

Offshore-Windpark OWP Gennaker



Fachgutachten der projektspezifisch zu erwartenden Unterwasserschall- immissionen durch Impulsrammungen zur Beurteilung der Störwirkung in umliegende FFH-Gebiete

Oldenburg, 22.01.2025

Projekt Nr. 4185

Version 1

Auftraggeber: OWP Gennaker GmbH
c/o Skyborn
Ericusspitze 2-4
20457 Hamburg

Ausführung: Patrick Remmers. B. Eng.,
Dr. Michael A. Bellmann

itap GmbH
Institut für Technische und Angewandte Physik GmbH
Marie-Curie-Straße 8
D – 26129 Oldenburg

Berichtsumfang: 57 Seiten

Akkreditiertes Prüflaboratorium nach ISO/IEC 17025 (DAkkS Registrierungsnummer D-PL-18192-01-00):
Ermittlung von Erschütterungen und Unterwasserschall

Sitz

itap GmbH
Marie-Curie-Straße 8
26129 Oldenburg

Amtsgericht Oldenburg
HRB: 12 06 97

Kontakt

Telefon (0441) 570 61-0
Fax (0441) 570 61-10
Mail info@itap.de

Geschäftsführer

Dr. Michael A. Bellmann

Bankverbindung

Oldenburger Volksbank

IBAN:
DE95 2806 1822 0080 0880 00
BIC: GENO DEF1 EDE

Commerzbank AG

IBAN:
DE70 2804 0046 0405 6552 00
BIC: COBA DEFF XXX

USt.-ID.-Nr. DE 181 295 042

Inhaltsverzeichnis

1.	Zusammenfassung.....	5
2.	Projektbeschreibung und Aufgabenstellung	7
3.	Schalltechnische Grundlagen	9
3.1	(Energie-) äquivalenter, kontinuierlicher Schalldruckpegel (<i>SPL</i>).....	10
3.2	Einzelereignispegel (<i>SEL</i>)	10
3.3	Zero-to-peak-Schalldruckpegel (<i>Lp, pk</i>)	12
4.	Beurteilungsgrundlagen.....	14
4.1	Lärmschutzwerte zur Vermeidung von Tötung und Verletzung	14
4.2	Projektspezifische Bewertungsmethodik zur Beurteilung der Störung und Meidewirkung von Schweinswalen durch Impulsrammschall.....	14
5.	Modellansätze.....	16
5.1	Modellanforderungen.....	16
5.2	Bestimmung des Quell- und Ausbreitungspegels.....	16
5.3	Berechnungsverfahren	25
5.4	Modellunsicherheiten / Unsicherheitsbetrachtungen.....	27
6.	Schallschutz bzw. zu erwartende Schallminderung.....	29
6.1	Schallminderungssysteme (Noise Mitigation Systems - NMS)	29
6.2	Schallschutzsysteme (Noise Abatement Systems - NAS)).....	32
6.3	Kombination von pfahlnahen und pfahlfernen Schallschutzsystemen	35
7.	Unmitigierter Rammschall in 750 m Entfernung	37
7.1	Schalltechnisch relevante Eingangsdaten	37
7.2	Ergebnisse der Modellierung für die unmitigierte Rammung	37
8.	Beurteilung des mitigierten Rammschalls hinsichtlich Stör- und Meidewirkung.....	40
8.1	Schallausbreitung über die Entfernung	40
8.2	Beurteilung der Stör- und Meidewirkung in den FFH-Schutzgebieten.....	45
9.	Referenzen	56

Änderungsverzeichnis

Version	Datum	Bemerkung
1	22.01.2025	Erste Version. Die neueste Version ersetzt alle früheren Versionen.

Einheiten:

$\mu\text{m/s}$ - Mikrometer pro Sekunde
 dB - Dezibel
 g/cm^3 - Gramm pro Kubikzentimeter

kJ - Kilojoule
 m/s - Meter pro Sekunde
 Pa - Pascal

Messgrößen:

λ - Wellenlänge
 ρ - Dichte eines Mediums
 L_{hg} - Hintergrundschallpegel
 $L_{p,pk}$ - Zero-to-peak-Spitzenpegel
 $L_{pk,pk}$ - Peak-to-peak Schalldruckpegel
 SEL - Einzelereignispegel
 SEL_{05} - 5 % Überschreitung Einzelereignispegel
 SPL - Dauerschalldruckpegel
 T - Mittelungszeit

Z - akustische Kennimpedanz
 c - Schallgeschwindigkeit
 n - Blow Count
 p - Schalldruck
 $p(t)$ - zeitvarianter Schalldruck
 p_0 - Referenzschalldruck
 p_{pk} - maximaler Schalldruck
 v - Schallschnelle

Abkürzungen:

BfN	Bundesamt für Naturschutz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (engl. Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety)
CTD	Leitfähigkeit, Temperatur, Tiefe (engl. conductivity, temperature and depth)
eBBC	engl. Enhanced Big Bubble Curtain, Enhanced Big Bubble Curtain, engl. Enhanced Big Bubble Curtain
FFH	Schutzgebiete nach der Fauna-Flora-Habitat Richtlinie (92/94/EWG)
HSD	Hydro Sound Damper
IHC-NMS	IHC- Noise Mitigation Screen
itap	Institut für technische und angewandte Physik
LAT	Lowest Astronomical Tide
MNRU	Menck Noise Reduction Unit
NAS	Noise Abatement System
NMS	Noise Mitigation System
PTS	Permanent Threshold Shift
SRD	Bodenwiderstandswert - engl. soil resistance value
TTS	temporary threshold shift, Temporary Threshold Shift
UBA	Umweltbundesamt (engl. Federal Environment Agency)
WTD71	Wehrtechnische Dienststelle 71

1. Zusammenfassung

Die OWP *Gennaker GmbH* plant die Errichtung des Offshore-Windparks (OWP) Gennaker in der deutschen Ostsee. Hierfür sollen Monopfähle für die Gründung des OWP mit einem Durchmesser von maximal 8,9 m mittels Rammung installiert werden.

Die *itap – Institut für technische und angewandte Physik GmbH* wurde beauftragt, eine vertiefende projekt- und standortspezifische Überprüfung der behördlichen Vorgaben zur Bewertung von Hydroschallemissionen in den umliegenden Schutzgebieten unter Berücksichtigung relevanter Einflussgrößen zu erstellen. Das vorliegende Fachgutachten überprüft oder ersetzt nicht die bestehende "Prognose der Hydroschallimmissionen während der Rammarbeiten" (Maquil, Müller, & Wildemann, 2024), welche die Einhaltung des dualen Lärmschutzkriteriums gem. BMU Schallschutzkonzept (2013) vor dem Hintergrund des artenschutzrechtlichen Tötungsverbots gem. §44 BNatSchG untersucht, sondern stellt eine weiterführende Betrachtung im Hinblick auf die Störwirkung von Impulsrammungen in umliegende FFH-Gebiete dar. Hintergrund ist, dass behördlicherseits eine Bewertungsmethodik für den OWP Gennaker für die Störwirkung von Impulsrammschall auf Schweinswale festgelegt worden ist. Unter Verwendung eines vereinfachten Ansatzes (8 km Störradius um den Zentroid der Schnittfläche, die sich aus dem Abtrag von 8 km von der Schutzgebietsgrenze mit dem Vorhabengebiet ergibt) kommt es theoretisch zu einer Beschallung des umliegenden FFH-Gebietes Plantagenetgrund mit Rammschall Einzelereignispegel (SEL) ≥ 140 dB von ca. 10,2 %; zulässig sind $\leq 10,0$ %). In den beiden weiteren umliegenden FFH-Gebieten liegen die rechnerisch beschallten Flächenanteile mit ≥ 140 dB unter 10 %. Dieser Ansatz berücksichtigt jedoch weder projekt- noch gebietsspezifische Einflussparameter bei der Schallausbreitung. Aus diesem Grund sind in diesem Gutachten die beschallten Flächen mit einem Einzelereignispegel ≥ 140 dB_{SEL}, basierend auf der projekt- und gebietsspezifischen Ausbreitungsdämpfung der lautesten Richtung für die „unspezifisch mitigierte“ Rammung unter Winterkonditionen („lautestes anzunehmendes Szenario“) und für die mitigierte Rammung unter Sommerbedingungen(realistisches anzunehmendes Szenario) berechnet worden. Die Generierung dieser Schallkarten basiert auf der behördlich festgelegten, modifizierten generischen Methode für den OWP Gennaker.

Für den „lautesten anzunehmenden Fall“ ergibt sich eine Ausdehnung der 140 dB-Isophone von 6,12 km für das FFH-Schutzgebiet Plantagenetgrund, 4,87 km für die Kadetrinne und 5,34 km für die Darßer Schwelle. Anhand der Ergebnisse (vgl. Schallkarten) kann aus akustischer Sicht eine Beeinträchtigung der FFH-Gebiete Plantagenetgrund, Kadetrinne und Darßer Schwelle durch Unterwasserrammschall ≥ 140 dB auf ≥ 10 % ihrer Fläche

ausgeschlossen werden, wenn $160 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ in 750 m Entfernung zur Impulsrammung eingehalten werden.

Für den „realistischen anzunehmenden Fall“ und sogar für den „lautesten anzunehmenden Fall“ kann aus akustischer Sicht zudem eine Beschallung aller drei FFH-Schutzgebiete von $\geq 1 \%$ mit Impulsrammschall $\geq 140 \text{ dB}$ gänzlich ausgeschlossen werden.

In Fortführung der behördlicherseits festgelegten Methode zur Ermittlung der Schallbelastung in Schutzgebieten für den OWP Gennaker wäre es aus fachlicher Sicht konsequent, den Abtrag eines pauschalen 8-km-Puffers ausgehend von den Schutzgebieten gemäß BMU (2013) durch die gebiets- und projektspezifisch ermittelten Reichweiten für die 140 dB -Isophone zu ersetzen.

Oldenburg, 22.01.2025



A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'P. Remmers'.

Patrick Remmers, B. Eng.

erstellt
Abteilungsleiter Unterwasserschall-Prognosen
stellvertretender Sachgebietsleiter Unterwasserschall (Prognosen)

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Bellmann'.

Dr. Michael A. Bellmann

geprüft
Geschäftsführung
Sachgebietsleiter Unterwasserschall

2. Projektbeschreibung und Aufgabenstellung

Die *OWP Gennaker GmbH* plant die Errichtung des Offshore-Windparks (OWP) Gennaker in der deutschen Ostsee; Abbildung 1. Das Planungsgebiet des Windparks liegt ca. 15 km nördlich der Halbinsel Fischland-Darß-Zingst innerhalb der 12-Seemeilenzone und umschließt den bereits bestehenden Windpark EnBW Baltic I. In östlicher Nachbarschaft zum OWP befindet sich das FFH-Schutzgebiet DE1343301 Plantagenetgrund und in westlicher Nachbarschaft die FFH-Schutzgebiete DE13393015 Kadetrinne und DE1540302 Darßer Schwelle, die allesamt Teil des EU-weiten Natura-2000-Schutzgebietnetzes zur Erhaltung gefährdeter oder typischer Lebensräume und Arten sind.

Im geplanten Windpark sollen 63 Windenergieanlagen in Wassertiefen zwischen 14 m und 20 m (LAT) errichtet werden. Als Fundamente der Windenergieanlagen sind dabei Monopfähle mit Pfahldurchmessern von derzeit 8,9 m in Planung, die mittels Impulsrammung im Meeresboden verankert werden sollen.

Das Einbringen von Gründungsstrukturen in den Meeresboden mittels Rammarbeiten verursacht Lärm, der für Meeressäuger und Fische schädlich sein kann (Lucke, Siebert, Lepper, & Blanchet, 2009) (Kastelein, Schop, Hoek, & Covi, 2015).

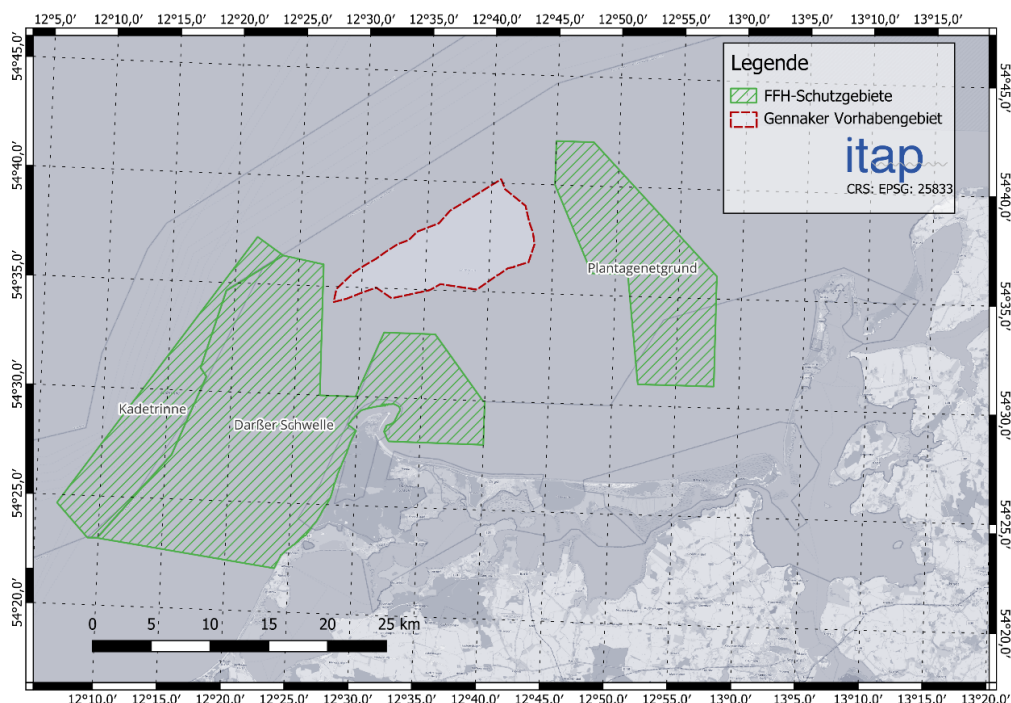


Abbildung 1: Standort des OWP Gennaker und der umliegenden FFH-Schutzgebiete in der Ostsee.

Im Rahmen des Genehmigungsverfahrens sind u. a. die Auflagen des „Standard, Untersuchung der Auswirkung von Offshore-Windenergieanlagen auf die Meeresumwelt (StUK4)“ des *Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)* zu beachten. In der Tabelle 4.3 der Technischen Anleitung des StUK4 in der Fassung vom Oktober 2013 wird u. a. gefordert, dass vor Baubeginn die zu erwartenden Unterwasserschallimmissionen während der Bauphase durch Prognoseberechnungen zu ermitteln sind. Ein derartiger Prognosebericht der zu erwartenden Unterwasserschallimmissionen durch die Impulsrammung zur Beurteilung der Einhaltung der deutschen Lärmschutzwerte zum Schutz von Schweinswalen vor Tötung und Verletzung durch Rammschall wurde seitens des Auftraggebers bei den Genehmigungsbehörden eingereicht (Maquil, Müller, & Wildemann, 2024). Dieses Prognosegutachten kam mit dem Planungsstand von 9,0 m Pfahldurchmesser zu der Einschätzung, dass die deutschen Lärmschutzwerte hinsichtlich Tötung und Verletzung eingehalten werden können.

Zudem wurde hinsichtlich Störung und Meidewirkung von Schweinswalen durch Unterwasserschalleinträge von Impulsrammungen behördlicherseits eine Bewertungsmethodik für den OWP Gennaker basierend auf dem BMU-Schallschutzkonzept (2013) für die Nordsee projektspezifisch festgelegt; siehe Kapitel 4.2.

Die *itap – Institut für technische und angewandte Physik GmbH* wurde beauftragt, eine vertiefende projekt- und standortspezifische Überprüfung der gebietsschutzspezifischen Ansätze unter Berücksichtigung relevanter Einflussgrößen zu erstellen. Das dafür verwendete empirische Rammschall-Modell der *itap GmbH* erfüllt die nationalen Richtlinien der Regierungsbehörden in Deutschland (BSH, 2013).

Hintergrund ist, dass der behördlich festgelegte Ansatz sowie die Methode des BMU-Schallschutzkonzeptes (2013) weder gebietsspezifische, wie z. B. Wassertiefe, noch projektspezifische Einflussparameter, wie z. B. effektiver Schallschutz, berücksichtigen. Grundsätzlich stellt die Anwendung des BMU-Schallschutzkonzeptes mit dem darin festgelegten, vereinfachten Verfahren mittels eines 8-km-Störradius einen sehr allgemein gehaltenen Ansatz dar, der basierend auf wenigen bis zu diesem Zeitpunkt vorliegenden empirischen Messdaten aus der Nordsee im Jahr 2013 entwickelt wurde. Eine Übertragung auf die Ostsee ist aus akustischer und technischer Sicht aufgrund der gebietsspezifischen Eigenschaften der Ostsee nicht möglich.

Auf der Grundlage der *itap GmbH* vorliegenden empirischen Datenbasis aus bereits abgeschlossenen Bauvorhaben in Nord- und Ostsee werden in diesem Fachgutachten zwei unterschiedliche Rammschallszenarien („schalltechnisch lautester anzunehmender Fall“ und „schalltechnisch realistischer anzunehmender Fall“) berechnet, um eine vertiefende Evaluation der möglichen Störwirkung von Rammschall auf die umliegenden FFH-Schutzgebiete durchführen zu können.

3. Schalltechnische Grundlagen

Schall ist eine rasche, oft periodische Schwankung des Drucks, die den Umgebungsdruck (im Wasser der hydrostatische Druck) additiv überlagert. Dabei handelt es sich um eine Hin- und Her-Bewegung der Wasserteilchen, die üblicherweise durch deren Geschwindigkeit, der sogenannten Schallschnelle v (engl. particle velocity), beschrieben wird. Die Schallschnelle kennzeichnet die Wechselgeschwindigkeit eines um seine Ruheposition in einem Medium schwingenden Teilchens. Die Schallschnelle ist nicht zu verwechseln mit der Schallgeschwindigkeit c_{Wasser} , also der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schall in einem Medium, die in der Regel bei Wasser im Bereich von $c_{\text{Wasser}} = 1.480 \text{ m/s}$ liegt. Die Schallschnelle v ist deutlich geringer als die Schallgeschwindigkeit c .

Schalldruck p und Schallschnelle v stehen mit der akustischen Kennimpedanz Z , die den Wellenwiderstand des Mediums charakterisiert, im folgenden Zusammenhang:

$$Z = \frac{p}{v}$$

Gleichung 1.

Im Fernfeld, d. h. in einigen Wellenlängen Abstand¹ (frequenzabhängig) von der Schallquelle, ist die Kennimpedanz gegeben durch:

$$Z = \rho c$$

Gleichung 2

mit ρ – Dichte des Mediums und c – Schallgeschwindigkeit.

Für eine Schalldruckamplitude von beispielsweise 1 Pa (entspricht bei einem sinusförmigen Signal einem Schalldruckpegel von 117 dB re 1 μPa^2 bzw. einem Spitzenpegel von 120 dB re 1 μPa^2) ergibt sich daraus für die Schallschnelle in Wasser ein Wert von ca. 0,7 $\mu\text{m/s}$.

In der Akustik wird die Intensität von Geräuschen in der Regel nicht direkt durch die Messgröße Schalldruck (oder Schallschnelle) beschrieben, sondern durch den aus der Nachrichtentechnik bekannten Pegel in Dezibel (dB). Allerdings gibt es verschiedene Schallpegelgrößen:

¹ Die Grenze zwischen Nah- und Fernfeld ist bei Unterwasserschall nicht genau definiert bzw. ausgemessen. Jedoch handelt es sich um eine frequenzabhängige Größe. In Luftschall wird ein Wert von $\geq 2 \lambda$ angenommen. Für Unterwasserschall existieren Angaben bis zu $\geq 5 \lambda$.

- (energie-) äquivalenter Dauerschalldruckpegel – SPL (Mittelungspegel) ,
- Einzelereignispegel – SEL ,
- Zero-to-peak-Spitzenpegel L_p .

Der SPL und der SEL können sowohl frequenzunabhängig angegeben werden, d. h. als breitbandige Einzahlwerte, als auch frequenz aufgelöst, z. B. in 1/3-Oktav-Bändern (Terzspektrum).

Im Folgenden werden die o. g. Pegelgrößen kurz beschrieben.

3.1 (Energie-) äquivalenter, kontinuierlicher Schalldruckpegel (SPL)

Der SPL ist die gebräuchlichste Messgröße in der Akustik und ist definiert als:

$$SPL = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p(t)^2}{p_0^2} dt \right) [\text{dB}]$$

Gleichung 3

mit

- $p(t)$ - zeitvarianter Schalldruck,
 p_0 - Referenz-Schalldruck (in Unterwasserschall 1 μPa),
 T - Mittelungszeit.

In der Literatur wird manchmal die Bezeichnung SPL für einen Schalldruckpegel ohne zeitliche Mittelwertbildung verwendet. Nach dieser Definition wird der kontinuierliche Schalldruckpegel über ein Intervall dann als SPL_{rms} bezeichnet, wobei der Index rms für "quadratischer Mittelwert" (root mean square) steht. In diesem Bericht wird die Terminologie nach DIN ISO 18406 (2017) verwendet sowie der Index rms weggelassen und der SPL in diesem Bericht ist gleich SPL_{rms} , da eine Definition nach *Gleichung 3* bereits eine Mittelwertbildung impliziert.

3.2 Einzelereignispegel (SEL)

Für die Charakterisierung von Rammschall ist der SPL allein ein unzureichendes Maß, da er nicht nur von der Stärke der Rammschläge, sondern auch von der Mittelungszeit und den Pausen zwischen den Rammschlägen abhängt. Die Schallbelastung - E bzw. der daraus

resultierende Einzelereignispegel - SEL sind besser geeignet. Beide Werte sind wie folgt definiert:

$$E = \frac{1}{T_0} \int_{T_1}^{T_2} \frac{p(t)^2}{p_0^2} dt$$

Gleichung 4

$$SEL = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T_0} \int_{T_1}^{T_2} \frac{p(t)^2}{p_0^2} dt \right) [\text{dB}]$$

Gleichung 5

mit

T_1 und T_2 - Start- und Endzeitpunkt der Mittelwertbildung (sollten so bestimmt werden, dass das Schallereignis zwischen T_1 and T_2 liegt),

T_0 - Referenz 1 Sekunde.

Daher ist der Einzelereignispegel eines Schallimpulses (Rammschlag) der (SPL -) Pegel eines Dauerschalls von 1 s Dauer und derselben Schallenergie wie der Impuls.

Der Einzelereignispegel (SEL) und der Schalldruckpegel (SPL) können ineinander umgerechnet werden:

$$SEL = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{SPL}{10}} - 10^{\frac{L_{hg}}{10}} \right) - 10 \log_{10} \left(\frac{nT_0}{T} \right) [\text{dB}]$$

Gleichung 6

mit

n - Anzahl der Schallereignisse, also der Rammschläge, innerhalb der Zeit T ,

T_0 - 1 Sekunde,

L_{hg} - Lärm- und Hintergrund(schall)pegel zwischen den einzelnen Rammschlägen.

So liefert *Gleichung 6* den mittleren Einzelereignispegel (SEL) von n Schallereignissen (Rammschlägen) aus nur einer Schalldruckpegelmessung. Für den Fall, dass der Hintergrundpegel zwischen den Rammschlägen gegenüber dem Rammschall deutlich untergeordnet ist (z. B. > 10 dB), kann er mit einer Vereinfachung von *Gleichung 6* und einem ausreichenden Genauigkeitsgrad wie folgt berechnet werden:

$$SEL \approx SPL - 10 \log_{10} \left(\frac{nT_0}{T} \right) [\text{dB}]$$

Gleichung 7.

Technischer Hinweis: In einigen Richtlinien zur Messung von Unterwasserschall, z. B. in Deutschland (BSH, 2013), ist ein gemittelter Einzelereignispegel von 30 Sekunden (SEL_{30s}) gemäß Gleichung 7 definiert.

3.3 Zero-to-peak-Schalldruckpegel ($L_{p,pk}$)

Dieser Parameter ist ein Maß für Schalldruckspitzen. Im Vergleich zum Schalldruckpegel (SPL) und zum Einzelereignispegel (SEL) gibt es keine Durchschnittsbestimmung:

$$L_{p,pk} = 20 \log_{10} \left(\frac{|p_{pk}|}{p_0} \right) [\text{dB}]$$

Gleichung 8

mit

$|p_{pk}|$ - maximal ermittelter Schalldruck.

Abbildung 2 zeigt ein Beispiel. Der Zero-to-peak-Schalldruckpegel ($L_{p,pk}$) ist immer höher als der Einzelereignispegel (SEL). Generell beträgt der Unterschied zwischen L und SEL bei Rammarbeiten 20 dB bis 25 dB. Einige Autoren bevorzugen den Peak-to-peak Wert ($L_{pk,pk}$) anstelle des $L_{p,pk}$. Eine visuelle Definition dieses Parameters findet sich in Abbildung 2, aber diese Metrik ist in der (ISO 18405, 2017) nicht definiert. Dieser Faktor beschreibt nicht den maximal erreichten (absoluten) Schalldruckpegel, sondern die Differenz zwischen der maximalen negativen und der maximalen positiven Amplitude eines Impulses. Dieser Wert ist maximal 6 dB höher als der Zero-to-peak-Schalldruckpegel ($L_{p,pk}$).

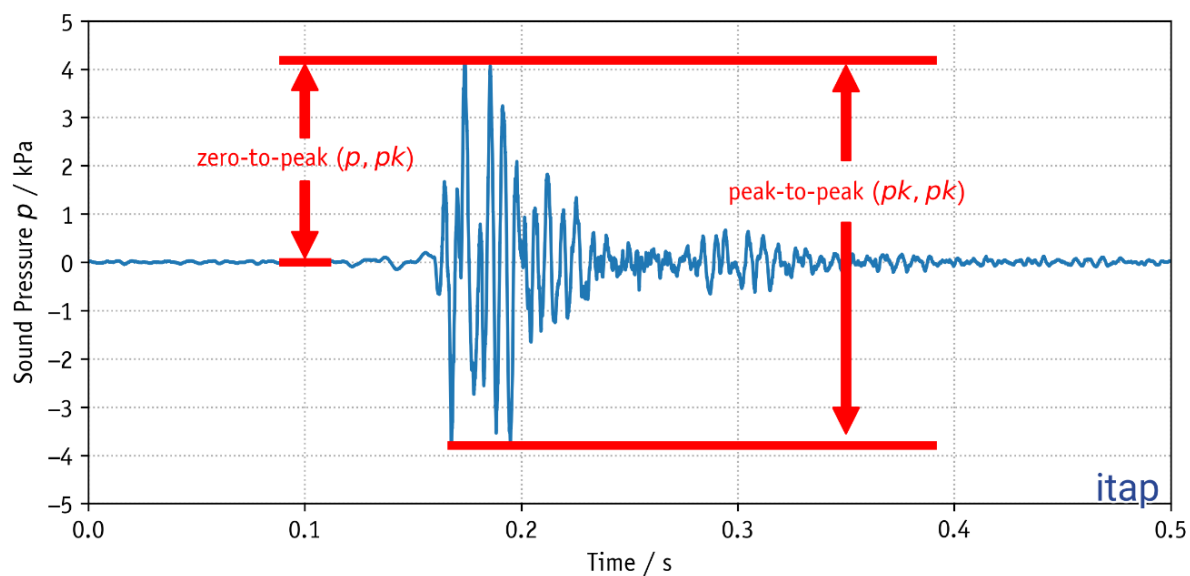


Abbildung 2: Typisches, gemessenes Zeitsignal von Unterwasserschall aufgrund von Rammarbeiten in einer Entfernung von mehreren 100 m.

4. Beurteilungsgrundlagen

4.1 Lärmschutzwerte zur Vermeidung von Tötung und Verletzung

Schalleinträge ins Wasser bei (Impuls-) Rammarbeiten sind ein menschlicher Eingriff in die Meeresumwelt, der negative Auswirkungen auf die Meeresfauna haben kann. Hohe Schalldruckpegel können Meeressäuger oder Fische schädigen, was zu Verhaltensstörungen und vorübergehendem Hörverlust (TTS, Temporary Threshold Shift) oder dauerhaftem Hörverlust (PTS, Permanent Threshold Shift) führen kann.

Das *Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie* (BSH) ist die Regulierungs- und Überwachungsbehörde für Offshore-Projekte in der deutschen AWZ. Im Sinne des Vorsorgeprinzips hat das BSH im Jahr 2008 weltweit erstmals ein duales Lärmschutzwertkriterium von 160 dB_{SEL} (zur Einhaltung durch den 5 % Überschreitungspegel des Einzelereignispegels (SEL_{05})) und 190 dB_{Lp,pk} (zur Einhaltung des maximalen Zero-to-peak-Spitzenpegels ($L_{p,pk}$)) festgelegt. Die Lärmschutzwerte wurden auf der Grundlage wissenschaftlicher Gutachten des *Umweltbundesamtes* (UBA) und von Ergebnissen aus Forschungsprojekten festgelegt. Diese Lärmschutzwerte müssen bei Rammarbeiten in einem Abstand von 750 m von der Emissionsstelle eingehalten werden.

Das *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit* (BMU) hat 2013 das Schallschutzkonzept für den Schweinswal in der deutschen Nordsee herausgegeben, in dem die Einhaltung der Lärmschutzwerte und ein Habitatansatz zur Vermeidung und Minimierung kumulativer Effekte verfolgt werden. Eine detaillierte Zusammenfassung der derzeitigen Genehmigungs- und Vollzugspraxis in der deutschen AWZ ist in Bellmann et al. (2020) zusammengefasst.

4.2 Projektspezifische Bewertungsmethodik zur Beurteilung der Störung und Meidewirkung von Schweinswalen durch Impulsrammschall

Im BMU Schallschutzkonzept für die Nordsee (2013) wurde nach damaligem besten Wissen und Gewissen ein Lärmschutzwertkriterium zur Vermeidung von Störungen oder Meidewirkung von Schweinswalen durch Impulsrammschall definiert. Eine Störung bzw. Meidewirkung ist danach gegeben, sobald der breitbandige Einzelereignispegel eines einzelnen Rammschlages einen Wert von 140 dB überschreitet.

Zum Schutz vor Störung und Meidewirkung von Schweinswalen durch Impulsrammschall darf nicht mehr als 10 % der Gebietsfläche eines FFH-Schutzgebietes oder - bei einer kumulativen Betrachtung - 10 % der AWZ der deutschen Nordsee mit einem Schalleintrag von ≥ 140 dB_{SEL} beschallt werden.

Für die Hauptkonzentrationsgebiete Doggerbank und Sylter Außenriff darf die beschallte Fläche der FFH-Schutzgebiete in der schweinswalsensitiven Zeit Mai bis August nicht mehr als 1 % betragen. Dies gilt insbesondere zum Schutz von Mutter-Kalb-Bindungen in dieser sensitiven Zeit.

Aus der im BMU-Schallschutzkonzept (2013) genannten, überschlägigen, geometrischen Funktion für die Schallausbreitungsdämpfung von

$$TL = (14 + r \cdot 0,0002) \log r \quad \text{Gleichung 9}$$

mit dem Abstand r , resultiert ein allgemeiner Störradius von 8 km für die Nordsee. Laut BMU-Schallschutzkonzept ist zur Beurteilung der beschallten Flächen hinsichtlich Störung bzw. Meidewirkung der Mittelpunkt bzw. das Zentroid der gesamten OWP-Fläche zu verwenden.

Für die Ostsee existiert keine nationale Bewertungsmethodik für Störung bzw. Meidewirkung von Schweinswalen durch Impulsrammschall. Aus diesem Grund wurde in Anlehnung an das BMU-Schallschutzkonzept der Nordsee eine Bewertungsmethodik projektspezifisch für den OWP Gennaker wie folgt seitens der Behörden definiert: Vom Rand jedes FFH-Schutzgebiets ist zunächst ein 8 km-Radius abzutragen. Alle Standorte für Windenergieanlagen innerhalb dieses 8 km-Radius pro FFH-Schutzgebiet werden als Teilfläche des OWPs zusammengefasst und der jeweilige Mittelpunkt bzw. Zentroid jeder Teilfläche bestimmt. Ausgehend von diesen Mittelpunkten ist die beschallte Fläche der angrenzenden FFH-Schutzgebiete mit einem Einzelereignispegel von ≥ 140 dB, in dem erneut ein Abtrag von 8 km in die jeweiligen Schutzgebiete hinein erfolgt, zu bestimmen. Diese rechnerisch ermittelte, beschallte Fläche pro FFH-Schutzgebiet darf nicht 10 % und mehr betragen.

Im vorliegenden Fall sind derartige Berechnungen der beschallten Flächen für das östlich vom Vorhabengebiet gelegene FFH-Schutzgebiet Plantagenetgrund und die westlich gelegenen FFH-Schutzgebiete Kadetrinne und Darßer Schwelle anzustellen; siehe Abbildung 1.

Technischer Hinweis: Aufgrund der unterschiedlichen Topographie der Nord- und Ostsee und somit unterschiedlichen Wasserverhältnissen ist basierend auf (Mess-) Erfahrungen mit einer deutlich unterschiedlichen Schallausbreitungsdämpfung in der Ostsee zu rechnen, da das vereinfachte Verfahren des BMU-Schallschutzkonzepts (2013) mit einem allg. 8 km-Radius um jeden Mittelpunkt/Zentroid der Teilflächen zu erheblich größeren Schallausbreitungen führt.

5. Modellansätze

5.1 Modellanforderungen

Das (Standard-)Modell der *itap GmbH* ist ein empirisches Modell, d. h. es basiert auf gemessenen Einzelereignispegeln (SEL) und auf Zero-to-peak-Schalldruckpegeln ($L_{p,pk}$) aus früheren Projekten. Daher handelt es sich bei dieser Art von Modell um ein "adaptives" Modell, das mit zunehmenden Eingangsdaten "präziser" wird.

Das empirische Rammschallmodell erfüllt die nationalen Richtlinien der Regulierungsbehörde in Deutschland (BSH, 2013) für Rammschallprognosen einschließlich der geforderten Ergebnisse. Zusätzlich ist die *itap GmbH* für Unterwasserschallprognosen und -messungen nach der DIN 17025 (2018) akkreditiert. Internationale Richtlinien oder Normen für Unterwasserrammschallberechnungen gibt es derzeit nicht. Auch in anderen Ländern gibt es keine festen Vorgaben für die Erstellung von Berechnungen; in der Regel werden die Anforderungen an die Berechnungen für jedes Bauprojekt einzeln festgelegt. Dieses Modell wurde bereits in Deutschland, Dänemark, den Niederlanden, dem Vereinigten Königreich, Belgien, Frankreich, den USA, Australien und Taiwan angewendet.

5.2 Bestimmung des Quell- und Ausbreitungspegels

5.2.1 Pfahldurchmesser

Der Einzelereignispegel (SEL) variiert im Verlauf einer Rammung und hängt von mehreren Parametern ab (z. B. reflektierende Pfahlhautoberfläche, Rammenergie, Bodenbeschaffenheit, Wandstärke des Pfahls, etc.). Da jedoch alle genannten Parameter in Wechselwirkung zueinanderstehen können, ist es nicht möglich, exakte Aussagen über den Einfluss eines einzelnen Parameters zu treffen. In einem ersten Schritt wird nur ein Parameter, der "Pfahldurchmesser", betrachtet. Um ein statistisch valides Ergebnis der lautesten zu erwartenden Rammschläge zu erhalten, basiert das empirische Modell auf der 5⁰%igen Überschreitung des Einzelereignispegels (SEL_{05}) während einer Pfahlinstallation.

Abbildung 3 zeigt die Schallpegel, die während der Rammarbeiten an einer Reihe von Windparks gemessen wurden, aufgetragen über den Eingabeparameter "Pfahldurchmesser".

Je größer die schallabstrahlende Fläche im Wasser ist, desto größer ist der Schalleintrag. Das heißt, die beurteilungsrelevanten Pegelwerte steigen mit zunehmender Pfahlfläche, also dem Durchmesser des Pfahls. Zu beachten ist auch, dass der Zusammenhang nicht linear ist.

Die Modellunsicherheit beträgt ± 5 dB allein unter Berücksichtigung des Eingangsparameters "Pfahldurchmesser" und beruht auf der Streuung der tatsächlich vorliegenden Messergebnisse aus Abbildung 3, die wahrscheinlich auf weitere Einflussfaktoren, wie Rammenergie und reflektierende Pfahlhautoberfläche, zurückzuführen ist.

Der folgende Vergleich zwischen den prognostizierten Werten und den tatsächlich gemessenen Pegelwerten zeigt, dass Modellunsicherheit (± 5 dB) die Streuung angemessen berücksichtigt. In den meisten Fällen hat das Modell den Pegelwert in 750 m Entfernung leicht überschätzt (unveröffentlichte Daten). Daher ist eine Anwendung im vorliegenden Fall aus praktischer Sicht möglich. Die Ergebnisse des Modells können somit als konservativ bzw. maximal konservativ angesehen werden.

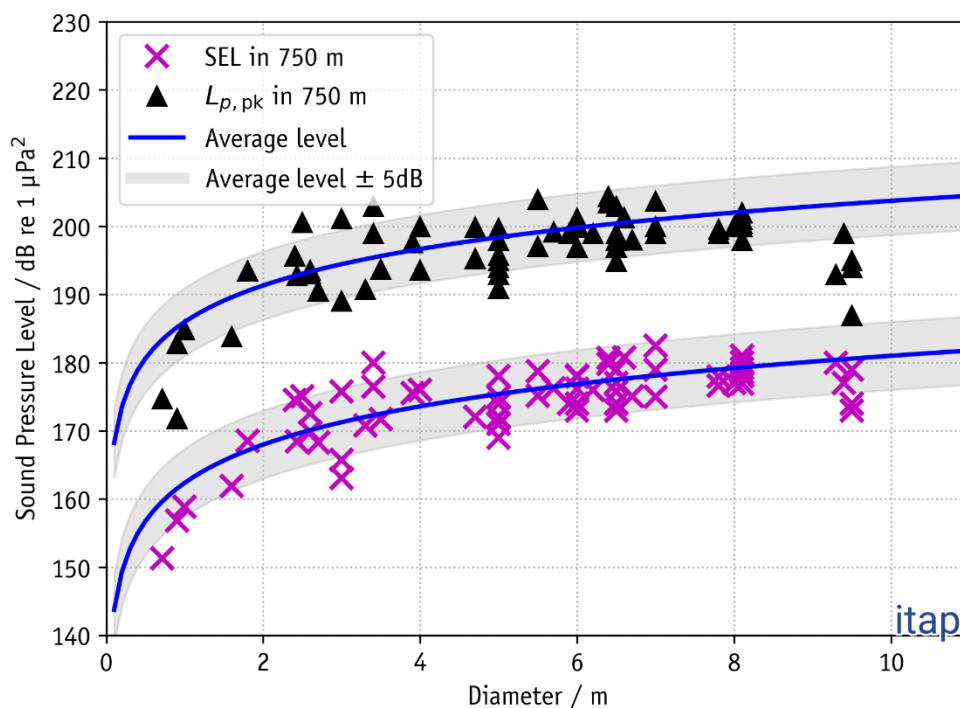


Abbildung 3: Gemessener Zero-to-peak-Schalldruckpegel ($L_{p,pk}$) und breitbandige 5 % Überschreitungspegel des Einzelereignispegels (SEL_{05}) während ungeminderter Rammarbeiten in 750 m Entfernung an einer Reihe von OWP als Funktion des Pfahldurchmessers (Stand 12/2024).

5.2.2 Rammenergie

Außerdem werden in dem hier verwendeten Modell in einem zweiten Schritt Zuschläge bzw. Abzüge für sehr hohe und sehr niedrige maximale Rammenergien verwendet. Betrachtet man die tatsächlich angewandte maximale Rammenergie bzw. die im Modell geschätzte maximale Rammenergie, so ergaben sich in der Regel Unterschiede zwischen dem Modell und den realen

Messwerten von etwa 2 dB. In der Mehrzahl der Fälle überschätzte das Modell mit den Eingangsdaten "Pfahldurchmesser" und "maximale Rammenergie" den Pegelwert im Abstand von 750 m leicht.

Im Rahmen einer Masterarbeit bei der *itap GmbH* wurde festgestellt, dass die gemessenen Schallpegelwerte im Durchschnitt etwa um 2,5 dB pro Verdoppelung der Rammenergie ansteigen (Gündert, 2014). Diese Erkenntnis ergab sich aus Untersuchungen an verschiedenen Fundamenten, bei denen die Schwankungen der Rammenergie während des Rammvorgangs (Eindringtiefe) mit entsprechenden Pegeländerungen (jeweils vom Soft-Start bis zur maximalen Rammenergie) statistisch verglichen wurden.

Die verwendeten Rammenergien in der vorliegenden Studie wurden in Zusammenarbeit mit dem Auftraggeber festgelegt und basieren auch auf den bisher durchgeführten Bodenuntersuchungen. Um die Endtiefe zu erreichen, wird die maximale Rammenergie des Pfahlhammers (wenn überhaupt notwendig) erfahrungsgemäß nur kurzzeitig zum Ende einer Rammung eingesetzt.

Eine Erhöhung der Rammenergie ist erforderlich, wenn eine bestimmte Anzahl von Rammschlägen zum Erreichen der Einbindetiefe von z. B. 0,25 m überschritten wird (Gefahr der Materialermüdung durch zu hohe Rammschlagzahlen (blow counts)). Die Erfahrungen aus der Praxis zeigen, dass meist geringere Rammenergien aufgebracht werden als im ungünstigsten Fall (worst case) prognostiziert.

Somit ist dieses Zusatzmodul zum bestehenden Modell der *itap GmbH* in der Lage, die beurteilungsrelevanten Pegelwerte für jeden einzelnen Rammschlag bei vorgegebenen Rammenergieverläufen zu prognostizieren. Die Modellunsicherheit dieses statistischen Modells (*itap GmbH* Basismodell + Erweiterung) beträgt nachweislich ± 2 dB; eine leichte Überschätzung durch dieses Modell konnte ebenfalls nachgewiesen werden.

Aufgrund der Erfahrungen der letzten Jahre und der Erkenntnisse aus der o.g. Masterarbeit kann davon ausgegangen werden, dass die Modellunsicherheit unter Berücksichtigung der oben genannten Zuschläge und Abzüge deutlich minimiert werden kann.

5.2.3 Hydraulikhammer

Der Einfluss verschiedener Hydraulikhammertypen wird derzeit nicht berücksichtigt, da zu viele Einflussparameter und -faktoren existieren, z. B. Ankerdesign, Kontaktfläche zwischen Hammer und Pfahl, Pfahlgreifer (pile gripper) oder Pfahlführung (pile-guiding frame). Theoretische Untersuchungen zeigen, dass der Einfluss der verschiedenen Hammertypen in einem Bereich von 0 dB bis max. 3 dB liegen könnte. Darüber hinaus gibt es derzeit keine

validen, empirischen Daten zu verschiedenen Hammertypen. Daher konzentriert sich das *itap*-Modell auf das Worst-Case-Szenario (lautestes mögliches Szenario).

Im Rahmen des Modells wird der Rammhammer (Hammertyp und Seriennummer) nur mit dem Einflussparameter Rammenergie berücksichtigt. Einflüsse sonstiger Variablen, wie die technische Ausführung, Konfiguration der Rammhaube und das Rammverfahren konnten bisher nicht empirisch ermittelt werden und bleiben in der Modellierung unberücksichtigt.

Darüber hinaus kann der Hydraulikhammer optional mit einer Impulsverlängerungseinheit ausgestattet werden, um eine möglichst geringe Schallemission zu gewährleisten. Bei den Impulsverlängerungen handelt es sich um eine Art Feder-Dämpfer-System, das eine Verlängerung des Rammimpulses bei gleichzeitigem Abbau der Kraftspitzen am Pfahl bewirkt.

Derzeit arbeiten zwei namhafte Rammhammerhersteller an der Entwicklung und Herstellung dieser neuartigen Impulsverlängerungs-Einheiten: IQIP-PULSE und Menck Noise Reduction Unit (MNRU).

Für die MNRU und PULSE-Einheiten werden derzeit Schallminderungen gemäß der derzeit verfügbaren Datenlage verwendet; siehe Kapitel 6.1.2.

5.2.4 Bodenkopplungen

Es kann davon ausgegangen werden, dass mit zunehmendem Bodenwiderstand (SRD-Wert) einer Bodenschicht auch die einzusetzende Rammenergie, um einen Pfahl auf Endtiefe zu verbringen, steigt.

Da es sich im Vorhabengebiet um einen sehr harten, sandigen Untergrund handelt und die in Kapitel 5.2.1, Abbildung 3 gezeigten Messdaten weitgehend auf sandigem und mitteldichtem, tonigem Untergrund ermittelt wurden, kann nicht ausgeschlossen werden, dass die zu erwartenden Schallemissionen höher sind als die in Abbildung 3 dargestellten Regressionsgeraden.

Aus diesem Grund ist im Modell ein frequenzunabhängiger Sicherheitszuschlag für die Bodenverhältnisse (Bodenkopplung) erforderlich.

5.2.5 Spektrum des Rammschalls

Abbildung 4 zeigt die spektrale Verteilung gemessener Einzelereignispegel (*SEL*) in einer Entfernung von 750 m zu einer unmitigierten Impulsrammung von Monopfählen mit Durchmessern von > 6 m (Bellmann, et al., 2020). Die gemessenen Frequenzspektren zeigen

grundsätzlich einen vergleichbaren Verlauf mit einem maximalen Schalleintrag zwischen 63 Hz und 250 Hz. Zu höheren und niedrigeren Frequenzen fällt das Frequenzspektrum stark ab. Aus den Messungen der letzten Jahre hat sich gezeigt, dass die Kombination aus größeren Rammhammertypen und größeren Pfahldurchmessern einen Einfluss auf das zu erwartende Rammschallspektrum haben. Tendenziell verschiebt sich das lokale Maximum bei größeren Rammhämmern und größeren Pfahldurchmessern schrittweise zu niedrigeren Frequenzen. Im Einzelnen ist der exakte spektrale Verlauf eines projektspezifischen Rammschallereignisses nach heutigem Kenntnisstand nicht genau prognostizierbar (Bellmann, et al., 2020). Für die Modellierung wird daher aus den Messdaten vergleichbarer Bauvorhaben ein idealisiertes Modellspektrum für den Einzelereignispegel extrahiert. Abbildung 4 zeigt die Form dieses mittleren 1/3-Oktav-Spektrums (blaue Linie) im Vergleich zu realen Messdaten (graue Linien). Das Modellspektrum wird an den sehr genau bestimmbaren Breitbandpegel mittels konstanter Verschiebung angepasst. Dazu wird aus über 87 Datensätzen, die zuvor auf einen gleichen Summenpegel normiert wurden, ein idealisiertes Spektrum gebildet. Abbildung 4 zeigt die Form dieses idealisierten 1/3-Oktav-Spektrums in blauer Farbe. Grau hinterlegt ist der 90 %-Interquartilsabstand des zugrundeliegenden Datensatzes.

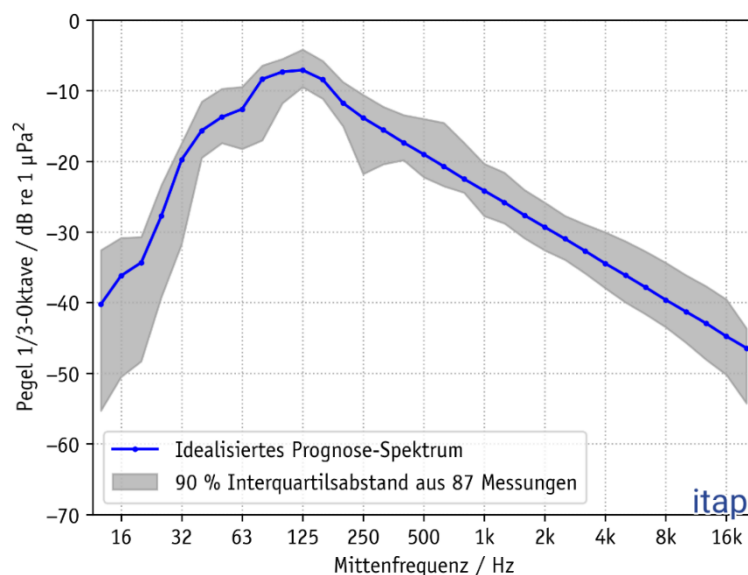


Abbildung 4: *Ermitteltes Modellspektrum (blau) für Monopfähle mit Pfahldurchmessern von bis zu 10⁰m, basierend auf verschiedenen Messdaten (grau: Messdaten) für die nachfolgenden Berechnungen.*

Durch die neuen Hammertechnologien MNRU und PULSE werden die einzelnen Impulse zeitlich verlängert. Es gilt als wahrscheinlich, dass dies auch das Rammschallspektrum (Amplitude und spektrale Zusammensetzung) beeinflusst. Erste Messungen deuten auf eine Verschiebung zu

tieferen Frequenzen und zeitgleich eine Verbreiterung des Maximums im Frequenzspektrum hin (nicht veröffentlichte Messungen der *itap GmbH* bei deutschen OWP-Bauvorhaben aus den Jahren 2022 bis 2024). Tendenziell ergibt sich unter Einsatz dieser neuen Technologien ein Maximum im Frequenzspektrum zwischen ca. 32 Hz und 250 Hz.

Zur Einhaltung des Lärmschutzwertkriteriums von $160 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ und $190 \text{ dB}_{\text{L,p,pk}}$ in 750 m ist bereits seit 2014 die Verwendung von einem pfahlnahen und pfahlfernen Schallschutzsystem gängige Praxis (Bellmann, et al., 2020). Die Einfügungsdämpfung dieser kombinierten Schallschutzsysteme ist ebenfalls stark frequenzabhängig; je höher die Frequenz, desto höher die Schallminderung. In Abbildung 5 ist zur Veranschaulichung der Wirkungsweise von Schallschutzsystemen exemplarisch der Vergleich von mitigierter zu unmitigierter Impulsrammung in einer Entfernung von 750 m dargestellt. Zudem wurde zwischen den Rampausen der permanent anwesende Hintergrundschall messtechnisch erfasst.

Abbildung 5 zeigt, dass bereits in wenigen hundert Metern Entfernung von der Rammbaustelle kein Rammschall mehr im Wasser bei Frequenzen ab wenigen kHz messtechnisch erfasst werden kann, da sich dieser vollständig mit dem umgebenden Hintergrundschall vermischt.

Dieser Effekt verstärkt sich noch einmal dergestalt, dass der detektierbare Rammschall im Pegel reduziert und zeitgleich noch tieffrequenter wird, wenn die neuen Hammertechnologien MNRU oder PULSE zum Einsatz kommen.

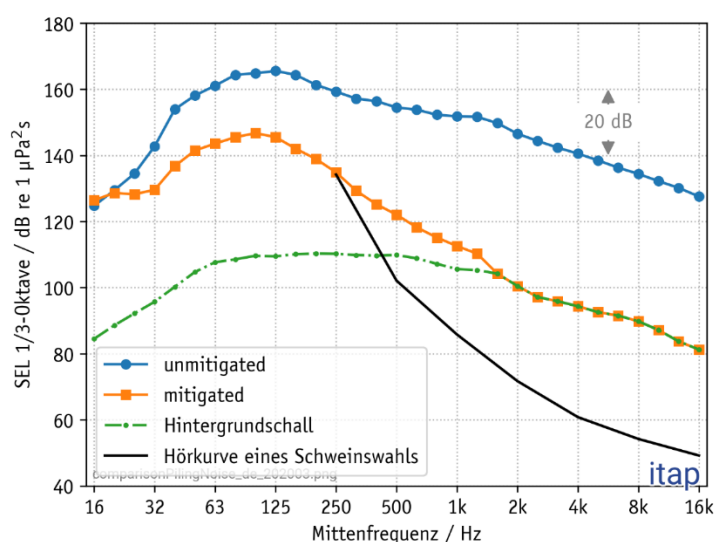


Abbildung 5: *minderter (mitigated) und ungeminderter (unmitigated) Impulsrammschall, messen in einer Entfernung von 750 m zu Gründungsarbeiten an einem großen monopfahl. Zudem sind der permanente Hintergrundschall, gemessen zwischen den Rammungen mit und ohne Schallschutzmaßnahmen sowie die Ruhehörschwelle des Schweinswals (Kastelein et al., 2017) dargestellt. (Quelle: Bellmann et al., 2020)*

5.2.6 Schallausbreitung

Motivation

Die Schallausbreitung wird häufig mit einfachen geometrischen Modellen beschrieben. Diese Modelle, wie beispielsweise das von Thiele & Schellstede (1980), basieren auf grundlegenden Annahmen über die Ausbreitung von Schallwellen und sind relativ leicht anzuwenden. Diese einfachen Modellansätze sind unkompliziert zu handhaben und produzieren schnell übersichtliche Ergebnisse. Allerdings steigt die Modellunsicherheit signifikant in komplexeren Szenarien, wie z. B. bei flachem Wasser, nicht konstanter Bathymetrie oder stark ausgeprägter Temperatur- und Salinitätsprofile in der Wassersäule (insbesondere in der Ostsee).

Im Gegensatz dazu bieten numerische Modelle der Schallausbreitung eine präzisere und detailliertere Möglichkeit, die Ausbreitung von Schall auch über größere Entfernung standortspezifisch zu berechnen. Diese Modelle berücksichtigen auch eine Vielzahl von Einflussfaktoren und sind daher in der Lage, deutlich realistischere Ergebnisse zu liefern (dies geht aus dem Vergleich von Prognosen mit den Ergebnissen von bestehenden Unterwasserschallmessungen während der Bauphase hervor; unveröffentlichte Daten der *itap GmbH*). Im Folgenden werden die wichtigsten Vorteile der numerisch berechneten Schallausbreitungsfunktionen gegenüber den einfacheren, geometrischen Modellen erläutert.

Berücksichtigung komplexer Umgebungsbedingungen

Geometrische Modelle nehmen an, dass sich Schall in einem homogenen, isotropen (in allen Richtungen gleichen) Medium ausbreitet, ohne Hindernisse oder Reflexionen. In der Realität jedoch sind die Umgebungsbedingungen selten so ideal. Schallwellen können von Hindernissen reflektiert, gebrochen oder absorbiert werden. Zudem können sich Schallwellen in nicht-homogenen Medien, wie in der Wassersäule, mit variierenden Temperaturen und Salinitäten unterschiedlich ausbreiten.

Numerische Modelle, wie zum Beispiel das Range-dependent Acoustic Model (RAM) nach Michael D. Collins (1995) und das BELLHOP-Beam-Tracing (Porter M. B., 1987), ermöglichen es, diese komplexen Umgebungsbedingungen detailliert zu berücksichtigen. Sie modellieren die Schallausbreitung unter Einbeziehung von Reflexionen, Brechungen, Beugungen und Streuungen, was zu realistischeren Ergebnissen führt. Dies ist insbesondere in flachen Gewässern mit einer nicht konstanten Bathymetrie von entscheidender Bedeutung, wo die Schallausbreitung nur in einem relativ schmalen Raum zwischen Sediment und Wasseroberfläche stattfindet (vergleichbar mit der Schallausbreitung in einem Rohr).

Frequenzabhängigkeit und Welleneffekte

Ein weiterer Vorteil numerischer Modelle ist die Berücksichtigung der Frequenzabhängigkeit der Schallausbreitung. Geometrische Modelle gehen oft davon aus, dass alle Frequenzen des Schalls sich gleich verhalten, was in der Praxis nicht der Fall ist. Tiefe Frequenzen neigen dazu, Hindernisse zu umgehen (Beugung), während hohe Frequenzen stärker reflektiert oder absorbiert werden.

Numerische Modelle ermöglichen es, die Ausbreitung von Schall in Abhängigkeit von der Frequenz genauer zu simulieren, da sich nicht alle Frequenzen mit derselben Schallgeschwindigkeit im Wasser ausbreiten (Dispersion).

Dies hat zur Folge, dass sich ein einzelner, sehr kurzzeitiger Impulsrammschall in 750 m zu einer Art Sweep mit deutlich längerer Signaldauer in mehreren Kilometern umwandelt. Etwas überspitzt lässt sich sagen, dass ein impulshaltiges Schallsignal bei der Ausbreitung über große Entfernungen immer mehr in ein Dauerschallsignal übergeht.

Genauigkeit und Flexibilität

Jedes Modell ist eine Simplifizierung der Realität und birgt eine Unsicherheit. Numerische Modelle bieten eine wesentlich höhere Genauigkeit als einfache geometrische Modelle. Während geometrische Modelle auf vereinfachenden Annahmen basieren, können numerische Modelle eine nahezu beliebige Detailtiefe erreichen, abhängig von der Rechenleistung und den zur Verfügung stehenden Eingangsparametern (Ressourcen). Dies bedeutet, dass numerische Modelle flexibler sind und an standortspezifische Bedingungen angepasst werden können.

Einflüsse von Salinen- und Temperaturschichtungen in der Ostsee

Aufgrund der geographischen Lage der Ostsee findet kaum ein Austausch mit Wasser aus dem Atlantik statt. Im Vergleich zur Nordsee, in der das Atlantikwasser gleich aus zwei Richtungen einströmt und eine ständige Durchmischung gewährleistet ist, sind die Strömungen in der Ostsee in erster Linie das Resultat von Wettereinflüssen. So kann es in den Sommermonaten zu Strömungsbedingungen kommen, bei denen eine vollständige Durchmischung des Wassers nicht mehr gewährleistet ist. Stattdessen ist es möglich, dass sich im Wasser Schichtungen von unterschiedlichem Salzgehalt und unterschiedlicher Temperatur bilden können. Hieraus ergibt sich ein ausgeprägtes Schallgeschwindigkeitsprofil über die gesamte Wassersäule.

Infolge der unterschiedlichen Schichtungen können sich Kanäle bilden, in denen sich die Schallwellen mit einer deutlich geringeren Dämpfung ausbreiten können. Diese sogenannten

„Schallkanäle“ entstehen in Bereichen, in denen die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls höher ist als in den darüber- und darunterliegenden Schichtungen. Da sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls unter Wasser mit zunehmender Temperatur oder Salinität erhöht, kommt es an den Übergängen zweier Schichtungen zu einer Beugung des Schalls in Richtung der Schicht mit der geringeren Ausbreitungsgeschwindigkeit. Tritt dieser Effekt an zwei gegenüberliegenden Grenzschichten (z. B. oben höhere Temperatur, unten höherer Salzgehalt) auf, kann sich der Schall aufgrund einer gerichteteren Verteilung der vorhandenen Schalleistung und geringerer Verluste durch Reflektionen innerhalb dieser Schichtung mit einer deutlich geringeren Dämpfung ausbreiten. Es entsteht ein „Schallkanal“. Dies funktioniert jedoch nur, wenn die Wellenlängen im Verhältnis zur Höhe des Schallkanals nicht zu groß werden. Damit die Schallimmissionen von Rammschlägen, die üblicherweise im Frequenzbereich $\ll 1000$ Hz (maximaler Schalleintrag ins Wasser zwischen 100 Hz und 200 Hz) liegen, in solchen Kanälen übertragen werden können, wären Schallkanäle mit einer tiefenabhängigen Ausdehnung $\gg 30$ m, d. h. horizontale Kanäle mit einer Höhe von $\gg 30$ m, erforderlich. Dieses ist bei Wassertiefen von ca. bis zu 20 m, wie sie im Baufeld des Windparks vorliegen, ausgeschlossen.

Die Bundeswehr (WTD71) konnte in wenig befahrenen Bereichen der Ostsee den Einfluss von derartigen Schallkanälen auf akustische Signale mehrfach messtechnisch nachweisen (Vortrag auf der 2. DUH Schallschutztagung, Berlin, 2014). Der Effekt der Schallkanäle betrug 10 dB und mehr auf einer Distanz von mehreren Kilometern. D. h., Schall innerhalb des Schallkanals wurde um 10 dB weniger bei der Schallausbreitung über mehrere Kilometer in der Amplitude reduziert als Schall ober- und unterhalb dieses Schallkanals. Jedoch wurde in diesem Vortrag deutlich darauf hingewiesen, dass es sich bei den Testsignalen nicht um Rammschall, sondern um (Sinus- oder Puls-) Signale in Frequenzbereichen von mehreren kHz handelte. Zudem betrug die Ausdehnung dieser Schallkanäle (in der Höhe) nur wenige Meter. Somit sind die dort eingesetzten Schallsignale um einen Faktor 10 und mehr in der Frequenz höher (entspricht einer Wellenlänge von $1/10$ und weniger), als der im vorliegenden Bericht betrachtete Rammschall. Zudem sei angesprochen, dass bei den Versuchen der Bundeswehr eine Punktschallquelle verwendet wurde, während ein zu rammender Pfahl eine räumlich ausgedehnte Linien-schallquelle darstellt. Der Einfluss der Quellcharakteristik auf die Weiterleitung in Schallkanälen ist derzeit noch nicht hinreichend wissenschaftlich untersucht worden.

Im abgeschlossenen Bauvorhaben *EnBW Windpark Baltic 2* wurden von der *itap GmbH* entsprechende Messungen der Salz-, Temperatur- und Schallgeschwindigkeitsprofile über die Wassertiefe an mehreren Tagen und Messpositionen nach Maßgabe des BSH mittels CTD-Sonden messtechnisch erfasst. Bei einer Messung im Spätsommer 2013, nach einer lang anhaltenden „Schönwetterperiode“, konnte einmalig ein Schallkanal messtechnisch erfasst

werden. Die Ausdehnung dieses Kanals betrug um die 10 m in der Höhe. Diese räumliche Ausdehnung wurde ebenfalls durch vorhandene Messstationen in der Ostsee über die letzten Jahre seitens des BSH messtechnisch bestätigt. Zu dem Zeitpunkt wurde der Hydroschall zeitgleich in drei unterschiedlichen Höhen über Grund während der Rammaktivitäten aufgezeichnet. Dabei befanden sich ein Hydrophon unterhalb des Schallkanals, ein Hydrophon in der Mitte und ein Hydrophon am oberen Rand des Schallkanals. Die Messergebnisse bei dieser Rammung in mehreren Hydrophontiefen besitzen eine Varianz von < 2 dB bei einer Messunsicherheit von 2 dB.

Während der gesamten Rammaktivitäten im Bauvorhaben EnBW Windpark Baltic 2 wurden permanent Messungen in Entfernungsbereichen zwischen 750 m und > 40 km, z. T. in unterschiedlichen Hydrophontiefen über Grund, durchgeführt. Es konnte bei den Installationen von 39 Monopfählen und insgesamt 123 Pfählen für die 41 Jacket-Fundamentstrukturen zu jedem Zeitpunkt eine erwartungsgemäße Schallabsorption bei der Ausbreitung im Wasser messtechnisch nachgewiesen werden.

Verwendete Methodik

Um die Modellierung der Schallausbreitung für das Vorhaben Gennaker an die örtlichen Gegebenheiten (standort- und projektspezifischen Rahmenbedingungen) anzupassen, wird die Ausbreitungsdämpfung für unterschiedliche Raumrichtungen von der Quelle numerisch bestimmt. Für Frequenzen < 3 kHz wird das Range-dependent Acoustic Model (RAM) nach Michael D. Collins (1995) und für Frequenzen ab 3 kHz das BELLHOP-Beam-Tracing-Verfahren (Porter M. B., 1987) verwendet. Als Wassertiefen werden die GEBCO 2023 Bathymetriedaten eines 20 km x 20 km Gitters herangezogen. Es wurden die zu erwartenden Schalldruckpegel in verschiedenen Wassertiefen für jedes Oktavband zwischen 12,5 Hz und 20 kHz modelliert. Zudem geht die Schallgeschwindigkeit (in Abhängigkeit u. a. von Salinität und Wassertemperatur) in diese Berechnung ein.

5.3 Berechnungsverfahren

In den folgenden Unterkapiteln werden die verschiedenen Berechnungsverfahren/-schritte und Teilmodellläufe im Detail beschrieben.

5.3.1 Schritt 1: Zero-to-peak-Pegel und Breitband-Einzelereignispegel in 750 m

Das *itap*-Modell berechnet den Einzelereignispegel (SEL) und den Zero-to-peak-Schalldruckpegel ($L_{p,pk}$) auf der Grundlage der empirischen Datenbasis in einem festgelegten Abstand von 750 m zur Quelle gemäß den Anforderungen der deutschen Messanleitung (BSH, 2011) und der internationalen Norm (ISO 18406, 2017). Die Modellergebnisse hängen von den folgenden Parametern ab:

- (i) dem Pfahldurchmesser,
- (ii) der maximalen Rammenergie (ungünstigster Fall, Worst-Case-Szenario),
- (iii) der Wassertiefe und
- (iv) der Sicherheitsmargen für z. B. Kopplungseffekte, akustische Verbindungen zwischen Pfahl und Jacket-Struktur (im Falle der Installation von Pin-Piles) oder Bodenkopplungen, falls erforderlich.

Im Verlauf einer Rammung ist die Streuung der jeweiligen Zero-to-peak-Spitzenpegel ($L_{p,pk}$) oftmals größer als die der Einzelereignispegel (SEL). In dieser Prognose werden die berechneten Zero-to-peak-Spitzenpegel ($L_{p,pk}$) auf die Maximalwerte einer gesamten Fundamentinstallation bezogen. Die Unsicherheit ist damit wie in Kapitel 5.4 beschrieben, vergleichbar mit der des Einzelereignispegels (SEL).

5.3.2 Schritt 2: Frequenzabhängigkeit des Quellpegels und Ausbreitungsdämpfung

Die Abschätzungen für den breitbandigen Einzelereignispegel (SEL) und den Zero-to-peak-Schalldruckpegel ($L_{p,pk}$) basieren auf empirischen Breitbanddaten aus verschiedenen OWP-Bauphasen (z. B. Bellmann et al., 2020). Die Schallausbreitung im Meer ist jedoch frequenzabhängig.

Die spektralen Ansätze für den Rammschall in 750 m werden aus empirischen Daten ermittelt (siehe Kapitel 5.2.5) und ein Ansatz für die Ausbreitungsdämpfung (TL) wird berücksichtigt. Die Auswahl der auf empirischen Daten basierenden Spektralform sowie der Gesamtpegel werden an den prognostizierten Breitband-Einzelereignispegel (SEL) angepasst.

Der Einzelereignispegel (SEL) ist ein energetischer Wert, bei dem die Energie auf verschiedene Frequenzbänder verteilt ist. Für die Breitbanddarstellung wird lediglich ein Frequenzband über den gesamten Frequenzbereich verwendet, dies bedeutet, dass die gesamte Schallenergie über alle Frequenzen für die Pegelberechnung berücksichtigt wird. Im Gegensatz dazu stellt der

Zero-to-peak-Spitzenpegel ($L_{p,pk}$) den maximalen Schalldruck bei einem Rammschlag dar, welcher frequenzunabhängig ist. So ist der $L_{p,pk}$ nur ein Einzahlwert.

5.3.3 Schritt 3: Schallkarten

Auf der Grundlage des Quellpegels und der Ansätze für die definierte Ausbreitungsdämpfung wird der Einzelereignispegel (SEL) als Funktion der Entfernung, Richtung und Wassertiefe berechnet. Die Ergebnisse werden in farbigen Schallkarten dargestellt.

5.4 Modellunsicherheiten / Unsicherheitsbetrachtungen

Sowohl die Modellierung der "Quellstärke" bzw. des "Quellpegels" des Rammschalls, als auch die Rammanalyse zur Bestimmung der maximalen Rammenergien sowie die Modellierung der Unterwasserschallausbreitung durch Anwendung von Ansätzen für die Ausbreitungsdämpfung (z. B. der Ausbreitungsdämpfung nach Collins (1995); Kapitel 5.2.6) beinhaltet einen gewissen Grad an Unsicherheit und damit auch die abgeleiteten Werte für die berechneten Pegel sowie deren Wirkungsbereich.

Messungen aus abgeschlossenen Bauprojekten (Bellmann, et al., 2020) mit großen Monopfählen bis 8,1 m zeigen, dass der gemessene SEL am Ende der Rammsequenz trotz einer Erhöhung der Rammenergie konstant bleibt oder um bis zu 25 % abnimmt, d. h. nicht zunimmt. Ein möglicher Erklärungsansatz hierfür ist die hohe Einbindetiefe des Monopfahls und die daraus resultierende, erhöhte Steifigkeit des zu rammenden Pfahls. Dieses „Verhalten“ ist jedoch stark abhängig vom Fundamentstandort (individuelle Bodenbeschaffenheit).

Gelegentlich stiegen jedoch die Einzelereignispegel (SEL) stetig an, bis die maximale Einbindetiefe erreicht war (bei gleichzeitiger Erhöhung der Rammenergie). Deshalb wird für alle Berechnungen immer die maximale Rammenergie verwendet.

Die Bestimmung des Quellpegels nur mit dem Eingangsparameter "Pfahldurchmesser" führt zu einer Unsicherheit von ± 5 dB (Abbildung 3). Um die Unsicherheit zu reduzieren, werden für die zweite relevante Wirkgröße "Rammenergie" Annahmen getroffen und Zuschläge und Abzüge auf der Basis eines Ausgangswertes berücksichtigt. Zusätzlich werden Sicherheitszuschläge für kritische Bodenbeschaffenheiten und eventuelle Ankopplungen an umliegende Strukturen berücksichtigt.

Durch die Berücksichtigung des effektiven Parameters "Rammenergie" wird die Unsicherheit deutlich reduziert. Der Vergleich der Modellergebnisse mit realen Messdaten von 2012 bis heute zeigt eine Unsicherheit von ± 2 dB (unveröffentlichte Daten aus verschiedenen

Projekten) für den Einzelschlag-*SEL* in 750 m Entfernung zum Rammereignis mit der Tendenz, dass das Modell die Messwerte meist leicht überschätzt. Die in dieser Prognose berechneten Einzelereignispegel in einer Entfernung von 750 m sind somit mit einer Unsicherheit von ± 2 dB behaftet.

Der wichtigste Einflussparameter in Bezug auf die Prognoseunsicherheit ist die Ausbreitungsdämpfung (TL), da dieser Parameter stark vom Wetter (Wind und Wellen) und der Bathymetrie abhängt. Dies bedeutet, dass bei prognostizierten Pegeln über große Entfernungen (> 10 km) Unsicherheiten von mehr als 2 dB auftreten können. In der Regel unterschätzen alle halbempirischen und theoretischen Ansätze zur Schallausbreitung über große Entfernungen die Ausbreitungsdämpfung, was einer Überschätzung der Pegel auf große Entfernungen entspricht. Die Prognose von Schalldruckpegeln in einer Entfernung von 750 m vom Pfahl wird durch die Verwendung verschiedener, empirischer und halbempirischer Ansätze für die Ausbreitungsdämpfung jedoch kaum beeinflusst.

6. Schallschutz bzw. zu erwartende Schallminderung

Im Allgemeinen kann Schallminderung erreicht werden durch die Anwendung von

- Schallminderungssystemen (Noise Mitigation Systems (NMS)), d. h. Reduzierung des Schallquellenpegels,
- Schallschutzsystemen (Noise Abatement Systems (NAS)), d. h. Reduzierung/Dämpfung des Rammschalls im Wasser.

Einen allgemeinen Überblick über technische Schallschutzsysteme, Schallminderungssysteme und mögliche, alternative, schallarme Fundamentstrukturen und -verfahren wurde 2011 erstmals im Auftrag des Bundesamtes für Naturschutz (BfN) veröffentlicht (Koschinski & Lüdemann, 2011). In den folgenden Jahren wurde diese Studie zwei Mal aktualisiert (Koschinski und Lüdemann (2013), Koschinski und Lüdemann (2019)). In Verfass *et al.* (2019) wird ebenfalls ein allgemeiner Überblick über technische Schallschutzsysteme gegeben. In dieser Studie wurden Fragebögen verwendet, um die Wirksamkeit jedes einzelnen Schallschutzsystems und die zu erwartenden Anwendungskosten zu bewerten.

In Bellmann *et al.*, (2020) wird ein Überblick über die insgesamt erzielten Schallminderungen mit Schallminderungssystemen und Schallschutzsystemen innerhalb der deutschen Gewässer gegeben. Basierend auf dieser Studie sind nur das schalloptimierte Rammverfahren als Schallschutzsystem und drei Schallminderungssysteme, der Große Blasenschleier (Big Bubble Curtain (BBC)), der Hydroschalldämpfer (Hydro Sound Damper (HSD)) und das IHC-Schallminderungs-Screen (IHC-Noise Mitigation Screen) zum aktuellen Zeitpunkt bewährte Techniken unter realen Offshore-Anwendungen.

In den folgenden Unterabschnitten werden verschiedene Schallschutzsysteme sowie die neuen Schallminderungssysteme PULSE und MNRU kurz beschrieben.

6.1 Schallminderungssysteme (Noise Mitigation Systems - NMS)

6.1.1 Schalloptimiertes Rammverfahren

Eine solide und zuverlässige Möglichkeit zur Reduzierung des Quellpegels bei Rammarbeiten ist die Verringerung der eingesetzten Rammenergie.

Basierend auf empirischen Daten reduzieren sich die akustischen, beurteilungsrelevanten Pegelgrößen um ca. 2,5 dB bei einer Halbierung der eingesetzten Rammenergie (Gündert, 2014). Ein solches Rammverfahren wird im Allgemeinen als schalloptimiertes Rammverfahren, mit einer hohen Schlagwiederholungsfrequenz und einer hohen Anzahl von Rammschlägen sowie geringer Rammenergien, bezeichnet. Typischerweise wird für eine solche schalloptimierte Rammung ein großer Hammer der neuesten Generation mit 50°% bis 60°% seiner Leistung eingesetzt (Bellmann, et al., 2020).

Durch Reduzierung der Rammenergie, durch Erhöhung der Schlagwiederholungsfrequenz (Blow Rate) und der Anzahl der Rammschläge pro 25 cm Einbindetiefe (Blow Count) wird der Rammvorgang so optimiert, dass die BSH-Vorgaben für die Gesamtrammzeit von 180°Min. für Monopfähle und 140°Min. für Jacket-Pfähle inkl. Vergrämuungsmaßnahme eingehalten werden können (schalloptimiertes Rammverfahren, (Bellmann, et al., 2020)).

Die Anwendung eines schalloptimierten Rammverfahrens hängt wesentlich vom Bodenwiderstand ab, der meist stark von der Einbindetiefe abhängt; je höher die Einbindetiefe, desto höher muss in der Regel die Rammenergie sein. Darüber hinaus muss die Anwendung eines schalloptimierten Rammverfahrens vor dem Bau sorgfältig hinsichtlich der Materialermüdung, des Bodenwiderstandes und der Rammdauer geprüft werden, d. h. dieses Schallminderungssystem ist nicht in allen Rammprojekten einsetzbar bzw. die Effektivität dieser Schallminderungsmaßnahme ist stark von den projekt- und standortspezifischen Randbedingungen abhängig.

Das Schallminderungspotenzial schalloptimierter Rammverfahren wird derzeit auf mehrere Dezibel geschätzt und wird meist in Verbindung mit einer Echtzeit- (Online-) Unterwasserschallüberwachung in 750 m Entfernung von der Rammstelle empfohlen.

6.1.2 Neue Hammertechnologien: PULSE-Einheit und MNRU

Neue Hammertechnologien wie die Menck Noise Reduction Unit (MNRU) und das PULSE-System von IQIP versuchen, die Spitzenamplitude der Kraftübertragung zwischen Hammer und Pfahl zu reduzieren und die Dauer der einzelnen Schläge zu verlängern.

PULSE-Einheit

Die Schallminderung kann durch die Verwendung unterschiedlicher Flüssigkeitsspiegel innerhalb der PULSE-Einheit von 0 mm bis 700 mm (entsprechend 0 % bis 100 %) eingestellt werden.

Erfahrungsgemäß liegen die Flüssigkeitsspiegel in der Praxis bislang bei 100 mm ($P_{\min}$), 400 mm (P_{med}) und 700 mm ($P_{\max}$).

Erste Messdaten mit und ohne PULSE-Einheit in Kombination mit dem IQ6 Rammhammer liegen aus Offshore-Tests in der deutschen Ostsee vor. So zeigte sich, dass bei Verwendung einer PULSE-Einheit das Rammverfahren grundsätzlich verändert werden muss, um das Risiko einer Beschädigung des Rammhammers, der PULSE-Einheit und des zu rammenden Pfahls zu minimieren. Somit sind die max. zulässigen Rammschläge pro 25 cm Einbindetiefe auf 40 bis 50 zu begrenzen (Blow Count). Sobald dieser maximale Blow Count erreicht wird, muss die eingesetzte Rammenergie schrittweise (von 10 % Kapazität bis auf max. Kapazität des eingesetzten Rammhammers) erhöht werden. Ist die maximale Rammenergie erreicht und der maximale Blow Count ebenfalls, so muss ein Teil der Flüssigkeit (Maximum 700 mm entspricht 100 %) reduziert werden (0 bis 150 mm ist i. d. R. das Minimum und symbolisiert eine ausgeschaltete PULSE-Einheit). Erste Ergebnisse deuten darauf hin, dass mit PULSE 100 % eine Schallminderung von $5,5 \text{ dB} \pm 1,7 \text{ dB}$ ohne Verwendung von weiteren Schallschutzsystemen erzielt werden kann. Für die PULSE-Einstellung $< 100 \%$ nimmt die resultierende Schallminderung zunehmend ab.

Basierend auf den ersten Einsätzen unter realen Offshore-Bedingungen und Simulationen des Rammprozesses ist davon auszugehen, dass das vom Pfahl abgestrahlte Rammschallspektrum sich geringfügig zu tieferen Frequenzen verschiebt (ca. ein bis zwei 1/3-Oktavbänder) und zeitgleich zu höheren und niedrigeren Frequenzen abflacht (Bellmann, et al., 2020). Es ist derzeit davon auszugehen, dass sich diese spektrale Veränderung des abgestrahlten Rammschallspektrums nicht wesentlich auf die zusätzlich zu erzielende Schallminderung von Schallschutzsystemen (wie ein Großer Blasenschleier) auswirkt. Es ist somit in erster Näherung von einer annähernd additiven Gesamtschallminderung zwischen Schallminderungsmaßnahme PULSE und Schallschutzsystem auszugehen.

MNRU

Die Firma Menck GmbH entwickelt und testet ihre Menck Noise Reduction Unit (MNRU) ebenfalls für ihre größeren Impulsrammhämmer der neusten Generation. Im Gegensatz zur PULSE-Einheit werden unterschiedliche Stahleinheiten als Feder-Dämpfer-System verbaut. Die MNRU wird ebenfalls zwischen dem Impulsrammhammer und der Rammschlaghaube eingesetzt. Ein An- oder Ausschalten der MNRU ist laut Herstellerangaben nicht möglich.

Für das MNRU-System liegen keine Messungen unter realen Offshore-Bedingungen mit und ohne MNRU-System sowie ohne zusätzliche Schallschutzsysteme vor, so dass eine verlässliche Bewertung hinsichtlich der erreichbaren Gesamtschallminderung derzeit nicht möglich ist.

Die durch den Einsatz des MNRU-Systems in Kombination mit den Schallschutzsystemen DBBC und HSD geminderten Rammschallspektren außerhalb deutscher Gewässer weisen jedoch ebenfalls darauf hin, dass die bzgl. des PULSE-Systems beschriebene Frequenzverschiebung zu tieferen Frequenzen ebenfalls zu beobachten ist. Allerdings liegen derzeit keine verlässlichen Pfahlüberwachungsdaten (engl. pile monitoring) vor, so dass aktuell nicht quantifiziert werden kann, ob und wie viele Energieverluste durch diese neue Hammertechnologie entstehen. Es werden ähnliche Schallminderungen wie bei der PULSE-Einheit erwartet.

6.2 Schallschutzsysteme (Noise Abatement Systems - NAS))

6.2.1 Einfache oder doppelte große Blasenschleier (BBC und DBBC)

Der einfache (BBC) und doppelte Große Blasenschleier (DBBC) ist eins der praktikabelsten und am häufigsten verwendeten NAS (> 1.200 Anwendungen). Außerdem ist das BBC-System die einzige pfahlferne Schallminderungsmaßnahme. Zwei geförderte F&E-Projekte wurden durchgeführt, um die Haupteinflussfaktoren eines großen Blasenschleiers auf die Gesamtschallminderung zu verstehen (Nehls & Bellmann, 2015); (Bellmann, et al., 2020).

Die Erfahrungen zeigen, dass die Gesamtschallreduzierung beim Einzelereignispegel (*SEL*) durch den Einsatz eines BBC-Systems erheblich von der Systemkonfiguration, der Strömung und der Wassertiefe abhängt. Mit zunehmender Wassertiefe nimmt die Leistung eines BBC leicht ab. Erfahrungen haben gezeigt, dass durch den Einsatz eines optimierten, doppelten Großen Blasenschleiers (DBBC) in der Ostsee mit sehr geringer Strömung Schallreduktionen von bis zu 18 dB (maximal gemessene Schallreduktion) in 40 m Wassertiefe möglich sind (Bellmann et al., 2020). Die gemittelte Schallreduktion eines optimierten DBBC bei mäßiger Strömung ($\leq 0,75$ m/s) lag meist zwischen 15 dB und 16 dB. Bei höheren Strömungen ist die Wahrscheinlichkeit von Drifteffekten des Blasenschleiers extrem hoch, was bedeutet, dass die Gesamtschallreduzierung richtungsabhängig sein kann. In flacheren Gewässern (< 20 m) ist damit zu rechnen, dass die resultierende Gesamtschallminderung etwas höher ausfallen wird.

Ausschlaggebend für einen erfolgreichen Einsatz eines Großen Blasenschleiers sind:

- (i) eine ausreichende Menge an Druckluft und
- (ii) eine vollständige Umhüllung des Pfahls durch den oder die Großen Blasenschleier.

Die benötigte Luftmenge, die sich aus dem statischen Druck des umgebenden Wassers ergibt, hängt von der Wassertiefe ab. In der Nordsee (wo die meisten BBC-Einsätze stattfanden) ist eine Luftmenge von $\geq 0,5 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$ für Wassertiefen bis zu 40 m derzeit Stand der Technik (Bellmann et al., 2020). Um eine vollständige Umhüllung des Pfahls zu ermöglichen, ist ein ausreichender Abstand der BBC-Düsenschläuche zum Pfahl erforderlich. Dieser Abstand ist abhängig von der örtlichen Strömung und der Wassertiefe (Verdriftungseffekte). Das bedeutet,

dass bei der Konfiguration des BBC-Systems die Wassertiefe und die Strömung, aber auch die Art des Installationsschiffs (Dynamic Positioning, verankertes, schwimmendes Schiff oder Hubschiff) bei der Auslegung der Gesamtlänge der verwendeten DüsenSchläuche und der Form des Layouts berücksichtigt werden müssen. Normalerweise ist eine Strömung von bis zu 2 Knoten kein Problem für die Anwendung eines optimierten BBC-Systems im Hinblick auf die Drifteffekte. Die Verwendung eines einzelnen BBC anstelle eines doppelten BBC führt jedoch zu einer Verringerung der Gesamtschallminderung um 2 bis 4 dB.

Im Folgenden sind die Mindestanforderungen an das DBBC-System aus bereits abgeschlossenen Rammvorhaben aufgeführt (Bellmann *et al.*, 2020):

Systemkonfigurationen für einen optimierten, einfachen / doppelten Großen Blasenschleier:

Lochgröße (Durchmesser) und Lochabstand:	1 - 2 mm alle ca. 20 - 30 cm
verwendete Luftmenge:	$\geq 0,5 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})^2$
Abstand zwischen den DüsenSchläuchen:	$\geq$ eine Wassertiefe zwischen 1. und 2. BBC
Gesamtlänge beider DüsenSchläuche:	$\leq 1.800 \text{ m}$

- Der BBC muss die Gründungsstruktur vollständig umschließen.
- Der typische DüsenSchlauchdurchmesser beträgt derzeit 4 Zoll (ca. 102 mm), was die Gesamtlänge eines einfachen BBC aufgrund der dynamischen Grenzen der Luftströmung auf 1.000 m begrenzt.
- Regelmäßige Wartung der verwendeten DüsenSchläuche.
- Keine turbulenz erzeugenden Hindernisse in den DüsenSchläuchen.
- Der Druck der Druckluft in den DüsenSchläuchen muss 2 - 3 bar höher sein als der statische Druck des Wassers außen (Überdruck); d. h. in Wassertiefen bis zu 30 m muss der Betriebsdruck der Kompressoren mindestens 8,5 bis 10[°]bar³ betragen.
- Die Gesamtlebensdauer eines jeden DüsenSchlauchs ist begrenzt (derzeit beste Praxis < 80 - 100 Anwendungen).

² Seit 2023 wird mit $0,5 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$ zu Projektstart angefangen und bei Überschreitungen der Lärmschutzwerte die Luftmenge auf $\geq 0,6 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$ erhöht..

³ Typischerweise kann der Druck an Bord des BBC-Versorgungsschiffs am Verteiler gemessen werden. Erfahrungsgemäß nimmt der Druck in den DüsenSchläuchen mit zunehmender Entfernung zum Verteiler aufgrund der physikalischen Parameter des Wassers, der Temperatur, etc. sowie aufgrund der Tatsache, dass die Luft den DüsenSchlauch auf dem Meeresboden verlässt, ab. Basierend auf Messungen im Inneren der DüsenSchläuche ist ein Druck von 9,3 bar am Verteiler für Wassertiefen bis zu 40 m ausreichend, um immer einen Überdruck im Inneren des DüsenSchlauches von 2 - 3 bar zu gewährleisten.

6.2.2 Verbesserter Großer Blasenschleier (engl. Enhanced Big Bubble Curtain)

Bei einem verbesserten Großen Blasenschleier (eBBC) wird ein Düsenschlauch mit einem Durchmesser von 152 mm anstatt der Standardgröße von 102 mm verwendet. Dies führt zu einer Verdopplung des Querschnitts des Düsenschlauches, was zur Folge hat, dass statt $0,5 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$ bis zu $1,1 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$ komprimierte Luftmenge in den Schlauch eingeführt werden kann.

Erste Offshore-Anwendungen zeigten, dass Schallminderungen durch einen einzelnen eBBC erzielt werden können, die mit denen des doppelten Großen Blasenschleiers vergleichbar sind.

Wird der innere Schlauch eines doppelten Großen Blasenschleiers (DBBC) durch einen verbesserten Großen Blasenschleier (eBBC) ersetzt, so kann eine zusätzliche Schallminderung von bis zu 2 dB erreicht werden.

6.2.3 IHC-Noise Mitigation Screen (IHC-NMS)

Das IHC-Noise Mitigation Screen (IHC-NMS)) wurde von der Firma IHC IQIP bv entwickelt und gebaut. Es besteht aus einem doppelwandigen Stahlrohr, wobei der Zwischenraum mit Luft gefüllt ist. Die Lärminderung wird durch die Impedanzunterschiede auf den doppelwandigen Stahlrohren des IHC-NMS beeinflusst. Eine detaillierte Beschreibung ist in (Bellmann, et al., 2020) enthalten.

Bei insgesamt mehreren hundert Anwendungen dieses pfahlnahen Lärmschutzsystems innerhalb von neun deutschen OWF-Bauprojekten bis einschließlich 2024 wurde bisher nur einmal zu Beginn der Entwicklung ein technisches Problem festgestellt. Abgesehen davon zeigten alle anderen Anwendungen, dass dieses Schallschutzsystem offshore-tauglich, fehlerfrei und robust funktioniert.

Bisher wurde das IHC-NMS von Jack-Up-Schiffen und schwimmenden Installationsschiffen in der Nordsee aus eingesetzt. Die damit erzielte Schallminderung erwies sich als unabhängig von

- der Wassertiefe (bis zu 40 m),
- der vorherrschenden Strömung und
- der Raumrichtung (omnidirektionale Schallreduktion).

Erfahrungen aus den Jahren ab 2018 zeigen, dass Monopfähle mit einem Durchmesser bis 10 m bei einer Wassertiefe von bis zu 40 m mit einer Schallminderung von 15 dB bis 17 dB unabhängig von der Strömung installiert werden konnten.

6.2.4 Hydroschalldämpfer (Hydro Sound Damper – HSD)

Der Hydroschalldämpfer ist ein pfahlnahes Schallschutzsystem, welches in Deutschland in den letzten Jahren nur in Kombination mit einem einfachen oder doppelten Großen Blasenschleier zum Einsatz kam, da ansonsten die zu erzielende Schallminderung nicht zu einer Einhaltung der Lärmschutzwerte geführt hätte.

Das HSD-System besteht aus einem Netz mit HSD-Elementen und einer Absenk- und Hebevorrichtung. Die HSD-Elemente bestehen aus verschiedenen Schaumstoffelementen in verschiedenen Größen. Jedes HSD-Element ist auf unterschiedliche Frequenzen und Wassertiefen abgestimmt, so dass das HSD-System an jedes einzelne Offshore-Projekt angepasst werden muss.

Das gesamte System (Absenk- und Hebevorrichtung, Netze und HSD-Elemente) kann für den Transport sowie für die Mobilisierung und Demobilisierung über Windensysteme ineinander gefahren werden.

Bisher wurde dieses Schallschutzsystem serienmäßig bei Monopfahl-Installationen mit Pfahldurchmessern bis ca. 9,6 m und einer Wassertiefe bis ca. 40 m eingesetzt und zeigte in der Nordsee bei Wassertiefen von bis zu 40 m eine konstante Schallreduzierung von mindestens 10 dB.

6.3 Kombination von pfahlnahen und pfahlfernen Schallschutzsystemen

Technischer Hinweis: *An dieser Stelle sei angemerkt, dass sich die Schallminderungen jedes einzelnen (separat) angewandten Schallschutzsystems nicht in der (einstelligen) Summe addieren, sondern spektral aufaddiert werden, d. h. zwei Schallschutzsysteme mit je 13 dB Schallminderung bei Einzelanwendung ergeben bei gleichzeitiger Anwendung nicht insgesamt 26 dB Schallminderung, sondern eine deutlich geringere Gesamtschallminderung.*

Technischer Hinweis: *Derzeit kann davon ausgegangen werden, dass Schallminderungssysteme (schalloptimiertes Rammverfahren, MNRU oder PULSE-Einheit) direkt den Quellpegel reduzieren. Dies bedeutet, dass sich die erzielte*

Schallminderung dieser Schallminderungssysteme additiv auf die Schallminderung durch die zusätzlich eingesetzten Schallschutzsysteme auswirkt. Derzeit ist mit einer Erhöhung der resultierenden Gesamtschallminderung um bis zu 5 dB durch die PULSE Einheit auszugehen.

IHC-NMS und einfacher bzw. doppelter Großer Blasenschleier

Mit der Kombination von IHC-NMS + BBC wurden selbst in Wassertiefen von 40 m Schallminderungen von 20 dB und mehr erreicht, siehe (Bellmann, et al., 2020). Zudem sind die Varianzen der erreichten Lärmreduktion gering, d. h. diese Kombination ist robust und führt meist zu ähnlichen Schallminderungen. Bei Verwendung eines DBBC sind bis zu 22 dB nach neusten Messerfahrungen möglich.

HSD und einfacher bzw. doppelter Großer Blasenschleier

Eine Kombination aus HSD und DBBC wurde in der Nord- und Ostsee bislang bei Pfahldurchmessern von bis zu 9,6 m und Wassertiefen bis zu 40 m eingesetzt. In der Nordsee ergaben sich im Mittel Schallminderungen von 18 dB bis 19 dB laut (Bellmann, et al., 2020). In der Ostsee zeigte sich eine deutlich höhere Streuung in der erzielten Schallminderung (15 bis 27 dB, was vermutlich auf die unterschiedlichen Bodeneigenschaften in der Ostsee zurückzuführen ist).

7. Unmitigierter Rammschall in 750 m Entfernung

7.1 Schalltechnisch relevante Eingangsdaten

Für das Modell werden die folgenden Eingangsdaten berücksichtigt:

Eingangsparameter

- Pfahltyp:	Monopfahl
- Pfahldurchmesser:	8,9 m
- Rammenergien:	von 1.000 kJ bis 6.000 kJ

Modellannahmen:

- Eingangsparameter #1:	Pfahldurchmesser
- Eingangsparameter #2:	2,5 dB Zuschlag oder Abzug pro Verdoppelung bzw. Halbierung der Rammenergie (bezogen auf einen Referenzwert).
- Bodenbeschaffenheit:	Sicherheitszuschlag +2 dB (Ostsee)
- Pfahloberfläche:	konstant, keine Zuschläge oder Abzüge
- Einbindetiefe:	keine Zuschläge oder Abzüge (siehe mögliche Auswirkungen in Kapitel 5.2.4)
- akustische Kopplung:	keine Zuschläge oder Abzüge

7.2 Ergebnisse der Modellierung für die unmitigierte Rammung

Unter Berücksichtigung der Modellansätze in Kapitel 5 sind folgende bewertungsrelevante Einzelereignispegel (SEL) und Zero-to-peak-Schalldruckpegel ($L_{p,pk}$) für unterschiedliche maximale Rammenergien in 750 m Entfernung zur Baustelle zu erwarten:

Tabelle 1: Berechneter Pegel des Einzelereignispegels (SEL) und des Zero-to-peak-Spitzenpegels ($L_{p,pk}$) in 750 m Entfernung.

Durchmesser [m]	Rammenergie [kJ]	SEL_{05} [dB] 750 m Entfernung	$L_{p,pk}$ [dB] 750 m Entfernung
8,9 m	1.000	179	202
	2.000	182	204
	3.000	183	206
	4.000	184	207
	5.000	185	208
	6.000	186	209

Für das Modell werden der Einzelereignispegel (SEL) und der Zero-to-peak-Schalldruckpegel ($L_{p,pk}$) separat mit einem empirischen Modell (Modellversion: 1.05) berechnet. Der in Tabelle 1 angegebene Einzelereignispegel (SEL) bezieht sich auf die angegebene Rammenergie. Diese Pegel stellen die Schallenergie für jeden einzelnen Rammschlag dar, indem die angegebene Rammenergie verwendet wird. Bei Rammarbeiten sind jedoch in der Regel mehrere tausend Rammschläge mit unterschiedlichen Rammenergien erforderlich. Auch beziehen sich Lärmschutzwerte nicht auf einen einzelnen Rammschlag, sondern auf die Pegelverteilung während einer kompletten Rammung.

Die Beurteilung der Einhaltung der Lärmschutzwerte zur Vermeidung von Tötung und Verletzung ist nicht explizit Bestandteil dieses Fachgutachtens, sondern wurde bereits in dem bestehenden Prognosegutachten der Müller BBM GmbH (Maquil, Müller, & Wildemann, 2024) adäquat behandelt.

Unabhängig davon, können trotz z.T. abweichender Eingangsdaten und unterschiedlich aufgebauter Modelle in diesem Fachgutachten (Kapitel 7) grundsätzlich die berechneten Schallemissionen einer unmitigierten Rammung des Prognosegutachtens von Müller BBM bestätigt werden.

Basierend auf aktuell vorliegenden Erkenntnissen von OWP Baustellen kann aus gutachterlicher Sicht festgehalten werden, dass Schallminderungen von mindestens 20 dB mit derzeit auf dem Markt verfügbaren Schallschutzsystemen erzielt werden können. Durch den Einsatz neuer Hammertechnologien (Impuls-Verlängerungseinheiten; Menck Noise Reduction Unit - MNRU - oder PULSE) sind weitere Schallreduktionen möglich. Erste Anwendungen der PULSE-Einheit in Kombination mit einem pfahlnahen und pfahlfernen Schallschutzkonzept in der Ost- und Nordsee in 2022 bis 2024 deuten auf eine resultierende Gesamtschallminderung von 25 bis 26 dB hin, trotz einer möglichen Verschiebung des Rammschallspektrums zu tieferen Frequenzen. Durch die stetigen Verbesserungen an der PULSE-Einheit und die

Verwendung eines eBBC (beide Technologien sind derzeit noch nicht Stand der Technik) ist somit die Einhaltung der Lärmschutzwerte auch bei hohen Rammenergien aus akustischer Sicht schon heute möglich.

Unabhängig davon bleibt abzuwarten, ob und welche Optimierungen an bestehenden Schallschutzsystemen in den nächsten Jahren noch zu realisieren sind und ob bzw. welche neuen Schallschutzsysteme zu offshore-tauglichen und robusten Schallschutzsystemen weiterentwickelt werden können, wie z. B. ein verbesserter Großer Blasenschleier – eBBC). Grundsätzlich stellt die Wassertiefe im geplanten Bauvorhaben für den Einsatz eines optimierten, doppelten Großen Blasenschleiers (DBBC) derzeit schon kein Problem dar. Zudem ist für eine detailliertere Beurteilung des einzusetzenden Schallschutzkonzepts und damit der Einhaltung der Lärmschutzwerte die Auswahl der einzelnen Schallschutzsysteme inkl. deren projektspezifischen System-konfigurationen abzuwarten.

Für die nachfolgenden Berechnungen zur Beurteilung der Störwirkungen in den umliegenden FFH-Schutzgebieten werden die Ergebnisse aus diesem Fachgutachten hinsichtlich des zu erwartenden Breitbandpegels und der spektralen Verteilung weiterverwendet. Es kann davon ausgegangen werden, dass die artenschutzrechtlichen Lärmschutzwerte gemäß BMU SSK (vgl. (Maquil, Müller, & Wildemann, 2024) bzgl. Tötung und Verletzung durch Rammschall, 160 dB SEL₀₅/190 dB $L_{p,pk}$ in 750 m, eingehalten werden können.

8. Beurteilung des mitigierten Rammschalls hinsichtlich Stör- und Meidewirkung

8.1 Schallausbreitung über die Entfernung

Auf der Grundlage der projektspezifischen Festlegung zur Beurteilung der Stör- bzw. Meidewirkung von Schweinswalen durch Impulsrammschall sind die beschallten Flächen mit Schalleinträgen von ≥ 140 dB zu ermitteln; siehe Kapitel 4.2. Daher ist eine Berechnung der Schallausbreitung von der Quelle (zu rammender Pfahl) über größere Entfernungen erforderlich; Berechnungsansätze siehe Kapitel 5.

Für die Beurteilung der Stör- und Meidewirkung wird in diesem Gutachten grundsätzlich davon ausgegangen, dass der Lärmschutzwert von 160 dB für den Einzelereignispegel durch Impulsrammschall in 750 m Entfernung eingehalten wird. Dabei erfolgen die Berechnungen der beschallten Flächen für die Beurteilung der Stör- bzw. Meidewirkung unter Berücksichtigung zweier Szenarien, um einerseits den „lautesten anzunehmenden Fall“ und andererseits, basierend auf Erfahrungen, den „realistisch anzunehmender Fall“ gegenüberzustellen:

- **„Lautester anzunehmender Fall“:** Das unmitigierte 1/3-Oktav-Spektrum wurde breitbandig angepasst, so dass in 750 m ein Summenpegel von 160 dB zu erwarten ist („unspezifisch mitigiert“; siehe Abbildung 6). Dies ist ein konstruierter Fall, um ein konservatives Ergebnis zu erzielen („lautester anzunehmender Fall“), bei dem eine breitbandige bzw. über alle Frequenzen konstante Schallreduktion angenommen wird. Hierbei werden frequenzabhängige Schallreduktionen, wie sie beim Einsatz eines projektspezifischen Schallschutzkonzepts entstehen (mitigierte Rammung), für die Berechnung der 140 dB Isophon-Linien nicht berücksichtigt. Zudem wird in dieser Variante die konservativere, d. h. geringere, Ausbreitungsdämpfung für den Winter berücksichtigt. Dies ist ein unspezifisch mitigiertes Szenario.
- **„Realistischer anzunehmender Fall“:** Es kann davon ausgegangen werden, dass ein projektspezifisches Schallschutzkonzept, bestehend aus mindestens einem pfahlnahen und einem pfahlfernen Schallschutzsystem, zur Anwendung kommt, so dass der Lärmschutzwert von 160 dB_{SEL} in einer Entfernung von 750 m eingehalten wird. D. h. im Gegensatz zum in Abbildung 2 dargestellten, unmitigierten Rammschallspektrum wurde hier für die Berechnung der 140 dB Isophon-Linien ein mitigiertes Rammschallspektrum verwendet. Basierend auf Erfahrungen wird das Rammschallspektrum durch ein effizientes Schallschutzkonzept frequenzabhängig gemindert, so dass bereits in 750 m eigentlich kein Rammschall mehr im

Frequenzbereich von > 1.000 Hz zu messen ist (Bellmann, et al., 2020). Für dieses Szenario wurde zudem das Schallgeschwindigkeitsprofil für den Sommer berücksichtigt, d. h. eine höhere Ausbreitungsdämpfung.

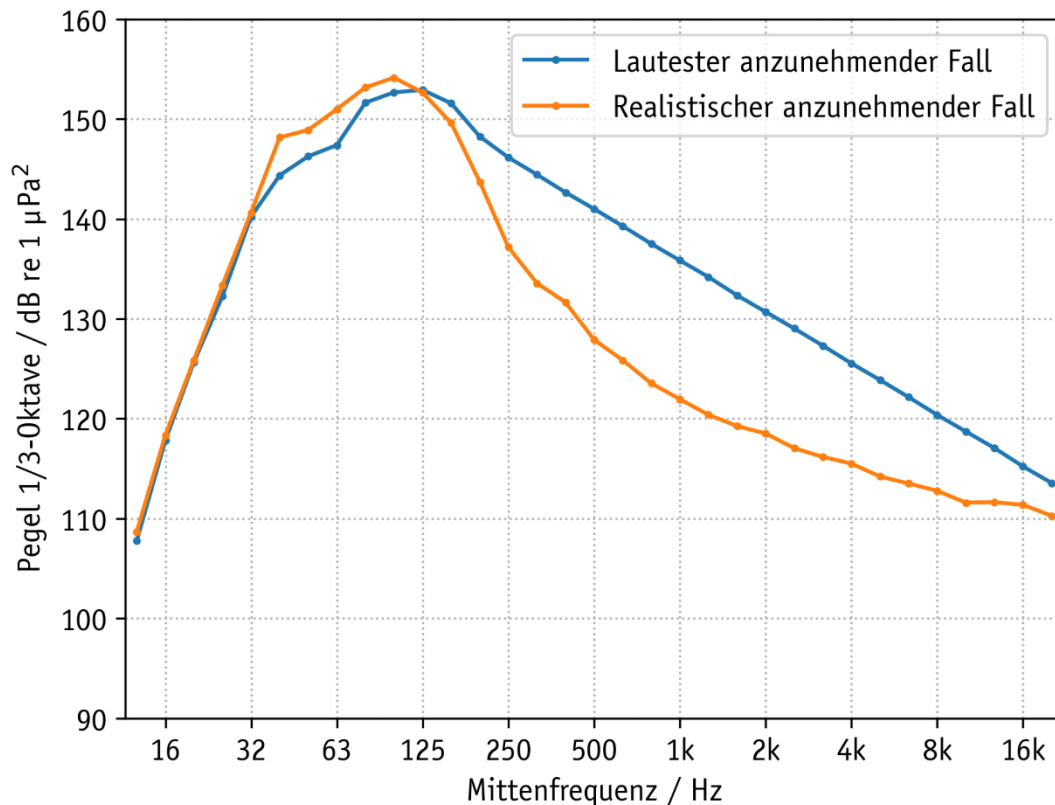


Abbildung 6: 1/3-Oktavspektren für den Einzelereignispegel (*SEL*) beider betrachteter Fälle in 750 m Entfernung von der Quelle zur Beurteilung der Stör- und Meidewirkung von Schweinswalen durch Impulsschall.

Für den „lautesten anzunehmenden Fall“ wird das Salinitäts- und Temperatur Profil für den Februar des World Ocean Atlas 2023 der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) standortspezifisch verwendet. Für den „realistischen anzunehmenden Fall“ wird ein gemittelttes Salinitäts- und Temperatur-Profil über die Sommermonate Juli bis September angesetzt. Damit kann der maximale Einfluss der Jahreszeit auf die Schallausbreitung quantifiziert werden. Die daraus resultierenden Schallgeschwindigkeiten sind in Abbildung 7 über die Wassertiefe dargestellt. Im Sommer ist die Schallgeschwindigkeit erwartungsgemäß höher und das Profil über die Wassertiefe aufgrund der unterschiedlichen Temperaturschichten im Wasser stärker ausgeprägt; siehe Abbildung 7.

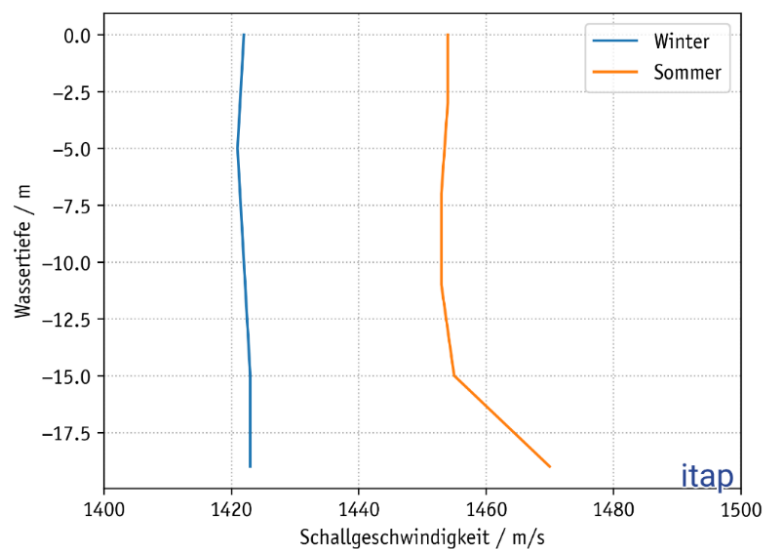


Abbildung 7: Angenommene, standortspezifische Schallgeschwindigkeitsprofile über die Wassertiefe für den Sommer und den Winter gemäß World Ocean Atlas 2023 der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

Die Unterschiede resultieren in einer unterschiedlichen, spektralen Zusammensetzung des 1/3-Oktav-Einzelereignispegels (*SEL*), einmal für den Fall der mitigierten und einmal für den Fall der „unspezifisch mitigierten“ Rammung.

Das jeweilige 1/3-Oktavspektrum wurde so justiert, dass es in beiden Fällen einem breitbandigen Einzelereignispegel (*SEL*) von 160 dB in 750 m Entfernung entspricht. Aufgrund der sehr flachen Bathymetrie im Vorhabengebiet können sich höhere Frequenzen weiter ausbreiten als tieffrequente. Dies wird insbesondere bei der Modellierung der Schallausbreitung über größere Entfernungen deutlich. Ein weiterer Unterschied der beiden dargestellten Fälle ist die Abhängigkeit der Schallausbreitung von den Wasserbedingungen (Temperatur und Salinität): im „lautesten anzunehmenden Fall“ wurde eine Winterkondition angenommen und für den „realistischen anzunehmenden Fall“ Sommerkonditionen.

Trotz der höheren Schallgeschwindigkeit im Wasser während der Sommermonate führt die in dieser Zeit ebenfalls höhere Ausbreitungsdämpfung in Summe zu einer geringeren Schallausbreitung im Vergleich zu den Wintermonaten wie auch in den folgenden Kapiteln verdeutlicht wird.

Technischer Hinweis: Aus den beiden deutschen OWP-Bauvorhaben Arcadis Ost 1 und Baltic Eagle aus den Jahren 2022 und 2023 ist bekannt, dass gerade im Sommer die Schallausbreitung in der Ostsee nochmals geringer ausfallen kann als anhand der o. g., numerischen Berechnungsformel berechnet. Ein

möglicher Erklärungsansatz ist, dass die Temperatur- und Salinitätsschichtung aufgrund von starker Sonneneinstrahlung und geringer Durchmischung der Wassersäule deutlich stärker ausfällt. Somit ergibt sich anhand der numerischen Berechnung der Ausbreitungsdämpfung zumeist die theoretisch lauteste Kondition.

8.1.1 Schalltechnisch relevante Eingangsdaten

Für das Modell werden die folgenden Eingangsdaten berücksichtigt:

Tabelle 2: Eingangsparameter für das Ausbreitungsmodell.

Parameter	Wert
Zentroid Überschneidung Plantagenetgrund:	54° 37,932' N 012° 40,775' O
Wassertiefe:	18 m am Zentroid (GEBCO 2023)
Schallgeschwindigkeit im Wasser*:	
Winter:	1.422 m/s bis 5 m Wassertiefe 1.421 m/s bis 10 m 1.422 m/s bis 15 m 1.423 m/s ab 15 m
Sommer:	1.454 m/s bis 5 m Wassertiefe 1.453 m/s bis 10 m 1.455 m/s bis 15 m 1.470 m/s bis 18 m
Schallgeschwindigkeit im Sediment:	1.650 m/s
Sediment Dichte:	1,6 g/cm ³
Ausbreitungsdämpfung im Sediment:	0,8 dB / Wellenlänge
Eingangsspektrum:	siehe Abbildung 6

*Schallgeschwindigkeitsprofile gemäß NOAA.

8.1.2 Darstellung der Schallausbreitung

Zur exemplarischen Darstellung der Unterschiede zwischen beiden betrachteten Rammschallspektren für die Sommer- und Winterkondition ist der spektrale Verlauf des Einzelereignispegels (*SEL*) für die lauteste Raumrichtung von 315° über die Frequenz und eine Entfernung bis 8 km für die zu betrachtende Teilfläche hinsichtlich einer Beschallung in Richtung FFH-Schutzgebiet Plantagenetgrund in Abbildung 8 gegenübergestellt.

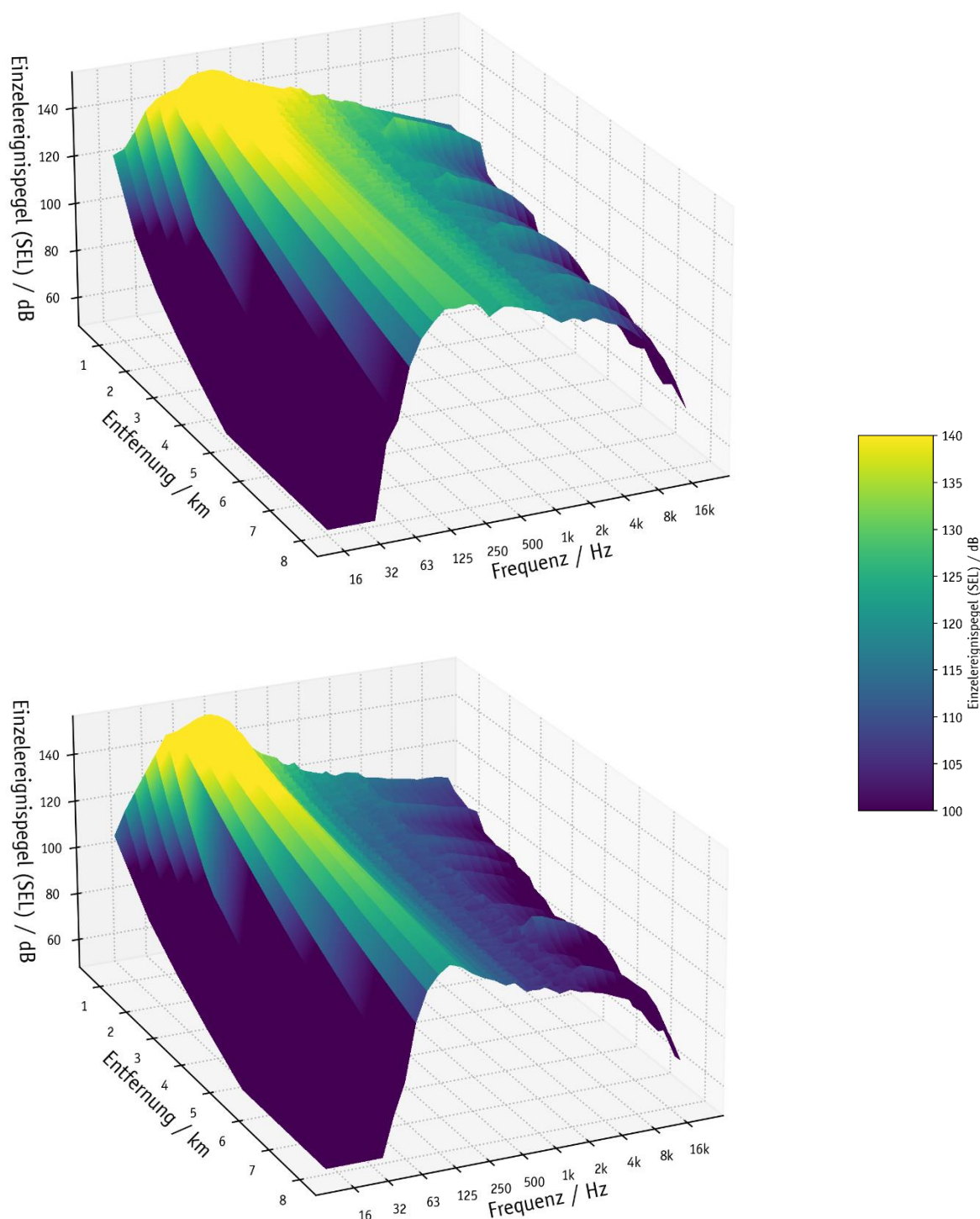


Abbildung 8: Schallausbreitung des spektralen Einzelereignispegels (*SEL*) beider betrachteter Szenarien in Abhängigkeit der Entfernung und der Frequenz für die lauteste Richtung in 315° für die Teilfläche zur Beurteilung der Auswirkungen für das FFH-Schutzgebiet Plantagenetgrund. Oben: lautestes anzunehmendes Szenario (Winterkondition), unten: realistisches anzunehmendes Szenario (Sommerkondition).

8.2 Beurteilung der Stör- und Meidewirkung in den FFH-Schutzgebieten

8.2.1 FFH-Schutzgebiet Plantagenetgrund

Basierend auf dem BMU-Schallschutzkonzept (2013) für die Nordsee hinsichtlich Stör- und Meidewirkung von Schweinswalen durch Unterwasserschalleinträge von Impulsrammungen ist behördlicherseits eine Bewertungsmethodik für den OWP Gennaker festgelegt worden; siehe Kapitel 4.2. Bei Verwendung des vereinfachten Verfahrens für die Nordsee mit pauschaler Anwendung eines 8 km-Radius, wobei hier gemäß behördlicher Vorgabe zunächst ein 8-km-Puffer („8 km Überschneidung“ in Abbildung 9 und folgende) ausgehend vom Schutzgebiet und anschließend ein 8-km-Radius ausgehend vom Mittelpunkt / Zentroid der sich ergebenden Schnittfläche abgetragen wird, kommt es rein rechnerisch zu einer Beschallung des FFH-Gebiets mit (impulshaftem) Rammschall (Einzelereignispegel SEL) ≥ 140 dB auf ca. 10,2 %; siehe Abbildung 9.

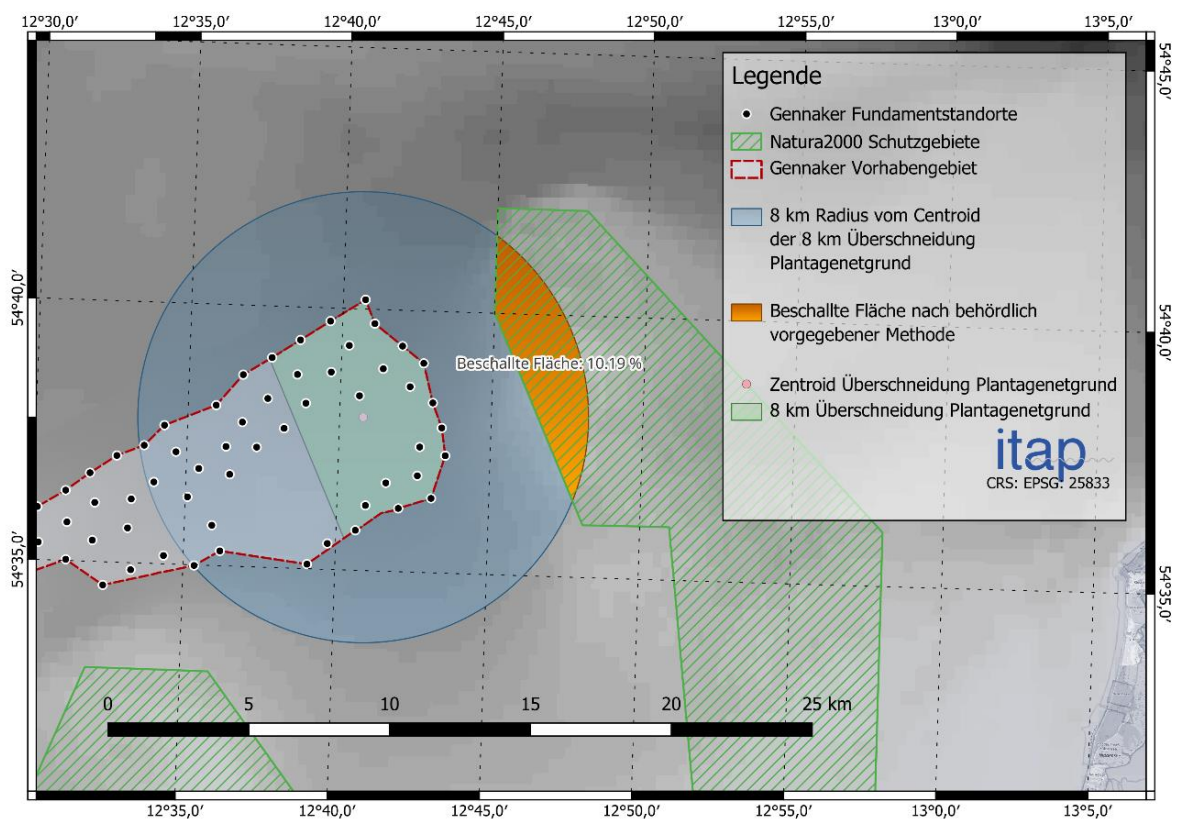


Abbildung 9: Dargestellte, behördlicherseits projektspezifisch angepasste Methode zur Bestimmung der beschallten FFH-Gebietsfläche mit Impulsrammschall von ≥ 140 dB_{SEL} für eine Beurteilung der Auswirkungen auf Schweinswale hinsichtlich Störung und Meidung durch Unterwasserschalleinträge, ausgelöst durch Impulsrammungen im OWP Gennaker in Anlehnung an das BMU-Schallschutzkonzept für die Nordsee (2013).

Die Schallentstehung und -ausbreitung während einer Impulsrammung im Meer sind grundsätzlich stark frequenzabhängig; siehe Kapitel 5.

Aus diesem Grund sind unter Verwendung der vorliegenden Bathymetrie im Projektgebiet (GEBCO 2023), dem Pfahldurchmesser von 8,9 m und je einmal mit den anzunehmenden Wassereigenschaften im Winter und Sommer (Temperatur und Salinität) im Zuge dieser Begutachtung eine projekt- und gebiets-spezifische Ausbreitungsdämpfung für den OWP Gennaker nach den in Kapitel 4.2 dargestellten Methoden berechnet worden.

In Abbildung 10 sind die resultierenden beschallten Flächen mit einem Einzelereignispegel $\geq 140 \text{ dB}_{\text{SEL}}$, basierend auf der projektspezifischen Ausbreitungsdämpfung der lautesten Richtung (blauer Kreis; weiteste Entfernung der 140 dB-Isophon-Linie gemäß Abbildung 10 oben) für die „unspezifisch mitigierte“ Rammung unter Winterkonditionen („lautestes anzunehmendes Szenario“; oben) und für die mitigierte Rammung unter Sommerbedingungen (realistischeres anzunehmendes Szenario, unten), gegenübergestellt. Zudem ist in der Abbildung 10 ebenfalls die 140 dB-Isophon-Linie, basierend auf der standortspezifischen Ausbreitungsdämpfung in 24 Raumrichtungen (orange Linie), dargestellt. Die Generierung der Schallkarten basiert auf der behördlich festgelegten, modifizierten, generischen Methode für den OWP Gennaker. Zur Verdeutlichung der Auswirkungen der Bathymetrie ist die standortspezifische Ausbreitungsdämpfung, aufgelöst in 24 Raumrichtungen, in der Abbildung 11 bis zu einem Einzelereignispegel von 140 dB für beide Szenarien noch einmal im Detail gegenübergestellt.

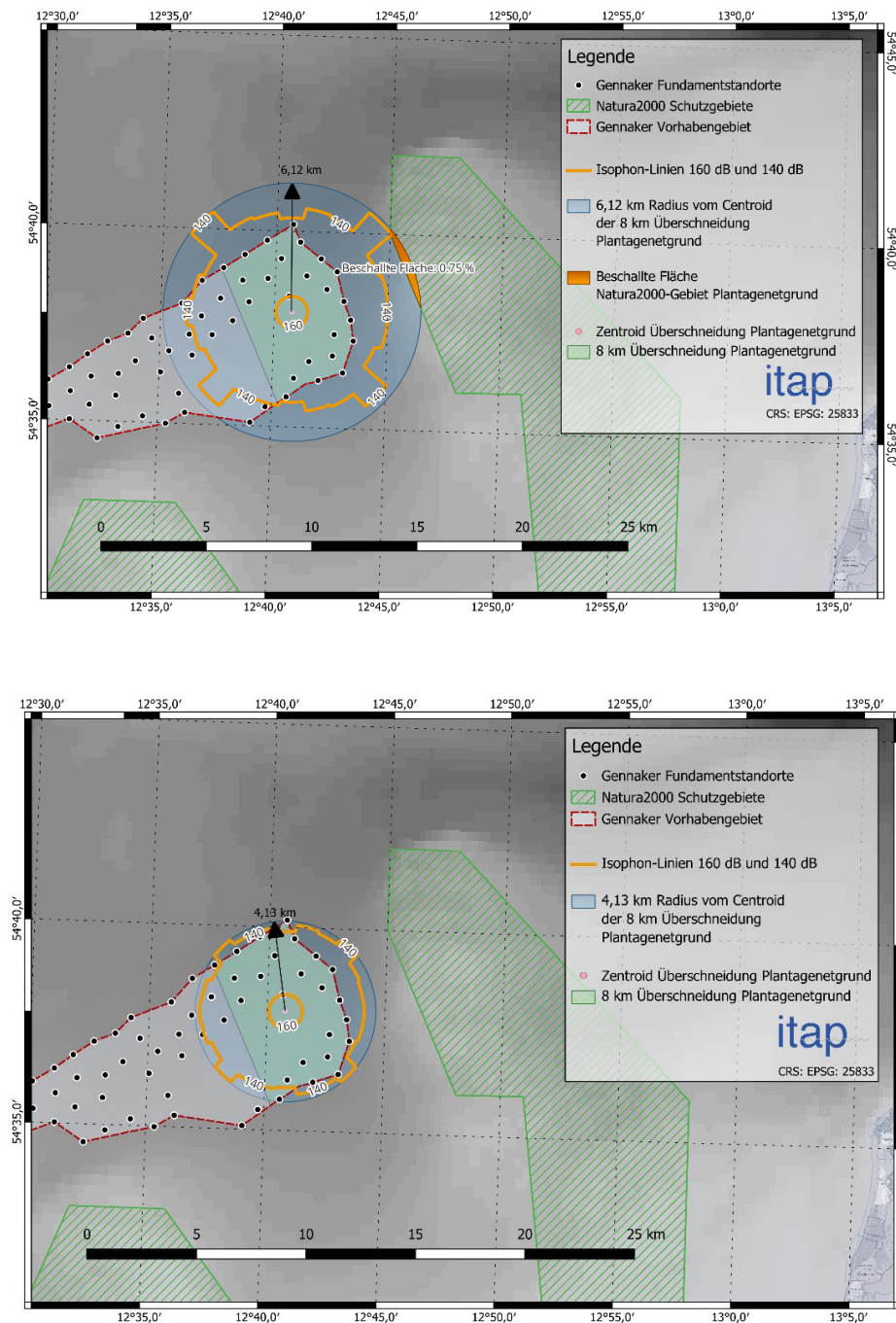


Abbildung 10: Darstellung der 140 und 160 dB-Isophon-Linien unter Verwendung der projektspezifischen Ausbreitungsdämpfung (orange Linie) und beschallte Flächen des FFH-Gebietes Plantagenetgrund mit einem Einzelereignispegel von $SEL \geq 140$ dB unter der Voraussetzung, dass der Lärmschutzwert von 160 dB in einer Entfernung von 750 m am Mittelpunkt gemäß behördlicher Setzung des OWP Gennaker (Mittelpunkt der Schnittfläche des 8 km-Puffers ausgehend vom FFH-Gebiet Plantagenetgrund) eingehalten wird (oben: orange Fläche; unten: keine Überschneidung). Oben: unter Annahme eines „unspezifisch mitigierte“ Rammschallspektrums (unter Winterkonditionen). Unten: unter Annahme einer mitigierte Rammung (unter Sommerkonditionen).

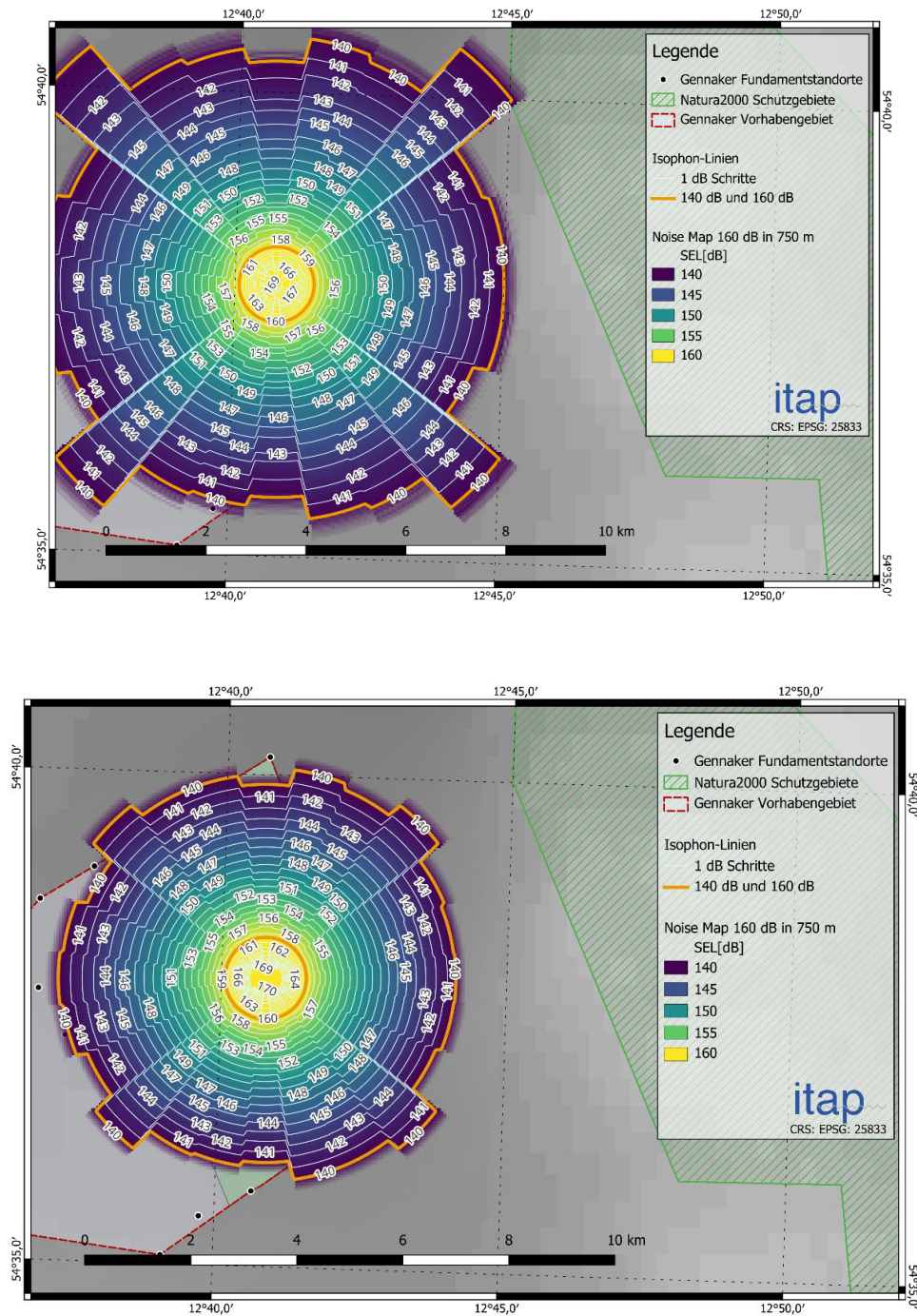


Abbildung 11: Basierend auf Abbildung 10 sind die Isophon-Linien von 160 dB bis 140 dB für eine Impulsrammung im OWP Gennaker in 1 dB-Schritten unter Verwendung der projektspezifischen Ausbreitungsdämpfung als Schallkarte dargestellt. Oben: unter der Annahme eines „unspezifisch mitigierten“ Rammschallspektrums unter Winterkonditionen („lautestes anzunehmendes Szenario“). Unten: unter der Annahme eines mitigierten Rammschallspektrums unter Sommerkonditionen (realistisches Szenario). In beiden Varianten wurde davon ausgegangen, dass der breitbandige Einzelereignispegel (SEL) in 750 m Entfernung zur Rammung 160 dB beträgt.

Abbildung 10 (oben) zeigt, dass unter Berücksichtigung der projekt- und standortspezifischen Ausbreitungsdämpfung für den „lautesten anzunehmenden Fall“ (= „unspezifisch mitigierte“ Rammung mit Winterkonditionen, ausgehend von der lautesten Raumrichtung) bei Einhaltung des Lärmschutzwertes von 160 dB_{SEL} in 750 m ein Einzelereignispegel (*SEL*) von 140 dB_{SEL} in Entfernungen bis zu 6,12 km zu erwarten ist. Daraus resultiert, dass für diesen Fall und der Anwendung der projekt- und standortspezifischen Ausbreitungsdämpfung und der behördlich festgelegten Methode ein Einzelereignispegel von 140 dB_{SEL} innerhalb des FFH-Gebiets Plantagenetgrund auf einer Fläche von maximal 0,75 % zu erwarten ist.

Abbildung 10 (unten) zeigt zudem für den „realistischen anzunehmenden Fall“ (mitigierte Rammung mit Sommerkonditionen), dass bei Einhaltung des Lärmschutzwertes von 160 dB_{SEL} in 750 m ein Einzelereignispegel von 140 dB_{SEL} in Entfernungen von 3,4 bis 4,1 km unter Berücksichtigung der projekt- und standortspezifischen Ausbreitungsdämpfung zu erwarten ist. Daraus resultiert, dass unter Anwendung der projekt- und standortspezifischen Ausbreitungsdämpfung und der behördlich festgelegten Methode ein Einzelereignispegel von 140 dB_{SEL} innerhalb des FFH-Gebiets Plantagenetgrund gar nicht zu erwarten ist.

Im Gegensatz dazu ist mit dem behördlich festgelegten, vereinfachten Ansatz in Anlehnung an das BMU-Schallschutzkonzept der Nordsee (2013) mit einem konstanten Radius von 8 km eine Überschneidung mit dem besagten FFH-Gebiet in Höhe von bis zu knapp 10,2 % zu rechnen; siehe Abbildung 9. Diese vereinfachte Methode berücksichtigt jedoch weder die standort- (Wassertiefe, Bathymetrie und Wasserbedingungen) noch die projektspezifischen Bedingungen (mitigierte Rammung).

Eine Übertragung von für die Nordsee getroffenen Annahmen ist aufgrund unterschiedlicher Schallausbreitungsbedingungen (Boden-beschaffenheit, aber auch Temperatur- und Salinitätsschichtungen, etc.) zudem nicht möglich.

Anhand der Ergebnisse der im Zuge der Erstellung dieses Gutachtens durchgeführten Modellierungen und Berechnungen auf der Basis gebiets- und projektspezifischer Parameter mit unterschiedlichen Schallausbreitungs- und Schallminderungsansätzen (mitigiert mit Sommerkonditionen = „gemäß Praxis realistischerweise anzunehmender Fall“; „unspezifisch mitigiert“ mit Winterkonditionen = „lautester anzunehmender Fall“) kann aus akustischer Sicht eine Beeinträchtigung des FFH-Gebietes Plantagenetgrund durch Unterwasser-rammschall ≥ 140 dB auf ≥ 10 % seiner Fläche ausgeschlossen werden, wenn 160 dB_{SEL} in 750 m Entfernung zur Impulsschallung eingehalten werden.

Für das FFH-Gebiet Plantagenetgrund kann zudem eine Beschallung von 1 % und mehr mit Impulsschall ≥ 140 dB durch Rammungen der Fundamente des Offshore-Windparks Gennaker für den realistisch anzunehmenden Fall (mitigierte Rammung unter Sommerkonditionen) und den „lautesten anzunehmenden Fall“ (= „unspezifisch mitigierte“

Rammung mit Winterkonditionen, ausgehend von der lautesten Raumrichtung) gänzlich ausgeschlossen werden, wenn 160 dB_{SEL} in 750 m Entfernung zur Impulsrammung eingehalten werden.

8.2.2 FFH-Schutzgebiete Kadetrinne und Darßer Schwelle

Sämtliche Methoden, Ansätze und Annahmen für das FFH-Schutzgebiet Plantagenetgrund aus Kapitel 8.2.1 zur projekt- und gebietsspezifischen Berechnung der beschallten Flächen sind ebenfalls für die beiden FFH-Schutzgebiete Kadetrinne und Darßer Schwelle angewendet worden.

In Abbildung 12 sind die beschallten Flächen des FFH-Gebietes Kadetrinne mit einem Einzelereignispegel ≥ 140 dB_{SEL} auf Basis der projektspezifischen Ausbreitungsdämpfung der lautesten Richtung für die „unspezifisch mitigierte“ Rammung unter Winterbedingungen (max. Ausdehnung der 140 dB_{SEL}-Isophonlinie: 4,87 km) und für die mitigierte Rammung unter Sommerbedingungen (max. Ausdehnung der 140 dB_{SEL}-Isophonlinie: 3,27 km) gegenübergestellt.

Dabei stellt der blaue Kreis die weiteste Ausdehnung der 140 dB-Isophon-Linie gemäß den Ergebnissen der Modellierung (Abbildung 12, oben) dar. Zudem ist davon auszugehen, dass die Winterbedingungen den „lautesten anzunehmenden Fall“ und die Sommerbedingungen den, gemäß Praxis, „realistischerweise anzunehmenden Fall“ widerspiegeln. Darüber hinaus ist in Abbildung 12 auch die 140 dB-Isophon-Linie auf Basis der standortspezifischen Ausbreitungsdämpfung in 24 Raumrichtungen zum Vergleich dargestellt (orange Linie). Die Generierung der Schallkarten basiert auf der behördlich festgelegten, modifizierten, generischen Methode in Anlehnung an das BMU-Schallschutzkonzept (BMU, 2013) für den OWP Gennaker. Zur Verdeutlichung der Einflüsse der Bathymetrie ist in Abbildung 13 die standortspezifische Ausbreitungsdämpfung, aufgelöst in 24 Raumrichtungen, bis zu einem Einzelereignispegel von 140 dB_{SEL} für beide Szenarien noch einmal detailliert dargestellt.

Dieselben Berechnungen und Ergebnisdarstellungen sind für das FFH-Gebiet Darßer Schwelle in der Abbildung 14 und der Abbildung 15 dargestellt. Die Ausdehnung der 140 dB-Isophon-Linie beträgt für den lautesten anzunehmenden Fall (unspezifisch mitigierte Rammung unter Winterbedingungen) max. 5,34 km und für den realistischen Fall (mitigierte Rammung unter Sommerbedingungen) max. 3,75 km.

In den FFH-Gebieten Kadetrinne und Darßer Schwelle kommt es danach zu keiner Beschallung mit Impuls-Rammschall ≥ 140 dB. Somit ist gemäß BMU-Schallschutzkonzept davon auszugehen, dass es zu keiner Störung mariner Säuger durch den Rammschall in diesen Schutzgebieten kommt. Auf eine graphische Darstellung dieser Bereiche wird daher verzichtet.

Anhand der Ergebnisse der im Zuge der Erstellung dieses Gutachtens durchgeführten Modellierungen und Berechnungen auf der Basis gebiets- und projektspezifischer Parameter mit unterschiedlichen Schallausbreitungs- und Schallminderungsansätzen (mitigiert mit Sommerkonditionen = „gemäß Praxis realistischerweise anzunehmender Fall“; „unspezifisch mitigiert“ mit Winterkonditionen = „lautester anzunehmender Fall“) kann aus akustischer Sicht eine Beeinträchtigung der FFH-Gebiete Kadetrinne und Darßer Schwelle durch Unterwasserrammschall ≥ 140 dB auf ≥ 10 % seiner Fläche ausgeschlossen werden, wenn $160 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ in 750 m Entfernung zur Impulsrammung eingehalten werden.

Für die FFH-Gebiete Kadetrinne und Darßer Schwelle kann zudem für den realistisch anzunehmenden Fall (mitigierte Rammung unter Sommerkonditionen) und für den „lautesten anzunehmenden Fall“ (= „unspezifisch mitigierte“ Rammung mit Winterkonditionen, ausgehend von der lautesten Raumrichtung) eine Beschallung von 1 % und mehr mit Impulsrammschall ≥ 140 dB durch Rammungen der Fundamente des Offshore-Windparks Gennaker gänzlich ausgeschlossen werden, wenn $160 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ in 750 m Entfernung zur Impulsrammung eingehalten werden.

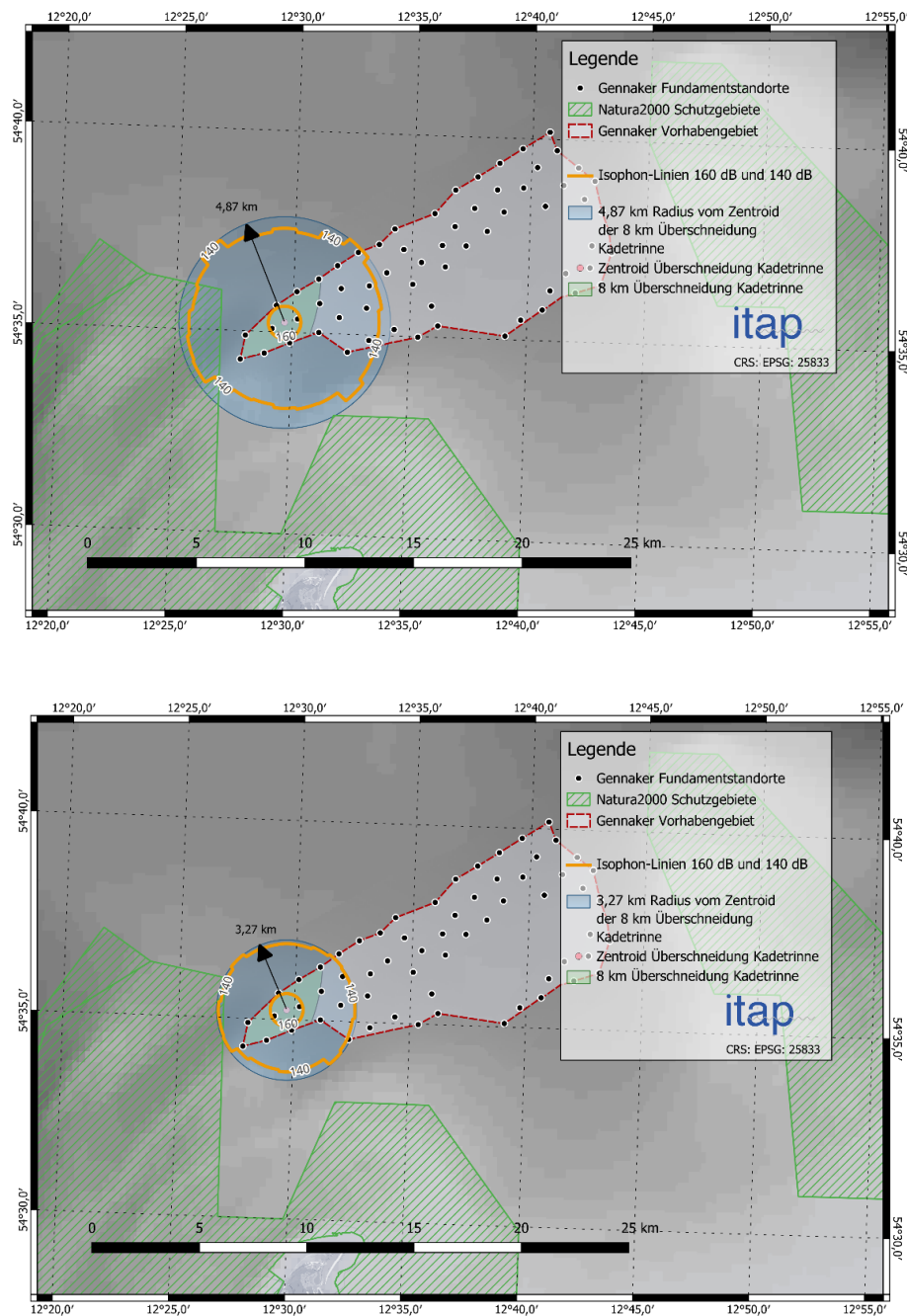


Abbildung 12: Darstellung der 140 und 160 dB-Isophon-Linien unter Verwendung der projektspezifischen Ausbreitungsdämpfung (orange Linie) und der beschallten Flächen des FFH-Gebietes Kadetrinne mit einem Einzelereignispegel von $SEL \geq 140$ dB unter der Voraussetzung, dass der Lärmschutzwert von 160 dB in einer Entfernung von 750 m zum Mittelpunkt gemäß behördlicher Setzung (Mittelpunkt der Schnittfläche des 8 km-Puffers ausgehend vom FFH-Gebiet Kadetrinne) eingehalten wird (oben: keine Überschneidung; unten: keine Überschneidung). Oben: unter Annahme eines „unspezifisch mitigierte“ Rammschallspektrums (unter Winterkonditionen). Unten: unter Annahme einer mitigierte Rammung (unter Sommerkonditionen).

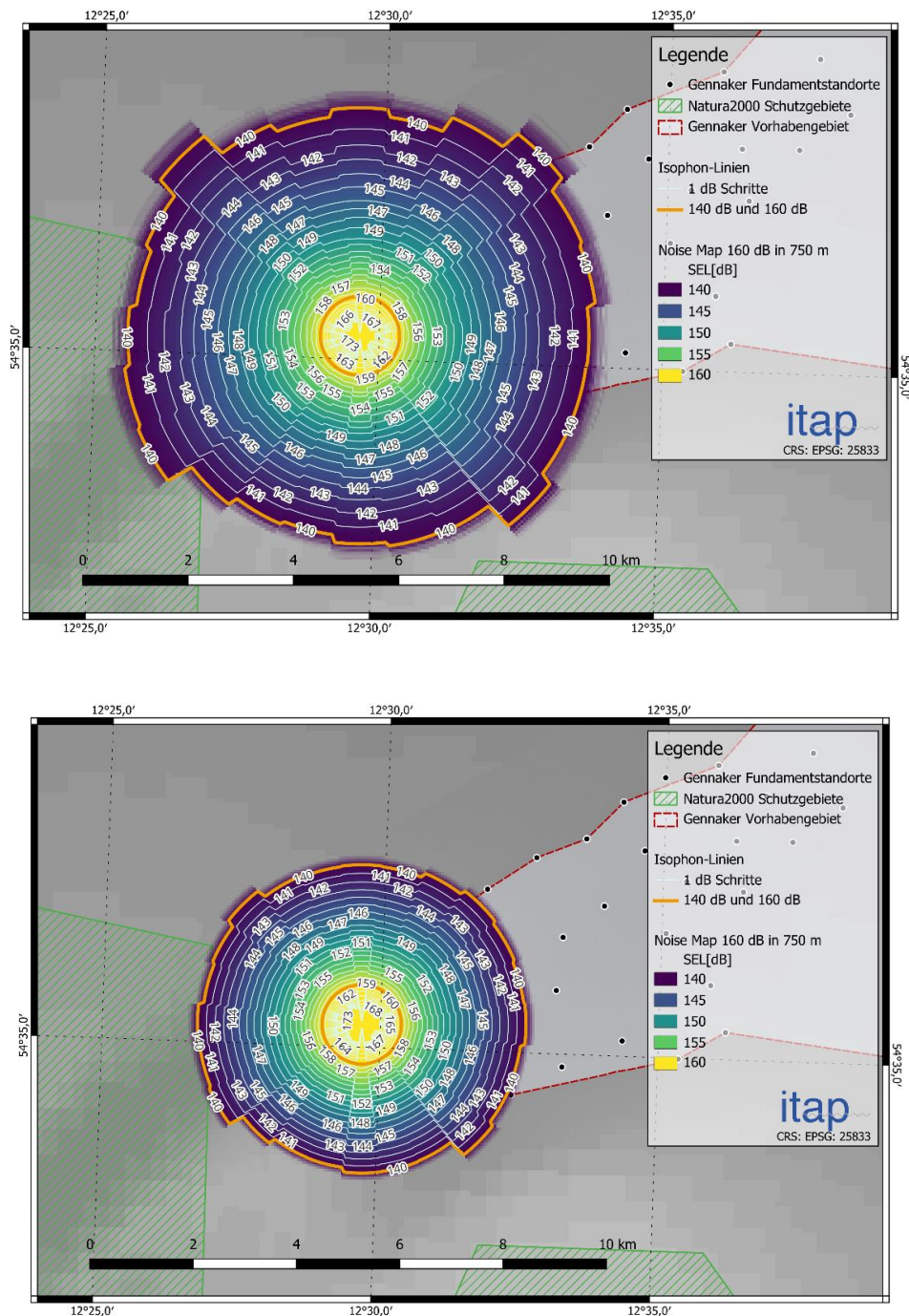


Abbildung 13: Basierend auf Abbildung 12 sind die Isophon-Linien von 160 dB bis 140 dB für eine Impulsrammung im OWP Gennaker in 1 dB Schritten unter Verwendung der projektspezifischen Ausbreitungsdämpfung als Schallkarte dargestellt. Oben: unter der Annahme eines „unspezifisch mitigierte“ Rammschallspektrums unter Winterkonditionen („lautestes anzunehmendes Szenario“). Unten: unter der Annahme eines mitigierte Rammschallspektrums unter Sommerkonditionen (realistisches Szenario). Für beide Varianten wurde davon ausgegangen, dass der breitbandige Einzelereignispegel (SEL) in 750 m Entfernung zur Rammung 160 dB beträgt.

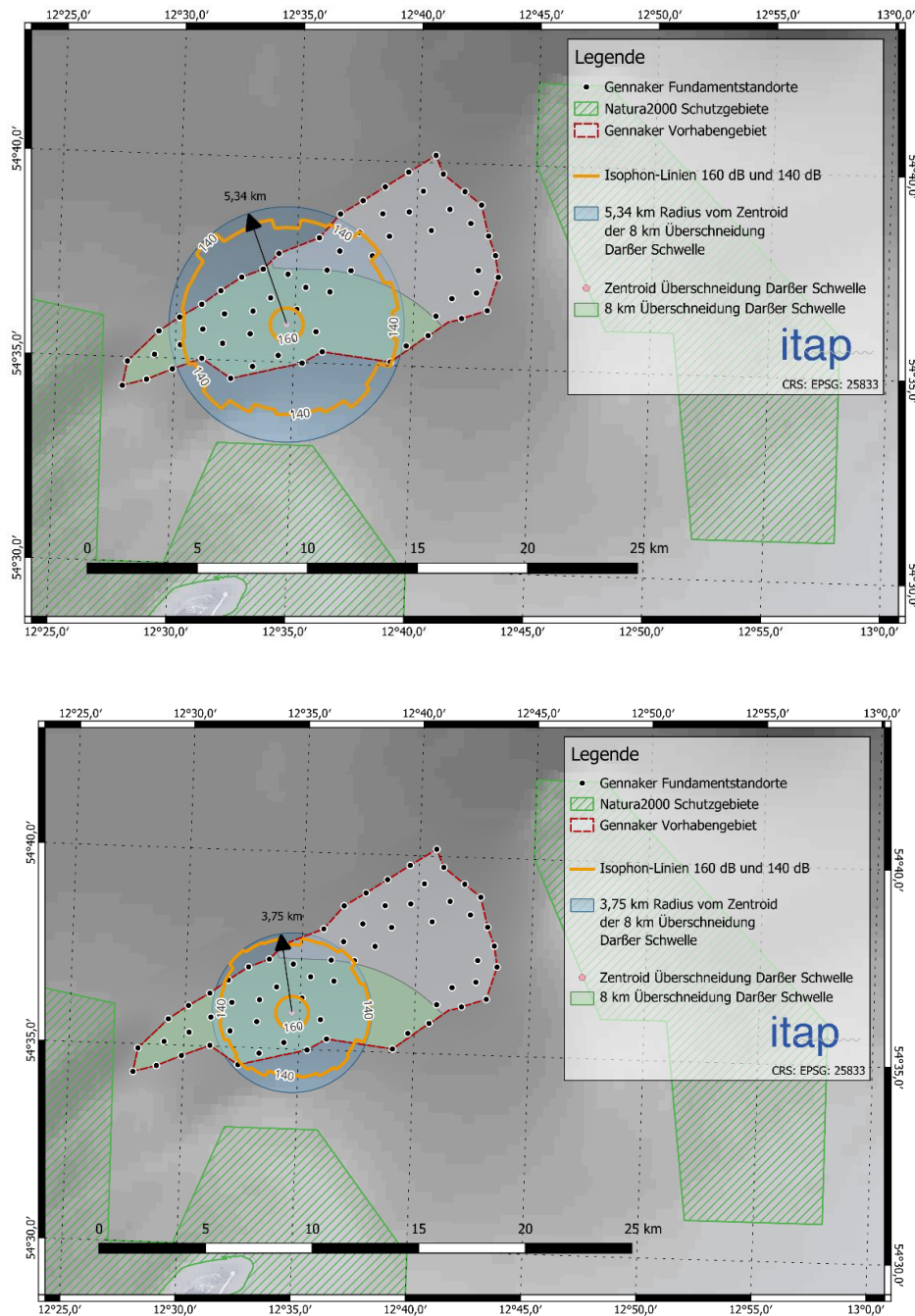


Abbildung 14: Darstellung der 140 und 160 dB-Isophon-Linien unter Verwendung der projektspezifischen Ausbreitungsdämpfung (orange Linie) und der beschallten Flächen des FFH-Gebietes Darßer Schwelle mit einem Einzelereignispegel von $SEL \geq 140$ dB unter der Voraussetzung, dass der Lärmschutzwert von 160 dB in einer Entfernung von 750 m zum Mittelpunkt gemäß behördlicher Setzung (Mittelpunkt der Schnittfläche des 8 km-Puffers ausgehend vom FFH-Gebiet Darßer Schwelle) eingehalten wird (oben: keine Überschneidung; unten: keine Überschneidung). Oben: unter Annahme eines „unspezifisch mitigierte“ Rammschallspektrums (unter Winterkonditionen). Unten: unter der Annahme einer mitigierte Rammung (unter Sommerkonditionen).

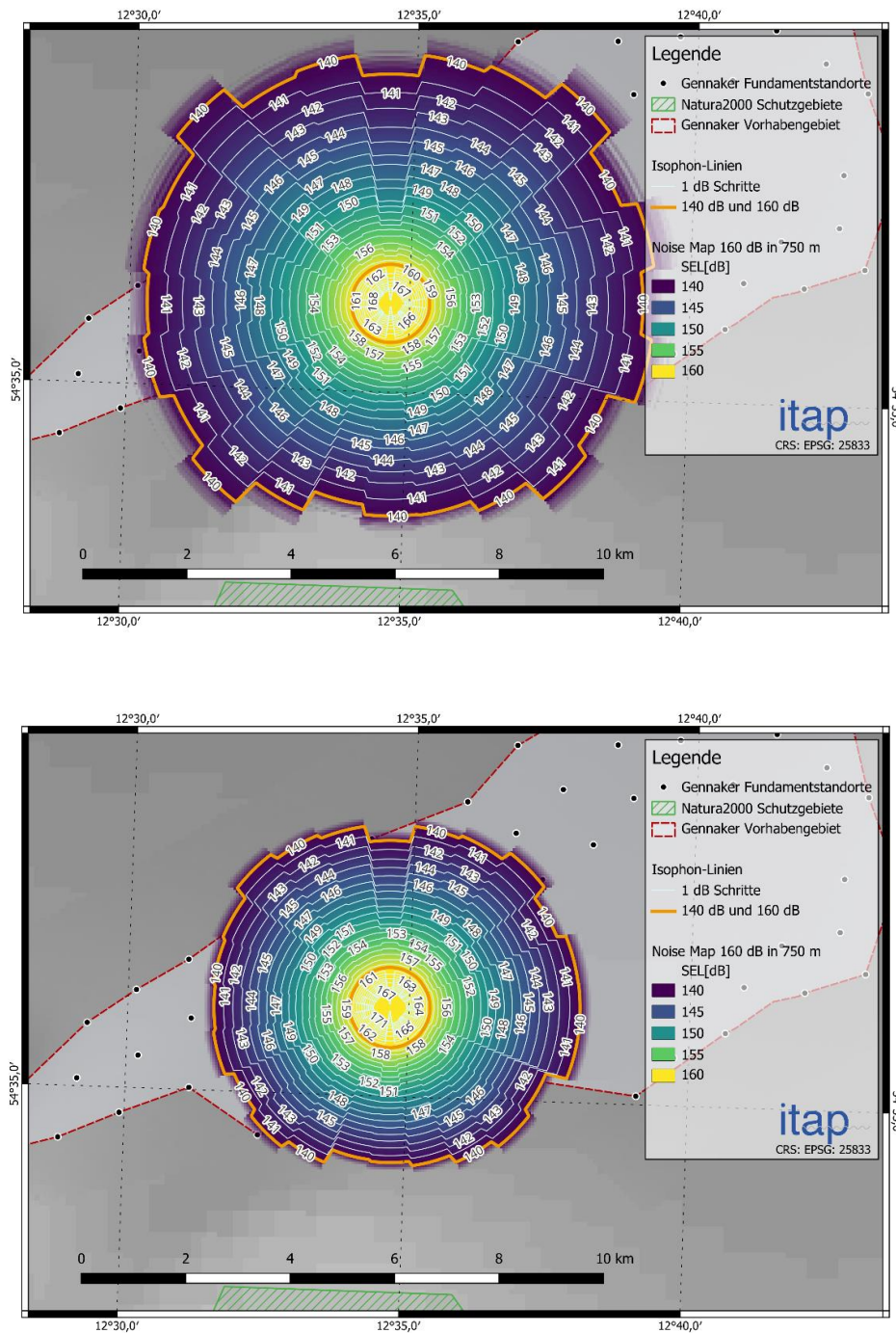


Abbildung 15: Basierend auf Abbildung 14 sind die Isophon-Linien von 160 dB bis 140 dB für eine Impulsrammung im OWP Gennaker in 1 dB Schritten unter Verwendung der projektspezifischen Ausbreitungsdämpfung als Schallkarte dargestellt. Oben: unter der Annahme eines „unspezifisch mitigierten“ Rammschallspektrums unter Winterkonditionen („lautestes anzunehmendes Szenario“). Unten: unter der Annahme eines mitigierten Rammschallspektrums unter Sommerkonditionen (realistisches Szenario). In beiden Varianten wurde davon ausgegangen, dass der breitbandige Einzelereignispegel (SEL) in 750 m Entfernung zur Rammung 160 dB beträgt.

9. Referenzen

- Bellmann, M. A., Brinkmann, J., May, A., Wendt, T., Gerlach, S., & Remmers, P. (2020). *Unterwasserschall während des Impulsrammverfahrens: Einflussfaktoren auf Rammschall und technische Möglichkeiten zur Einhaltung von Lärmschutzwerten. Gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), FKZ UM16 881500. Beauftragt und geleitet durch das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Auftrags-Nr. 10036866. Editiert durch die itap GmbH. Tech. rep., itap GmbH.*
- Bellmann, M. A., Brinkmann, J., May, A., Wendt, T., Gerlach, S., & Remmers, P. (2020). *Unterwasserschall während des Impulsrammverfahrens: Einflussfaktoren auf Rammschall und technische Möglichkeiten zur Einhaltung von Lärmschutzwerten. Gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), FKZ UM16 881500. Beauftragt und geleitet durch das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Auftrags-Nr. 10036866. Editiert durch die itap GmbH. Tech. rep., itap GmbH.*
- BMU. (2013). *Konzept für den Schutz der Schweinswale vor Schallbelastungen bei der Errichtung von Offshore-Windparks in der deutschen Nordsee (Schallschutzkonzept).* Tech. rep., Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- BSH. (2011). *Measuring instruction for underwater sound monitoring – Current approach with annotations - Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie.*
- BSH. (2013). *Offshore-Windparks – Prognosen für Unterwasserschall – Mindestmaß an Dokumentation - Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie. Bericht Nr. M.100004/29.*
- Collins, M. D. (1995). *User's Guide for RAM Versions 1.0 and 1.0 p. Naval Research Lab, Washington, DC, 20375, 14.*
- DIN 17025. (2018). *DIN EN ISO/IEC 17025:2018-03, Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien (ISO/IEC\17025:2017); Deutsche und Englische Fassung EN\ISO/IEC\17025:2017.* Deutsches Institut für Normung. Beuth Verlag GmbH. doi:10.31030/2731745
- Gündert, S. (2014). *Empirische Prognosemodelle für Hydroschallimmissionen zum Schutz des Gehörs und der Gesundheit von Meeressäugern. Masterarbeit an der Universität Oldenburg, Institut für Physik, AG Akustik.*
- ISO 18405. (2017, April). *ISO 18405:2017, Underwater acoustics — Terminology.* Standard, International Organization for Standardization, Geneva.

- ISO 18406. (2017, April). *ISO 18406:2017, Underwater acoustics – Measurement of radiated underwater sound from percussive pile driving*. Standard, International Organization for Standardization, Geneva.
- Kastelein, R. A., Schop, J., Hoek, L., & Covi, J. (2015, 10). Hearing thresholds of a harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) for narrow-band sweeps. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 138, 2508–2512. doi:10.1121/1.4932024
- Koschinski, S., & Lüdemann, K. (2011). Stand der Entwicklungen schallminimierender Maßnahmen beim Bau von Offshore-Windenergieanlagen, report on behalf of BfN. *Bonn, Germany*, 1–83.
- Koschinski, S., & Lüdemann, K. (2013). Development of noise mitigation measures in offshore wind farm construction. *Commissioned by the Federal Agency for Nature Conservation*, 1–102.
- Koschinski, S., & Lüdemann, K. (2019). Noise mitigation for the construction of increasingly large offshore wind turbines – Technical options for complying with noise limits, report on behalf of BfN. *Bonn, Germany*, 1–42.
- Lucke, K., Siebert, U., Lepper, P. A., & Blanchet, M. A. (2009). Temporary shift in masked hearing thresholds in a harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) after exposure to seismic airgun stimuli. *J. Acoust. Soc. Am.*, 425, 4060-4070.
- Maquil, T., Müller, A., & Wildemann, M. (2024). *Vorhaben Offshore-Windpark Gennaker - Prognose der zu erwartenden Hydroschallimmissionen während der Rammarbeiten.*, s.l.: s.n.
- Nehls, G., & Bellmann, M. A. (2015). *Weiterentwicklung und Erprobung des „Großen Blasenschleiers“ zur Minderung der Hydroschallemissionen bei Offshore-Rammarbeiten. Gefördert durch PTJ und BMWi, FKZ 0325645A/B/C/D*. Tech. rep.
- Porter M. B., B. H. (1987). Gaussian beam tracing for computing ocean acoustic fields. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1987: Vol. 82, 1349-1359.
- Thiele, R., & Schellstede, G. (1980). Standardwerte zur Ausbreitungsdämpfung in der Nordsee. *FWG-Bericht 1980-7, Forschungsanstalt der Bundeswehr für Wasserschall und Geophysik*.
- Verfuss, U. K., Sinclair, R. R., & Sparling, C. (2019). *A review of noise abatement systems for offshore wind farm construction noise, and the potential for their application in Scottish waters (Report No. 1070)*. Tech. rep., Scottish Natural Heritage.

Schalltechnische Prognose

Final Audit Report

2025-01-24

Created:	2025-01-24
By:	Michael Bellmann (bellmann@itap.de)
Status:	Signed
Transaction ID:	CBJCHBCAABAAMUXziSyqd84zTJsf6LGoSBIfe00yv_aE

"Schalltechnische Prognose" History

-  Document created by Michael Bellmann (bellmann@itap.de)
2025-01-24 - 7:03:46 AM GMT
-  Document emailed to Patrick Remmers (p.remmers@itap.de) for signature
2025-01-24 - 7:03:58 AM GMT
-  Email viewed by Patrick Remmers (p.remmers@itap.de)
2025-01-24 - 7:30:36 AM GMT
-  Document e-signed by Patrick Remmers (p.remmers@itap.de)
Signature Date: 2025-01-24 - 7:30:57 AM GMT - Time Source: server
-  Agreement completed.
2025-01-24 - 7:30:57 AM GMT