (left) and SM3M (right) recording systems.	25
Figure 8: Deployment configuration for acoustic recorders	27
Figure 9: Temporal signature in μPa , significant duration in sec and power spectral density in dB ref 1 $\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ at 300m from blasting area: without (left) and with (right) bubble curtain effect.	30
Figure 10: Spectrum with (red, R2) and without (blue, R1) bubble curtain (top) and attenuation induced by bubble curtain (down)	34
Figure 11: Synthesis of efficiency of bubble curtain and comparison with mitigation literature	35
Figure 12: Broadband level and spectrogram before, during and after bubble curtain implementation (recorder R1, bubble curtain in line configuration)	37
Figure 13: Ambient noise map of the area of Ålesund. Median statistical noise for Week 2019/36.	38

List of Tables

Table 1: Blast terminology and geographical context	14
Table 2: Blasting D1_S01 and acoustic recorders locations	15
Table 3: Blasting D1_S02 and acoustic recorders locations	15
Table 4: Blasting D2_S01 and acoustic recorders locations	15
Table 5: Blasting D2_S02 and acoustic recorders locations	15
Table 6: Blasting D3_S01 and acoustic recorders locations	16
Table 7: Blasting D3_S02 and acoustic recorders locations	16
Table 8: Exploitable recording times	17
Table 9: General information on each blasting	21
Table 10: Format to describe the information for each hole	21
Table 11: Minimum and maximum range for sound pressure levels (SPL) for each recorder	25
Table 12: Technical characteristics of the SM3M recorder and HTI SPL omnidirectional hydrophone (for area "high levels" recorder)	26
Table 13: Technical characteristics of the SM3M recorder and HTI High SPL omnidirectional hydrophone (for area "high levels" recorder and ambient noise levels)	26
Table 14: Technical characteristics of the Iclisten omnidirectional hydrophone	27
Table 15: Received acoustics levels for each explosion	29
Table 16: Decrease of noise level induced by the bubble curtain	33
Table 17: General information on each blasting in Båtsfjord area (April 2018)	36

Executive summary

Underwater acoustic measurements were carried out in Ålesund from 03 to 05 September 2019 during dynamite-type explosive blasting operations as part of a future expansion of the mooring area.

During this period, six buried blasting operations of different loads (from 411 to 1,715 kg of dynamite) were made in different configurations. During these operations, a bubble curtain was deployed at 300m from the blast site in order to evaluate the efficiency for this mitigation technique.

Four autonomous acoustic recorders were deployed at various locations in the bay, monitoring sound at various distances ranging from 300m to 2,500m from the blast site. The acoustic systems deployed were designed to be able to record both the very low levels of ambient noise and the very high levels from the explosions.

The measurement results show that the peak-to-peak values of the sound pressure (SPL_{pk-pk}) reached a maximum of 220.4 dB ref 1 μ Pa and a maximum sound exposure level (SEL) of 189.9 dB ref 1 μ Pa²s at a distance of 300 from the blasting position (total charge of 915 kg). For the maximum total charge (1,715kg), a decrease of 8.5 and 3.3 dB respectively on SPL_{pk-pk} and SEL was observed on received levels at same location. The number of groups, the maximal charge by group and micro-delay¹ seems to be the most important factors. The sound exposure level, which represents a measurement of the energy of the blasting, shows small variation between each blast (± 2 dB). This difference should be explained by the local bathymetrical and geographical configuration, the way explosive charges have been disposed, the charge unit and the duration of micro-delays between blasts. Thus, the bathymetric context, the distribution and the configuration of the unitary charges are significant parameters and the mere value of the total charge of the explosion is not enough to predict the sound levels in the marine environment. By geometrical inversion, the maximum source level is estimated to 261.1 dB ref 1 μ Pa @1m $SPL_{peak-peak}$ and SPL_{rms} of 230.6 dB ref 1 μ Pa@1m.

Measurements also allow to quantify the efficiency of the bubble curtain thanks to a well thought-out acoustic monitoring strategy. As expected, results show a best efficiency when the bubble curtain was deployed in circle because all coastline reflections were attenuated by the bubble curtain. In the case of a line configuration, the efficiency of the bubble curtain is degraded by 12 dB for frequencies greater than 400 Hz. With a circle deployment, the bubble curtain appears effective for frequencies higher than 40 Hz. The efficiency achieved 32dB in maximum for frequencies close to 600 Hz. The bubble curtain gave acoustic attenuation higher than 20 dB for frequencies between 100Hz and 3 kHz. The attenuation values observed during these experiments are stable according to the blasts and conform to the values of literature.

¹ Micro-delay is an important factor for the SPL_{pk-pk} noise level. In this project, micro-delays were always set to the same duration for all blasts.

Chapter I. Context and objectives

I.1. Context of the study

Kystverket requested to remove bedrocks in Ålesund to increase sailing depth. Explosives have been used for this purpose. Akvaplan-niva has requested the expertise of Quiet-Oceans to perform measurements and associated analysis of underwater noise and pressure related to a series of representative blasting at different distances from the explosion point. During blasting operations, a bubble curtain was deployed by NUVA 300m from blast location. Adaptive deployments of acoustic systems therefore make it possible to evaluate the effectiveness of this attenuation device.

I.2. Objectives and Scope of Work

The work done in the framework of this project has been divided in four phases:

- Drafting of the monitoring program and detailed protocol, including the selection of the most suitable equipment and positions that enable to gather pertinent data, and an operational protocol to ensure that measurement is made right from the first time as explosions would not be made again;
- Field measurements in September 2019 in cooperation with Kystverket, Akvaplan-niva, Wasa Dredging and NUVA;
- Analysis of underwater acoustic sounds produced by blasting operations;
- Analysis of underwater acoustic efficiencies of a bubble curtain.

I.3. Definition of the metrics used in the report

The metrics that will be calculated from the received signal for all available data during blasting are:

- 1- Peak-to-peak Sound Pressure Levels (broadband);
- 2- 0-to-peak Sound Pressure Levels (broadband);
- 3- 1-second Sound Exposure Levels;
- 4- RMS Sound Pressure Levels.

I.3.1. Peak-to-peak levels

The peak sound pressure is the maximum sound pressure during a stated time interval. A peak sound pressure may arise from a positive or negative sound pressure. The unit is the pascal (Pa). This quantity is typically used as a metric for a pulsed waveform, such as airgun sources.

The calculation of peak-to-peak pressure levels used in this study is defined as follows:

$$SPL_{pp} = 20 \log_{10}(((\max(p(t)) - \min(p(t))))/p_0)$$

over a short period (typically 0.5 s) in dB ref. 1μPa, and where $p(t)$ is a signal in μPa.

$p_0 = 1\mu\text{Pa}$ is the reference sound pressure.

I.3.2. 0-peak levels

The 0-peak sound pressure is the maximum sound pressure during a stated time interval. A 0-peak sound pressure may arise from a positive or negative sound pressure. The unit is the pascal (Pa). This quantity is typically used as a metric for a pulsed waveform, such as impulsive sources.

The calculation of 0-peak pressure levels used in this study is defined as follows:

$$SPL_{pp} = 20 \log_{10}((\max(|p(t)|))/p_0)$$

over a short period (typically 0.5 s) in dB ref. 1μPa, and where $p(t)$ is a signal in μPa.

$p_0 = 1\mu\text{Pa}$ is the reference sound pressure.

I.3.3. 1-second Sound Exposure Levels

The sound exposure level is the integral of the square of the sound pressure over a stated time interval or event (such as an acoustic pulse) between a starting time t_1 and an end time t_2 . The time difference between t_1 and t_2 is equal to 1 second. Sound Exposure Levels are expressed in dB re $1\mu\text{Pa}^2\text{s}$. Sound Exposure levels are expressed as broadband levels, third-octave levels according to [4], $1/10^{\text{th}}$ octave levels. The calculation of 1s-SEL (or SEL) levels used in this study is defined as follows:

$$\text{SEL} = 10 \log_{10} \left(\int_0^T p(t)^2 / p_0^2 dt \right)$$

Expressed in dB ref $1\mu\text{Pa}^2\text{s}$ where T is the time integration equal to 1 second.

$p_0 = 1\mu\text{Pa}$ is the reference sound pressure.

I.3.4. RMS Sound Pressure Levels

The root mean square sound pressure is the square root of the mean square pressure of the received signal, where the mean square pressure is the time integral of squared sound pressure over a specified time interval T divided by the duration of the same time interval. The RMS sound pressure is calculated by first squaring the values of sound pressure, averaging over the specified time interval, and then taking the square root:

$$\text{SPL}_{\text{rms}} = 20 \log_{10} \left(\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p(t)^2 / p_0^2 dt} \right)$$

The root mean square sound pressure is defined as broadband levels, third-octave levels according to [4], $1/10^{\text{th}}$ octave levels, and is expressed in dB ref $1\mu\text{Pa}^2$.

$p_0 = 1\mu\text{Pa}$ is the reference sound pressure.

I.4. Source level

Source Levels are equal to twenty times the decimal logarithm of the product of the far-field sound pressure and the distance from the source in a specified direction. Its unit is the dB re $1\mu\text{Pa} \cdot @1\text{m}$ (understood as dB re $1\mu\text{Pa}$ referred to 1m).

The source level is a measure of the acoustic output of a source, and may be considered as a characteristic property of the source itself, independent of the propagation path from source to receiver position.

The Source Levels are defined as broadband levels or third-octave levels according to [4], $1/10^{\text{th}}$ octave levels.

Chapter II. Description of the dataset available

In order to evaluate the underwater noise produced by shallow water blasting operations and bubble curtain efficiency, four underwater acoustic recorders were deployed at different locations in Ålesund bay during three days (03 to 05 September 2019). During this period, six explosive operations were conducted with different charges, same micro-delays, and different geographical configurations.

II.1. Acoustic monitoring strategy

The measurement strategy is illustrated in Figure 1. It consists in making measurements with instrumentation designed for measuring high levels and lower levels (for ambient noise) at several distances in order to:

- assess the propagation of the acoustic wave;
- assess ambient noise levels;
- reduce experimental risk;
- estimate the efficiency of bubble curtain.

Distances and positions need to be defined according to:

- the charges used for the explosions;
- how the charges are designed (confined or unconfined);
- Bubble curtain location and bathymetry;

in order to avoid the risk of saturation of the acoustic instruments.

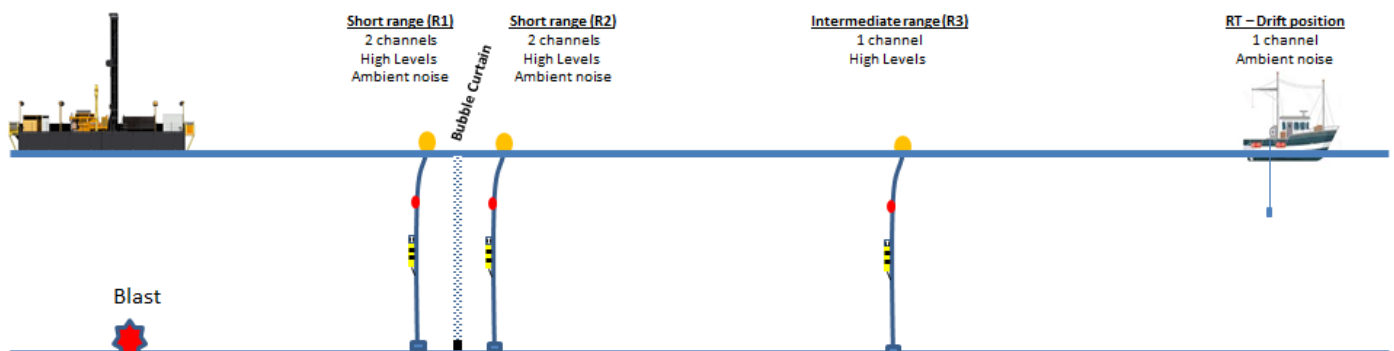


Figure 1: Measurement strategy

II.2. Acoustic deployments

From 03 to 05 September 2019, a set of blasting operations were conducted in the west part of the harbour. During these operations, four acoustic recorders were deployed, three at fixed positions and one at a drifting remote position, in order to analyse the physical underwater noise produced by this anthropogenic activity.

The setup of the monitoring is illustrated in Figure 2, and exact coordinates are given in Table 2.

- A first recorder is placed at R1 location close to Kvennaneset's most South West point since the bubble curtain had to be placed at a short distance from the coastline for technical constraints. The objective of this measurement point is to assess sound levels from blasting and allow comparison with the other recorder placed behind the bubble curtain.
- A second recorder is placed at R2 location close to R1 location. This recorder is devoted to the measurement of the direct acoustic path and the efficiency of bubble curtain attenuation. The distance between R1 and R2 locations is about 50m.

- A third recorder is placed at R3 location (around 1,000m) in order to measure sound level differences further out in the bay.
- A fourth recorder is made from a drifting support vessel at RT location, around 2,500m from the blasting area in the direct path in order to capture both the ambient noise levels and the blasting signature at large distance.

Figure 2: Context of the experiment.

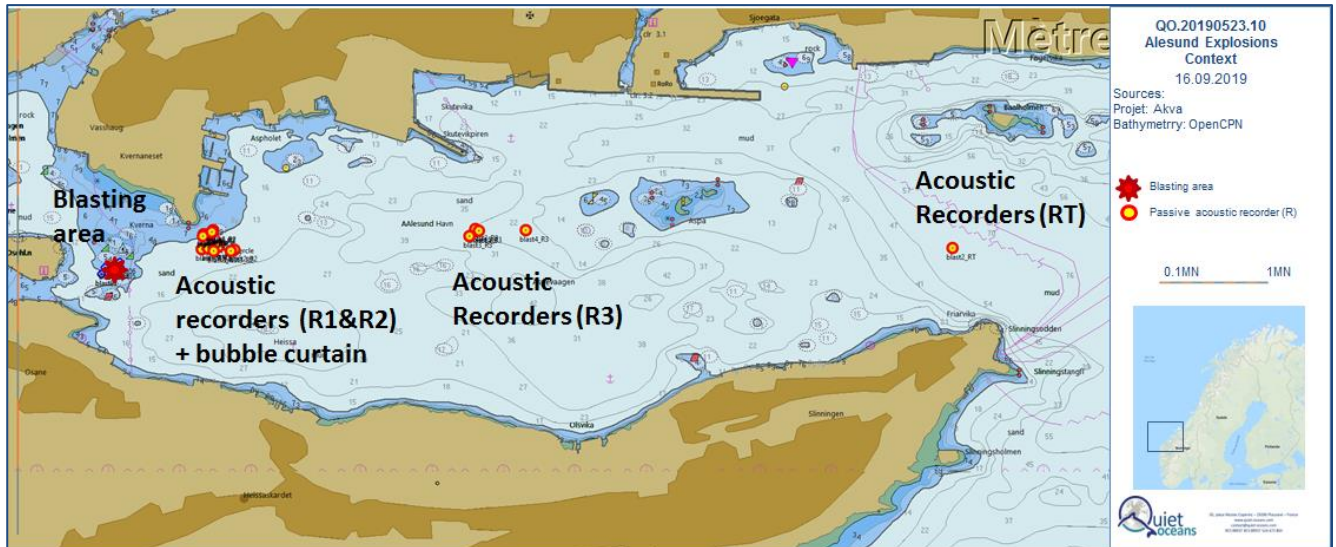


Table 1: Blast terminology and geographical context

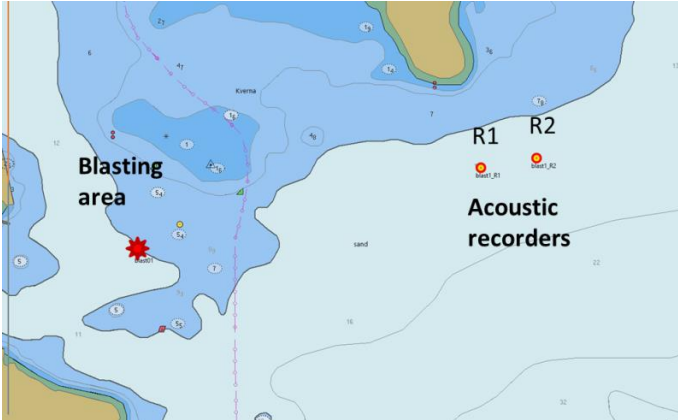
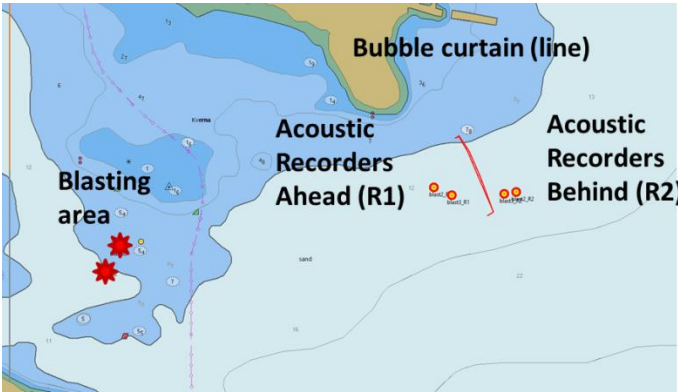
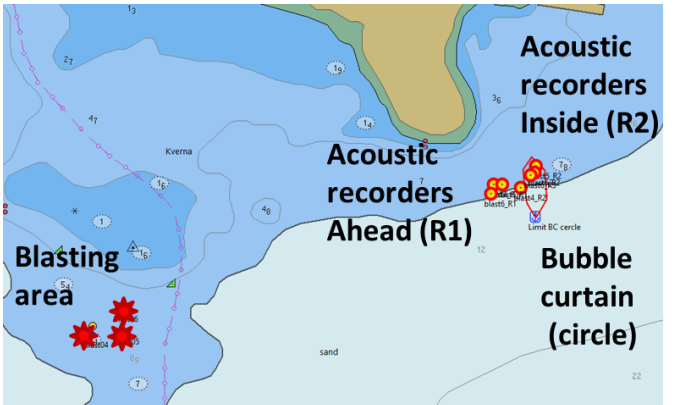
Blast	Bubble curtain	Context
D1_S01	Off	
D1_S02	On (in line)	
D2_S01		
D2_S02	On (in circle)	
D3_S01		
D3_S02		

Table 2: Blasting D1_S01 and acoustic recorders locations

Name	Latitude (DegMin)	Longitude(DegMin)	Immersion (m)	Water depth (m)
Basting area	062°27.903'N	006°07.367'E	NA	
R1	62° 27.9270' N	006° 07.7090' E	6m above bottom	11.5
R2	62° 27.9310' N	006° 07.7610' E	6m above bottom	12
R3	62° 27.9530' N	006° 08.5760' E	15m above bottom	31.2
RT			5m from surface	

Table 3: Blasting D1_S02 and acoustic recorders locations

Name	Latitude (DegMin)	Longitude(DegMin)	Immersion (m)	Water depth (m)
Basting area	062°27.890'N	006°07.392'E		
R1	62° 27.9280' N	006° 07.7290' E	6m above bottom	16.2
R2	62° 27.9260' N	006° 07.813' E	6m above bottom	16.7
R3	62° 27.9570' N	006° 08.577' E	15m above bottom	32.4
RT	62° 27.9400' N	006° 09.5950' E	5m from surface	

Table 4: Blasting D2_S01 and acoustic recorders locations

Name	Latitude (DegMin)	Longitude(DegMin)	Immersion (m)	Water depth (m)
Basting area	062°27.900'N	006°07.402'E		
R1	62° 27.9245' N	006° 07.7475' E	6m above bottom	
R2	62° 27.9250' N	006° 07.801' E	6m above bottom	
R3	62° 27.9464' N	006° 08.5574' E	15m above bottom	32.2
RT	62° 27.9400' N	006° 09.5950' E	5m from surface	

Table 5: Blasting D2_S02 and acoustic recorders locations

Name	Latitude (DegMin)	Longitude(DegMin)	Immersion (m)	Water depth (m)
Basting area	062°27.900'N	006°07.428'E	NA	
R1	62° 27.9490' N	006° 07.7150' E	6m above bottom	
R2	62° 27.9480' N	006° 07.7340' E	6m above bottom	
R3	62° 27.9550' N	006° 08.737' E	15m above bottom	
RT	62° 27.8590' N	006° 11.263' E	5m from surface	

Table 6: Blasting D3_S01 and acoustic recorders locations

Name	Latitude (DegMin)	Longitude(DegMin)	Immersion (m)	Water depth (m)
Basting area	062°27.901'N	006°07.450'E	NA	
R1	62° 27.9490' N	006° 07.7210' E	5m above bottom	10
R2	62° 27.9551' N	006° 07.7450' E	4.5m above bottom	9.8
R3	62° 27.9562' N	006° 08.5765' E	15m above bottom	31.4
RT	62° 27.8140' N	006° 11.380' E	5m from surface	

Table 7: Blasting D3_S02 and acoustic recorders locations

Name	Latitude (DegMin)	Longitude(DegMin)	Immersion (m)	Water depth (m)
Basting area	062°27.908'N	006°07.449'E	NA	
R1	62° 27.9460' N	006° 07.7130' E	5m above bottom	11
R2	62° 27.9530' N	006° 07.7440' E	5m above bottom	10
R3	62° 27.9520' N	006° 07.741' E	5m above bottom	10

II.3. Periods of recording

Table 8 indicates the recording time periods for all blasting operations.

Table 8: Exploitable recording times

Point name	Recorder Name	Id Channel	Starting time UTC (HH:MM)	Ending time UTC (HH:MM)
Shot D1_S01 – 2019/09/03 08:02 UTC				
R1	ENR-018	01	07:37	08:46
		02	07:37	08:46
R2	ENR-015	01	07:37	08:46
		02	07:37	08:46
R3	ENR-017	01	07:37	08:46
RT	icl1719	01	07:37	08:46

Point name	Recorder Name	Id Channel	Starting time UTC (HH:MM)	Ending time UTC (HH:MM)
Shot D1_S02 – 2019/09/03 17:32 UTC				
R1	ENR-018	01	13:54	18:02
		02	13:54	18:02
R2	ENR-015	01	13:54	18:02
		02	13:54	18:02
R3	ENR-017	01	13:54	18:02
RT	icl1719	01	13:54	18:02

Point name	Recorder Name	Id Channel	Starting time UTC (HH:MM)	Ending time UTC (HH:MM)
Shot D2_S01 – 2019/09/04 10:25 UTC				
R1	ENR-018	01	08:42	11:00
		02	08:42	11:00
R2	ENR-015	01	08:42	11:00
		02	08:42	11:00
R3	ENR-017	01	08:42	11:00
RT	icl1719	01	08:42	11:00

Point name	Recorder Name	Id Channel	Starting time UTC (HH:MM)	Ending time UTC (HH:MM)
Shot D2_S02 – 2019/09/04 19:02 UTC				
R1	ENR-018	01	18:08	19:28
		02	18:08	19:28
R2	ENR-015	01	18:08	19:28
		02	18:08	19:28
R3	ENR-017	01	18:08	19:28
RT	icl1719	01	18:08	19:28

Point name	Recorder Name	Id Channel	Starting time UTC (HH:MM)	Ending time UTC (HH:MM)
Shot D3_S01 – 2019/09/05 10:04 UTC				
R1	ENR-018	01	08:43	10:50
		02	08:43	10:50
R2	ENR-015	01	08:43	10:50
		02	08:43	10:50
R3	ENR-017	01	08:43	10:50
RT	icl1719	01	08:43	10:50

Point name	Recorder Name	Id Channel	Starting time UTC (HH:MM)	Ending time UTC (HH:MM)
Shot D3_S02 – 2019/09/05 15:29 UTC				
R1	ENR-018	01	14:39	15:45
		02	14:39	15:45
R2	ENR-015	01	14:39	15:45
		02	14:39	15:45
R3	ENR-017	01	14:39	15:45

II.4. Support vessel for the measurement

The vessel used for the deployment of the acoustic moorings is the fishing vessel "Bølgen" (Figure 3).



Figure 3: Support vessel used for the experiment.

II.5. Blasting information

II.5.1. General information

For each blasting operation, in a preliminary step, a drilling operation was done in order to place the charges a few meters below the surface of the rocky bottom (Figure 4).

Each explosion is composed of a set of regularly spaced holes called a "well" (Figure 5). Pieces (called sausages) of explosives are inserted in each hole to a certain quantity. The explosive used by Wasa Dredging for these blasting operations were Merikemiitti (Offshore bulk emulsion) ignited with Fordyn dynamite. Both explosives are manufactured by Forcit in Finland and have a Relative effectiveness factor (TNT equivalence) of 1.08.

For each blasting, the number of holes implemented is different. Holes inside a "well" are sorted in several groups. The holes belonging to the same group blast simultaneously. Between each group, a micro-delay of several milliseconds is set. For all blasts, the micro-delay was set to 25ms.

Information about each explosion has been collected in order to make possible the interpretation of the underwater acoustic levels. Table 9 is a synthesis of the blasting information for each explosion. More detailed information about the hole, charge and micro-delay configurations are given in sections 0 to II.5.7.

Every day, two wells were blasted. Before each explosion, remaining material from the previous blasting was removed. All wells were blasted unconfined.

Figure 4: Schematic vertical view of the blasting location

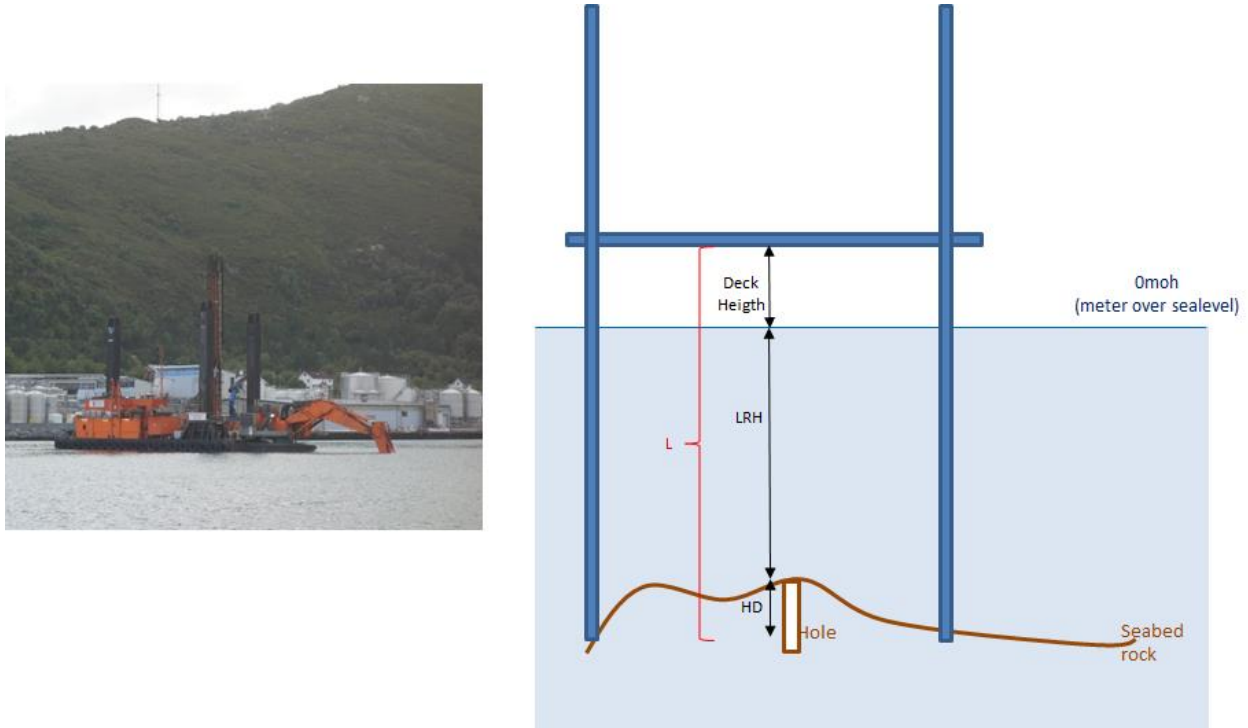


Figure 5: Schematic representation of each well (red stars correspond to holes actually blasted)

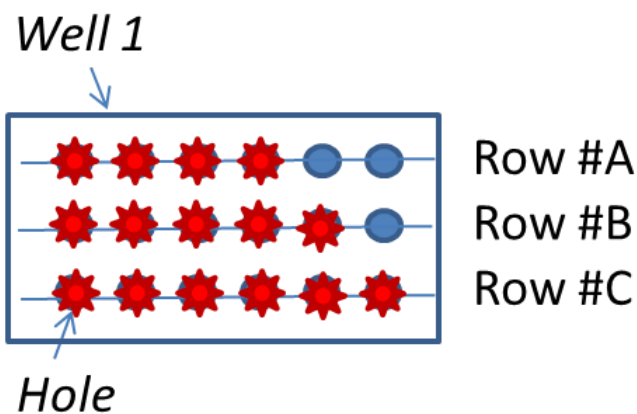


Table 9: General information on each blasting

Shoot Id	Day	Time UTC	Well Id	Nb of groups	Micro-delay (ms)	Nb of holes	Row Id	Maximum by group (Kg)		Total charge (Kg)	
								Explosive	Eq. TNT	Explosive	Eq. TNT
D1_S01	2019/09/03	08:02	39	17	25	34	1 to 10	124	133.9	1,715.3	1,852.5
D1_S02	2019/09/03	17:32	40	12	25	20	1 to 4	74	79.9	630	680.4
D2_S01	2019/09/04	10:25	41	6	25	10	1 to 2	85	91.8	411.6	444.5
D2_S02	2019/09/04	19:02	42	13	25	21	1 to 5	128	138.2	1,082.2	1,168.8
D3_S01	2019/09/05	10:04	43	12	25	20	1 to 4	104	112.3	915.6	988.8
D3_S02	2019/09/05	15:29	44	8	25	20	1 to 2	135	145.8	684.6	739.4

Table 10: Format to describe the information for each hole

	G	
LRH	⊗	DP
	HD	HC

G = Group Id

LRH = Laser rock height

DP = Number of dynamite pieces of 2,1 Kg

HD = Hole depth

HC = Hole charge in Kg dynamite

II.5.2. Blasting D1_S01

For this blasting, the explosive is divided in 17 groups. The first group, number 1, is composed of two holes (hole 1: 43 kg, hole 2: 51 kg). The second group, number 2, ignited 25 ms after the first one, is composed of one hole (hole 3: 68 kg). The total duration of blast is 425 ms.

Row	GPS PTN Left hole		Hole 1			Hole 2			Hole 3			Hole 4		
	X	Y												
1	351636,8	6929292,9		1			1			2			-	
			10,7	⊗		9,3	⊗		8,3	⊗		-	⊗	
				3	43		3,5	51		4,5	68		-	-
2	351636,85	6929289,05		3			3			3			-	
			10,8	⊗		10,1	⊗		9,7	⊗		-	⊗	
				3	43		2,7	37		3,1	44		-	-
3	351650,36	6929288,87		4			4			5			5	
			9,5	⊗		8,5	⊗		9	⊗		9,4	⊗	
				3,3	48		4,3	65		3,8	56		3,4	49
4	351654,15	6929288,9		6			6			7			7	
			9,7	⊗		9,1	⊗		9,2	⊗		9,4	⊗	
				3,1	44		3,7	54		3,6	53		3,4	49
5	351649,73	6929302,09		-			8			8			9	
			-	⊗		9,6	⊗		9,7	⊗		9,7	⊗	
				-	-		3,2	46		3,1	44		3,1	44
6	351653,81	6929301,95		-			9			10			10	
			-	⊗		9,5	⊗		9,5	⊗		9,4	⊗	
				-	-		3,3	48		3,3	48		3,4	49
7	351657,95	6929289,1		11			11			12			12	
			9,5	⊗		9,4	⊗		9,3	⊗		9,3	⊗	
				3,3	48		3,4	49		3,5	51		3,5	51
8	351662,95	6929289,05		13			13			14			14	
			9,4	⊗		9,3	⊗		9,2	⊗		9,2	⊗	
				3,4	49		3,5	51		3,6	53		3,6	53
9	351657,33	6929302,21		-			15			15			16	
			-	⊗		9,3	⊗		9,3	⊗		9	⊗	
				-	-		3,5	51		3,5	51		3,8	56
10	351662,26	6929302,15		-			16			17			17	
			-	⊗		9,2	⊗		9	⊗		8,7	⊗	
				-	-		3,6	53		3,8	56		4,1	61

II.5.3. Blasting D1_S02

Row	GPS PTN Left hole		Hole 1			Hole 2			Hole 3			Hole 4			Hole 5		
	X	Y															
1	351657,3	6929268,9		3			2			2			1			1	
			10,3	⊗		10,5	⊗		9,8	⊗		9,8	⊗		9,8	⊗	
				2,5	28		2,5	28		2,7	31		2,7	31		2,7	31
2	351660,72	6929268,71		6			5			5			4			4	
			10,7	⊗		10,2	⊗		9,8	⊗		9,5	⊗		9,6	⊗	
				2,5	28		2,5	28		2,7	31		3	35		2,9	34
3	351663,94	6929268,86		9			8			8			7			7	
			10,7	⊗		10,1	⊗		9,7	⊗		9,5	⊗		9,4	⊗	
				2,5	28		2,5	28		2,8	32		3	35		3,1	36
4	351667,28	6929268,84		12			11			11			10			10	
			16,8	⊗		10	⊗		9,4	⊗		9,4	⊗		9,3	⊗	
				2,5	28		2,5	28		3,1	36		3,1	36		3,2	38

II.5.4. Blasting D2_S01

Row	GPS PTN Left hole		Hole 1			Hole 2			Hole 3			Hole 4			Hole 5		
	X	Y															
1	351666,9	6929286,2		1			1			2			2			3	
			9,2	⊗		9,2	⊗		9,1	⊗		9	⊗		8,9	⊗	
				3,3	39		3,3	39		3,4	41		3,5	42		3,6	43
2	351670,37	6929285,85		4			4			5			5			6	
			9,2	⊗		9,2	⊗		9	⊗		8,9	⊗		8,9	⊗	
				3,3	39		3,3	39		3,5	42		3,6	43		3,6	43

II.5.5. Blasting D2_S02

Row	GPS PTN Left hole		Hole 1			Hole 2			Hole 3			Hole 4			Hole 5		
	X	Y															
1	351689	6929284,6		1			-			-			-			-	
			6,5	⊗		-	⊗		-	⊗		-	⊗		-	⊗	
				6	77		-	-		-	-		-	-		-	-
2	351689,03	6929287,36		4			3			3			2			2	
			7,3	⊗		7,3	⊗		7,6	⊗		7,9	⊗		8,6	⊗	
				5,2	66		5,2	66		4,9	62		4,6	57		3,9	48
3	351689,05	6929290,64		7			6			6			5			5	
			8,6	⊗		8,3	⊗		8,2	⊗		8,4	⊗		9,1	⊗	
				3,9	48		4,2	52		4,3	53		4,1	50		3,4	41
4	351689,12	6929294,03		10			9			9			8			8	
			8,6	⊗		8,6	⊗		8,6	⊗		8,8	⊗		9	⊗	
				3,9	48		3,9	48		3,9	48		3,7	45		3,5	42
5	351689,02	6929297,48		13			12			12			11			11	
			8,6	⊗		8,6	⊗		8,6	⊗		8,7	⊗		8,8	⊗	
				3,9	48		3,9	48		3,9	48		3,8	46		3,7	45

II.5.6. Blasting D3_S01

Row	GPS PTN Left hole		Hole 1		Hole 2		Hole 3		Hole 4		Hole 5	
	X	Y										
1	351707,9	6929286	9,2	3	9	3	8,3	2	8,3	2	7	1
			3,3	39	3,5	42	4,2	52	4,2	52	5,5	70
2	351708,08	6929289,5	9,1	6	9	5	8,8	5	8,8	4	8,7	4
			3,4	41	3,5	42	3,7	45	3,7	45	3,8	46
3	351708,09	6929292,82	9,1	9	8,9	8	8,8	8	8,8	7	8,7	7
			3,4	41	3,6	43	3,7	45	3,7	45	3,8	46
4	351708,07	6929296,11	9,2	12	8,7	11	8,8	11	8,7	10	8,7	10
			3,3	39	3,8	46	3,7	45	3,8	46	3,8	46

II.5.7. Blasting D3_S02

Row	GPS PTN Left hole		Hole 1		Hole 2		Hole 3		Hole 4		Hole 5		Hole 6		Hole 7		Hole 8		Hole 9		Hole 10	
	X	Y																				
1	351707,7	6929299,7	9,1	4	9,2	4	8,9	4	8,9	3	9,9	3	8,9	2	8,8	2	8,8	1	8,9	1	9,1	1
			3,4	41	3,3	39	3,6	43	3,6	43	2,6	29	3,6	43	3,7	45	3,7	45	3,6	43	3,4	41
2	351707,81	6929302,92	8,8	8	8,7	8	8,7	7	8,7	7	8,9	7	8,8	6	8,7	6	8,8	5	8,9	5	9,1	5
			3,7	45	3,8	46	3,8	46	3,8	46	3,6	43	3,7	45	3,8	46	3,8	46	8,9	8,9	9,1	9,1

II.6. Bubble curtain information

During five blasts (D1_S02 to D3_S02), a bubble curtain has been deployed by NUVA in two configurations:

- In line for two blasts, D1_S02 and D2_S01 (see Table 1);
- In circle for three blasts, D2_S02, D3_S01 and D3_S02 (see Table 1).



Figure 6: Bubble curtain in line configuration in the foreground and blast location (Source: Kystverket)

The characteristics of the bubble curtain were:

- Length of hose: 72m
- Diameter of hose: 75 mm (outside), 60 mm (inside)
- Distance between holes: 16 cm
- Diameter of holes: 1 mm.

II.7. Acoustic instrumentation deployed

The acoustic instrumentation includes four independent systems (Figure 7):

- Two two-channel autonomous recorders set up for “high and low levels” to measure intense sounds and ambient noise;
- One single-channel autonomous recorder set up for “high levels” to measure intense sounds;
- One Iclisten autonomous and real-time recorders for “low levels” to measure intense sounds at large distance and ambient noise.

Table 11 shows the reception ranges of the equipment used and demonstrates that using diverse equipment allows the measurement of all ranges of noise levels, from ambient to intense noises.

Figure 7: Iclisten (left) and SM3M (right) recording systems.



Table 11: Minimum and maximum range for sound pressure levels (SPL) for each recorder.

Equipment	Single-channel SM3M	2-channel SM3M		Single-channel Iclisten
Acoustic objective	High levels	High levels	Ambient noise	Ambient noise
SPL min (dB ref 1μPa)	159	159	83	83
SPL max (dB ref 1μPa)	242	242	166	174
Dedicated zone	Near (R3)	Near (R1 & R2)		Far (RT)

II.7.1. Description of the single-channel SM3M

In order to perform continuous underwater acoustic measurement at low distances and high levels, we used a loud single-channel SM3M acoustic recorder (Figure 7) manufactured by Wildlife Acoustics Inc. The technical characteristics of these recorders are detailed in Table 12. The maximum selectable sample frequency is 384 kHz enabling to use the complete bandwidth of the HTI99-HF hydrophone (characteristics in Table 11) and to capture the expected steep variation of the pressure.

Table 12: Technical characteristics of the SM3M recorder and HTI SPL omnidirectional hydrophone (for area “high levels” recorder)

Hydrophone	HTI99HF, Omnidirectional
Frequency band	10Hz to 180kHz
Maximum sample frequency	10 Hz to 80 kHz with variability less than 2 dB
Sensibility	384 kHz
Gain	-240dB ref. 1 V / μ Pa
Audio files format	0-12 dB
Autonomy for continuous measurement	Wav
Length	Minimum 30 days with Alkaline batteries
Diameter	79.4 cm
Weight	16.5 cm
Maximum operating depth	13.5 kg filled with 32 batteries
Operating temperature range	200 m
	-20°C to 50°C

II.7.2. Description of the two-channel SM3M

The recorder used to record intense noise at the shortest ranges is the two-channel SM3M acoustic recorder manufactured by Wildlife Acoustics Inc. in the United States. It has the same shape than the previous one.

Two hydrophones are connected to the recorder:

- The first channel is a HTI High SPL omnidirectional with low sensitivity, specifically designed to record and characterize high acoustic pressure levels (SPL) thanks to a hydrophone with a sensitivity of -240dB ref. 1 V / μ Pa (characteristics in Table 11);
- The second channel is connected to a more sensitive hydrophone in order to also measure lower levels such as ambient noise levels.

Table 13: Technical characteristics of the SM3M recorder and HTI High SPL omnidirectional hydrophone (for area “high levels” recorder and ambient noise levels)

Hydrophone	HTI High SPL omnidirectional
Frequency band	10Hz to 180kHz
Maximum sample frequency	10 Hz to 80 kHz with variability less than 2 dB
Sensibility	256 kHz
Gain	-240dB ref. 1 V / μ Pa on channel 1
Audio files format	-163.9 ref. 1 V / μ Pa on channel 2
Autonomy for continuous measurement	0-12 dB
Length	Wav
Diameter	Minimum 30 days with Alkaline batteries
Weight	79.4 cm
Maximum operating depth	16.5 cm
Operating temperature range	13.5 kg filled with 32 batteries
	200 m
	-20°C to 50°C

II.7.1. Description of the single-channel Iclisten

In order to perform continuous underwater acoustic measurement at large distances and in real-time, we used the single-channel Iclisten acoustic recorder manufactured by Oceans Sonics in Canada. The technical characteristics of this recorder are detailed in Table 14. The maximum selectable sample frequency is 512 kHz, enabling to use the complete bandwidth of the hydrophone (characteristics in Table 11) and to capture the expected steep variation of the pressure.

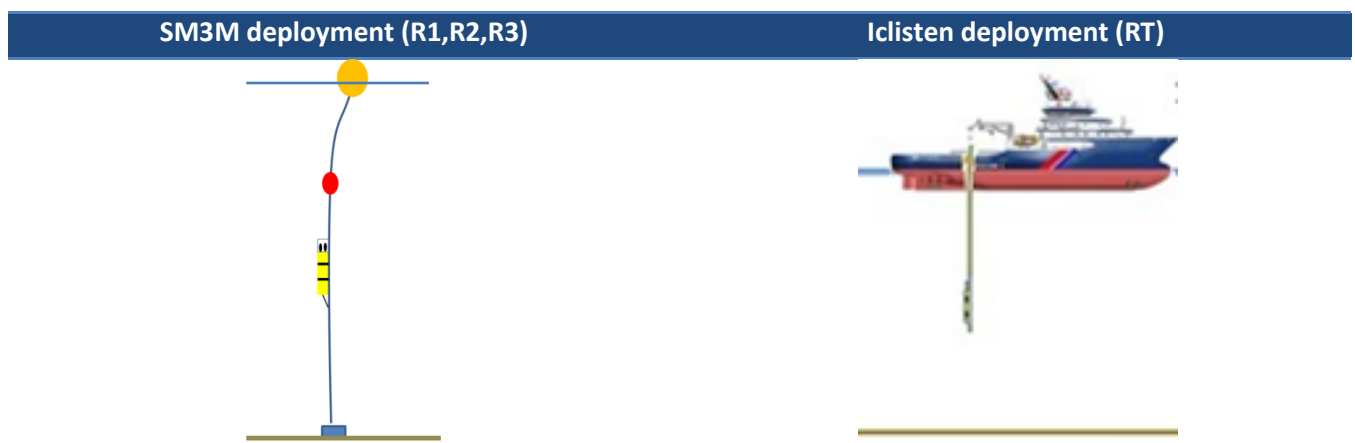
Table 14: Technical characteristics of the Iclisten omnidirectional hydrophone

Hydrophone	Omnidirectional
Frequency band	10Hz to 180kHz
	10 Hz to 80 kHz with variability less than 2 dB
Maximum sample frequency	512 kHz
Sensibility	-170.4 dB re: 1V/μPa
Gain	NA
Audio files format	Wav
Autonomy for continuous measurement	10 hours
Length	267 mm
Diameter	45 mm
Weight	0.3 kg
Maximum operating depth	200 m
Operating temperature range	-20°C to 50°C

II.8. Deployment setup

Figure 8 shows the type of deployment implemented for each device: the SM3M recorders are deployed on a fixed mooring while the Iclisten real-time device is deployed from the support vessel.

Figure 8: Deployment configuration for acoustic recorders



Chapter III. Physical analysis of blasting

III.1. Objective

The objective of the physical analysis of the blasting is to calculate metrics that characterise the received and emitted sound levels presented in the first and second section of this chapter. The third section reports the estimation of the efficiency of the bubble curtain mitigation used in the experiment. Finally, the fourth section analyses the self-noise generated by the bubble curtain itself.

III.2. Received levels

Table 15 gives received underwater acoustic levels for each blasting at each location of recorder. This table gives for each blast

- name of blast,
- UTC time of blasting,
- bubble curtain presence,
- range between blasting and acoustic recorder,
- SPL_{pk-pk} , SPL_{0-pk} , SPL_{rms} , SEL metrics.

For periods when the bubble curtain has been active, Table 15 gives the relative positions of the recorders from the bubble curtain. “Ahead” means that the recorder is placed between the blasting and the bubble curtain, “behind” means that the bubble curtain is placed between the blasting and the recorder.

The recorder R1 was systematically placed at about 300 m from the blasting position. The measures show a significant variability of the measured SPL according to the blast properties.

The maximum level is obtained for blast D3_S01 with a SPL_{pk-pk} of 220.4 dB ref 1 μ Pa and a SEL of 189.9 dB ref 1 μ Pa²s. Surprisingly, these values were not obtained by the blast with the maximum total explosive charge, which was 915 kg for this blast.

The maximum level obtained for the blast with the maximum total explosive charge (blast D1_S01, 1,715 kg) was indeed lower: the SPL_{pk-pk} and SEL are respectively 8.5 and 3.3 dB less for D3_S01.

The variability of levels across all blasting operations is 10.6 dB for SPL_{pk-pk} and 5.3 dB for SEL, among total charges ranging from 411 to 1,715 kg.

The variability for SPL_{pk-pk} values can be explained by the differences in the maximum charge.

The variability for SEL can be explained by the temporal spreading induced by the use of micro-delays between each group of charges. Without micro-delay, each acoustic level produced by each charge is indeed summed up synchronously. This does not happen when micro-delay is used, which spreads the peaks levels over time.

Blast D1_S01 has the highest number of hole groups (17) with a maximum group charge of 124Kg, while blasting D2_S01 has the smallest one (6) with a maximum group charge of 85Kg. The difference of Sound Level between these two extreme configurations is not big: SPL_{pk-pk} differs by 2.1 dB and SEL differs by 2.0 dB at position R1, which is 300m from the blasting point.

Among all groups, the total charge of explosive blasted simultaneously is quite different (74 to 135 kg), which explains the difference in pressure of the SPL_{pk-pk} . Thus, the SEL increase is mainly explained by the number of groups involved.

The propagation loss between locations R1 and R3 are consistent with the expected values given the shallow bathymetric context (loss of 9.5 dB for range difference of 743m).

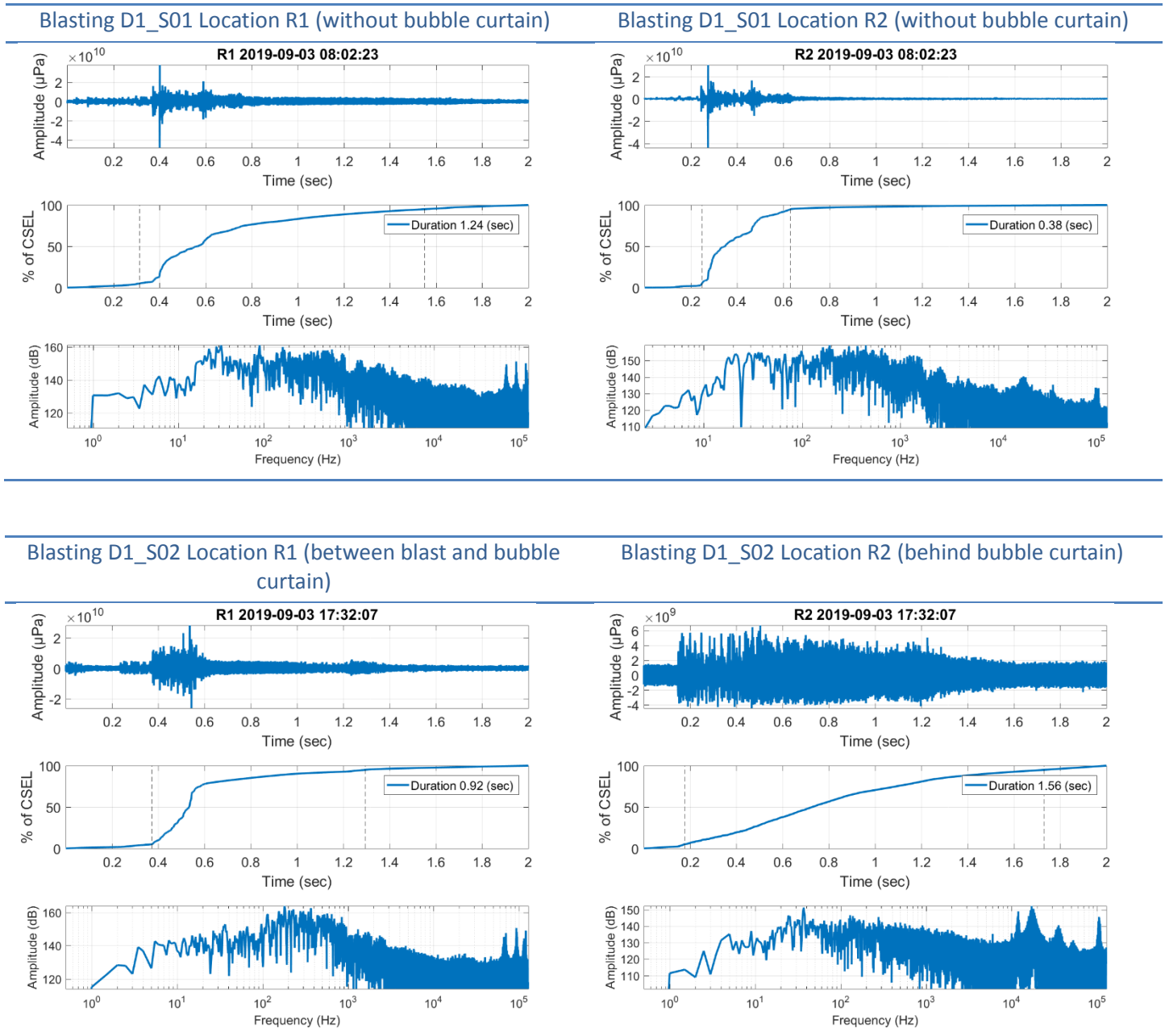
Figure 9 shows the typical signature of blasting at locations R1 and R2 (ahead and behind/inside bubble curtain). The triptych shows the temporal signal, the significant duration T_{90} in second, and spectrum distribution of the acoustic energy.

For the first blasting operation without bubble curtain, the temporal signatures are very similar in form and spectrum between the two locations R1 and R2. In this context, the spectrum shows a maximum of energy for frequencies ranging from 30 to 900Hz. The significant attenuation of low frequencies below 20 Hz can be explained by the water height and bottom properties, which induce a cut-off frequency of the sound waves (Brekhovskikh, 1960). Thus, this bathymetric context is unfavourable to the propagation of highly energetic low frequency waves.

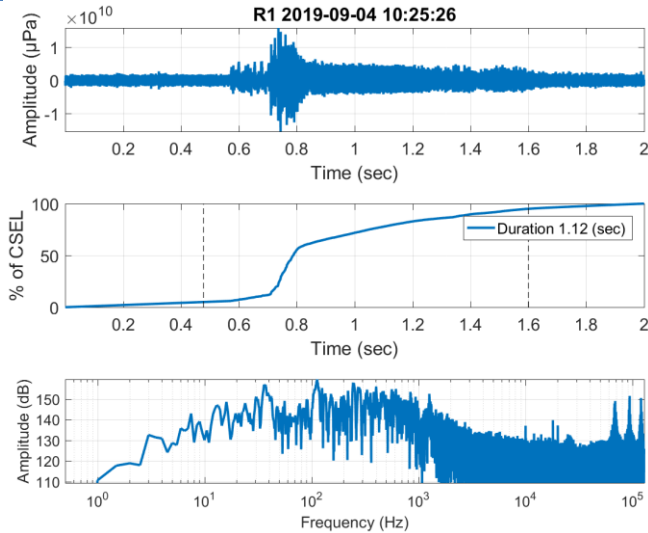
Table 15: Received acoustics levels for each explosion

Day	Shot	Date	Blasting time UTC	Recorder	Location	Bubble curtain	Distance from blasting point (m)	SPL pk-pk (dB ref 1μPa) Unweighted	SPL 0-pk (dB ref 1μPa) Unweighted	SPL rms (dB ref 1μPa) Unweighted	SEL (dB ref 1μPa²s) Unweighted
1	D1_S01	03/09/2019	08:02:08	ENR-018	R1	off	281	211,9	206,4	186	186,6
				ENR-015	R2	off	326	210	204,3	188	184,2
				ENR-017	R3	off	1024	202,4	196,7	177,9	178,7
				ic1719	RT	off	-	182,3	177,3	155,9	155,9
1	D1_S02	03/09/2019	17:32:08	ENR-018	R1	in front of	298	214,7	209	187,9	187,7
				ENR-015	R2	Behind	368	200,9	196,4	180,7	181,2
				ENR-017	R3		1026	193,3	187,6	167,6	168,9
				ic1719	RT		2322	187,3	181,4	166,6	160,5
2	D2_S01	04/09/2019	10:25:08	ENR-018	R1	in front of	300	209,8	203,9	184,3	184,6
				ENR-015	R2	Behind	346	199,8	194,8	179,7	180,5
				ENR-017	R3		997	193	187,4	166,2	168,8
2	D2_S02	04/09/2019	19:02:00	ENR-018	R1	in front of	263	213,2	207,7	186,6	185,2
				ENR-015	R2	Inside	278	194,4	188,5	175,2	175,5
				ENR-017	R3		2260	202,2	196,5	181,1	177,5
3	D3_S01	05/09/2019	10:04:00	ENR-018	R1	in front of	250	220,4	216,3	190,7	189,9
				ENR-015	R2	Inside	273	193,8	188,3	174,5	174,9
				ENR-017	R3		2187	207,3	201,5	186,1	180,9
3	D3_S02	05/09/2019	15:29:20	ENR-018	R1	in front of	238	217,6	214,1	187,9	187,9
				ENR-015	R2	Inside	267	192,2	186,5	175	175,1
				ENR-017	R3		264	191,7	186,8	173,7	173,9

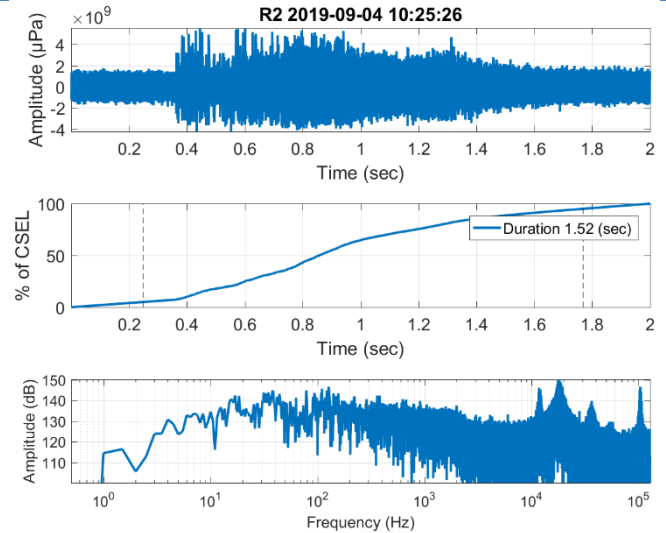
Figure 9: Temporal signature in μPa , significant duration in sec and power spectral density in dB ref $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ at 300m from blasting area: without (left) and with (right) bubble curtain effect.



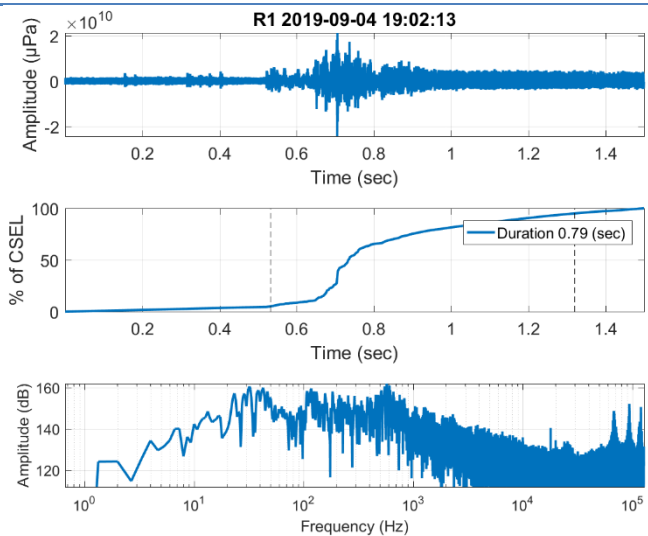
Blasting D2_S01 Location R1 (between blast and bubble curtain)



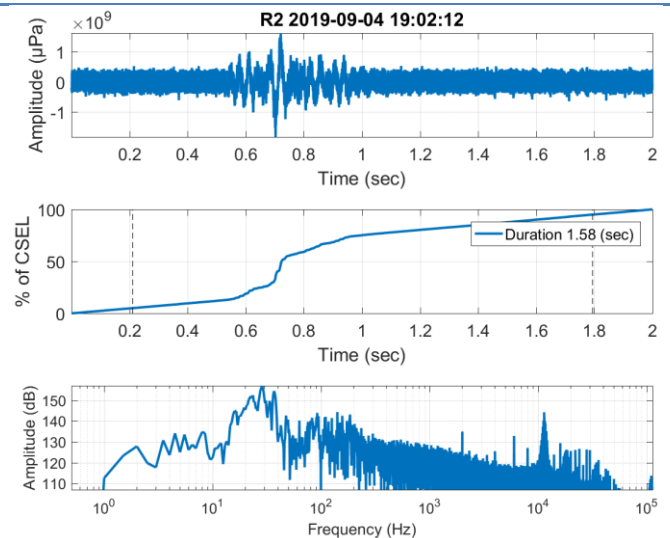
Blasting D2_S01 Location R2 (behind bubble curtain)



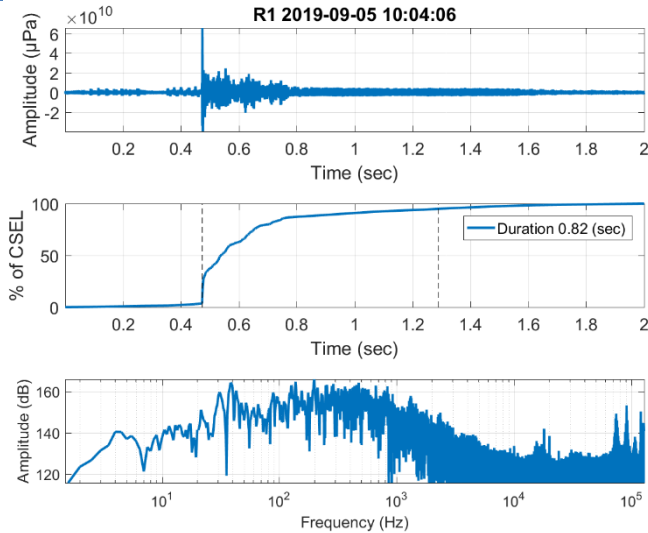
Blasting D2_S02 Location R1 (between blast and bubble curtain)



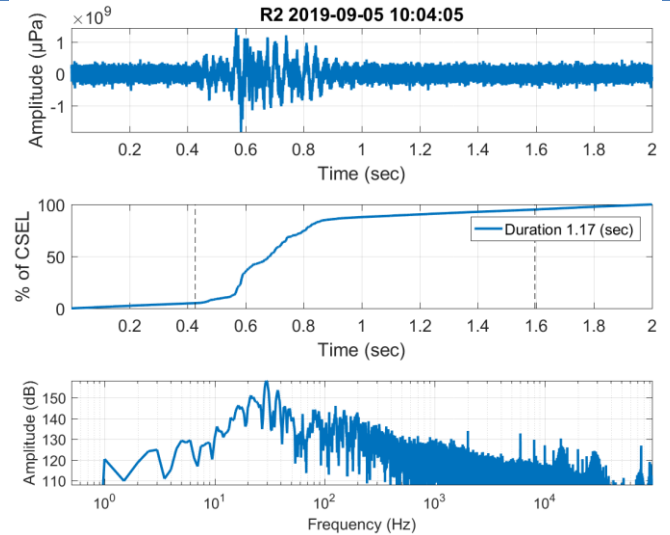
Blasting D2_S02 Location R2 (inside bubble curtain)



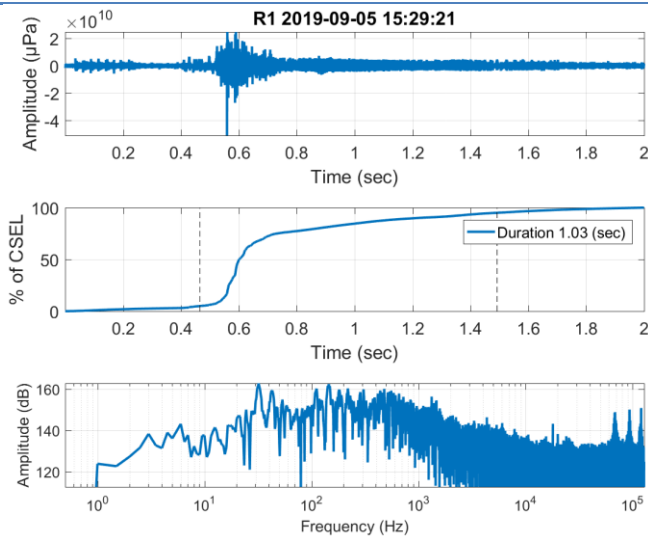
Blasting D3_S01 Location R1 (between blast and bubble curtain)



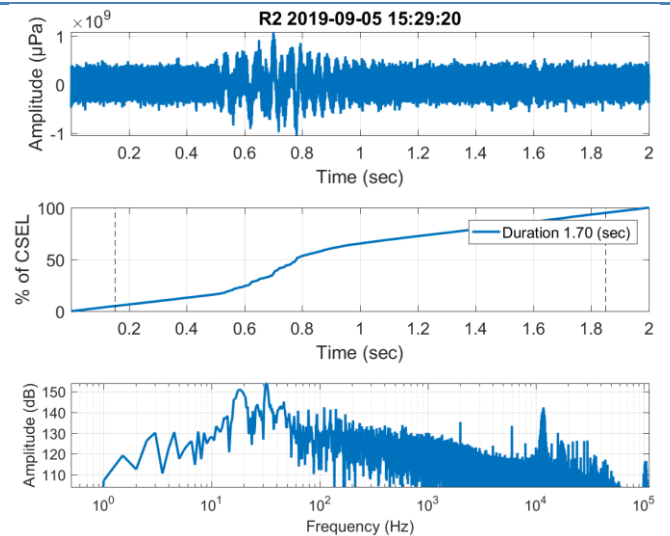
Blasting D3_S01 Location R2 (inside bubble curtain)



Blasting D3_S02 Location R1 (between blast and bubble curtain)



Blasting D3_S02 Location R2 (inside bubble curtain)



III.3. Efficiency of the bubble curtain

Table 16 highlights the decrease of noise level induced by the bubble curtain according to configuration and acoustic metrics. The circle configuration seems to allow best results with a decrease by 18.8 to 26.6 dB for SPL_{pk-pk} and by 9.7 to 15 dB for SEL.

For blasting operations D1_S02 to D3_S02, the recorders R1 and R2 show acoustic characteristics respectively without and with bubble curtain effect. At R1 location, variation in temporal signature between blasts is observed but no significant variations in spectrum distribution. At R2 location, the bubble curtain induced a significant temporal effect of the signal (doubling of the significant duration of the signal) and a significant drop in peak signal. The bubble curtain affected frequencies higher than 80 Hz (Figure 9).

Table 16: Decrease of noise level induced by the bubble curtain.

Shot	Configuration bubble curtain	Space between location (m)	ΔSPL_{pk-pk} (dB ref 1 μ Pa) Unweighted	ΔSPL_{0-pk} (dB ref 1 μ Pa) Unweighted	ΔSPL_{rms} (dB ref 1 μ Pa) Unweighted	ΔSEL (dB ref 1 μ Pa ² s) Unweighted
D1_S02	Line	70	13,8	12,6	7,2	6,5
D2_S01	Line	46	10	9,1	4,6	4,1
D2_S02	Circle	15	18,8	19,2	11,4	9,7
D3_S01	Circle	23	26,6	28	16,2	15
D3_S02	Circle	29	25,4	27,6	12,9	12,8

Figure 10 shows spectrum in third octave band with and without bubble curtain at R1 and R2 locations and attenuation induced for the three cases:

- First case: no bubble curtain;
- Second case: bubble curtain deployed along a line;
- Third case: bubble curtain deployed along a circle.

The first case highlights the variability measurement for two measurements separated by only 45m. This variability can reach 7dB at maximum and 2dB in mean and can be explained by the bottom properties and the bathymetry at each location.

The second and third cases highlight the efficiency of bubble curtain according to the design (line or circle). As expected, the configuration in circle shows the best attenuation with a maximum if efficiency at frequency close to 600 Hz (attenuation 32 dB). For frequencies less than 40 Hz, bubble curtain appears ineffective. The difference between the two configurations is 12 dB for frequencies higher than 400 Hz. The bubble curtain design in line is probably less efficient because coastal acoustic reflections along the coastline circumvent the bubble curtain. The measurements done in Ålesund with the bubble curtain deployed in circle (**Figure 11**) demonstrated a similar efficiency than measurements reported in the literature (Pehlke, 2013).

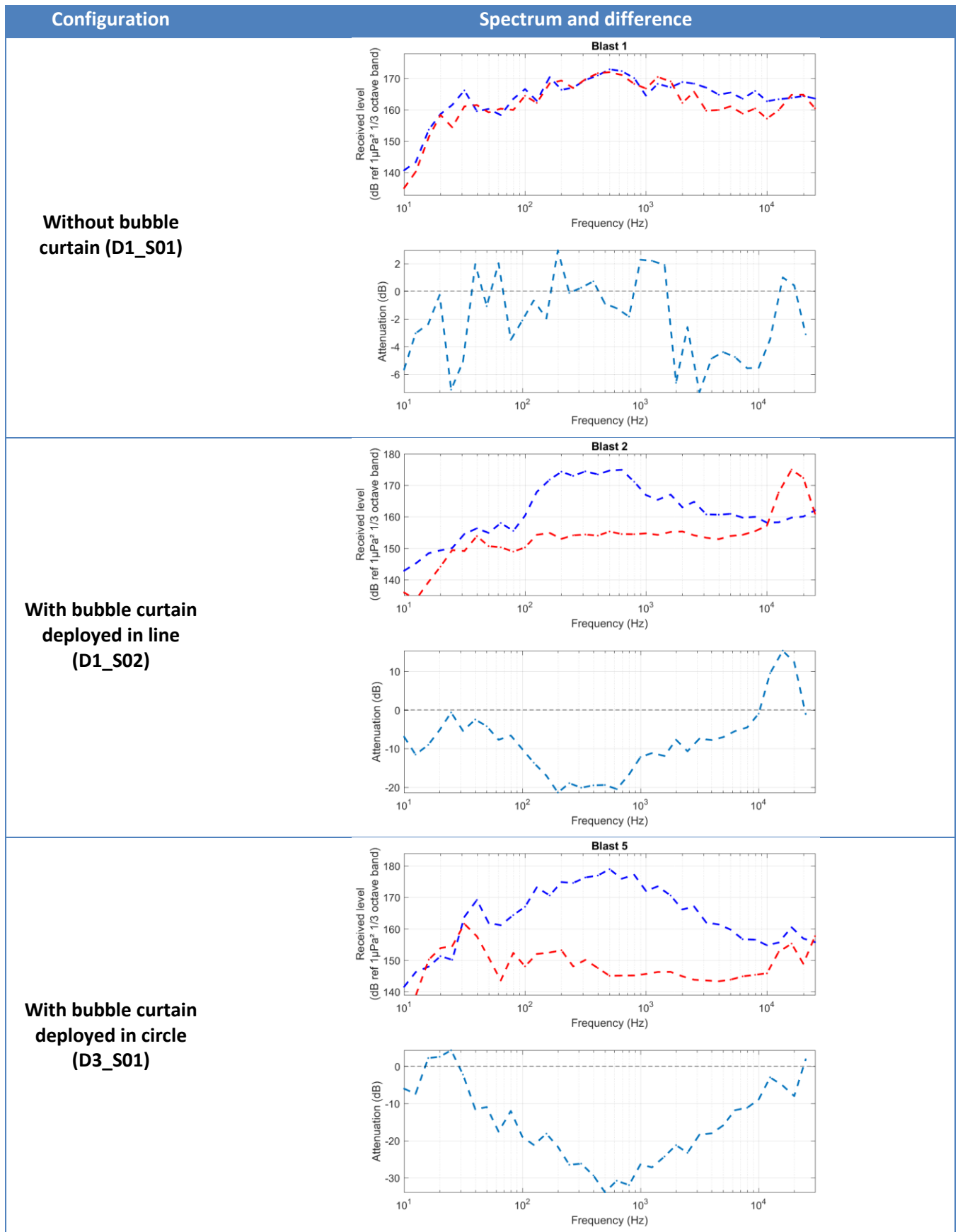
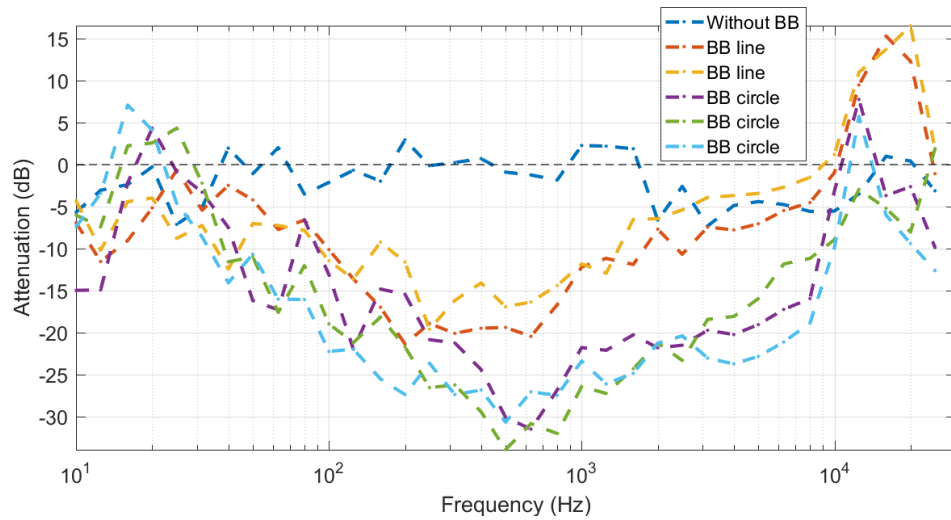


Figure 10: Spectrum with (red, R2) and without (blue, R1) bubble curtain (top) and attenuation induced by bubble curtain (down)

Ålesund
measurements
synthesis



Literature
reference

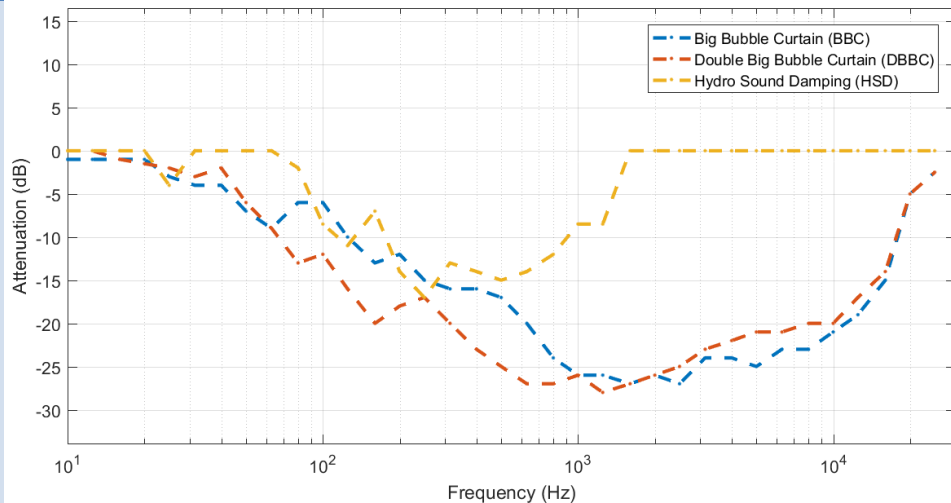


Figure 11: Synthesis of efficiency of bubble curtain and comparison with mitigation literature

III.4. Estimation of the source levels

Measured values at short distances (R1 location) have been derived to estimate the source level of the blasting operations. A simplistic approach has consisted to approximate the transmission loss as $K \cdot \log_{10}(r)$ where $K=17$ and r is the distance from the blast. Under this assumption, blasting D3_S01 gives the highest levels, reaching 261.1 dB ref 1 μ Pa @1m SPL peak-peak and SPL_{rms} of 230.6 dB ref 1 μ Pa@1m. The strong attenuation at the lowest frequencies below 80Hz induced by the cut-off frequency has been discarded.

For better accuracy, a propagation model needs to be used to estimate the transmission loss for each frequency. In this case, the environmental data (bathymetry, sound speed profile, bottom properties, and surface roughness) would need to be known with a fair resolution (Collins M. , Cederberg, King, & Chin-Bing, 1996), (Porter & Reiss, 1984).

III.5. Comparison with Båtsfjord blasting

Underwater acoustic measurements and analysis were carried out in the fjord of Båtsfjord from 24 to 26 April 2018 during dynamite-type blasting operations as part of improvements of sailing conditions. During this period, five buried explosive blasting operations of different loads (from 56.7 to 529 kg of dynamite) were made in different configurations (Table 17). No bubble curtain or mitigation solution was used during these explosions. Explosive was classic dynamite, according to the company in charge for blasting, Aarsleff, with a relative effectiveness factor of 1.25.

In this environmental context with a complex bathymetry, the maximum values of source levels were obtained with measurements realized at 1,100 and 13,000 m from blasting: 267.7 dB ref 1 μ Pa SPL@1m peak-peak and 247.7 dB ref 1 μ Pa@1m SPL_{rms}.

In comparison with Båtsfjord measurement, the SPL peak-peak and SEL estimates in Ålesund show a decrease about 6.6 and 17.1 dB respectively despite the significant increase in maximum charge per group and the total charge.

The reasons have to be explored and could be linked to the water depth and sediment.

Table 17: General information on each blasting in Båtsfjord area (April 2018)

Shoot Id	Day	Time UTC	Well Id	Nb of groups	Micro-delay (ms)	Nb of holes	Row Id	Maximum by group (Kg)		Total charge (Kg)	
								Explosive	Eq. TNT	Explosive	Eq. TNT
D2_S01	2018/04/24	08:34	1	2	50	4	A	35.7	44.6	56.7	70.9
D2_S02	2018/04/24	12:34	1	2	50	5	B	44.1	55.1	75.6	94.5
D2_S03	2018/04/24	15:44	1	2	50	6	C	58.8	73.5	109.2	136.5
D3_S01	2018/04/25	19:33	2	15	25	29	1 to 5	44.1	55.1	529.2	661.5
D4_S01	2018/04/26	14:56	3	5	25	13	1 to 6	35.7	44.6	144.9	181.1

III.6. Noise induced by bubble curtain

Acoustic measurements were done at close distance from the bubble curtain before, during and after the operation of the bubble curtain. The recorder R1 was placed at 40m from bubble curtain arranged as a line. The broadband levels, during these three phases, are illustrated in Figure 12. The ambient noise before the operation of the bubble curtain is measured at about 112 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$. The bubble curtain induces an increase by 18 dB after a few minutes of commissioning. The maximum sound pressure level remains stable during few minutes at 130 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ but declined by about 3dB after a couple of minutes with a drop in high frequencies. Other blastings also show a variation in high frequencies after a few minutes but no decline of the noise level.

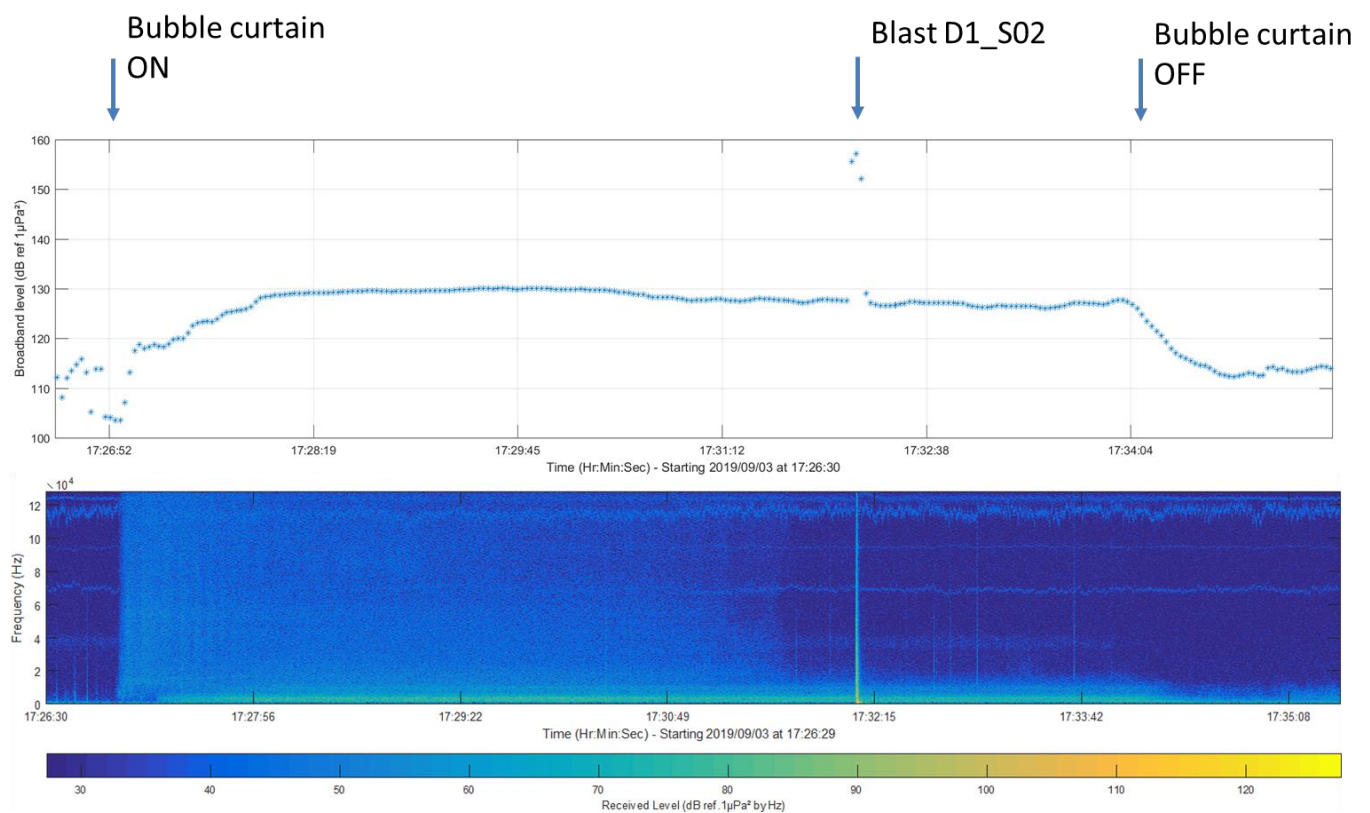


Figure 12: Broadband level and spectrogram before, during and after bubble curtain implementation (recorder R1, bubble curtain in line configuration)

III.7. Ambient noise

Apart from the explosion, drilling and pre-spotting phases, ambient noise measurements were made at the RT location at the mouth of Aspevågen (Figure 2). The results show an existing noise variation between 99 and 142 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$ with a median value of 122 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$.

In comparison, observed median ambient noise levels are:

- Offshore oceanic area: 100 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$;
- Coastal area: 105 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$;
- Large port area: 100 to 105 dB ref $1\mu\text{Pa}^2$.

The ambient noise measured in Ålesund is in average 15 to 20 dB higher than in other port areas comparable to a fjord and 2 dB higher than Båtsfjord fjord. The factors of this difference should be the almost continuous presence of at least a motor vessel in the bay and sediment with higher reflection properties than other site configurations.

Quiet-Oceans has also modelled statistical ambient noise in a large area around Ålesund. Figure 13 presents median statistical ambient noise (percentile 50%) at third-octave 125 Hz for Week 2019/36 when the measurement campaign took place. Ambient noise includes both natural and anthropogenic components of noise.

This modelling has been done with one noise picture every 15mn, that is to say 672 different situations for the whole week, using [Quonops® Online Services](https://qos.quiet-oceans.com), Quiet-Oceans modelling platform accessible online.

This map shows SPL noise caused by local traffic of ferries in fjords, the coastal sea lane and (top left) the remote maritime route that circumnavigates around Norway.

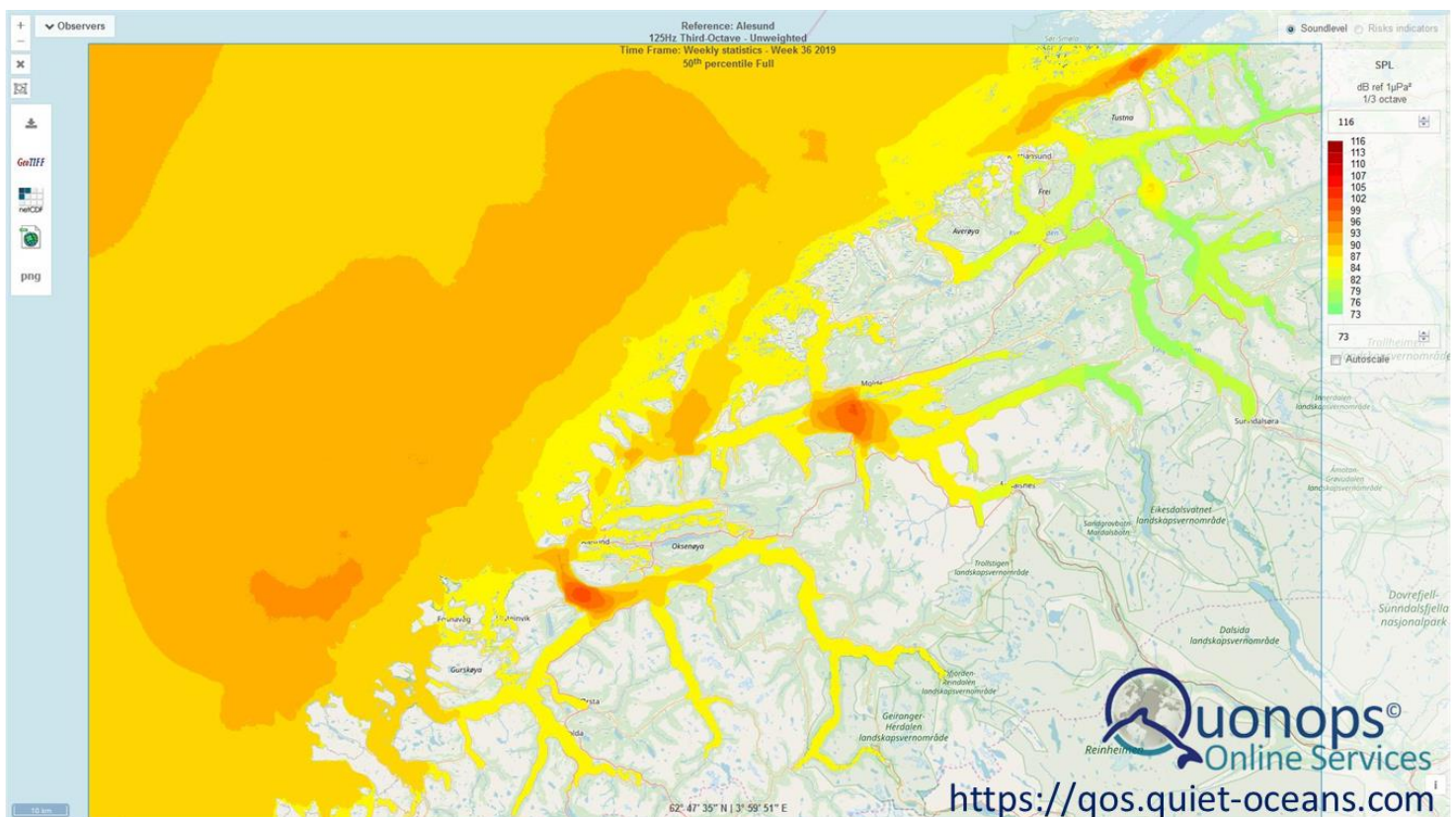


Figure 13: Ambient noise map of the area of Ålesund. Median statistical noise for Week 2019/36. Percentile 50%. Third-octave 125 Hz. (Source: Quonops® Online Services)

Chapter IV. Recommendations

Based on the levels measured during this series of explosions and the efficiency of bubble curtain, the following recommendation can be made:

With the objective to reduce the level of noise:

- Use the minimum amount of charges needed;
- Divide the total charge in several blasting groups separated by micro-delays (25 ms or more);
- Implement noise mitigation systems, like bubble curtains and other solutions, around blasting in order to reduce significantly sound levels at the scale of the basin or implement a bubble curtain (or alternative solution) in line to preserve specific area;

With the objective avoid the acoustic impact on marine species²:

- Make an acoustic impact assessment to know whether an acoustic risk is caused by the planned noisy activity, and to quantify this risk;
- Implement a soft-start (or ramp up) procedure in order to gradually increase the level of sound up to the maximum levels of the operation;
- Implement real-time passive acoustic monitoring and possibly visual observation at least 30 minutes before the start of each operation to ensure that no cetacean is present in the area around the blasting in which physiological damage would occur;
- Pursue real-time passive acoustic monitoring and possibly visual observation at least 30 minutes after the blasting to report any abnormal event on marine life.

² Fish, marine mammals and other marine species can suffer from physiological damage and disturbance caused by anthropogenic noisy activities at sea.

Chapter V. Bibliography

- [1] Folegot, T., Clorennec, D.,(2014), From Footprint prediction to risk assessment and focused mitigation, Proceedings of the ECS/ASCOBANS/ACCOBAMS Joint Workshop on introducing noise into the marine environment – what are the requirements for an impact assessment for marine mammals ?, European Cetacean Society's 28th Annual Conference, Liege, Belgium, 6th April 2014.
- [2] C. Audoly, C. Rousset, E. Baudin and T. Folegot (2016), AQUO Project: Research on solutions for the mitigation of shipping noise and its impact on the marine fauna, a Synthesis of guidelines, International Conference and Exhibition on Underwater Acoustics, Athens, Greece, 2016.
- [3] ANSI S1.11-2004: Specification for Octave-Band and Fractional-Octave-Band Analog and Digital Filters, American National Standard Institute, USA, Reaffirmed by ANSI 2009.
- [4] IEC 1995 (EN 61260), Electroacoustics - Octave-band and fractional-octave-band filters, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 1996.
- [5] G. Le Provost and T. Folegot (2018), Seismic Source Characterization in the North Sea, Recovery of Acoustic Equipment in Lorient, Quiet-Oceans, technical report ref. QO.20170712.01.RAP.019.02A.
- [6] D. Clorennec, G. Le Provost and T. Folegot (2018), Seismic Source Characterization in the North Sea, Design Proving Document, Quiet-Oceans, technical report ref. QO.20170712.01.RAP.001.04A.
- [7] EMODnet, 2012: Seabed substrate data (version 28.6.2012) made available by the EMODnet (European Marine Observation and Data Network) Geology project, funded by the European Commission Directorate General for Maritime Affairs and Fisheries. <http://www.emodnet-geology.eu>.
- [8] Applied Physics Laboratory. (October 1994). *APL-UW High Frequency Ocean Environmental Models Handbook*. Washington DC, USA: University of Washington.
- [9] Collins, M. D. (1994). Generalization of the Split-Step Pade. *J. Acoust. Soc. Am.*, 96, 382-385.
- [10] Collins, M. D., Kuperman, W. A., & Siegman, W. L. (1995). Parabolic Equation for poro-elastic media. *J. Acous. Soc. Am*, 98(3), 1645-1656.
- [11] Pekeris, C. L., Theory of propagation of explosive sound in shallow water, in *Propagation of Sound in the Ocean*, *Geol. Soc. Am., Mem.* 27, 1–112 (1948)
- [12] Wenz, G. (1962). Acoustic Ambient Noise in the Ocean: Spectra and Sources. *J. Acoust. Soc. Am.*, 34:1936-1956.
- [13] NOAA. (2016). Technical guidance for assessing the effects of anthropogenic sound on marine mammal hearing - Underwater acoustic thresholds for onset of permanent and temporary threshold shifts. NOAA Technical memorandum NMFS-OPR-55, NOAA.
- [14] ICES. (2018). Ecosystem overviews - Greater North Sea Ecoregion. Visited on the 04 26th, 2018, on ICES: <http://www.ices.dk/explore-us/Action%20Areas/ESD/Pages/Greater-North-Sea-Key-State-Marine-mammals.aspx>
- [15] Simar, V., Mélis, B., & Pézeril, S. (s.d.). Guide d'identification et d'observation des mammifères marins en Manche et Mer du Nord. 1-48. (I. Tétéghem, Éd.)
- [16] Shirihi H., J. B. (2007). Guide des mammifères marins du monde. Paris, France: Delachaux & Niestlé SA.
- [17] Miller, L., & Wahlberg, M. (2013). Echolocation by the harbor porpoise: life in coastal waters. *Frontiers in Physiology*, 4.

- [18] Richardson, W., Malme, C., Green, C., & Thomson, D. (1995). *Marine Mammals and Noise*. San Diego, CA: Academic Press.
- [19] Tougaard, J., Poulsen, L. R., Amundin, M., Larsen, F., Rye, J., & Teilman, J. (2006). Detection function of T-PODS and estimation of porpoise densities. (T. N. Leeney RH, Éd.) In proceedings of the Workshop on static acoustic monitoring of cetaceans, European Cetacean Society, Special Issue(46).
- [20] Bailey, H., Senior, B., Simmons, D., Rusin, J., Picken, G., & Thompson, P. (2010). Using T-PODs to assess variations in the occurrence of coastal bottlenose dolphins and harbour porpoises. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 20(2), 150-158.
- [21] Pehlke. (2013). *Entwicklung und Erprobung des Großen Blasenschleiers zur Minderung der Hydroschallemissionen bei Offshore-Rammarbeiten* Projektkurztitel: HYDROSCHALL-OFF BW II. Förderkennzeichen 0325309A/B/C.
- [22] Pehlke, H. G. (2013). *Schlussbericht Entwicklung und Erprobung des Großen Blasenschleiers zur Minderung der Hydroschallemissionen bei Offshore Rammarbeiten*.