

JANUAR 2024
LILLEBÆLT VIND A/S

UMWELTVERTRÄGLICHKEITSPRÜFUNG – WINDPARK LILLEBÆLT SYD

ANHANG G2 UNTERWASSERLÄRM – ZUSÄTZLICHES
SCHALLGESCHWINDIGKEITSSZENARIO

JANUAR 2024
LILLEBÆLT VIND A/S

UMWELTVERTRÄGLICHKEITSPRÜFUNG – WINDPARK LILLEBÆLT SYD

ANHANG G2 UNTERWASSERLÄRM – ZUSÄTZLICHES

SCHALLGESCHWINDIGKEITSSZENARIO

PROJEKTNR.

A234064

DOKUMENTNR.

A234064-ATR04-G2

VERSION

1.

VERÖFFENTLICHUNGSDATUM

10.01.2024

BESCHREIBUNG

Technischer Bericht

AUSGEARBEITET VON

RSLN

KONTROLLIERT VON

MNLR

GENEHMIGT VON

MEAS

INHALT

1	Einleitung	7
2	Höreigenschaften für Robben	8
3	Alternatives Wasserschallgeschwindigkeitsprofil	10
3.1	Akustische Merkmale des Schallgeschwindigkeitsprofils	10
3.2	Schallgeschwindigkeitsprofil aus empirischen Daten	12
4	Modellierungsergebnisse für Robbe und Schweinswal	13
4.1	Unterwassergeräusche durch Rammpfähle	13
4.2	Unterwasserlärm durch in Betrieb befindliche Windenergieanlagen	15
5	Schlussfolgerung	17
6	Referenzen	18

1 Einleitung

In diesem Dokument werden zusätzliche Unterwasserlärmergebnisse ergänzend zum ursprünglichen Modellbericht A234064-ATR04-G vorgestellt, der in Anhang G1 des Hauptberichts aufgeführt ist. In beiden Berichten finden dieselben Methoden und dieselbe Software Anwendung. Detaillierte Modelleinstellungen entnehmen Sie bitte dem Erstbericht.

Während sich der erste Modellbericht auf ein Wasserschallgeschwindigkeitsprofil konzentrierte, das den Monaten März–April entspricht, wurden in der vorliegenden Untersuchung Profile über das gesamte Jahr hin weg untersucht. Auf dieser Grundlage wird eine repräsentative, konservative Wahl des Schallgeschwindigkeitsprofils für die akustische Modellierung getroffen.

Ebenso bezog sich der erste Modellbericht auf die akustischen Befunde aus der Anhörung zu Schweinswalen, d. h. der funktionalen Hörgruppe „VHF“ (Very High Frequency), der dänischen Energieagentur 2022. In der vorliegenden Untersuchung werden auch Seehunde und Kegelrobben betrachtet (Hörgruppe „PCW“ in beiden Fällen).

Es wird darauf hingewiesen, dass die beiden Fassungen der dänischen Leitlinie über Unterwasserlärm (dänische Energieagentur 2022) und (dänische Energieagentur 2023) hinsichtlich akustischer Kriterien und Modellierungsverfahren übereinstimmen.

2 Höreigenschaften für Robben

Im ersten Modellbericht wurden nur Schweinswale berücksichtigt, wobei Frequenzgewichtung und Kriterien gemäß der funktionellen Hörgruppe „VHF“ (Dänische Energieagentur 2023) angewendet wurden.

In der vorliegenden Untersuchung werden auch Seehunde und Kegelrobben betrachtet, die beide der funktionellen Hörgruppe „PCW“ (Phocid Carnivores in Water) angehören. Es wird darauf hingewiesen, dass für diese Hörgruppe derzeit in der dänischen Leitlinie für Unterwasserlärm Kriterien für PTS/TTS (Permanente bzw. temporäre Hörschwellenabwanderung) angegeben sind, während keine Angaben zu Verhaltensstörungen enthalten sind.

Abbildung 1 zeigt die in dieser Untersuchung angewandten Frequenzgewichtungsfunktionen. Es ist zu erkennen, dass für Frequenzen unterhalb von etwa 20 kHz die PCW-Hörgruppe deutlich bessere Hörfähigkeiten aufweist als die VHF-Hörgruppe. Gemäß der dänischen Richtlinie über Unterwasserlärm hat die PCW-Hörgruppe einen indikativen Hörbereich von 40 Hz bis 50 kHz, während die VHF-Gruppe einen indikativen Hörbereich 1 kHz bis 150 kHz hat.

Die PTS/TTS-Schwellenwerte für Robben sind in Tabelle 1 aufgeführt und setzen eine Frequenzgewichtung gemäß der PCW-Hörgruppe voraus. Aufgrund der unterschiedlichen Frequenzgewichtung sollten diese Werte nicht direkt mit Schwellenwerten beispielsweise der VHF-Gruppe verglichen werden.

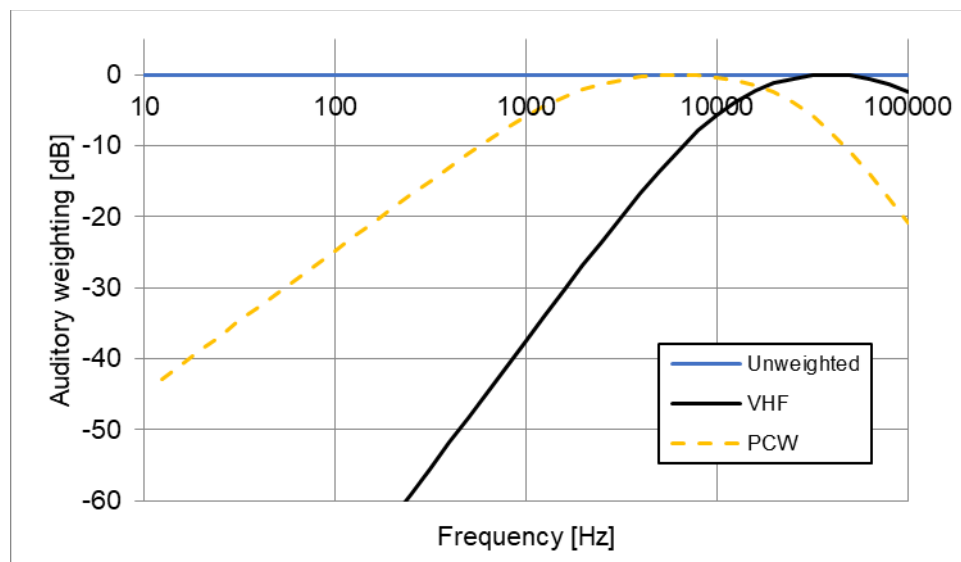


Abbildung 1 Hörbezogene Frequenzgewichtungsfunktionen (Dänische Energieagentur 2023).

Tabelle 1 Akustische Kriterien für Robben(Dänische Energieagentur 2023).

Art und Hörgruppe	Phase/Klangtyp	Schwellenwert	
		PTS SELcum,24h [dB re 1µPa2s]	TTS SELcum,24h [dB re 1µPa2s]
Seehunde und Kegelrobben (PCW)	Bau: Impulsiv	185 dB	170 dB
	Betrieb: Nichtimpulsiv	201 dB	181 dB

3 Alternatives Wasserschallgeschwindigkeitsprofil

3.1 Akustische Merkmale des Schallgeschwindigkeitsprofils

Die Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit c [m/s] von der Wassertiefe im Meerwasser D [m] wird gemeinhin als Schallgeschwindigkeitsprofil bezeichnet.

In relativ geringer Wassertiefe wie für den Standort Lillebælt beeinflusst das Schallgeschwindigkeitsprofil die Wechselwirkung zwischen Schallausbreitung und Meeresboden hauptsächlich auf zwei Weisen (Farcas et al. 2016):

- Der Schallgeschwindigkeitsgradient bewirkt eine **Brechung der Schallwelle**, d. h. eine „Verbiegung“ der Ausbreitungsrichtung. Besonders relevante Abbildung 3 Fälle sind:
 - Aufwärtsbrechende Profile: Profile mit allgemeiner Steigung mit geringster Schallgeschwindigkeit nahe der Meeresoberfläche. Die Schallausbreitung neigt dazu, sich zur Meeresoberfläche hin zu „biegen“. Der Offshore-Windpark entspricht typischerweise wenig oder keinem Wind, was akustisch zu keinen (oder geringen) Verlusten führt, wenn die Schallwelle mit der Meeresoberfläche interagiert. Ein solches Profil verursacht daher geringe Ausbreitungsverluste über die Entfernung. Aufwärtsbrechende Profile finden sich häufig in der kalten Jahreszeit, wenn die Luft relativ kalt ist und die obere Wassersäule durch die Sonne wenig erwärmt wird.
 - Abwärtsbrechende Profile: Profile mit allgemeiner Steigung mit geringster Schallgeschwindigkeit nahe des Meeresbodens. Dadurch wird die Schallausbreitung zum Meeresboden hin gebrochen. Die Schallwelle erfährt erhebliche Verluste bei der Interaktion mit dem Meeresboden. Abwärtsbrechende Profile verursachen daher hohe Ausbreitungsverluste über die Entfernung. Diese Art von Profilen findet man oft in wärmeren Zeiten des Jahres, wenn die Luft relativ warm ist und die Sonne den oberen Teil der Wassersäule erhitzt.

Das Diagramm in Abbildung 3 zeigt einzelne akustische Strahlengänge, die eine Quelle und einen bestimmten Empfänger verbinden. Dargestellt ist, wie der Strahl abhängig von den beiden Schallgeschwindigkeitsprofilen entweder nach oben oder nach unten gebrochen wird.

Komplexere Profile entstehen z. B. bei Stratifikation. Hierbei ist anzumerken, dass Abschnitte des Profils mit Steigungen zu den vorstehenden Merkmalen tendieren werden.

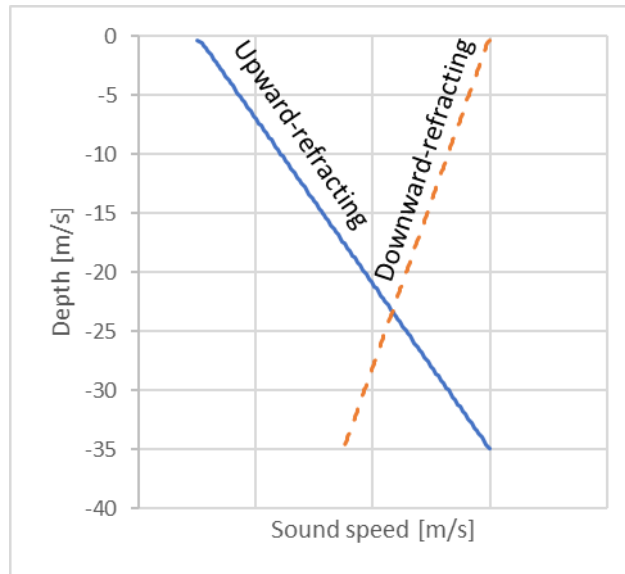


Abbildung 2 Generische Beispiele für Schallgeschwindigkeitsprofile.

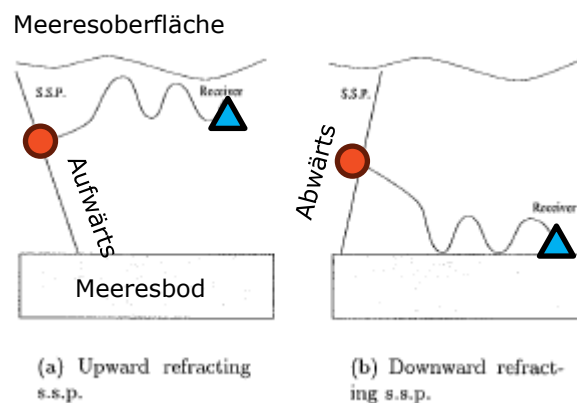


Abbildung 3 Generische Strahlverlaufdiagramme für auf- und abbrechende Schallgeschwindigkeitsprofile (s.s.p.). Überarbeitet aus (Lützen 1998). Der rote Punkt ist die Schallquelle und das blaue Dreieck ist ein Empfänger.

- **Akustische Kopplung** mit Meeresboden: Für Meeresböden mit ähnlichen akustischen Eigenschaften wie das Wasser findet ein hoher Übergang der akustischen Energie vom Wasser in den Meeresboden statt. Grob gesagt manifestiert sich dies als Energieverlust für den Meeresboden. Daher werden hohe Ausbreitungsverluste über die Entfernung beobachtet. Alternativ reflektieren Meeresböden mit sehr kontrastreichen Eigenschaften einen größeren Teil des Schalls zurück ins Wasser und führen so zu geringen Ausbreitungsverlusten über die Entfernung.

Maßgebend für die Kopplung ist die akustische Impedanz $r \times c$ (Dichte mal Schallgeschwindigkeit) von Wasser bzw. der obersten Meeresbodenschicht.

Bei einem konservativen Ansatz im Rahmen der Untersuchung wird ein Schallgeschwindigkeitsprofil mit folgenden Eigenschaften bevorzugt:

- Nach oben brechend, um eine maximale Wechselwirkung mit der Meeresoberfläche anstatt mit dem Meeresboden zu verursachen.
- Allgemeine Schallgeschwindigkeitswerte weit von den 1630 m/s der obersten Sandschicht des Meeresbodens entfernt. Dies erhöht die Reflexion des Schalls zurück in die Wassersäule und reduziert den Energieverlust in den Meeresboden.

Diese Merkmale entsprechen einem konservativen, geringen Ausbreitungsverlust über die Entfernung.

3.2 Schallgeschwindigkeitsprofil aus empirischen Daten

Die Schallgeschwindigkeit wird aus Messungen von Temperatur T [°C] und Salzgehalt S [ppt] berechnet, z. B. gemäß Medwins Formel (Medwin 1975):

$$c = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.00029T^3 + (1.34 - 0.010T)(S - 35) + 0.016D$$

Messungen von Temperatur und Salzgehalt wurden der ozeanographischen Datenbank des ICES (International Council for the Exploration of the Sea (ICES) 2023) entnommen. Für den Bereich zwischen Als und Fünen wurden ca. 280 Profilproben entnommen. Diese erstreckten sich über den Zeitraum April 2007 bis Dezember 2022, jedoch zu etwa 90 % aus dem Jahr 2018 oder später. Abbildung 4 Ausgewählte Profile aus dem Gesamtdatensatz sind beispielhaft dargestellt.

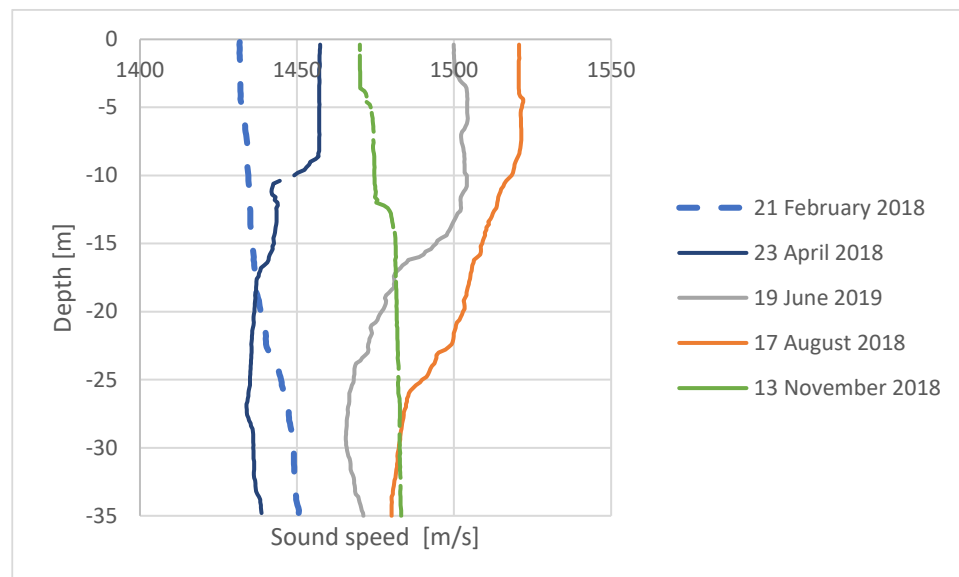


Abbildung 4 Beispiele für Schallgeschwindigkeitsprofile aus dem Gebiet Lillebælt. Die gestrichelte blaue Linie „21. Februar 2018“ wird für die Modellierung ausgewählt.

Nach Prüfung des gesamten großen Datensatzes wurde festgestellt, dass das Schallgeschwindigkeitsprofil mit der Bezeichnung „21. Februar 2018“ (gestrichelte blaue Linie in Abbildung 4) die Kriterien bis Ende des Abschnitts 3.1 erfüllt und dem Zweck eines konservativen Schallgeschwindigkeitsprofils dient. Es ist allgemein nach oben brechend und weist im Vergleich zu den anderen Profilen allgemein niedrige Schallgeschwindigkeitswerte auf.

4 Modellierungsergebnisse für Robbe und Schweinswal

Im Folgenden bezieht sich „konservatives Schallgeschwindigkeitsprofil“ auf das Profil mit der Bezeichnung „21. Februar 2018“ (gestrichelte blaue Linie in Abbildung 4) des Abschnitts 3.2. Abgesehen von diesem Schallgeschwindigkeitsprofil sind Modellaufbau und -konfiguration dieselben wie im ursprünglichen Modellierungsbericht A234064-ATR04-G, der in Anhang G1 im Hauptbericht aufgeführt ist. Darüber hinaus wurden die Ergebnisse der Erststudie mit Frequenzgewichtung und akustischen Kriterien für Robben ausgewertet, die der Hörgruppe PCW angehören

4.1 Unterwassergeräusche durch Ramppfähle

Die Darstellungen in Abbildung 5 und Abbildung 6 veranschaulichen die Modellierungsergebnisse für Schweinswale (Hörgruppe VHF) bzw. Robben (sowohl Seehunde als auch Kegelrobben gehören Hörgruppe PCW an). Das präsentierte Szenario beinhaltet eine Reduzierung um 15 dB entsprechend der Geräuschminderung eines doppelten Blasenschleiers (DBBC).

In den folgenden beiden Tabellen sind die Ergebnisse anhand folgender Themen angegeben:

- Tabelle 2: **SEL kumuliert**, entsprechend dem ungemilderten Referenzszenario aus (Dänische Energieagentur 2023). Die Ergebnisse der Erstuntersuchung werden als „März/April“-Profil aufgenommen. Es ist zu erkennen, dass der Geräuschpegel für das konservative gewählte Schallgeschwindigkeitsprofil um ca. 1 dB ansteigt.
- Tabelle 3: **Wirkungsbereiche** nach permanenter Schwellenwertverschiebung (PTS), temporärer Schwellenwertverschiebung (TTS) und Verhaltensauswirkungen aus (Dänische Energieagentur 2023). Ein allgemeiner Anstieg ist zu beobachten, der für Schweinswale von 12,5 km aus der ersten Untersuchung bis 15 km bei Anwendung des konservativen Schallgeschwindigkeitsprofils am auffälligsten in Bezug auf Verhaltenseinflüsse ist. Bei Robben ist die Entfernung zur Schwelle in der Regel kleiner als bei Schweinswalen.
 - Es wird darauf hingewiesen, dass für Robben kein Kriterium für die Verhaltensauswirkung angegeben ist, siehe Abschnitt 2.

Tabelle 2 Referenzszenario für März/April vs. konservative Schallgeschwindigkeitsprofile, in SEL_{cum} [dB re 1µPa²s] mit Anfangsentfernung 200 m, ungemildertes Einrammen.

Art und Hörgruppe	SEL _{cum} , L _{E,cum} für Referenzszenario	
	Profil März/April	Konservatives Profil
Schweinswale (VHF)	164,3 dB _{VHF}	165,3 dB _{VHF}
Seehunde und Kegelrobben (PCW)	192,4 dB _{PCW}	193,5 dB _{PCW}

Tabelle 3 Entfernung zum Schwellenwert für PTS, TTS und Verhaltensauswirkungen unter Annahme eines gemilderten Einrammens (15 dB). März/April Schallgeschwindigkeitsprofil und konservatives Schallgeschwindigkeitsprofil.

Art und Hörgruppe	Abstand zur Schwelle					
	Profil März/April			Konservatives Profil		
	PTS	TTS	Verhalten	PTS	TTS	Verhalten
Schweinswale (VHF)	75 m	740 m	12,5 km	95 m	776 m	15 km
Seehunde und Kegelrobben (PCW)	42 m	544 m	-	53 m	570 m	-

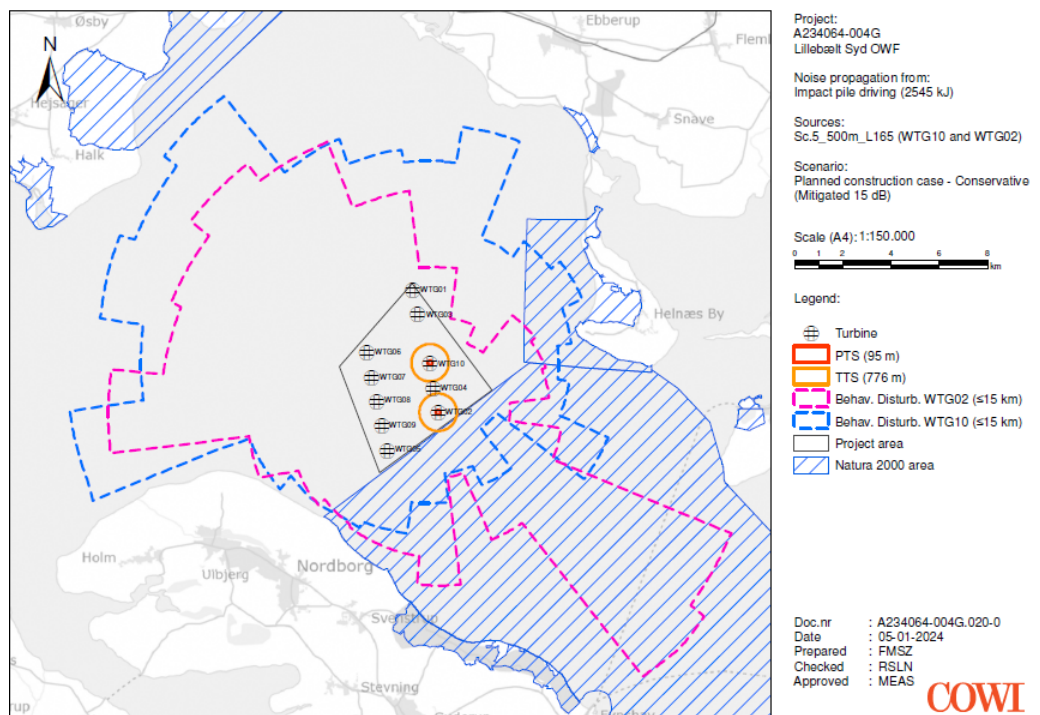
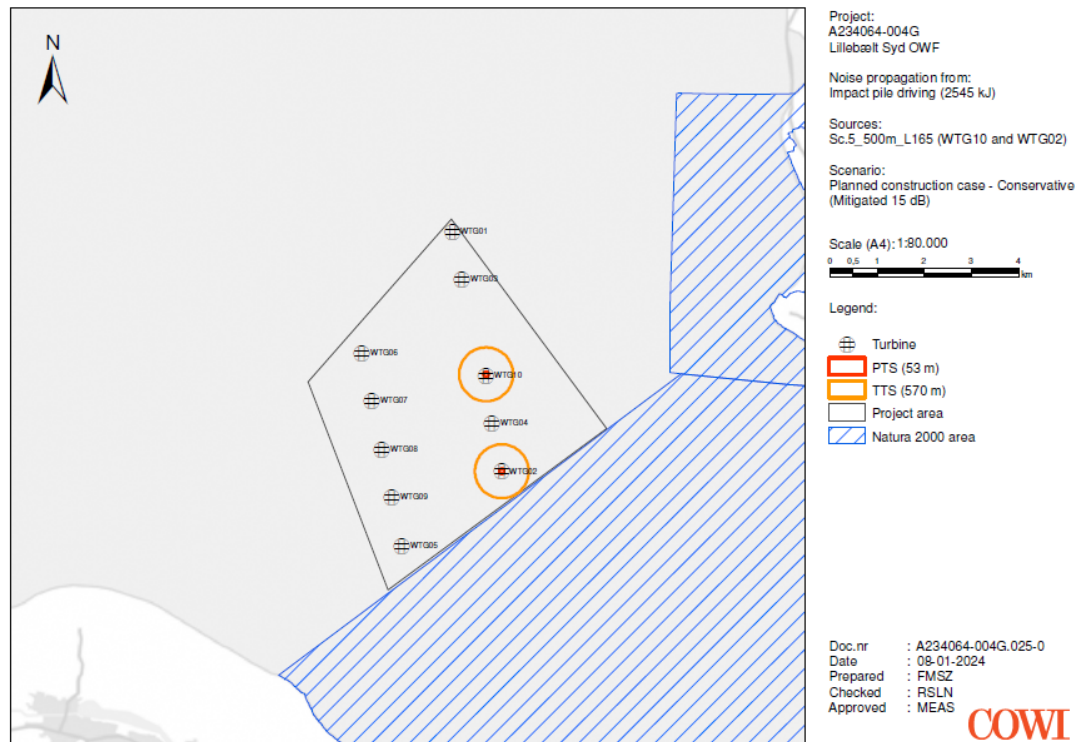


Abbildung 5 Resultierende Auswirkungsbereiche für Schweinswale (VHF) für das konservative Schallgeschwindigkeitsprofil und bei Geräuschminderung (15 dB). Ergebnisse für WEA02 und WEA10.



4.2 Unterwasserlärm durch in Betrieb befindliche Windenergieanlagen

Wie in Abschnitt 2 Tabelle 1 angeführt erhöhen sich die akustischen Schwellenwerte von Robben (Hörgruppe PCW) für PTS und TTS bei nichtimpulsivem Lärm gegenüber impulsivem Lärm um 16 bzw. 11 dB. Die Robben sind daher wesentlich unempfindlicher gegenüber dem die Betriebsphase kennzeichnenden Dauerlärm als gegenüber der Bauphase, in der Rammarbeiten erfolgen. Ähnliche Tendenzen sind bei anderen Meeressäugern zu erkennen (Southall et al. 2019).

Bei Robben wurde in keiner Entfernung von der Lärmquelle ein Überschuss hinsichtlich PTS oder TTS festgestellt. Daher wurde beurteilt, dass der Lärm in allen Bereichen unter den Kriterien für PTS und TTS liegt. Es wird darauf hingewiesen, dass keine Kriterien für die Auswirkungen auf das Verhalten angegeben sind, siehe Abschnitt 2.

Für Schweinswale wurde angenommen, dass die Ausbreitungseigenschaften sowohl für Schlaglärm als auch für Dauerlärm ähnlich sind. Beim Übergang vom anfänglichen Schallgeschwindigkeitsprofil zum konservativen Profil in Abschnitt 3.2 wird daher etwa die gleiche relative Vergrößerung des Abstands zum Schwellenwert erwartet. Auf dieser Grundlage wird die Entfernung zur Schwelle für PTS/TTS grob auf 15 m bzw. 170 m für ein Tier eingestuft, das 24 Stunden

stationär bleibt. Ebenso beträgt der Abstand zum Schwellenwert für Verhaltenseinflüsse 240 m.

Generell ist die Vorhersage des Betriebslärms zukünftiger Windenergieanlagen schwierig. Es liegen semiempirische Arbeiten beruhend auf kleineren Windenergieanlagen vor, darunter (Tougaard et al. 2020), die für die vorliegende Untersuchung verwendet wurden. Bei neueren Messungen für große Anlagen (Fundamentdurchmesser 6 und 8 m) wurde jedoch beobachtet, dass Vorhersagen unter Verwendung des vorstehenden semiempirischen Rahmens tendenziell weit höhere Geräuschpegel vorhersagen als die tatsächlich gemessenen (Holme et al. 2022). Demzufolge gelten die Vorhersagen in diesem Abschnitt als konservativ.

5 Schlussfolgerung

Diese Untersuchung dient als Ergänzung zum ursprünglichen Modellbericht A234064-ATR04-G, der aus Anhang G1 des Hauptberichts hervorgeht.

Beruhend auf einer Vielzahl historischer Schallgeschwindigkeitsprofile wurde ein konservativer Ansatz zur Auswahl eines repräsentativen Schallgeschwindigkeitsprofils angewandt. Das Modell wurde mit diesem Profil wiederholt und die Ergebnisse wurden sowohl nach Schweinswalen (Hörgruppe VHF) als auch nach Seehunden und Kegelrobben (beide Hörgruppe PCW) bewertet.

In dem in der dänischen Leitlinie über Unterwasserlärm festgelegten unverminderten Referenzszenario erhöhte sich der SEL-Cum-Lärmpegel im Vergleich zur ursprünglichen Untersuchung um etwa 1 dB. Sowohl für Schweinswale als auch für Robben vergrößerten sich die Auswirkungsgebiete (Entfernung zur Schwelle). In Bezug auf Schweinswale und Rammgeräusche wurde der Hauptanstieg in Bezug auf Verhaltensänderungen beobachtet, der von 12,5 km in der ersten Studie auf 15 km mit dem konservativeren Schallgeschwindigkeitsprofil zunahm.

Für die Betriebsphase der Windenergieanlagen wurde der Lärm mit PTS- und TTS-Kriterien von Robben verglichen. Es wird beurteilt, dass der Lärm diesen Kriterien in allen Bereichen entspricht. Für Schweinswale ergaben sich Wirkungsbereiche für PTS/TTS von 15 m und 170 m und ein Wirkungsbereich von 240 m für Verhaltensänderungen. Es wird betont, dass Betriebsgeräusche für große Windenergieanlagen mit großen Unsicherheiten verbunden sind und dass die hier vorgestellten Ergebnisse als konservativ angesehen werden.

6 Referenzen

- Danish Energy Agency (2022) Guideline for underwater noise - Installation of impact or vibratory driven piles. Copenhagen
- Danish Energy Agency (2023) Guideline for underwater noise - Installation of impact or vibratory driven piles. Copenhagen
- Farcas A, Thompson PM, Merchant ND (2016) Underwater noise modelling for environmental impact assessment. *Environ Impact Assess Rev* 57:114–122. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2015.11.012>
- Holme CT, Simurda M, Gerlach S, Bellmann MA (2022) The relation between underwater noise and operating offshore wind turbines. Poster präsentiert in „The Effects of Noise on Aquatic Life“ 1–1
- International Council for the Exploration of the Sea (ICES) (2023) ICES oceanographic data. <https://data.ices.dk/view-map>. Aufgerufen am 21. Dez. 2024
- Lützen R (1998) Acoustic communication with an unmanned submarine. Master of Science Thesis, Technical University of Denmark
- Medwin H (1975) Speed of sound in water: A simple equation for realistic parameters. *J Acoust Soc Am* 58:1318–1319. <https://doi.org/10.1121/1.380790>
- Southall BL, Finneran JJ, Reichmuth C, et al (2019) Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Updated Scientific Recommendations for Residual Hearing Effects. *Aquat Mamm* 45:125–232. <https://doi.org/10.1578/AM.45.2.2019.125>
- Tougaard J, Hermannsen L, Madsen PT (2020) How loud is the underwater noise from operating offshore wind turbines? *J Acoust Soc Am* 148:2885–2893. <https://doi.org/10.1121/10.0002453>