

**BILAG 2: THYBORØN HAVN – NYT KAJANLÆG – UNDER-
VANDSSTØJ MODELLERING**

Thyborøn Havn – Nyt kaj anlæg

Undervandsstøj modellering

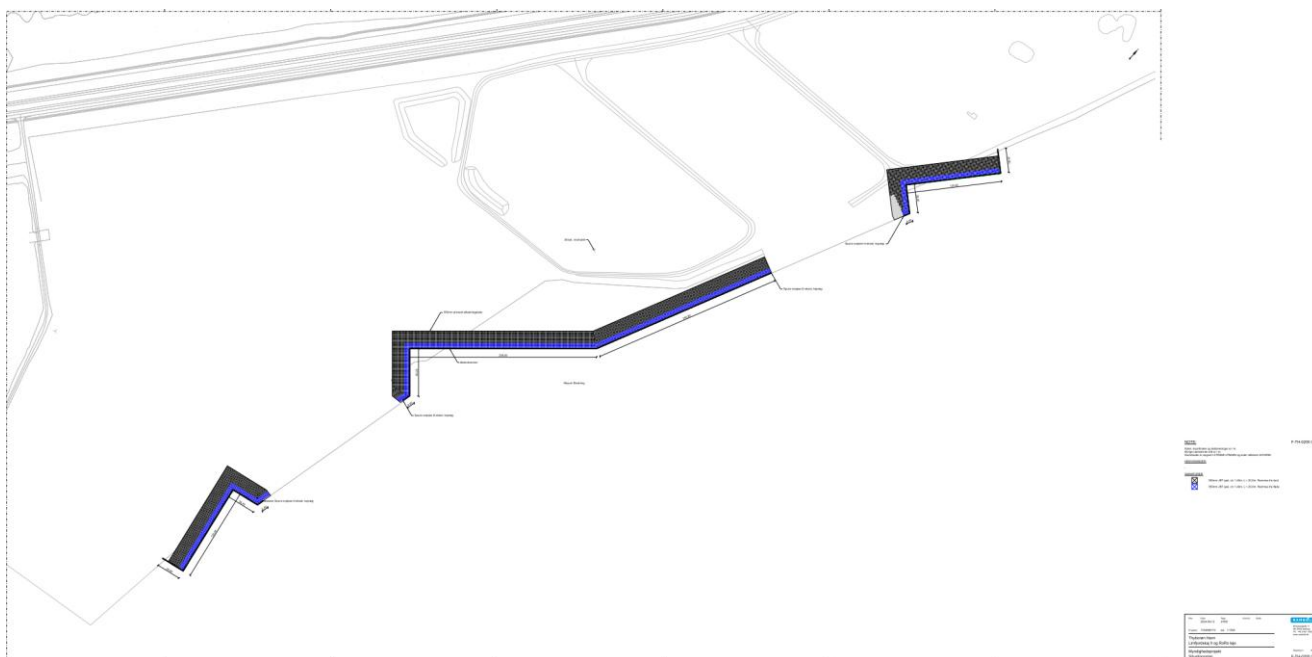
Projekt navn **Thyborøn Havn - Nyt kaj anlæg Thyborøn Havn - Nyt kaj anlæg**
Projekt nr. **1100059229**
Modtager **Trafikstyrelsen og Lemvig Kommune**
Dokumenttype **Bilag rapport**
Version **1.00.2**
Dato **2026/01/06**
Udarbejdet af **---CRIM**
Kontrolleret af **JLSUMKMG**
Godkendt af **AGST**
Beskrivelse

Indhold

1.	Indledning	1
2.	Undervandslyd	2
2.1	Gældende akustiske parametre	3
3.	Grænseværdier	3
3.1	Havpattedyr:	4
4.	Undervandsstøjkilde	5
5.	Modellen	6
5.1	Resultater for marsvin og sæler	7
6.	References	8

1. Indledning

I forbindelse med Thyborøn Havn - Nyt kaj anlæg vil der ske nedramning af betonpæle og spuns som medfører undervandsstøj. Rambøll har fortaget en vurdering og modellering af udbredelsen på undervandsstøj fra anlægsaktiviteter. På [Figur 1-1](#) ses placeringen af de forventede aktiviteter for det nye kajområde bestående af 3 ro-ro lejer.



Figur 1-1. Oversigt over projektområdet ved Thyborøn Sydhavn.

2. Undervandslyd

Undervandslyd, som lyd i luften, 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. Lydtryksniveauet 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.

2.1 Gældende akustiske parametre

Følgende nøgleudtryk bruges i dette dokument:

- Sound Pressure Level (SPL) - udtrykket 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 μ Pa).
- Lydeksponeringsniveau (SEL) - udtrykket 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 μ Pa²s). 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 μ Pa²s.
- Kumulativ lydeksponering (SEL (cum)) - udtrykket 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 støjkluder. RMS-lydtrykniveauet eller SPL er det gennemsnitlige kvadrattrykniveau.
- Pulserende/impulsiv lyd - en diskontinuerlig lydkilde, der omfatter en eller flere øjeblikkelige lyde som under eksplosioner eller ramning af spuns.
- Kontinuerlig lyd - lydkilde, som en skibsmotor, eller brummen som ved boreoperationer eller ved indpumpning af sand.

3. Grænseværdier

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 dog 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, eksponerings-varigheden 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 (DEA 2023, Southall 0219). Meget højfrekvente (VHF) vægtede støj-tærskelgrænser er gældende for marsvin, mens "Phocid Carnivores in Water" (PCW) vægtede støj-tærskelgrænser 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.

3.1 Havpattedyr:

Støjgrænse	Marsvin	Hvidnæse og øresvin	Spættet sæl	Gråsæl
	Impulsiv støj (Pæle/spunsramning)	Impulsiv støj (Pæle/spunsramning)	Impulsiv støj (Pæle/spunsramning)	Impulsiv støj (Pæle/spunsramning)
	Serie af slag og enkelt slag	Serie af slag og enkelt slag	Serie af slag SELcum og enkelt slag	Serie af slag SELcum og enkelt slag
TTS (dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$) (DEA 2023)	140 dB SELcum VHF og 196 dB Peak (Southall 2019)	153 dB VHF SELcum og 224 dB Peak (Southall 2019)	170 dB SELcum PCW og 212 Peak (Southall 2019)	170 dB SELcum PCW og 212 Peak (Southall 2019)
PTS (dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$) (DEA 2023)	155 dB SELcum og 202 dB Peak (Southall 2019)	173 dB VHF SELcum og 230 dB Peak (Southall 2019)	185 dB SELcum PCW og 218 dB Peak (Southall 2019)	201 dB SELcum PCW
Adfærdsforskyrrelse (dB re μPa)	103 dB SEL rms 125 ms VHF enkelt slag (DEA 2023)	160 dB rms enkelt slag (NOAA 2019)	151 dB SEL enkelt slag (Russel 2016) 160 dB rms enkelt slag (NOAA 2019)	151 dB SEL enkelt slag (Russel 2016) 160 dB rms enkelt slag (NOAA 2019)
Værdier er angivet som kumulativ lyd eksponering (Cumulative Sound Exposure (SEL)) – SEL er den samlede tidsintegrationen af det kvadrerede tryk i løbet af en lyd eller en række lyd hændelser. Det muliggør at lyde af forskellig varighed og niveau kan karakteriseres i forhold til total lydenergi (enhed Pa^2s).				

Tabel 3-1. Tærskelværdier for temporære (TTS) og permanente (PTS) grænser for høreskade for hvaler (marsvin), delfiner (hvidnæse og øresvin) og sæler (spættet sæl og gråsæl) udsat for impulsiv undervandsstøj (dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ SEL cum).

Grænseværdier for marine pattedyr er angivet som et kumulativt eksponeringsniveau over 24 timers aktivitet (SELcum) som er en akkumuleret dosis over alle de impulser dyrene modtager indenfor en 24-timers periode. Dvs. 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 (ramningsslag).

En worst case antagelse af et stationært dyr kan foretages, men dette vil overvurdere omfanget af især påvirkningszoner for tærskelværdier betydeligt. Derfor er der også inkluderet en simpel model for dyrenes flugt, herunder en tærskel for reaktion efterfulgt af bevægelse væk fra kilden, enten 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. Flugtrespons er kun indregnet for marsvin¹, da der er endnu ikke samme videnskabelige grundlag for at indregne flugtrespons for sæler.

4. Undervandsstøjkilde

Ramning i fri vandsøjle forud sat at der kun rammes fra en flåde, med 5 minutters soft start. Soft start er ramning med mindre en 10 % ramning engeri. Anlægsperioden vil begynde 1/9.

I alt skal der installeres ca. 550 løbende meter (lbm) **stålspons** til kote ca. -18,0. Varigheden af spunsarbejderne estimeres til 6-7 uger.

I alt skal der rammes ca. 1600 **35x35cm JBT pæle** med en længde på ca. 21 m fra flåde og arbejderne har en forventet varighed af 13-15 uger.

Der må forventes hård ramning, da pælene skal stå med spids i moræneler med styrker $c_u > 500$ kPa.

Duc d'albe (fortøjnings pæl) etableres med 132 løbende meter (lbm) **stålspons** og 180 pæle, antages at være **35x35cm JBT pæle** og ske i forlængelse af det andet kajarbejde. Der skal laves et sekundært RoRo leje i nordende af Limfjordskaj II, som består af et RoRo leje og duc d'albe. I alt forventes rammet ca. 132 løbende meter (lbm) stålspons og ca. 180 pæle. OG ja, vi kan antage 35x35cm pæle.

Pæle	15 uger
Spuns	7 uger
duc d'albe (fortøjnings pæl)	4 uger
Samlet	26 uger

Baseret på eksisterende undersøiske lydmålinger er lydildens niveauer og frekvensspektre estimeret for de identificerede signifikante lydilder for potentielle undervandsstøjpåvirkninger.

Der skal jo foretages nedramninger langs hele havnestrækningen. Men da den nordlige del ligger nærmest Thyborøn Kanal foretages de modellerede støjudbredelser fra den nordlige del af projektområdet, da det er her det antages, at effekten vil være størst (også ift. bathymetri/dybde).

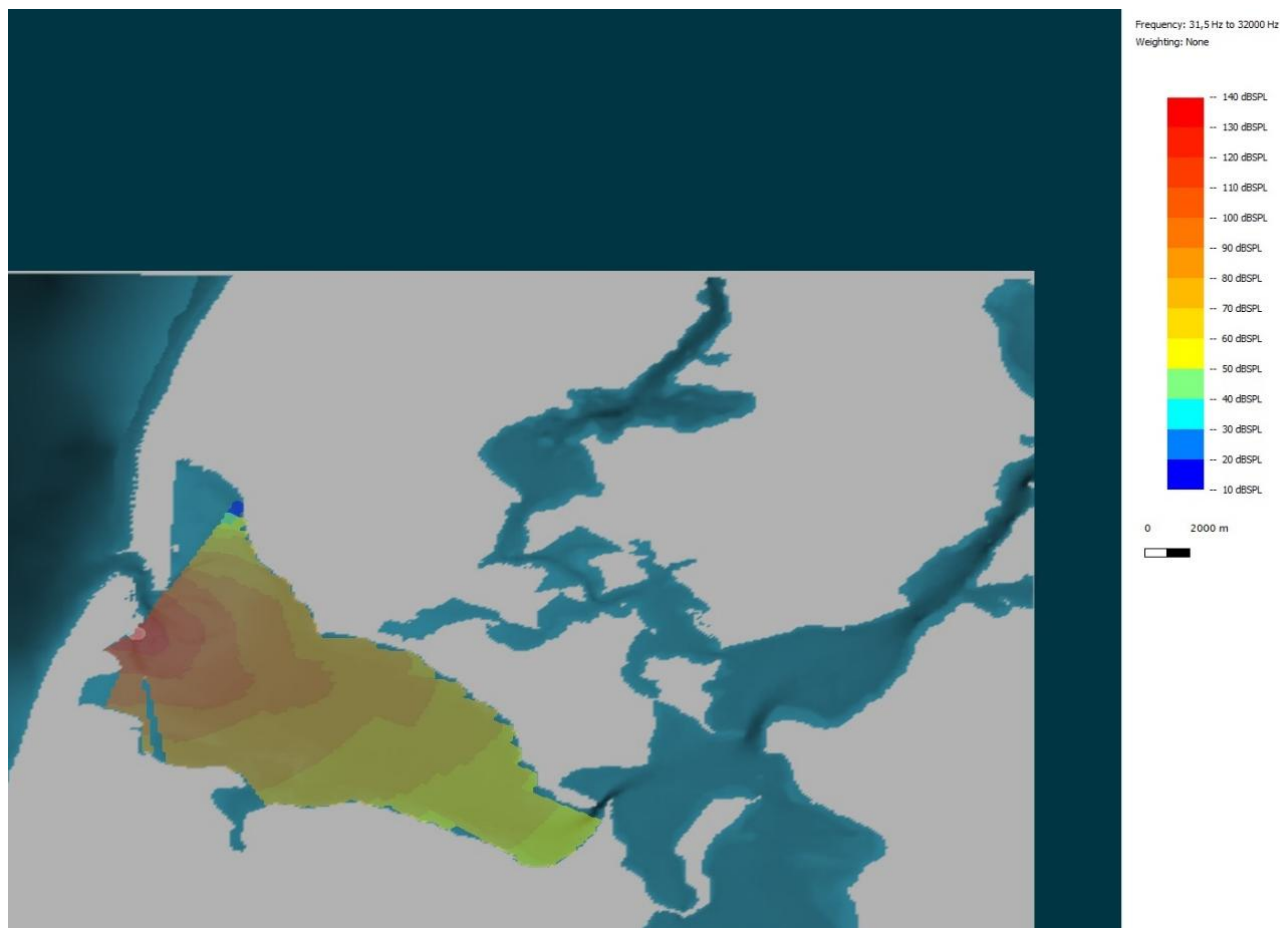
Hvor det er relevant, for at opnå et ækvivalent kildeniveau ved 1 m fra kilden med henblik på akustisk formeringsmodellering, er trykfeltet reproduceret i henhold til cylindrisk spredningstab eller $15 \cdot \log(r)$. Formålet med back-formeringstrinet er at bestemme det effektive kildeniveau ved 1 m,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

Aktivitet	Time/per day (hours)	Lp rms max. fast @ 1 meter, dB re. 1 uPa	Lp Peak @ 1 meter, dB re. 1 uPa	SEL @ 1 meter, dB re. 1 uPa2s
Betonpæle ramning (BOEM 2023)	6	184	195	174
Spuns ramning (Maxon, Vedbæk 2020)	6	190	197	181

Tabel 4-1. Undervandsstøj kildestyrke baseret på anvendt nedramningsaktivitet.

5. Modellen

En 3D undervandakustisk model af området er, i programmet dBSEA, opbygget af bathymetrien, havbundsforhold og vandsøjledata (EMODNET). Udbredelsen af undervandsstøj er beregnet med den paraboliske metode, som er en alsidig og robust metode til at beregne lydfeltet uden for lydkilden, genereret af arbejde med spuns. Denne metode er en af de mest anvendte indenfor undervandsakustikområde.



Figur 5-1. dBSEA undervandsstøj kort (Spunsramning, SEL u-vægtede).

5.1 Resultater for marsvin og sæler

	Effekt	Flugtrespons [m/s]	Beton pæle ramming (med 5 minut "soft-start")	Spuns ramming (med 5 minut "soft-start")
Marsvin	PTS	1.5	0 meters (VHF SELcum med flugt) 0 meters (Peak)	0 meters (VHF SELcum med flugt) 0 meters (Peak)
	TTS	1.5	0 meters (VHF SELcum med flugt) 0 meters (Peak)	0 meters (VHF SELcum med flugt) 1 meters (Peak)
	Adfærd	-	1430 meters (DEA 2023)	2110 meters (DEA 2023)

Tabel 5-1. Afstand i meter fra aktivitet til at overholde undervandstøj grænseværdier (worst case)

	Effekt	Flugtrespons [m/s]	Beton pæle ramming (med 5 minut "soft-start")	Spuns ramming (med 5 minut "soft-start")
Hvidnæse og øresvin	PTS	1.5	0 meters (VHF SELcum med flugt) 0 meters (Peak)	0 meters (VHF SELcum med flugt) 0 meters (Peak)
	TTS	1.5	0 meters (VHF SELcum med flugt) 0 meters (Peak)	0 meters (VHF SELcum med flugt) 0 meters (Peak)
	Adfærd	-	60 meters (NOAA 2019)	300 meters (NOAA 2019)

Tabel 5-2. Afstand i meter fra aktivitet til at overholde undervandstøj grænseværdier (worst case)

	Effekt	Flugtrespons [m/s]	Beton pæle ramming (med 5 minut "soft-start")	Spuns ramming (med 5 minut "soft-start")
Spættet sæl og gråsæl	PTS	1.5	0 meters (VHF SELcum med flugt) 0 meters (Peak)	0 meters (VHF SELcum med flugt) 0 meters (Peak)
	TTS	1.5	0 meters (VHF SELcum med flugt) 0 meters (Peak)	0 meters (VHF SELcum med flugt) 0 meters (Peak)
	Adfærd	-	50 meters (Russel 2016) 60 meters (NOAA 2019)	300 meters (Russel 2016) 300 meters (NOAA 2019)

Tabel 5-3. Afstand i meter fra aktivitet til at overholde undervandstøj grænseværdier (worst case)

6. References

DEA, 2023: Guidelines for underwater noise, Prognosis for EIA and SEA assessments, Energistyrelsen marts 2023. https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Vindmoller_hav/energistyrelsens_guidelines_for_underwater_noise_-_installation_of_impact_or_vibratory_driving_piles_2023.pdf

Southall 2019. Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Updated Scientific Recommendations for Residual Hearing. Aquatic Mammals 2019, 45(2), 125-232, DOI 10.1578/AM.45.2.2019.125

Russell et al., 2016. Avoidance of wind farms by harbour seals is limited to pile driving activities. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27867217/>

BOEM 2023: Center for Marine Acoustics. 2023. Sound source list: a description of sounds commonly produced during ocean exploration and industrial activity. Sterling (VA): U.S. Department of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management. 69 p. Report No.: BOEM OCS 2023-016.

NOAA 2019: National Oceanic and Atmospheric Administration (US). 2019. ESA Section 7 Consultation Tools for Marine Mammals on the West Coast (webpage), 27 Sep 2019. <https://www.fisheries.noaa.gov/westcoast/endangered-species-conservation/esa-section-7-consultation-tools-marine-mammals-west>.

Maxon, Vedbæk, 2020: Lynnetteholmen pæleramming og spunsramming undervandsstøj målerapport, Ramboll, GeoSea nv | Geotechnical & Offshore Solutions, www.deme-group.com/geosea