

Dokumenttype
Baggrundsrapport

Dato
Juni 2021

FORUNDERSØGELSE KATTEGATFORBINDELSEN MODELLERING AF UNDERVANDSSTØJ



FORUNDERSØGELSE KATTEGATFORBINDELSEN MODELLERING AF UNDERVANDSSTØJ

Projekt navn **Kattegatforbindelsen, Kyst-Kyst**
Projekt nr. **110041633**
Modtager **Sund & Bælt**
Dokumenttype **Baggrundsrapport**
Version **1**
Dato **15-06-2021**
Udarbejdet af **Christopher McKenzie Maxon**
Kontrolleret af **EV + MAJH**
Godkendt af **MIBR**
Beskrivelse **Baggrundsrapport vedrørende modellering af undervandsstøj i forbindelse med anlægsaktiviteter for en Kattegatforbindelse**

Rambøll
Hannemanns Allé 53
DK-2300 København S

T +45 5161 1000
F +45 5161 1001
<https://dk.ramboll.com>

INDHOLD

1.	Indledning	2
2.	Støjkilder og udvalgte løsningmodeller	4
2.1	Støjkilder	4
2.2	Løsningsmodeller	4
3.	Undervandsstøj	6
3.1	Gældende akustiske parametre	6
4.	Undervandsstøjsudbredelsesmodel	8
5.	Grænseværdier for undervandsstøj	9
6.	Undervandsstøjkilder	11
6.1	Boblegardiner	11
7.	Resultater	13
7.1	KKØ 2.1 sænketunnel	13
7.2	KKØ 2.1 hængebro	13
7.3	KKØ 3.1 sænketunnel/lavbro	14
7.4	KKV 1.2 sænketunnel/lavbro	14
7.5	KKV 2.1 højbro/lavbro	15
7.6	KKV 2.3 højbro/lavbro	15
7.7	KKV 3.1 højbro/lavbro	15
7.8	KKV 3.4 højbro/lavbro	16
8.	Alternativ anlægsmetode	17
9.	Referencer	20

1. INDLEDNING

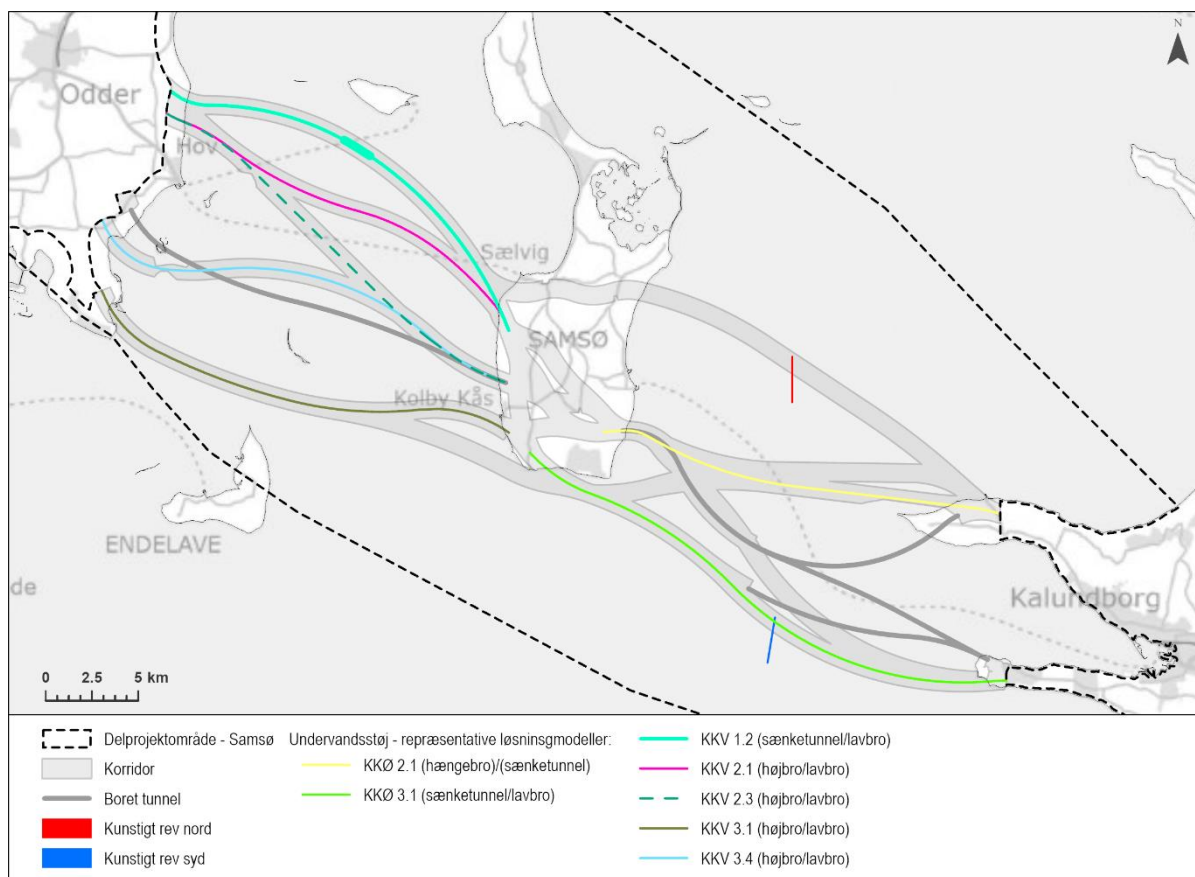
Med finansloven for 2019 blev det besluttet at gennemføre en forundersøgelse for en fast forbindelse over Kattegat. Analysen forventes afsluttet ultimo 2021. Der skal gennemføres en forundersøgelse for både en ren vejforbindelse (4+0) og en kombineret vej- og jernbaneforbindelse over Kattegat (4+2).

I den forbindelse er der udarbejdet en række rapporter, der blandt andet omfatter de helt indledende miljøundersøgelser for både landdelen og den marine del (kyst-kyst). Dette baggrundsnotat, beskriver den modellering af undervandslyd, der er udarbejdet i forbindelse med den miljøfaglige baggrundsrapport for kyst-kyst.

Mere konkret er formålet med dette baggrundsnotat at beskrive analysen af det forventede potentielle undervandslydniveau. Resultatet af modelleringerne vil i sidste ende blive benyttet i den miljøfaglige baggrundsrapport, som et værktøj til at vurdere den potentielle påvirkning på havpattedyr.

Modelleringen inkluderer bestemmelse af påvirkningszoner (afstande) fra de forskellige støjende anlægsaktiviteter for forskellige løsningsmodeller. Påvirkningszonerne er baseret på fastsatte grænseværdier for undervandsstøj, hvor potentiel påvirkning på havpattedyr kan forekomme.

Der er i den miljøfaglige baggrundsrapport analyseret potentielle miljøpåvirkninger af 32 forskellige løsningsmodeller beliggende i delprojektområde Samsø. Et antal af disse er udvalgt som repræsentative løsningsmodeller (Figur 1-1).



Figur 1-1 Repræsentative løsningsmodeller, der benyttes i modellering af undervandsstøj. Ydermere vises korridorer for løsningsmodeller, der indgår i den miljøfaglige baggrundsrapport.

Informationer om hvilke aktiviteter, der indgår i anlægsarbejdet, er baseret på et fagnotat udarbejdet af COWI (COWI 2020, Teknisk notat. Interfaceinformation til miljøundersøgelser [1]).

2. STØJKILDER OG UDVALGTE LØSNINGSMODELLER

2.1 Støjkilder

Aktiviteter i forbindelse med anlæg af en Kattegatforbindelse kan forårsage undervandslyd og vibrationer af varierende frekvenser og intensiteter. Baseret på informationer om en Kattegatforbindelses sandsynlige anlægsaktiviteter [1]), er det vurderet at følgende aktiviteter kan give anledning til undervandsstøj:

- Nedvibrering af spunsvæg. I forbindelse med sænketunnelløsninger må det forventes, at cut & cover udføres i udgravning med enten sekantvægge, slidsevægge og/eller spunsvægge. I hvilket omfang den tilstødende rende med sænketunnelelementer placeret imod cut & cover tunnel bliver udført med spuns, vil afhænge af de aktuelle forhold. Det er som udgangspunkt antaget, at alle sænketunnelløsninger vil inkludere nedvibrering af spunsvægge [1]. Nedvibrering af spunsvæg giver anledning til impulsstøj (se afsnit 3.1).
- Nedvibrering af casing til monopæle. I udgangspunktet forventes det, at broer kan funderes direkte uden brug af pæleramning, bortset fra enkelte løsninger vest for Samsø, hvor det er planlagt at lave fundering af lavbro på monopæle [1]. Ved fundering af monopæle nedvibreres først en såkaldt casing, som er en ramme, der reducerer et evt. sedimentspild. Efterfølgende bores monopælen gennem casingen ned i havbunden. Nedvibrering af casing giver anledning til impulsstøj (se afsnit 3.1).
- Gravearbejder. I forbindelse med etablering af brofundamenter, sænketunnelelementer og arbejdskanaler udføres gravearbejder i havbunden. Gravearbejde giver anledning til kontinuerlig støj (se afsnit 3.1).
- Stenlægning. Det forventes, at der bl.a. skal anvendes sten i forbindelse med etablering af brofundamenter og andre anlægstekniske anlæg til beskyttelse af fundamenterne (scour protection), som underlag for fundamenter og i forbindelse med etablering af sænketunnel. Stenudlægning giver anledning til kontinuerlig støj (se afsnit 3.1).
- Anlægsfartøjer. Støj fra anlægsfartøjer er inkluderet som en kilde til undervandsstøj i forbindelse med modelleringen, når denne er i forbindelse med en anden anlægsaktivitet. Støj fra sejlads til og fra anlægsområdet er ikke modelleret selvstændigt. Støj fra anlægsfartøjer giver anledning til kontinuerlig støj (se afsnit 3.1).

2.2 Løsningsmodeller

Der er i den miljøfaglige baggrundsrapport analyseret potentielle miljøpåvirkninger af 32 forskellige løsningsmodeller beliggende i delprojektområde Samsø. Et antal af disse er udvalgt som repræsentative løsningsmodeller (Figur 1-1). I Tabel 2-1 præsenteres de repræsentative løsningsmodeller og de aktiviteter, der genererer undervandsstøj, der er modelleret.

Table 2-1 Modelleret linjeføringer og forventede aktiviteter, der kan give anledning til undervandsstøj.

Scenarie	Linjeføring	Støjkloder modelleret
1	KKØ 2.1 (sænketunnel)	Gravning, stenlægning, skibstrafik, nedvibrering af spunsvæg ved kyst (cut & cover ved sænketunnel)
2	KKØ 2.1 (hængebro)	Gravning, stenlægning, skibstrafik
2	KKØ 3.1 (sænketunnel/lavbro)	Gravning, stenlægning, skibstrafik, nedvibrering af spunsvæg ved kyst (cut & cover ved sænketunnel)
4	KKV 1.2 (sænketunnel/lavbro)	Gravning, stenlægning, skibstrafik, nedvibrering af spunsvæg ved kyst (cut & cover ved sænketunnel)
5	KKV 2.1 (højbro/lavbro)	Gravning, stenlægning, skibstrafik
6	KKV 2.3 (højbro/lavbro)	Gravning, stenlægning, skibstrafik
7	KKV 3.1 (højbro/lavbro)	Nedvibrering af casing til monopæle, gravning, stenlægning, skibstrafik
8	KKV 3.4 (højbro/lavbro)	Nedvibrering af casing til monopæle, gravning, stenlægning, skibstrafik

3. UNDERVANDSSTØJ

Undervandslyd eller undervandsstøj, som lyd i luft, er forstyrrelser fra en kilde i et medium - her vand - der rejser på en 3-dimensionel måde, når forstyrrelsen forplantes med lydens hastighed.

Lyd bevæger sig med forskellig hastighed i forskellige medier. Lydens hastighed bestemmes af densiteten og komprimerbarheden af mediet. Densitet er mængden af materiale i et givet volumen, og kompressibilitet er et mål for, hvor meget et stof kan komprimeres til et givet tryk. Jo tættere og jo mere komprimerbar, jo langsommere vil lydbølgerne bevæge sig. Vand er meget tættere end luft, men da det næsten er ukomprimerbart, er lydens hastighed ca. fire gange hurtigere i vand end i luft. Lydens hastighed kan også blive påvirket af temperaturen. Lydbølger har tendens til at rejse hurtigere ved højere temperaturer.

Undervandslyd kan måles som en ændring i tryk og beskrives som lydtryk og kan måles med en trykfølsom enhed (hydrofon).

På grund af lydens store trykamplituder er det praktisk at bruge en decibel (dB) logaritmisk skala til at kvantificere trykniveauer. Lydtrykniveaue under vand i decibel (dB) er defineret i følgende ligning:

$$\text{Lydtrykniveau (SPL)} = 20\log_{10} (P / P_0)$$

P er trykket og P₀ er referencetrykket. Referencetrykket er 1 mikropascal (μPa) for undervandslyd, som er forskellig for lydtrykniveauer i luften. Af denne grund kan lydtrykniveauer i vand og luft ikke sammenlignes direkte.

Undervandslydniveauer varierer i overensstemmelse med lydkildens tidssignatur og akustiske miljøforhold og kan defineres i fremtiden med hensyn til eksponering, gennemsnit og/eller maksimale niveauer. Følgende akustiske parametre bruges ofte til at vurdere støjpåvirkningen fra undervandsstøjkilder for det identificerede lokale marine liv.

3.1 Gældende akustiske parametre

Følgende nøgleudtryk bruges i dette dokument:

- Sound Pressure Level (SPL) - dette kvantificerer størrelsen af en lyd på et givet punkt, dvs. hvor høj den er og måles i decibel (dB). Som en relativ enhed citeres dB i forhold til 1 mikropascal i undersøiske studier (så dB er 1 μPa).
- Lydeksponeringsniveau (SEL) - dette er et decibel mål for at beskrive, hvor meget lydenergi en receptor (f.eks. et havpattedyr) har modtaget fra en begivenhed og normaliseres til et interval på et sekund (citeret i dB re. 1 μPa²s). Det kan betragtes som et logaritmisk mål for lydeksponering, og derfor svarer en stigning på 3 dB i SEL til en fordobling af lydenergien; dB re. 1 μPa²s.
- Kumulativ lydeksponering (SEL (cum)) - dette er tidsintegralet af det kvadratiske tryk over varigheden af en lyd eller en række lyde. Det gør det muligt at karakterisere lyde af forskellig varighed og niveau med hensyn til total lydenergi normaliseret til et interval på et sekund (citeret i dB re. Pa²s).
- Peak pressure level (PEAK) - lydtrykket fra nul til top på et givet tidspunkt.

- Root mean square (RMS) - gennemsnit af lydtrykket over en given tid; RMS SPL bruges ofte til at evaluere virkningerne af kontinuerlige støjkilder. RMS-lydtrykniveauet eller SPL er det gennemsnitlige kvadrattrykniveau.
- Impulsstøj/pulserende/impulsiv lyd - en diskontinuerlig lydkilde, der omfatter en eller flere øjeblikkelige lyde som under ammunition.
- Kontinuerlig støj/lyd - lydkilde, som en skibsmotor, eller brummen som ved boreoperationer.

4. UNDERVANDSSTØJSUDBREDELSESMODEL

En 3-dimensionel undervandsakustisk model af området er, i programmet dBSea [2], opbygget af batymetrien (vanddybden), havbundsforhold og vandsøjledata (EMODNET).

Undervandsstøjudbredelsen er beregnet med den paraboliske metode som er en alsidig og robust metode til at beregne lydfeltet uden for lydkilden, genereret af anlægsarbejder. Denne metode er en af de mest anvendte indenfor undervandsakustikområdet.

Udbredelsesmodellen til bestemmelse af undervandslyd beregner estimater af lydfeltet, der genereres fra undervandsstøjkilder. Modelleringsresultaterne bruges til at bestemme, om afstandene (støjkort) fra de identificerede undervandsstøjkilder og ud til grænseværdierne for de identificerede havpattedyr i området kan overholdes. For at fremstille stedspecifikke estimater af det udstrålede støjfelt som en funktion af rækkevidde og dybde anvender lydudbredelsesmodellen akustiske parametre, der er relevante for det geografiske fokusområde, herunder det forventede lyd hastighedsprofil for vandet, batymetrien og de geoakustiske egenskaber af havbunden. Der er beregnet afstande til grænseværdierne for henholdsvis den midlertidige (TTS¹) og permanente (PTS²) hørenedsættelse og adfærd for sæler og marsvin.

Undervandsstøj, der forekommer som følge af projektet, behandles hovedsageligt i forhold til påvirkning af havpattedyr og andre marine dyrearter i anlægsfasen. Indledende vurderinger peger i retningen af, at påvirkningerne af undervandsstøj i driftsfasen forventes at udfylde et beskedent niveau.

Gennem drøftelser mellem Sund & Bælt Holding og Rambøll er otte modelkørsler fastlagt, hvor blandt andet påvirkninger af undervandsstøj fra betydende anlægsaktiviteter modelleres, beregnes og videreformidles til vurderinger af marinbiologer.

Beregning af undervandsstøj

I forlængelse af modelopbygningen beregnes undervandsstøjen for betydende anlægsaktiviteter ved de otte modelkørsler. Modelleringsresultaterne finder anvendelse ved bestemmelse af de potentielle påvirkningsafstande fra de identificerede betydelige undervandsstøjkilder.

Potentielle påvirkninger på havpattedyr fra øgede støjniveauer kan forekomme gennem en række processer, herunder:

- Fysisk skade og høretab (PTS og TTS)
- Forstyrrelse af dyrs adfærd

Med viden om påvirkningsgrænser for adfærdsreaktion, midlertidigt og permanent høretab fastlægges støjkonsekvensafstande i de områder, der påvirkes af forskellige aktiviteter.

For hver løsningsmodel er der for den pågældende relevante anlægsaktivitet modelleret støjudbredelsen (påvirkningszonen for adfærd for marsvin) for 3-4 repræsentative beregningspunkter på linjeføringen. Baseret på disse modelresultater er der efterfølgende genereret en tabel med afstanden til påvirkning (i meter) fra hver aktivitet (afsnit 2.1) i relation til havdybde for hver løsningsmodel.

¹ TTS: Temporary Threshold Shift = En midlertidig tærskelforskydning er, når evnen til at høre reduceres midlertidigt.

² PTS: Permanent Threshold Shift = En permanent tærskelforskydning er, når evnen til at høre reduceres permanent, hvilket medfører et permanent høretab.

5. GRÆNSEVÆRDIER FOR UNDERVANDSSTØJ

Fysiske skader på høreapparatet kan føre til permanente ændringer i dyrenes detektionstærskel (permanent tærskelforskydning, PTS). Dette kan skyldes ødelæggelse af sensoriske celler i det indre øre eller ved metabolisk udmattelse af sensoriske celler, støtteceller eller endda auditive nerveceller. Høretab er normalt kun midlertidigt (midlertidig tærskelforskydning, TTS), og dyret vil genvinde sine oprindelige påvisningsevner efter en restitutionsperiode. For PTS og TTS er lydintensiteten en vigtig faktor for graden af høretab, ligesom frekvensen, eksponeringsvarigheden og længden af restitutionstiden er.

Evnen til at høre lyde varierer på tværs af en arts høreområde. De fleste audiogrammer fra pattedyr har en typisk "U-form", hvor frekvenser i bunden af "U" er dem, som dyret er mere følsomme for med hensyn til hørelse. Auditive vægtningsfunktioner afspejler således et dyrs evne til at høre en lyd (og afspejler ikke nødvendigvis, hvordan et dyr opfatter og adfærdsmæssigt reagerer på den lyd). For at afspejle højere hørelsesfølsomhed ved bestemte frekvenser vægtes lyde ofte. Auditive vægtningsfunktioner er blevet foreslået for havpattedyr, specifikt forbundet med PTS/TTS akustiske tærskler udtrykt i SELcum-matricen, som tager højde for, hvad der er kendt om havpattedyrs hørelse [3]. Meget højfrekvente (VHF) vægtede støjtærskelgrænser er gældende for marsvin, mens og "Phocid Carnivores in Water" PCW vægtede støjtærskelgrænser er gældende for sæler.

De foreslåede kriterier for PTS og adfærdsmæssig respons i denne rapport er baseret på resultater præsenteret i videnskabelig litteratur og/eller almindeligt anvendt i øjeblikket i miljøkonsekvensvurderinger af undervandsstøj [3], Tabel 5-1 .

Tabel 5-1 Estimerede grænseværdier for adfærd, TTS³ og PTS⁴ på marsvin og sæler for impulsstøj og kontinuerlig støj. Der findes ikke en grænse for adfærdspåvirkning for sæler [3].

Påvirkningstype*	Marsvin			Sæler	
	PTS (VHF-vægtet)	TTS (VHF-vægtet)	Adfærd	PTS (PCW-vægtet)	TTS (PCW-vægtet)
Impulsstøj (vibrering)	155 dB SEL	140 dB SEL	100 dB re. 1 μPa	185 dB SEL	170 dB SEL
Kontinuerlig støj (gravearbejde, stenlægning mm)	173 dB SEL	153 dB SEL	100 dB re. 1 μPa	201 dB SEL	181 dB SEL
SEL-grænseværdier i dB re 1 μPa ² s under vand					
VHF: Very high frequency (marsvin)					
PCW: Phocid in water (sæler)					
*Baseres på nye guidelines - fra Southall, 2019 [3]					

Grænseværdier for marine pattedyr er angivet som et kumulativt eksponeringsniveau over 24 timers aktivitet (SELcum), dvs. som en akkumuleret dosis over alle de impulser dyrene modtager indenfor en 24-timers periode. Hvilket betyder, at for den simplest mulige situation, hvor støjen er den samme i alle impulser, og dyrene ikke bevæger sig, så skal der lægges $10 \cdot \log_{10}(N)$ til værdien for den enkelte puls, hvor N er antallet af pulser (ramningslag).

³ TTS: Temporary Threshold Shift = En midlertidig tærskelforskydning er, når evnen til at høre reduceres midlertidigt.

⁴ PTS: Permanent Threshold Shift = En permanent tærskelforskydning er, når evnen til at høre reduceres permanent, hvilket medfører et permanent høretab.

Da dyr ikke er stationære⁵, er der i modellen inkluderet en simpel model for dyrenes flugt. Modellen inkluderer en tærskel for reaktion efterfulgt af bevægelse væk fra kilden, som enten kan foregå i en lige linje vinkelret på sporet eller radialt væk fra lydkilden.

Modtagerbevægelse (dyr) er modelleret som en bevægelse med en hastighed på 1,5 m/s.

Baseret på DCEs (Danish Center for the Environment) anbefaling for adfærd for marsvin, er der brugt 100 dB re. 1 uPa (VHF-vægtet) [4] og for sæler findes ingen tærskel, men den ligger formentlig en anelse højere end for marsvin.

⁵ Modellen kan inkludere en antagelse om at dyrene er stationære, hvilket vil være en worst case-antagelse. Dette vil dog overvurdere omfanget af påvirkningszonen, hvor tærskelværdierne er overskredet, betydeligt.

6. UNDERVANDSSTØJKILDER

De anvendte kildestyrker er baseret på internationale målinger, kilde-data og studier (se Tabel 6-1 **Fejl! Henvisningskilde ikke fundet.**).

Baseret på eksisterende undersøiske lyd-målinger er lydkildens niveauer og frekvensspektre estimeret for de identificerede signifikante lydkilder for potentielle undervandsstøjpåvirkninger.

Hvor det er relevant for at opnå et ækvivalent kildeniveau ved 1 m fra kilden med henblik på akustisk formeringsmodellering, er trykfeltet reproduceret i henhold til cylindrisk spredningstab eller $15 \cdot \log(r)$. Formålet med back-formeringstrinet er at bestemme det effektive kildeniveau ved 1 m, der bruges i den akustiske formeringsmodel.

Tabel 6-1 Kildestyrker benyttet i støjmodelleringen.

Aktiviteter	Lydstryke			
	Tid/per dag (timer)	SEL @ 1 meter, dB re. 1 uPa2s	SELCum faktor, dB re. 1 uPa2s	SELCum, dB re. 1 uPa2s
Gravning c	8	185	44,6	229,6
Stenlægning [5][6]	8	185	44,6	189,6
Nedvibrering af spuns med 2X boble [5][6]	6	187	43,3	230
Nedvibrering af monopæle med 2X boble [5][6]	6	187	43,3	230

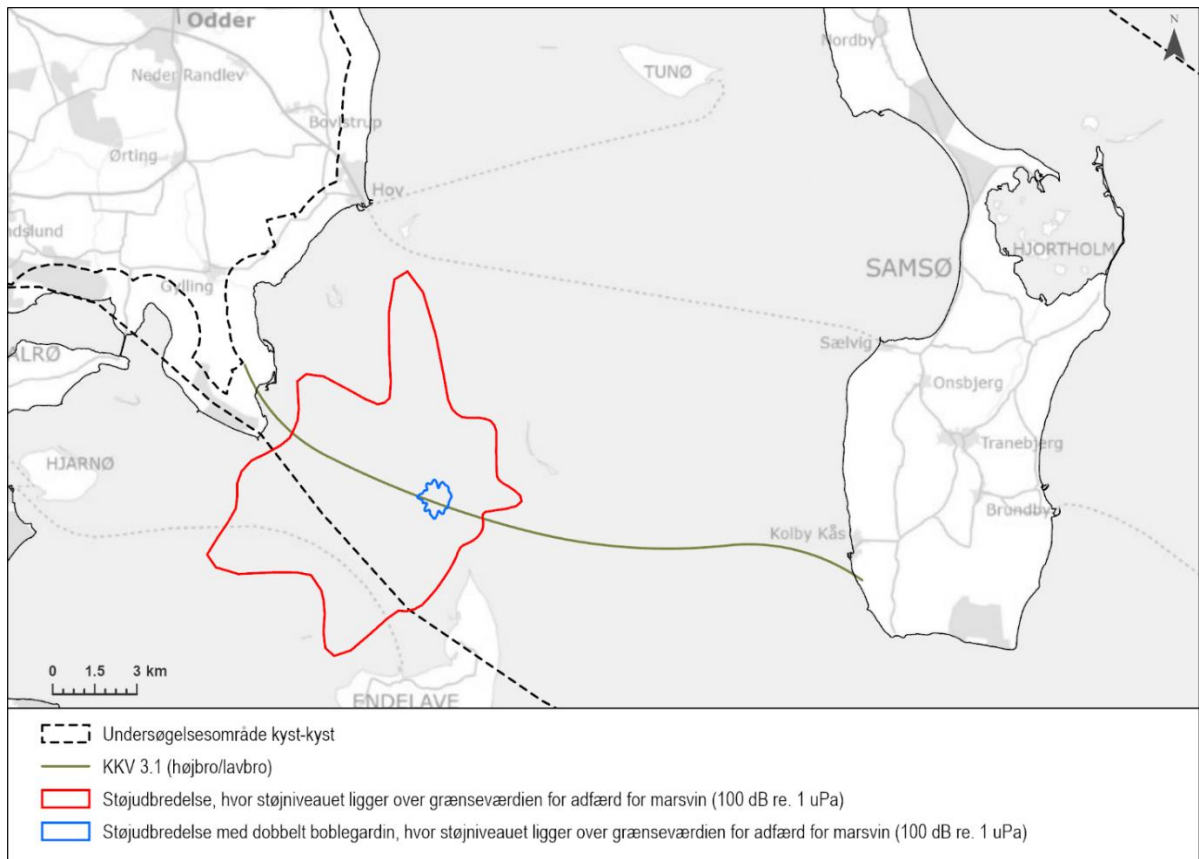
6.1 Boblegardiner

Det er på et tidligt stadie af forundersøgelsen identificeret, at anlægsaktiviteterne, som inkluderer nedvibrering af spuns og casing til monopæle, kræver implementering af afværgetiltag.

Boblegardiner er støjreducerende afværgetiltag, der bruges til at reducere og absorbere undervandsstøj fra støjende anlægsaktiviteter. Et boblegardin består af et eller to cirkulære luftslanger, der placeres på havbunden rundt om monopælen eller rundt om spunsarbejdet, og som fødes med luft fra store kompressorer på et tilhørende skib. Luftboblerne fra slangen danner således et gardin af luft, der både reflekterer (og dermed tilbageholder) lyden inden for luftcirklen og absorberer og spreder den akustiske energi som varme. På grund af forskellen i tæthed og lydhastighed mellem vand og luft er der en impedansoverensstemmelse. Da luft i modsætning til vand er komprimerbar, ændrer bobler i vand kompressibiliteten af vand/luftblandingen og lydets formerings-hastighed inden i medier. Akustisk stimulation af bobler tæt på deres resonansfrekvens reducerer effektivt amplitude af den udstrålede lydbølge ved hjælp af sprednings- og absorptionseffekter. Interaktion mellem de mange gasbobler øger deres støjreduktionspotentiale.

Et eksempel på effekten af et dobbeltboblegardin ses på Figur 6-1.

Der er i forbindelse med modelleringen implementeret dobbelt boblegardin på for alle løsningsmodeller, der indeholder nedvibrering af spuns (løsningsmodeller inkl. sænketunnel) og nedvibrering af casings.



Figur 6-1 Støjudbredelse forårsaget af anlægsaktiviteter ved nedvibrering af casing til monopæle ved lavbro-løsning uden (rød konturlinje) og med (blå konturlinje) dobbelt boblegardin (eksempel KKV 3.1 (lavbro)), hvor støjniveauet ligger over grænseværdien for adfærd for marsvin (100 dB re. 1 uPa).

7. RESULTATER

Nedenfor præsenteres resultaterne af undervandsstøjmodelleringen for de otte repræsentative løsningsmodeller og de ekstrapolerede data for hver anlægsaktivitet for forskellige vanddybder (se afsnit 4).

7.1 KKØ 2.1 sænketunnel

Tabel 7-1 Den gennemsnitlige støjdbredelse (m) fra anlægsaktiviteter forårsaget af de to typer af anlægsstøj (impulsstøj og kontinuerlig støj), hvor støjniveauet ligger over grænseværdien for adfærd for marsvin (100 dB re. 1 µPa).

Dybde (m)	Kontinuerlig støj (gravearbejder, stenlægning, skibstrafik)	Impulsstøj (nedvibrering af spunsvægge med dobbelt boblegardin)
	Afstand (m)	Afstand (m)
0-5	-	200
5-10	-	300
10-15	600	500
15-20	800	700
20-25	910	800
25-30	700	-
30-50	620	-

7.2 KKØ 2.1 hængebro

Tabel 7-2 Den gennemsnitlige støjdbredelse (m) fra anlægsaktiviteter forårsaget af kontinuerlig støj, hvor støjniveauet ligger over grænseværdien for adfærd for marsvin (100 dB re. 1 µPa).

Dybde (m)	Kontinuerlig støj (gravearbejder, stenlægning, skibstrafik)
	Afstand (m)
0-5	800
5-10	1300
10-15	1100
15-20	900
20-25	900
25-30	800
30-50	700

7.3 KKØ 3.1 sænketunnel/lavbro

Tabel 7-3 Den gennemsnitlige støjdbredelse (m) fra anlægsaktiviteter forårsaget af de to typer af anlægsstøj (impulsstøj og kontinuerlig støj), hvor støjniveauet ligger over grænseværdien for adfærd for marsvin (100 dB re. 1 µPa).

Dybde (m)	Kontinuerlig støj (gravearbejder, stenlægning, skibstrafik)	Impulsstøj (nedvibrering af spunsvægge med dobbelt boblegardin)
	Afstand (m)	Afstand (m)
0-5	-	200
5-10	-	300
10-15	600	500
15-20	800	700
20-25	910	800
25-30	700	-
30-50	620	-

7.4 KKV 1.2 sænketunnel/lavbro

Tabel 7-4 Den gennemsnitlige støjdbredelse (m) fra anlægsaktiviteter forårsaget af de to typer af anlægsstøj (impulsstøj og kontinuerlig støj), hvor støjniveauet ligger over grænseværdien for adfærd for marsvin (100 dB re. 1 µPa).

Dybde (m)	Kontinuerlig støj (gravearbejder, stenlægning, skibstrafik)	Impulsstøj (nedvibrering af spunsvægge med dobbelt boblegardin)
	Afstand (m)	Afstand (m)
0-5	1100	650
5-10	1400	900
10-15	1000	1200
15-20	800	1100
20-25	1000	1000
25-30	1400	1300
30-50	1600	-

7.5 KKV 2.1 højbro/lavbro

Tabel 7-5 Den gennemsnitlige støjdbredelse (m) fra anlægsaktiviteter forårsaget af kontinuerlig støj, hvor støjniveauet ligger over grænseværdien for adfærd for marsvin (100 dB re. 1 µPa).

Dybde (m)	Kontinuerlig støj (gravearbejder, stenlægning, skibstrafik)
	Afstand (m)
0-5	1000
5-10	1300
10-15	1000
15-20	800
20-25	600
25-30	800
30-50	1000

7.6 KKV 2.3 højbro/lavbro

Tabel 7-6 Den gennemsnitlige støjdbredelse (m) fra anlægsaktiviteter forårsaget af kontinuerlig støj, hvor støjniveauet ligger over grænseværdien for adfærd for marsvin (100 dB re. 1 µPa).

Dybde (m)	Kontinuerlig støj (gravearbejder, stenlægning, skibstrafik)
	Afstand (m)
0-5	1000
5-10	1300
10-15	1000
15-20	800
20-25	600
25-30	800
30-50	1000

7.7 KKV 3.1 højbro/lavbro

Tabel 7-7 Den gennemsnitlige støjdbredelse (m) fra anlægsaktiviteter forårsaget af de to typer af anlægsstøj (impulsstøj og kontinuerlig støj), hvor støjniveauet ligger over grænseværdien for adfærd for marsvin (100 dB re. 1 µPa).

Dybde (m)	Kontinuerlig støj (gravearbejder, stenlægning, skibstrafik)	Impulsstøj (nedvibrering af casing til monopæle med dobbelt boblegardin)
	Afstand (m)	Afstand (m)
0-5	900	800
5-10	1000	700
10-15	1200	1200
15-20	1000	-
20-25	1200	-
25-30	1000	-
30-50	800	-

7.8 KKV 3.4 højbro/lavbro

Tabel 7-8 Den gennemsnitlige støjdbredelse (m) fra anlægsaktiviteter forårsaget af de to typer af anlægsstøj (impulsstøj og kontinuerlig støj), hvor støjniveauet ligger over grænseværdien for adfærd for marsvin (100 dB re. 1 µPa).

Dybde (m)	Kontinuerlig støj (gravearbejder, stenlægning, skibstrafik)	Impulsstøj (nedvibrering af casing til monopæle med dobbelt boblegardin)
	Afstand (m)	Afstand (m)
0 -5	900	800
5-10	1000	700
10-15	1200	1200
15-20	1000	-
20-25	1200	-
25-30	1000	-

8. ALTERNATIV ANLÆGSMETODE

Jf. Interfacenotat [1] udarbejdet af COWI forventes det, at broer kan funderes direkte uden brug af pæleramning. Dette er gældende bortset fra tre KKV-løsningsmodeller (KKV 3.1, 3.2 og 3.4), hvor det er antaget, at fundering på monopiles vil være den mest økonomiske løsning. Dette er behandlet i kapitel 7.

Såfremt det skulle vise sig nødvendigt at pæleramme fundamenter, vil dette kun blive aktuelt for et fåtal af fundamenter. Enten i form af en egentlig hård fundering med bærende pæle eller pæle som jordforstærkning (inklusion piles). Når ramningen forløber ubesværet i de øverste jordlag skønnes 1 m pæl at kunne rammes på 5 minutter. Det er selve rammetiden, hvor der er støj. Der bruges også tid på at flytte rammegrejet til en ny pæleposition etc. I de nederste 5-10 m kan rammetiden være meget større op til 1 time per meter. I gennemsnit for 25 m dybde antager vi ca. 5 timer i snit (den tid, hvor ramningen foregår, hvor der er støj).

- Til et typisk højbrofundament med areal 30x24 m skal der overslagsmæssigt bruges ca. 30 pæle med diameter 1,5 m. Det vil kræve ramning i $30 \times 5 = 150$ timer, hvor der er støj.
- For pylonfundamenterne skal man bruge skønsmæssigt 165 pæle, hvilket vil medføre støj i $165 \times 5 = 825$ timer pr. fundament. Den totale tid for at installere pælene til ét fundament (165 stk. 2,5m diameter pæle) skønnes til 1,5-2 måneder med én maskine.

Som eksempel på undervandsstøjen fra ramme-aktiviteter er der udvalgt følgende scenarier:

1. Den østlige pylon på KKØ 2.1 (hængebro)
2. En lokalitet for en højbrospille på KKV 3.4 (højbro/lavbro).

Nedenfor gives eksempel støjdbredelsen fra nedramning af funderingspæle til en pylon med og uden afværgetiltag (dobbelt boblegardin), hhv. Figur 8-1 og Figur 8-2.

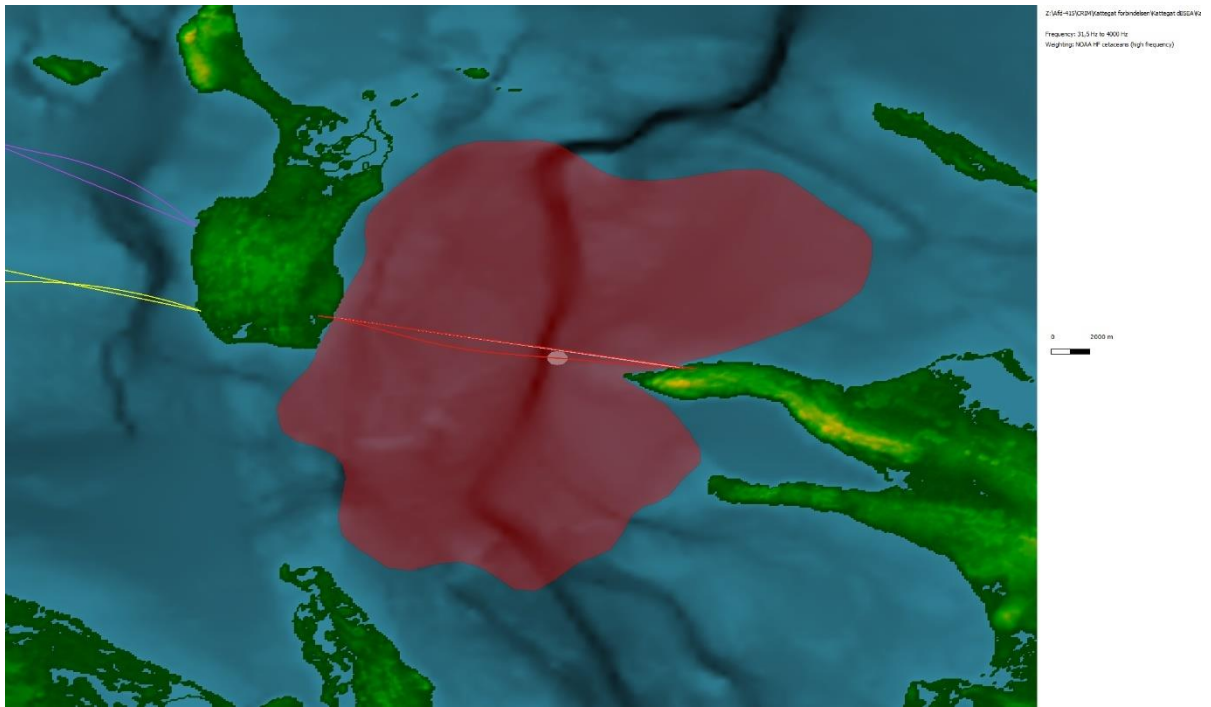
Desuden gives eksempel på støjdbredelsen fra nedramning af funderingspæle til en højbrospille med og uden afværgetiltag (dobbelt boblegardin), hhv. Figur 8-3 og Figur 8-4. **Fejl!**

Henvisningskilde ikke fundet.

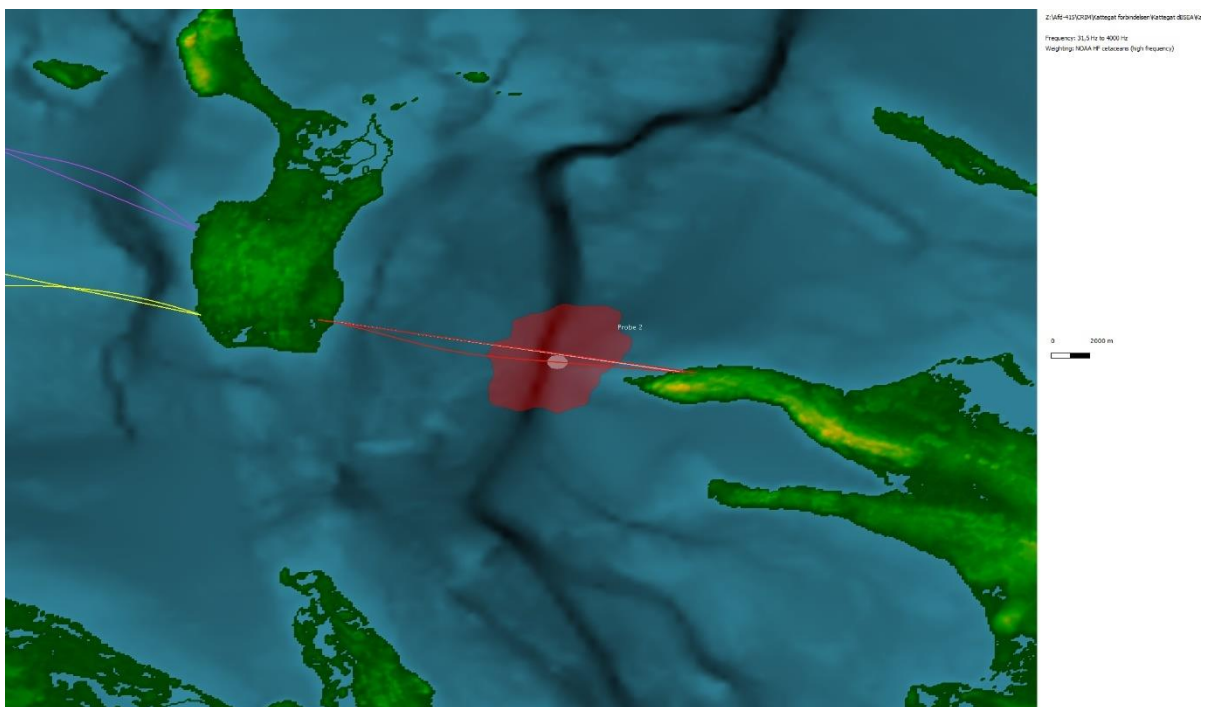
Kilderstyrker brugt til modelleringen ses i Tabel 8-1.

Tabel 8-1 Kildestyrker benyttet i støjmodelleringen.

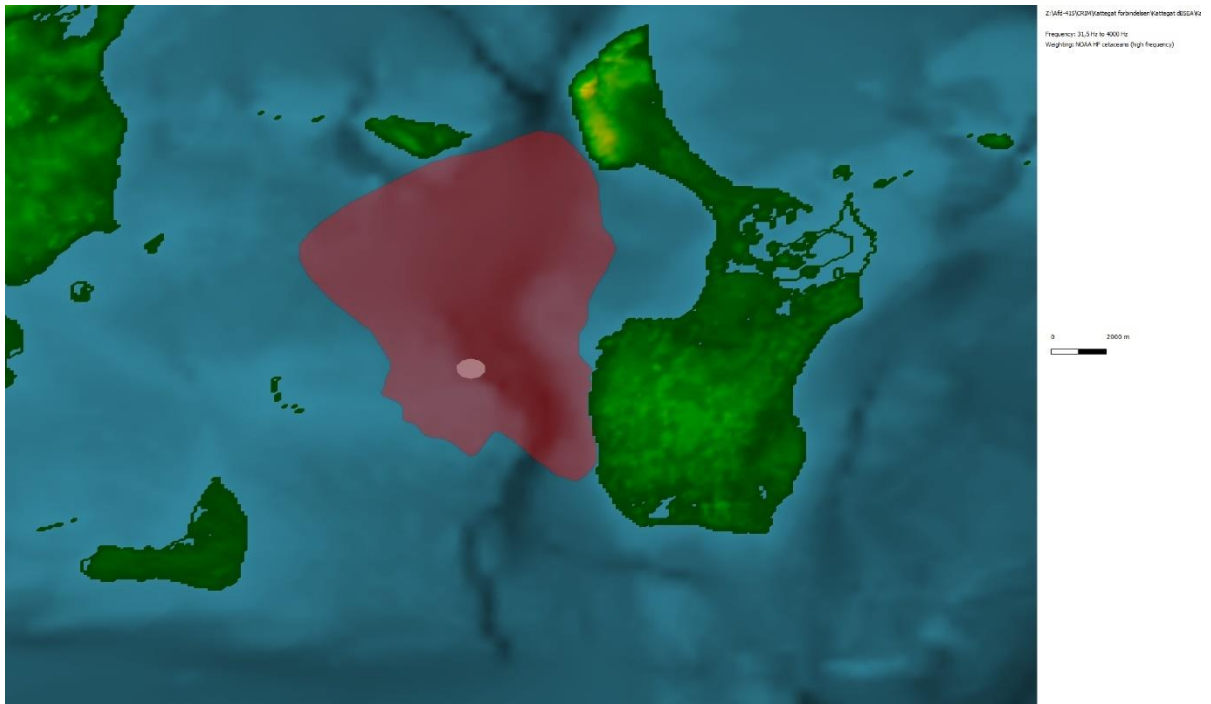
Aktiviteter	Lydstyrke			
	Tid/per dag (timer)	SEL @ 1 meter, dB re. 1 uPa2s	SELcum faktor, dB re. 1 uPa2s	SELcum, dB re. 1 uPa2s
Monopile 1,5 meter pæle ramning med 2X boble [7][8]	6	189	43,5	232
Monopile 2,5 meter pæle ramning med 2X boble [7][8]	6	193	43,5	236



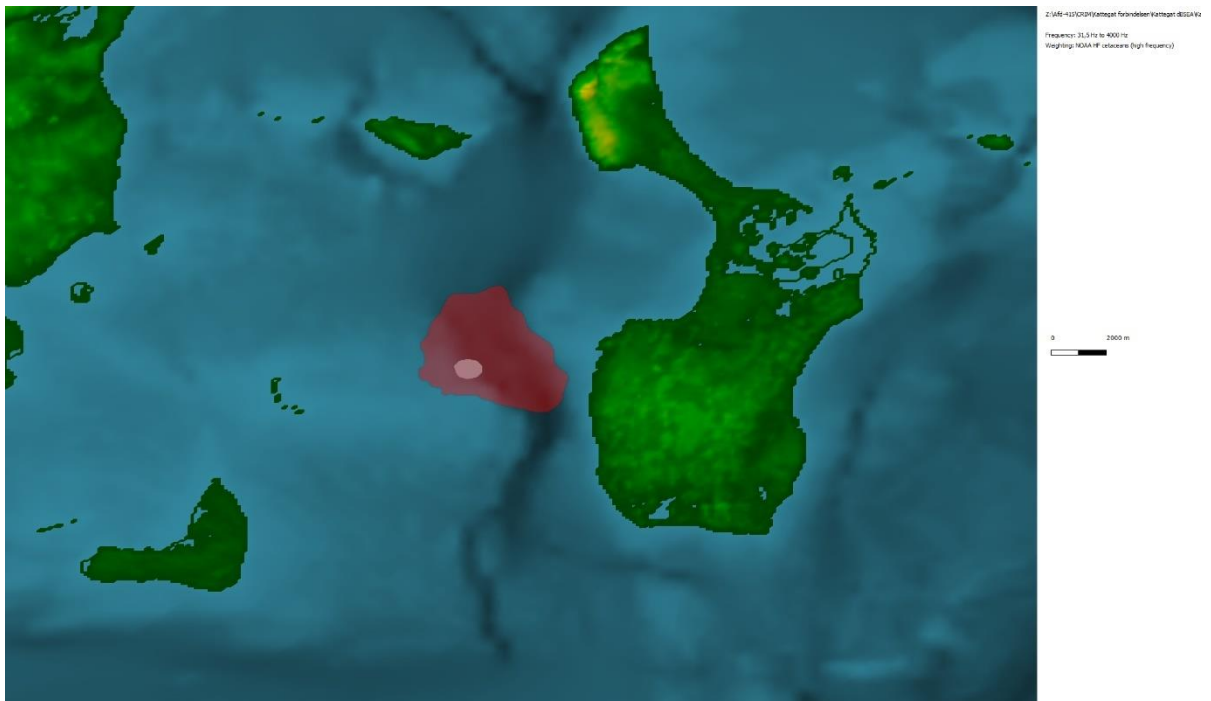
Figur 8-1 Marsvins adfærdsforstyrrelse (100 dB VHF) ved nedramning af funderingspæle uden afværgetiltag. Som eksempel er valgt den østlige pylon på KKØ 2.1. Det røde område angiver det område, hvor marsvin vil ændre adfærd – f.eks. i form af fortrængning.



Figur 8-2 Marsvins adfærdsforstyrrelse (100 dB VHF) ved nedramning af funderingspæle med afværgetiltag (dobbeltbobleardin). Som eksempel er valgt den østlige pylon på KKØ 2.1. Det røde område angiver det område, hvor marsvin vil ændre adfærd – f.eks. i form af fortrængning.



Figur 8-3 Marsvins adfærdsforstyrrelse (100 dB VHF) ved nedramning af funderingspæle uden afværgetiltag. Som eksempel er der valgt en højbrospille på KKV 3.4. Det røde område angiver det område, hvor marsvin vil ændre adfærd – f.eks. i form af fortrængning.



Figur 8-4 Marsvins adfærdsforstyrrelse (100 dB VHF) ved nedramning af funderingspæle med afværgetiltag (dobbeltbobleardin). Som eksempel er der valgt en højbrospille på KKV 3.4. Det røde område angiver det område, hvor marsvin vil ændre adfærd – f.eks. i form af fortrængning.

9. REFERENCER

- [1] COWI, "Kattegatforbindelse – Kyst-Kyst. Anlægstekniske forundersøgelser. Interfaceinformation til miljøundersøgelser. Teknisk notat. Version 0.12. 29. oktober 2020. Dokumentnr. A134385-A-NOT-001," 2020.
- [2] F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M. B. Porter, and H. Schmidt, *Computational Ocean Acoustics*, 2nd ed. Springer-Verlag New York, 2011.
- [3] B. L. Southall *et al.*, "Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Updated Scientific Recommendations for Residual Hearing Effects," *Aquat. Mamm.*, vol. 45, no. 2, pp. 125–232, 2019, doi: 10.1578/AM.45.2.2019.125.
- [4] J. Tougaard, "Input to revision of guidelines regarding underwater noise from oil and gas activities - effects on marine mammals and mitigation measures," *Aarhus Univ. DCE – Danish Cent. Environ. Energy*, vol. 202, no. Aarhus Univ. DCE – Danish Cent. Environ. Energy, p. 52, 2016, [Online]. Available: <http://dce2.au.dk/pub/SR202.pdf>.
- [5] R. Wyatt, "Joint Industry Programme on Sound and Marine Life: Review of Existing Data on Underwater Sounds Produced by the Oil and Gas Industry - Issue 1," no. 1, pp. 1–104, 2008, [Online]. Available: http://www.soundandmarinelife.org/Site/Products/Seiche_Aug08.pdf.
- [6] J. R. Nedwell and B. Edwards, "A review of measurements of underwater man-made noise carried out by Subacoustech Ltd, 1993–2003," 2004.
- [7] M. A. Bellmann, A. May, T. Wendt, S. Gerlach, P. Remmers, and J. Brinkmann, "Underwater noise during percussive pile driving: Influencing factors on pile-driving noise and technical possibilities to comply with noise mitigation values," *ERa Rep. Exp. Rep. piling-driving noise with without Tech. noise Mitig. Meas.*, vol. 2020, no. May, 2020, [Online]. Available: https://www.itap.de/media/experience_report_underwater_era-report.pdf.
- [8] M. A. Bellmann, "Overview of existing noise mitigation systems for reducing pile-driving noise," *INTERNOISE 2014 - 43rd Int. Congr. Noise Control Eng. Improv. World Through Noise Control*, pp. 1–11, 2014.