

Untersuchungsbohrungen im Untersuchungsfeld „Zentrale Nordsee“



Prognose der zu erwartenden Hydroschall- immissionen während der Rammarbeiten des Standrohrs

Projekt Nr.: 4301

Oldenburg, 18.03.2026

Version 5

Antragstellerin: BEB Erdgas und Erdöl GmbH & Co. KG.
Auftraggeberin: ExxonMobil Production Deutschland GmbH
Vahrenwalder Straße 238
30179 Hannover
Germany

Ausführung: itap GmbH
Institut für technische und angewandte Physik
Marie-Curie-Straße 8
26129 Oldenburg

Bearbeiter: Patrick Remmers, B. Eng.
Aenne Stennes, B. Eng.

Berichtsumfang: 39 Seiten

Sitz

itap – Institut für technische und
angewandte Physik GmbH
Marie-Curie-Straße 8
26129 Oldenburg

Amtsgericht Oldenburg
HRB: 12 06 97

Kontakt

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

Geschäftsführer

Dr. Michael A. Bellmann

Bankverbindung

Oldenburger Volksbank
IBAN: DE95 2806 1822 0080 0880
00

BIC: GENO DEF1 EDEB

Commerzbank AG

IBAN: DE70 2804 0046 0405 6552
00

BIC: COBA DEFF XXX

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

Änderungsverzeichnis:

Version	Datum	Kommentare
1	03.12.2024	Erste Version
2	24.03.2025	Textliche Änderungen, Schallkarten ergänzt
3	19.01.2026	Textliche Änderungen
4	12.03.2026	Textliche Änderungen
5	18.03.2026	Geänderte Beschreibung der Beurteilungsgrundlage

Diese Version ersetzt alle vorhergegangenen Versionen.

Einheiten:

$\mu\text{m/s}$ - Mikrometer pro Sekunde

mm - millimeter

cm - centimeter

Pa - Pascal

dB - Dezibel

s - Sekunde

kJ - Kilojoule

Messgrößen:

λ - Wellenlänge

T - Mittelungszeit

ρ - Dichte eines Mediums

Z - akustische Kennimpedanz

E - Schallbelastung

c - Schallgeschwindigkeit

L_{hg} - Hintergrundpegel

n - Anzahl

$L_{p,pk}$ - zero-to-peak Spitzenpegel

p - Schalldruck

$L_{pk,pk}$ - Peak-to-Peak Spitzenpegel

$p(t)$ - zeitvarianter Schalldruck

SEL - Einzelereignispegel

p_0 - Bezugsschalldruck

SEL_{05} - 5 % Überschreitung Einzelereignispegel

p_{pk} - maximaler Schalldruck

SPL - Dauerschalldruckpegel

v - Schallschnelle

Abkürzungen:

BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (engl. Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety)

BSH - Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

eBBC - Enhanced Big Bubble Curtain

FFH - Fauna-Flora-Habitat

IQIP -NMS - IQIP - Noise Mitigation Screen

LBEG - Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie

MNRU - Menck Noise Reduction Unit

NAS - Noise Abatement System

NMS - Noise Mitigation System

PTS - Permanent Threshold Shift

SNR - Signal to noise ratio

SRD - Bodenwiderstandswert - engl. soil resistance value

TTS - Temporary Threshold Shift

UBA - Umweltbundesamt

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse	6
2. Einleitung und Aufgabenstellung.....	8
3. Schalltechnische Grundlagen	10
3.1 (Energie-) äquivalenter Dauerschallpegel (<i>SPL</i>)	11
3.2 Einzelereignispegel (<i>SEL</i>)	11
3.3 Zero-to-peak-Spitzenpegel $L_{p,pk}$	12
4. Lärmschutzwerte für impulshaften Unterwasserschall	13
5. Modelansätze.....	14
5.1 Bestimmung des Quell- und Ausbreitungspegel	14
5.1.1 Pfahldurchmesser.....	15
5.1.2 Rammenergie	16
5.1.3 Hydraulikhammer.....	17
5.1.4 Bodenkopplungen	17
5.1.5 Spektrum des Rammschalls	18
5.1.6 Ausbreitungsdämpfung	20
5.2 Berechnungsverfahren	21
5.2.1 Schritt 1: Zero-to-peak-Pegel und Breitband-Einzelereignispegel in 750 m... 21	
5.2.2 Schritt 2: Frequenzabhängigkeit des Quellpegels und Ausbreitungs-dämpfung21	
5.2.3 Schritt 4: Schallkarten	22
5.3 Modellunsicherheiten/ Unsicherheitsbetrachtungen	22
6. Modellierung von Rammschall-Szenarien.....	25
6.1 Vorhandene Bedingungen	25
6.2 Schalltechnisch relevante Eingangsdaten	26
7. Ergebnisse der Prognose	27
8. Schallschutz	29
8.1 Schallminderungssysteme (NMS)	30
8.1.1 Schalloptimiertes Rammverfahren	30
8.1.2 Neue Hammertechnologien PULSE und MNRU	31

8.2	Schallschutzsysteme (NAS)	33
8.2.1	Einfache oder doppelte große Blasenschleier (BBC und DBBC)	33
8.2.2	Verbesserter Großer Blasenschleier (engl. Enhanced Big Bubble Curtain)	35
8.2.3	IQIP -Noise Mitigation Screen (IHC-NMS)	35
8.2.4	Hydroschalldämpfer (Hydro Sound Damper – HSD)	36
8.2.5	AdBm Resonanzsystem	37
9.	Literaturverzeichnis	38

1. Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse

Die Antragstellerin beantragt die Genehmigung einer Untersuchung des Untergrundes auf seine Eignung zur Errichtung eines Kohlendioxidspeichers gemäß §§ 7 & 8 KSpTG. Hierzu sollen in einem abgegrenzten Untersuchungsfeld mit dem Projektnamen Zentrale Nordsee Untersuchungsbohrungen an bis zu drei Lokationen durchgeführt werden.

Die Herstellung der Bohrung beginnt mit dem Setzen des Standrohrs. Die Installation des Standrohrs erfolgt im Impuls-Ramm-Verfahren. Bei diesen Arbeiten entstehen die höchsten Schalleinträge ins Wasser während des Abteufens einer Untersuchungsbohrung. Es erfolgt deshalb für diesen Arbeitsschritt einer Prognose der zu erwartenden Hydroschallimmissionen.

Im Rahmen des Genehmigungsverfahrens durch das Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) ist beabsichtigt u. a. auch die Auflagen des „Standard, Untersuchung der Auswirkung von Offshore-Windenergieanlagen auf die Meeresumwelt (StUK4)“ des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) zu erfüllen. Unter anderem wird gefordert, dass vor Baubeginn die zu erwartenden Unterwasserschallimmissionen während der Bauphase durch Prognoseberechnungen zu ermitteln sind.

Die *itap - Institut für technische und angewandte Physik GmbH* wurde beauftragt, Prognoseberechnungen für die zu erwartenden Hydroschallimmissionen während der Installationen des Standrohrs durchzuführen und gegebenenfalls Vorschläge für mögliche Schallschutzmaßnahmen zu diskutieren.

Die Prognoseberechnungen in Bezug auf die Hydroschallimmissionen während der Rammarbeiten ergaben folgende Resultate:

- In 750 m Entfernung werden folgende beurteilungsrelevante Pegelgrößen für die voraussichtlich maximale Rammenergie erwartet:

Durchmesser [m]	Max. Rammenergie [kJ]	Einzelereignispegel SEL_{05} in 750 m [dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$]	Spitzenpegel $L_{p,pk}$ in 750 m [dB re 1 μPa]
0,76	117	159	185

- Es ist zu erwarten, dass es durch die Installation des Leiter-Rohres zu keinen Überschreitungen des dualen Lärmwertkriteriums (160dB_{SEL} und $190\text{ dB}_{Lp,pk}$) kommt. Damit ist nach gängiger Praxis die Einhaltung der Anforderungen an den Arten- und den Gebietsschutzes gemäß MSRL (2008) und BNatG Rechnung getragen. Aufgrund der Prognoseunsicherheit von $\pm 2\text{ dB}$ kann eine Überschreitung des dualen Lärmwertkriteriums jedoch nicht ausgeschlossen werden.

- Aufgrund der bestehenden Prognose- und Messunsicherheit wird aus gutachterlicher Sicht die Prüfung eines freiwilligen Einsatzes einer Schallminderungsmaßnahme empfohlen, um im Falle einer Überschreitung schnellstmöglich reagieren zu können.

Oldenburg, 18.03.2026

Patrick Remmers, B.Eng.

Erstellt

Sachgebietsleiter Unterwasserschall-Prognosen

Aenne Stennes, B. Eng.

Geprüft

Stellv. Sachgebietsleiter Unterwasserschall-Prognosen

2. Einleitung und Aufgabenstellung

Die Antragstellerin beantragt die Genehmigung einer Untersuchung des Untergrundes auf seine Eignung zur Errichtung eines Kohlendioxidspeichers gemäß §§ 7 & 8 KSpTG. Hierzu sollen in einem abgegrenzten Untersuchungsfeld mit dem Projektnamen Zentrale Nordsee Untersuchungsbohrungen an bis zu drei Lokationen durchgeführt werden. Für die Festlegung der Lage der Untersuchungsbohrungen ist zunächst die Auswertung einer 3D-Seismik erforderlich. Nach Auswertung der 3D Seismik werden kleinräumige Suchräume für die geplanten Untersuchungsbohrungen festgelegt. Innerhalb dieser kleinräumigen Suchräume erfolgen dann weitere bohrlokationsspezifische Untersuchungen. Erst nach Auswertung dieser Untersuchungen können die Bohransatzpunkte der geplanten Untersuchungsbohrungen final festgelegt werden. Hinsichtlich der Lage der Untersuchungsbohrungen im Untersuchungsfeld werden seitens der Antragstellerin folgende Kriterien festgelegt:

- Die geplanten Untersuchungsbohrungen liegen voraussichtlich in einem Vorbehaltsgebiet für Verteidigung ((Luft-) Gefahrengbiet über See ED-D 44 & ED-D 46 sowie Artillerieschießgebiet „Nordsee“).
- Die geplanten Untersuchungsbohrungen liegen nicht in einem weiteren Vorranggebiet oder Vorbehaltsgebiet des Raumordnungsplans.
- Die geplanten Untersuchungsbohrungen haben jeweils einen Abstand von mind. 2 km zum nächsten Vorranggebiet für die Schifffahrt.
- Die geplanten Untersuchungsbohrungen liegen außerhalb der Vorbehaltsgebiete für Leitungen. Die erforderlichen Sicherheitsabstände von 500 m werden zum Vorbehaltsgebiet für Leitungen eingehalten.
- Die geplanten Untersuchungsbohrungen haben des Weiteren einen deutlichen Abstand zu bestehenden Windparks und zu Vorranggebieten für die Windenergie von mind. ca. 15 km.
- Die geplanten Untersuchungsbohrungen haben mind. einen Abstand von 20 km zum nächsten Naturschutz- oder FFH-Gebiet.
- Nach Abschluss der bohrlokationsspezifischen Untersuchungen wird eine Lage der geplanten Untersuchungsbohrungen in einem geschützten Biotop nach § 30 BNatSchG ausgeschlossen.
- Nach Abschluss der bohrlokationsspezifischen Untersuchungen wird eine Lage der geplanten Untersuchungsbohrungen in direktem Umfeld von Unterwasserhindernissen ausgeschlossen.
- Nach Abschluss der bohrlokationsspezifischen Untersuchungen wird eine Lage der geplanten Untersuchungsbohrungen in direktem Umfeld von Kampfmitteln ausgeschlossen.

Die Herstellung der Bohrung beginnt mit dem Setzen des Standrohrs. Die Installation des Standrohrs erfolgt jeweils im Impulse Ramm Verfahren. Bei dem Rammverfahren für das Standrohr entstehen die höchsten Lärmemissionen während des Abteufens einer Untersuchungsbohrung.

Im Rahmen des Genehmigungsverfahrens durch das Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) ist beabsichtigt u. a. auch die Auflagen des „Standard, Untersuchung der Auswirkung von Offshore-Windenergieanlagen auf die Meeresumwelt (StUK4)“ des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) zu erfüllen. 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. Zudem sind die vom BSH unter Vorarbeit des UBA (2010) festgesetzten Lärmschutzwerte für den Einzelereignispegel (SEL) von 160 dB_{SEL} und den Spitzenpegel ($L_{p,pk}$) von 190 dB_{Lp,pk} in 750 m Entfernung zur Rammbaustelle einzuhalten.

Die itap - Institut für technische und angewandte Physik GmbH wurde beauftragt, Prognoseberechnungen für die zu erwartenden Hydroschallimmissionen während der Installation der Standrohre durchzuführen und gegebenenfalls Vorschläge für mögliche Schallschutzmaßnahmen zu diskutieren.

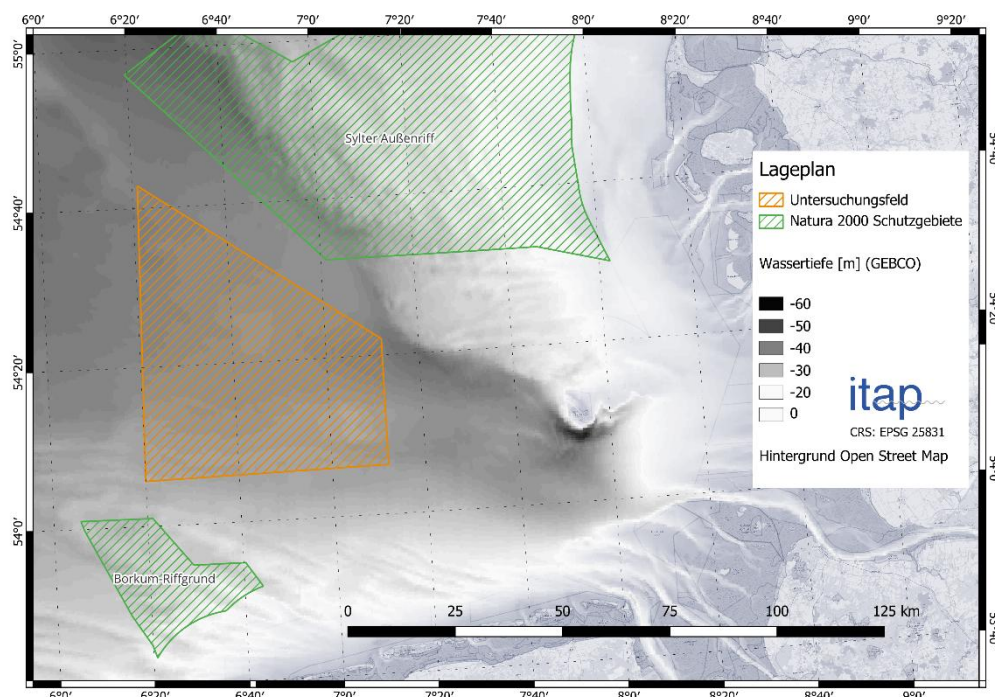


Abbildung 1: Lage des Untersuchungsfelds und der FFH-Gebiete FFH-Borkum Riffgrund und Sylter Außenriff in der Nordsee.

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 $117 \text{ dB re } 1 \mu\text{Pa}^2$ bzw. einem Spitzenpegel von $120 \text{ dB re } 1 \mu\text{Pa}^2$) 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:

- (Energie-) äquivalenter Dauerschalldruckpegel – *SPL* (Mittelungspegel) ,
- Einzelereignispegel – *SEL*,

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 $\geq 5\lambda$.

- zero-to-peak-Spitzenpegel $L_{p,pk}$.

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 Dauerschallpegel (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

$p(t)$ - zeitlich variabler Schalldruck,

p_0 - Bezugsschalldruck (bei Unterwasserschall $1 \mu\text{Pa}^2$),

T - Mittelungszeit.

3.2 Einzelereignispegel (SEL)

Zur Charakterisierung von Rammgeräuschen ist der SPL allein kein ausreichendes Maß, da er nicht nur von der Stärke der Rammschläge abhängt, sondern auch von der Mittelungszeit und von den Pausen zwischen den Rammschlägen.

Die Schallbelastung E oder vielmehr der resultierende Einzelereignispegel SEL sind besser geeignet. Beide Werte sind folgendermaßen 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 - Anfangs- bzw. Endzeit der Mittelungen (sind so zu wählen, dass das Schallereignis zwischen T_1 und T_2 liegt),
 T_0 - Referenz 1 Sekunde.

Der Einzelereignispegel eines Schallimpulses (Rammschlag) ist damit der (SPL) eines kontinuierlichen Schalls von 1 s Dauer und der gleichen Schallenergie wie der Impuls.

Der Einzelereignispegel (SEL) und der Dauerschallpegel (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} - Stör- bzw. Hintergrundpegel zwischen den einzelnen Rammschlägen.

Die Gleichung 6 liefert somit den mittleren Einzelereignispegel (SEL) von n Schallereignissen (Rammschlägen) aus nur einer Schalldruckpegel (SPL)-Messung. Im Falle, dass der Hintergrundpegel zwischen den Rammschlägen deutlich geringer als der Rammschall ist (z. B. > 10 dB), kann mit hinreichender Genauigkeit mit einer Vereinfachung von Gleichung 6 folgendermaßen gerechnet werden:

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

Gleichung 7

3.3 Zero-to-peak-Spitzenpegel $L_{p,pk}$

Diese Größe ist ein Maß für kurzzeitige Schalldruckmaxima. Im Gegensatz zum Schalldruckpegel (SPL) und Einzelereignispegel (SEL) gibt es keine Mittelwertbildung:

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

Gleichung 8

mit

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

Ein Beispiel ist in Abbildung dargestellt. Der zero-to-peak-Spitzenpegel ($L_{p,pk}$) ist stets höher als der Einzelereignispegel (SEL). In der Regel beträgt die Differenz zwischen dem $L_{p,pk}$ und dem SEL bei Rammarbeiten 20 dB bis 25 dB. Einige Autoren bevorzugen den Peak-to-peak-Spitzenpegel ($L_{pk,pk}$) anstelle des $L_{p,pk}$. Eine Definition dieses Parameters ist in Abbildung 2 gegeben. Dieser Faktor beschreibt nicht den maximal erreichten (absoluten) Einzelereignispegel (SEL), sondern die Differenz zwischen der negativen und der positiven Amplitude eines Impulses (Abbildung 2).

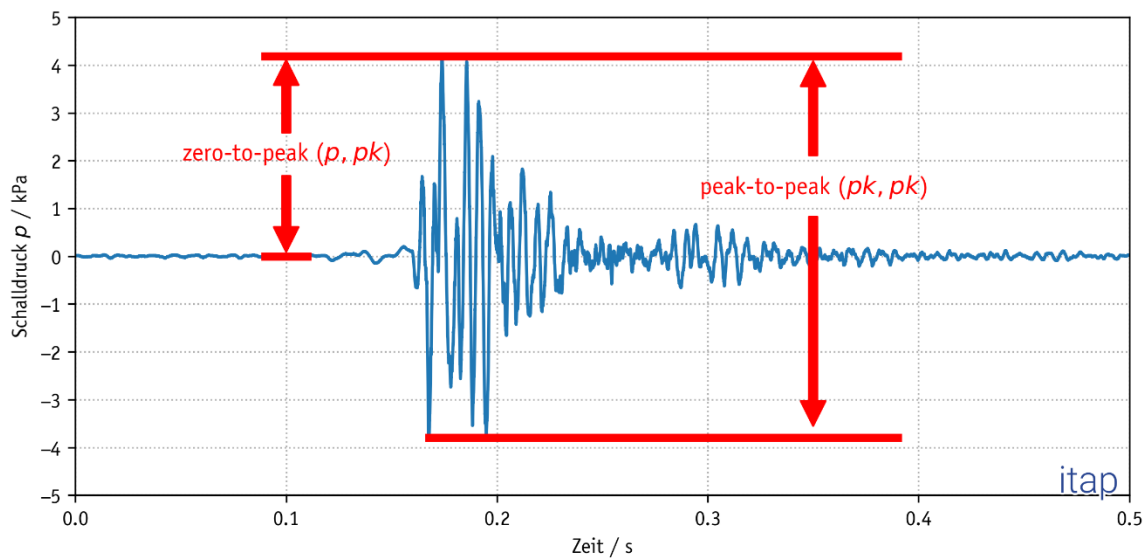


Abbildung 2: Typisches, gemessenes Zeitsignal des Unterwasserschalls bei Rammungen in einer Entfernung von einigen 100 m.

4. Lärmschutzwerte für impulshaften Unterwasserschall

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

Die Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (MSRL 2008) schreibt für alle EU-Staaten verbindlich vor, den „guten Umweltzustand“ zu definieren, zu überwachen und Maßnahmen zu ergreifen, wenn dieser nicht erreicht wird. Dafür wurden von der Europäischen Kommission mehrere

Deskriptoren definiert; der Deskriptor 11 Energieeintrag ins Wasser/Unterwasserschall ist dabei in zwei Teildeskriptoren unterteilt worden: 11.1 impulshaltige Schalleinträge (z. B. Sprengungen oder Schalleinträge durch das Impulsrammverfahren) und 11.2 Dauerschall (z. B. Schifflärm). Die MSRL ist jeweils ins nationale Recht verbindlich umzusetzen. In Deutschland wurden daher Lärmschutzwertkriterien entwickelt um den Artenschutz (§43 BNatSchG) und den Gebietsschutz (§44 BNatSchG) sowie weiteren Verordnungen Sorge zu tragen. In Deutschland wurde dazu 2011 verbindlich die Vermeidung einer temporären Hörschwellenverschiebung bei der Leitart Schweinswal zur Einhaltung des Artenschutzes gemäß BNatSchG eingeführt. Basierend auf Litertaur (Lucke, et al. 2007) wurde festgelegt, dass der Einzelereignispegel (L_E bzw. SEL) für einen einmaligen Impuls (z. B. Sprengung) nicht höher als 164 dB ausfallen darf; bei schnell aufeinanderfolgenden Impulsfolgen, wie z. B. bei einer Impulsrammung zur Gründung von Fundamentstrukturen in den Meeresboden unter Verwendung einer Schlagramme, darf der Einzelereignispegel den Wert 160 dB nicht überschreiten. Für den jeweiligen Spitzenpegel ($L_{p,pk}$) ist der Grenzwert 190 dB bei jedem Impuls einzuhalten. Diese verbindlichen Grenzwerte sind in 750 m von der Quelle verbindlich einzuhalten. Zur Einhaltung des Gebietsschutzes für den Anwendungsfall der Fundamentgründung von Offshore-Strukturen wurde das Schallschutzkonzept Nordsee erarbeitet (BMU 2013). Eine detaillierte Zusammenfassung der derzeitigen Genehmigungs- und Vollzugspraxis ist in Bellmann et al., (2020) seitens des BSH zusammengefasst .

Nach gängiger Praxis sind das o. g. Lärmschutzwertkriterium bzgl. Artenschutz und die Vorgaben des BMU Schallschutzkonzepts (2013) bzgl. Gebietsschutz für jede Art des impulshaltigen Schalleintrages in der deutschen AWZ der Nord- und Ostsee in den letzten 10 Jahren seitens der Genehmigungsbehörden für den Bau von Offshore-Bauvorhaben und anderweitiger industrieller Nutzung der Nord- und Ostsee , wie z. B. Öl & Gas, angewendet worden. Auch regionale Regulierungsbehörden haben sich in den letzten 10 Jahren dieser Praxis angeschlossen.

Schlussendlich können aber auch projekt-spezifische Vorgaben der Genehmigungsbehörden vorgeschrieben werden; dies ist die im vorliegenden Vorhaben jedoch derzeit nicht der Fall.

5. Modelansätze

5.1 Bestimmung des Quell- und Ausbreitungspegel

Der Einzelereignispegel (SEL) variiert im Verlauf einer Rammung und hängt, wie bereits erwähnt, von mehreren Parametern ab (z. B. reflektierende Pfahloberfläche, Rammenergie, Bodenbeschaffenheit, Wandstärke, etc.). Das angewandte Modell berücksichtigt in einem ersten Schritt lediglich den Pfahldurchmesser als Einflussgröße. Um ein statistisch valides Ergebnis

der lautesten zu erwartenden Rammschläge zu erhalten, basiert das empirische Modell auf der 5 prozentigen Überschreitung des Einzelereignispegels (SEL_{05}) während einer Pfahlinstallation.

5.1.1 Pfahldurchmesser

Während des Impulsrammens wird der gesamte Pfahl über die vollständige Wassersäule hinweg in Schwingung versetzt. Die effektiv schallabstrahlende Länge entspricht daher der lokalen Wassertiefe. Der maßgebende geometrische Parameter zur Beschreibung des Quellpegels ist folglich der Pfahldurchmesser, welcher explizit als Eingangsgröße im Vorhersagemodell berücksichtigt wird.

Abbildung 3 zeigt gemessene Unterwasserschallpegel während Rammarbeiten an verschiedenen Offshore-Gründungsbauwerken, dargestellt als Funktion des Pfahldurchmessers. Mit zunehmender Pfahloberfläche erhöht sich der abgestrahlte Schalldruckpegel. Entsprechend steigen die beurteilungsrelevanten akustischen Kenngrößen mit wachsendem Pfahldurchmesser, wobei der Zusammenhang nicht linear ist. Für die folgende Prognose werden die aus dem OWP-Vorhaben gewonnenen Erkenntnisse aus den OWP-Bauvorhaben auf die Rammung von Standrohren übertragen.

Wird der Quellpegel ausschließlich auf Basis des Pfahldurchmessers abgeschätzt, ergibt sich eine Modellunsicherheit von etwa ± 5 dB. Diese Unsicherheit spiegelt die Streuung der empirischen Messdaten wider und ist vermutlich auf zusätzliche Einflussfaktoren wie Rammenergie, Pfahlwandstärke, akustische Reflektivität der Pfahloberfläche sowie Sedimenteigenschaften zurückzuführen. Werden alle relevanten Parameter im Modell berücksichtigt, reduziert sich die Gesamtunsicherheit auf etwa ± 2 dB.

Vergleiche zwischen prognostizierten und gemessenen Pegeln zeigen, dass das Modell in den meisten Fällen den Schalldruckpegel in 750 m Entfernung leicht überschätzt. Das Modell ist daher als konservativer Ansatz zu bewerten.

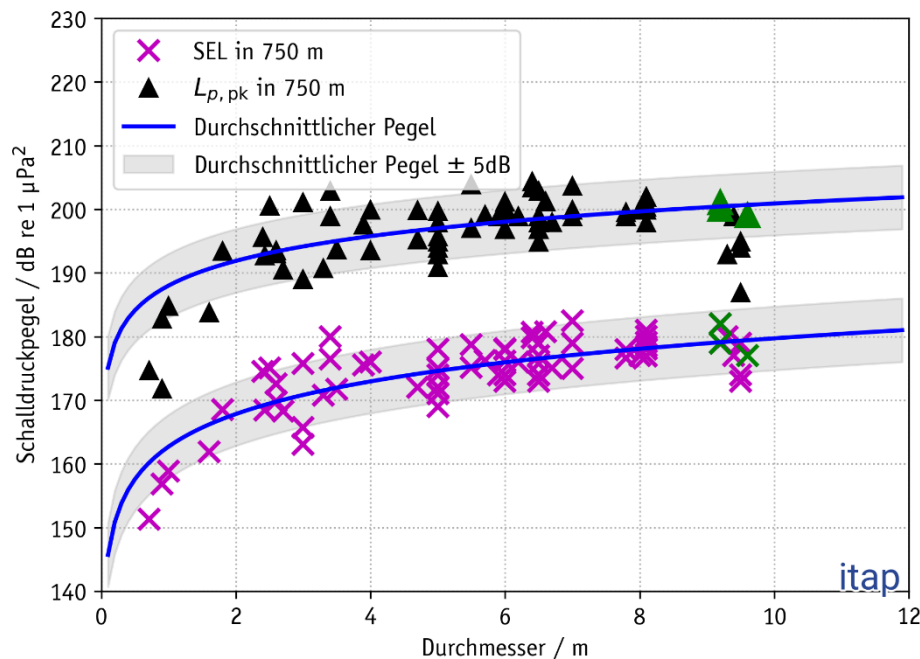


Abbildung 3: Gemessener Zero-to-peak Schalldruckpegel ($L_{p,pk}$) und breitbandige 5%ige Überschreitungspegel des Einzelereignispegels (SEL_{05}) während ungeminderter Rammarbeiten in 750 m Entfernung an einer Reihe von OWP als Funktion des Pfahldurchmessers, Messdaten bei Verwendung des IQIP PULSE Systems im 0 % Modus sind grün markiert und wurden nicht in der Regressionsanalyse berücksichtigt.

5.1.2 Rammenergie

Die beurteilungsrelevanten Pegelwerte (SEL und $L_{p,pk}$) erhöhen sich mit zunehmender Rammenergie. Basierend auf den Erfahrungen früherer Bauprojekte wird ein Ausgangspunkt für die Bestimmung der Einflussgröße "Rammenergie" angenommen. Davon ausgehend werden im Modell Zu- bzw. Abschläge von 2,5 dB pro Verdoppelung/Halbierung für höhere bzw. niedrigere maximale Rammenergien angesetzt.

Die verwendeten Rammenergien 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 rates)). Die Erfahrungen aus der

Praxis zeigen, dass meist geringere Rammenergien aufgebracht werden als im ungünstigsten Fall (worst case) prognostiziert.

5.1.3 Hydraulikhammer

In der folgenden Prognose werden unterschiedliche Szenarien mit unterschiedlichen Rammenergien betrachtet.

Die beurteilungsrelevanten Pegelwerte (SEL und $L_{p,pk}$) steigen mit zunehmender Rammenergie. Basierend auf den Erfahrungen früherer Bauprojekte wird ein Ausgangspunkt für die Bestimmung des Einflussparameters "Rammenergie" angenommen. Unter dieser Annahme werden im Modell Zu- bzw. Abschlüsse von 2,5 dB pro Verdopplung/Halbierung für höhere bzw. niedrigere, maximale Rammenergien geschätzt.

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).

In der Prognose 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 Prognose unberücksichtigt.

5.1.4 Bodenkopplungen

Der Einfluss unterschiedlicher Bodenverhältnisse ist derzeit noch Gegenstand der Forschung. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass mit zunehmendem Bodenwiderstand (SRD-Wert) einer Bodenschicht auch die eingesetzte Rammenergie steigt.

Da der Meeresboden im Untersuchungsfeld im Wesentlichen aus Sand und einem Sand-Ton-Gemisch besteht und die in Kapitel 5.1.1, Abbildung 3 dargestellten Messdaten überwiegend auf sandigem und mitteldichtem, tonigem Untergrund ermittelt wurden, kann davon ausgegangen werden, dass die zu erwartenden Schallemissionen mit der in Abbildung 3 dargestellten Regressionsgeraden übereinstimmen.

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

5.1.5 Spektrum des Rammschalls

Die in Kapitel 5.1.1 dargestellten Abschätzungen des Breitband-Einzelereignispegels (SEL) und des Zero-to-peak-Schalldruckpegel ($L_{p,pk}$)-Wertes beruhen auf den Breitband-Messdaten verschiedener Studien (Abbildung 3). Die Schallausbreitung im Meer ist jedoch stark frequenzabhängig, siehe Kapitel 5.1.6. Aus diesem Grund müssen für die Berechnungen Abschätzungen der Frequenzzusammensetzung der jeweiligen Quellpegel² vorgenommen werden.

Abbildung 4 zeigt die spektrale Verteilung der Einzelereignispegel (SEL), die bei Rammarbeiten an verschiedenen Pfählen (graue Linien) ermittelt wurden. Die in unterschiedlichen Abständen sowie bei unterschiedlichen Rammenergien und Pfahldurchmessern ermittelten Spektren verlaufen ähnlich. Das Frequenzspektrum zeigt ein Maximum im Bereich von 60 Hz bis 250 Hz. Bei Frequenzen oberhalb von ca. 250 Hz nimmt der Pegel allmählich ab, während bei Frequenzen unterhalb von ca. 60 Hz ein steiler Pegelabfall zu beobachten ist. Die Grenzfrequenz für den steilen Pegelabfall bei niedrigen Frequenzen hängt von der Wassertiefe ab. Je tiefer das Wasser ist, desto niedriger ist die Grenzfrequenz. Für die maximale Wassertiefe im Projektgebiet von ca. 41,6 m (LAT) wird die Grenzfrequenz bei 20 Hz liegen.

Aus Messungen der letzten zwei Jahre hat sich gezeigt, dass sowohl der Hydraulikhammertyp, als auch der Pfahldurchmesser einen Einfluss auf das zu erwartende Rammschallspektrum haben können. Tendenziell verschiebt sich das lokale Maximum bei größeren Pfahlhammertypen und größeren Pfahldurchmessern zu niedrigeren Frequenzen. Diese Einflussfaktoren können derzeit jedoch nicht mit statistischer Gültigkeit abgeschätzt werden.

Im Einzelnen ist der spektrale Verlauf eines Rammschallereignisses nach heutigem Kenntnisstand nicht exakt vorhersagbar. Daher wird für die Modellierung ein idealisiertes Modellspektrum für den Einzelereignispegel aus Messdaten vergleichbarer Bauvorhaben extrahiert. 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.

² "Quellpegel" ist der Einzelereignispegel (SEL) oder Zero-to-peak-Schalldruckpegel ($L_{p,pk}$) in einer fiktiven Entfernung von 750 m zu einer gedachten Punktschallquelle.

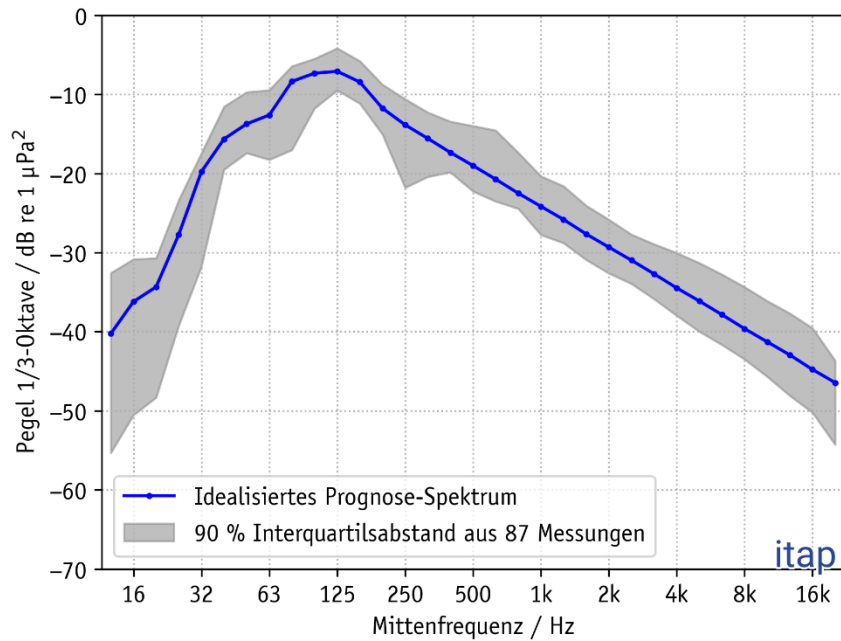


Abbildung 4: Das für den Rammschall geschätzte Modellspektrum (blau) für Monopfähle, basierend auf verschiedenen Messdaten (grau: 90 % Interquartilsabstand der zugrundeliegenden Messdaten).

5.1.6 Ausbreitungsdämpfung

Die Ausbreitungsdämpfung wurde exemplarisch für die Untersuchungsbohrung #1 für 24 Transekte in 15°-Schritten von der Quelle aus mit numerischen Modellansätzen und der Bathymetrie GEBCO 2023 auf einem 50 km x 50 km Gitter in 1 m-Schritten berechnet. Es wurde ein Frequenzbereich von 20 Hz bis 20 kHz berücksichtigt. Für Frequenzen unter 5 kHz wurde das ‚Range-Dependent Acoustic Model‘ (RAM) nach (Collins 1995) verwendet und über 5 kHz das ‚BELLHOP Beam Tracing‘ Modell (Porter 2011).

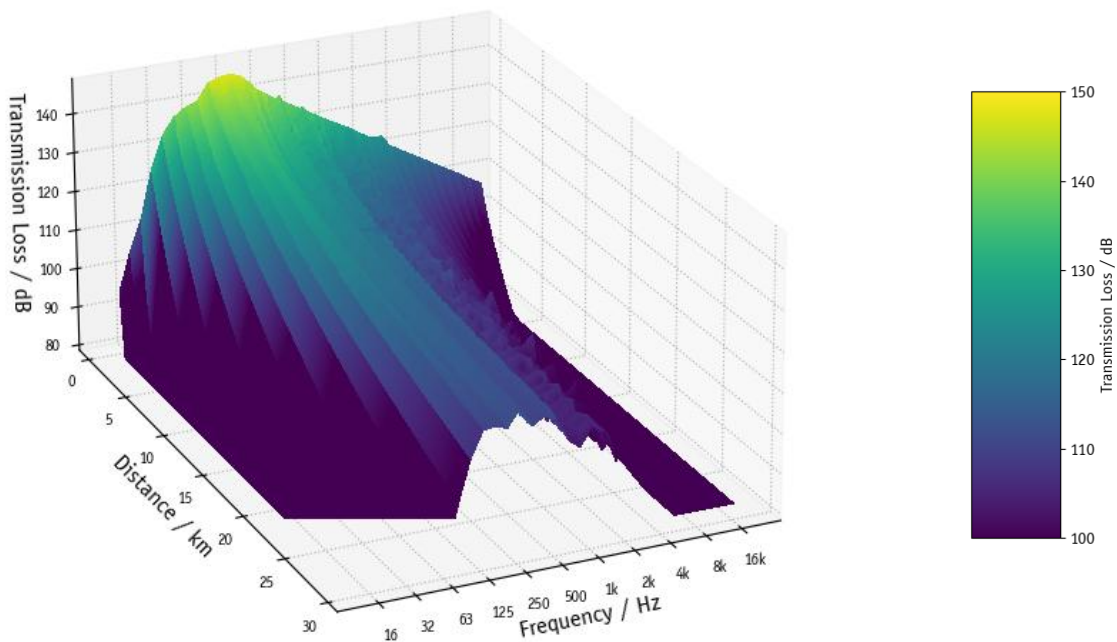


Abbildung 5: Beispielhafte Ausbreitungsdämpfung des SEL in 1/3 Oktaven in 45° Raumrichtung bei der Installation des Konduktors für die Untersuchungsbohrung #1 mit 117 kJ Rammenergie.

5.2 Berechnungsverfahren

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

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

Das *itap*-Modell prognostiziert 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 5.3 beschrieben, vergleichbar mit der des Einzelereignispegels (SEL).

5.2.2 Schritt 2: Frequenzabhängigkeit des Quellpegels und Ausbreitungsdämpfung

Für die Vorhersage von Impulsrammungen, vorwiegend aus Bauvorhaben von Offshore Windparks, hat es sich etabliert den breitbandigen Einzelereignispegel (SEL) und den Zero-to-peak-Schalldruckpegel ($L_{p,pk}$) an ein frequenzabhängiges Ausbreitungsmodell zu koppeln, siehe Kapitel 5.1.6.

Die spektrale Verteilung des Rammschalls in 750 m wird aus empirischen Daten ermittelt (siehe Kapitel 5.1.5). 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 Breitband-Darstellung 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.

5.2.3 Schritt 4: 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.

5.3 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; 5.1.6 beinhaltet einen gewissen Grad an Unsicherheit und damit auch die abgeleiteten Werte für die prognostizierten Pegel sowie deren Wirkungsbereich.

Messungen aus abgeschlossenen Bauprojekten (Bellmann, et al. 2020) mit großen Monopiles 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 Monopiles 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.

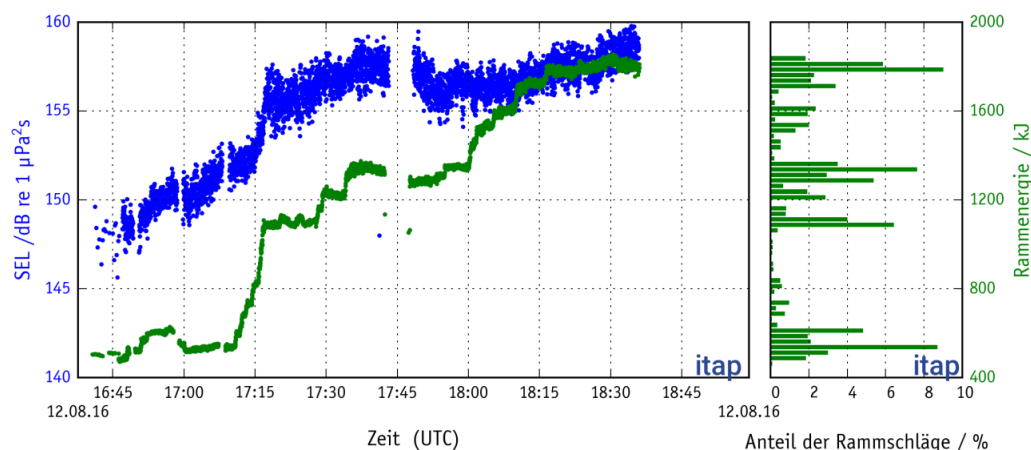
Abbildung 6 zeigt ein Beispiel für ein typisches SEL -Diagramm im Vergleich für eine typische Monopile- und Pin-Pile-Installation.

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 Zu- und Abschläge auf der Basis eines Ausgangswertes berücksichtigt.

Durch die Berücksichtigung des effektiven Parameters "Rammenergie" wird die Unsicherheit deutlich reduziert. Der Vergleich des Modells 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 Auswirkung der prognostizierten Schallpegel in einer Entfernung von 750 m vom Pfahl durch die Verwendung verschiedener, empirischer und halbempirischer Ansätze für die Ausbreitungsdämpfung ist jedoch sehr begrenzt.



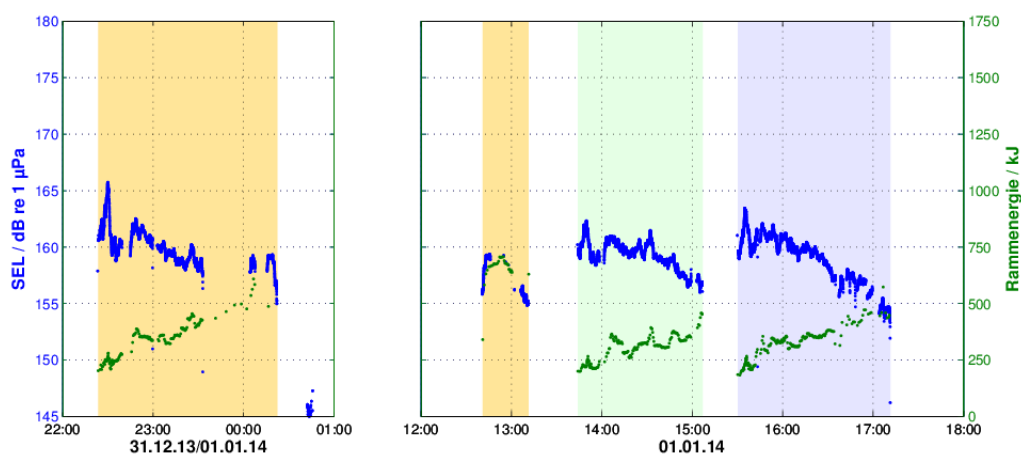


Abbildung 6: Oben: Einfacher Einzelereignispegel (SEL) als Funktion der Zeit (blaue Linie) und die verwendete Rammernergie (grüne Linie) für eine typische Monopfahl-Installation in der Nordsee. Unten: Ein mögliches Beispiel für eine Jacket-Installation mit drei Pin-Piles (der gefärbte Hintergrund markiert die drei verschiedenen Pfähle).

6. Modellierung von Rammschall-Szenarien

6.1 Vorhandene Bedingungen

Die Wassertiefe im Untersuchungsfeld variiert zwischen 35 m und 40 m. Das Sediment besteht überwiegend aus Fein- und Mittelsanden. Unterschiede im Bodenwiderstand (SRD-Wert) der Bodenschicht führen auch zu unterschiedlichen Rammenergien, diese werden im Modell durch Berücksichtigung der maximalen Rammenergie einkalkuliert. Da die in Abbildung 3 gezeigten Messdaten auf Installationen in vergleichbar weicheren Sediment-Schichtungen beruhen, ist ein frequenzunabhängiger Sicherheitszuschlag für die Bodenverhältnisse (Bodenkopplung) nicht erforderlich.

Für das Untersuchungsfeld kann von einer guten Durchmischung des Wassers ohne ausgeprägtes Schallgeschwindigkeitsprofil ausgegangen werden. Dies führt zu einer konstanten Schallgeschwindigkeit über die gesamte Wassertiefe. Für das Modell wird eine mittlere Schallgeschwindigkeit von 1.480 m/s angenommen. Die Schallgeschwindigkeit im Wasser hängt vom Salzgehalt und der Temperatur ab und hat einen geringen Einfluss auf die durch die Wassertiefe verursachte Grenzfrequenz (Urlick, 1983; Jensen *et al.*, 2010).

Der Einzelereignispegel *SEL* kann normativ nur bei einem Signal-Rausch-Verhältnis zum bestehenden Hintergrundschaallpegel von ≤ 10 dB fehlerfrei berechnet werden. Je nach vorherrschendem Hintergrundschaallpegel, dem verwendeten Schallschutzkonzept und der verwendeten Rammenergie kann es insbesondere beim Beginn einer Impulsrammungen zu einem Signal-Rausch-Abstand (engl. signal to noise ratio (SNR)) < 10 dB kommen. D. h. es gibt eine teilweise Vermischung des Impulsrammschalls mit dem permanenten Hintergrundschaall. Dieser Effekt wird allerdings in der nachfolgenden Prognose nicht berücksichtigt, da ein ausreichender SNR zum Ende der Rammung gewährleistet ist.

6.2 Schalltechnisch relevante Eingangsdaten

Für das Modell werden die folgenden Eingangsdaten berücksichtigt:

Eingangsparameter OWEA

- Pfahltyp:	Monopile
- Pfahldurchmesser:	0,76 m
- Wassertiefe:	ca. 37 m an den Standorten
- Rammenergien:	Von 50 kJ bis 150 kJ
- Wasserbeschaffenheit:	Gute Durchmischung des Wassers ohne ausgeprägtes Schallgeschwindigkeitsprofil.

Modellannahmen:

- Eingangsparameter #1:	Pfahldurchmesser
- Eingangsparameter #2:	2,5 dB Zu- oder Abschlag pro Verdoppelung bzw. Halbierung der Rammenergie (bezogen auf einen Referenzwert).
- Bodenbeschaffenheit:	Kein Zuschlag aufgrund von Boden-Beschaffenheit
- Akustische Ankopplungen:	0 dB
- Pfahloberfläche:	konstant, keine Zu- oder Abschlüsse
- Ausbreitungsdämpfung:	gemäß Kapitel 5.1.6

7. Ergebnisse der Prognose

Unter Berücksichtigung der Modellansätze in Kapitel 6 folgende bewertungsrelevante Einzelereignispegel (SEL) und zero-to-peak-Schalldruckpegel ($L_{p,pk}$) für unterschiedliche maximale Rammenergien in 750 m Entfernung zur Untersuchungsbohrung zu erwarten.

Tabelle 1: Prognostizierte Pegelgrößen in 750 m Entfernung.

Durchmesser [m]	Max. Rammenergie [kJ]	Einzelereignispegel SEL_{05} in 750 m [dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$]	Spitzenpegel $L_{p,pk}$ in 750 m [dB re 1 μPa]
0,76	50	157	182
	75	158	184
	100	159	185
	117	159	185
	150	160	186

Für das Modell werden der Einzelereignispegel (SEL) und der zero-to-peak-Schalldruckpegel ($L_{p,pk}$) separat mit einem empirischen Modell (Modellversion: 1.06) 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 Lärm-schutzwerte wie schalloptimierte Rammung nicht auf einen einzelnen Rammschlag, sondern auf die Pegelverteilung während einer kompletten Rammung. Die angegebenen SEL -Werte sind identisch mit dem für eine Sequenz einzuhaltenden 5 %-Überschreitungspegel (SEL_{05}), wenn die maximale Rammenergie für mindestens 5 % der gesamten Rammsequenz verwendet wird.

Für die in Tabelle 1 beispielhaft aufgeführten Pegelgrößen in 750 m Entfernung sind in Tabelle 2 Entfernungsbereiche angegeben, in denen ausgewählte Einzelereignispegel (Breitband) unter Berücksichtigung der in Kapitel 5.1.6 beschriebenen Ausbreitungsdämpfung erreicht werden. Weiterhin wurden die spektralen Annahmen aus Abbildung 4 (Kapitel 5.1.5) berücksichtigt.

Tabelle 2: Darstellung der berechneten Entfernungsbereiche, in denen ausgewählte Einzelereignispegel (SEL) bei der Rammung von Pfählen mit einem Durchmesser von 0,76 m und maximaler Rammenergie von 117 kJ ohne Verwendung eines Schallschutzsystems erreicht werden.

Einzelereignispegel SEL [dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$]	min. Entfernung [km] (Richtungsabhängig)	Median Entfernung [km] (Richtungsabhängig)	max. Entfernung [km] (Richtungsabhängig)
160	0,701	0,721	0,721
140	7,633	7,787	8,017

8. Schallschutz

(Impuls-) Rammarbeiten führen zu impulsiven Schallemissionen mit hohen Pegeln (so genannter Rammschall), die Meereslebewesen schädigen können, z. B. (Lucke et al., 2009) (Kastelein, et al. 2015). Für die ökologisch nachhaltige CCS-Untersuchung auf See ist es daher notwendig, diesen Schalleintrag ins Wasser zu reduzieren, siehe Kapitel 4. Für Impulsschall ist das duale Lärmwertkriterium ($160\text{dB}_{\text{SEL}}$ und $190\text{ dB}_{\text{Lp,pk}}$) einzuhalten. Für die Einhaltung des Lärmschutzwertes von $160\text{ dB}_{\text{SEL}}$ ist der 5%-Perzentilwert des Einzelereignispegels (SEL_{05}) relevant, d. h. der SEL_{05} muss $\leq 160\text{ dB}$ betragen. Diese Lärmschutzwerte wurden speziell für den Schutz von Schweinswalen vor vorübergehenden Hörschwellenverschiebungen entwickelt. Daher müssen für dieses Projekt Schallminderungsmaßnahmen geplant werden, die in der Lage sind, den Rammschall so zu reduzieren, dass der Lärmschutzwert eingehalten wird.

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.

Im Auftrag des Bundesamtes für Naturschutz (BfN) wurde 2011 erstmals ein allgemeiner Überblick über Schallminderungssysteme, technische Schallschutzsysteme und mögliche alternative lärmarme Gründungsstrukturen und -verfahren veröffentlicht (Koschinski und Lüdemann 2011). In den folgenden Jahren wurde diese Studie zweimal aktualisiert (Koschinski und Lüdemann 2013), (Koschinski und Lüdemann 2019). In (Verfuss, Sinclair und Sparling 2019) wird auch ein allgemeiner Überblick über die technischen NAS im Auftrag des schottischen Naturerbes gegeben. In dieser Studie werden die Wirksamkeit jedes einzelnen Schallschutzsystems und die voraussichtlichen Kosten der Anwendung anhand von Fragebögen bewertet. In Bellmann et al. (2020) wird ein Überblick über die mit NMS und NAS in deutschen Gewässern erzielten Gesamtschallminderungen gegeben. Danach sind nur das schalloptimierte Rammverfahren als NMS und drei NAS, der große Blasenschleier (BBC), der Hydroschalldämpfer (HSD) und die IHC-Noise Mitigation Screen, bewährte Systeme mit dem Stand der Technik unter realen Offshore-Einsatzbedingungen.

Aus der Genehmigungsvollzugspraxis hat sich herausgestellt, dass die im Erfahrungsbericht Rammschall (Bellmann et al., 2020) beschriebenen Schallschutzsysteme als Stand der Technik bzw. beste verfügbare Technologie seitens der Genehmigungsbehörde BSH eingestuft werden und somit ohne weitere Auflagen in Bauvorhaben eingesetzt werden können. In den Folgejahren 2021 bis heute sind weitere Schallschutzsysteme und auch Schallminderungssysteme unter realen Offshore-Bedingungen angewendet worden. Ein Teil dieser neuen Technologien wird beim Bau von OWPs allerdings derzeit noch nicht akzeptiert, da noch keine ausreichenden

Daten vorliegen, um die zu erwartende Schallminderung und damit einen effektiven Schallschutz zu belegen.

Im Nachfolgenden werden die derzeit in OWP Bauvorhaben gemäß gängiger Praxis zu Einsatz kommenden Schallminderungsmaßnahmen vorgestellt, damit für dieses Bauvorhaben eine projekt- und standort-spezifische Auswahl an effektiven Maßnahmen weitergehende geplant werden kann. Diese Zusammenstellung ist dabei eine Fortschreibung des bestehenden Erfahrungsberichts (Bellmann et al., 2020).

8.1 Schallminderungssysteme (NMS)

8.1.1 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). Dieses 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).

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 des schalloptimierten Rammverfahrens vor dem Beginn der Untersuchungsbohrung sorgfältig hinsichtlich der Pfahlmüdigkeit, des Bodenwiderstandes und der Rammdauer geprüft werden, d. h. dieses Schallminderungssystem ist nicht bei allen Rammvorhaben anwendbar.

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

8.1.2 Neue Hammertechnologien PULSE und MNRU

Derzeit werden neue Rammhammertechnologien entwickelt, wie die Menck Noise Reduction Unit (MNRU) oder das PULSE-System von IQIP b.v.. Diese neuen Hammertechnologien versuchen, die Spitzenamplitude der Kraftübertragung zwischen Hammer und Pfahl zu reduzieren und die Dauer jedes einzelnen Rammschlags zu verlängern. Gegenwärtig befinden sich diese neuen Hammertechnologien in der Testphase bzw. die PULSE Einheit wird derzeit im 5. OWP-Bauvorhaben serienmäßig eingesetzt. Dabei spiegeln diese neue Hammertechnologie noch nicht den Stand der Technik in Bezug auf Schallminderung wider, da sowohl noch technisch konstruktive Änderungen am PULSE vorgenommen werden als auch an dem Zusammenspiel zwischen Rammhammer und PULSE Einheit hinsichtlich eines schalloptimierten Rammverfahrens gearbeitet wird.

Der Dämpfungseffekt kann durch die Verwendung verschiedener Flüssigkeitsstände in der PULSE-Einheit im Bereich P_{\min} , P_{med} und P_{\max} eingestellt werden. Erfahrungsgemäß liegt der Mindestflüssigkeitsstand bei 100 mm (P_{\min}), 400 mm (P_{med}) und 700 mm (P_{\max}). Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Bezeichnungen der PULSE-Konfiguration über die 5 OWP-Bauvorhaben mehrfach geändert haben. Aus diesem Grund ist die Angabe der Füllstandhöhe in der PULSE Einheit ein reproduzierbares Maß und wird mittlerweile auch im Rammprotokoll und den Rammbarkeitsanalysen verwendet.

Bei den ersten PULSE-Offshore-Tests in der deutschen Ostsee wurde beobachtet, dass die in den Monopfahl eingebrachte Energie durch den Einsatz der PULSE-Einheit reduziert wurde, da dieses als Feder-Dämpfer-System arbeitet. Basierend auf einem durchgeführten Pfahlmonitoring lag der Energieverlust durch den Einsatz der PULSE-Einheit zwischen 3% für P_{zero} (bedeutet 0 mm Flüssigkeit), 15% für P_{med} (ca. 400 mm) und 30% für P_{\max} (700 mm). Das bedeutet, dass 30% der Rammenergie durch P_{\max} reduziert werden kann.

Auf der Grundlage der ersten Offshore-Einsätze der PULSE-Einheit ist bekannt, dass das ungeminderte Rammschallspektrum leicht zu niedrigen Frequenzen hin verschoben wird und die Abnahme des Spektrums zu hohen Frequenzen hin geringer ausfällt; das bedeutet, dass die gesamte Spektralform flacher ist. Typischerweise liegt der maximale Schalleintrag ins Wasser bei ungeminderten XL-Monopfählen zwischen 80 und 160 Hz (Abbildung 4), bei Anwendung der neuen Hammertechnologien (PULSE, MNRU) könnte der maximale Schalleintrag ins Wasser zwischen 32 und 200 Hz liegen, was einen Einfluss auf die erreichbare Schallminderung durch den Einsatz von (Nah- und Fernfeld) Schallschutzsystemen haben könnte; der Effekt ist derzeit statistisch nicht valide quantifizierbar. Allerdings muss an dieser Stelle erwähnt werden, dass die ersten PULSE-Anwendungen unter realen Offshore-Bedingungen in der Ostsee mit sehr

schwierigen Bodenverhältnissen durchgeführt wurden, so dass die oben genannten Ergebnisse hierdurch verzerrt sein könnten. Bei Anwendungen der PULSE Einheit mit geringer werdender Flüssigkeit zeigte sich, dass die spektrale Verbreiterung und zeitgleiche Verschiebung zu tieferen Frequenzen ebenfalls erheblich abnehmen.

Der erste Einsatz der PULSE-Einheit mit dem neuen IQ6-Hammer von *IQIP b.v.* erfolgte im Sommer 2023 in einem deutschen OWP-Bauvorhaben. Die ersten Ergebnisse deuten darauf hin, dass das Zusammenspiel zwischen IQ6 Hammer und PULSE-Einheit hinsichtlich der Installation von Monopfählen auf Endtiefe gut funktioniert, jedoch projektspezifische Anpassungen in der Rammprozedur bzw. an der PULSE-Einheit notwendig sind, damit ein schalloptimiertes Rammverfahren zur Anwendung kommt und zusätzlich keine Beschädigung an der PULSE Einheit, dem Hammer oder dem zu rammenden Monopfahl auftritt.

Für die PULSE-Einheit liegen erste Messdaten mit und ohne diese Einheit aus Offshore-Tests in der deutschen Ostsee vor. Diese Daten deuten darauf hin, dass eine Gesamtschallreduzierung in Kombination mit (Nah- und Fernfeld) Schallschutzsystemen nach Stand der Technik (Bellmann et al., 2020) zwischen 4 und 6 dB auf dem Einzelereignispegel erreicht werden kann; etwas höhere Gesamtschallreduzierungen werden für den Spitzenschalldruckpegel bei Verwendung der Maximaleinstellung erreicht. Für die PULSE-Einstellung P_{med} (400 mm) wurde eine Gesamtschallreduzierung von 2 bis 5 dB gemessen. Je geringer die Füllstandhöhe in der PULSE Einheit desto geringer die daraus resultierende Schallminderung.

Zudem existieren Hinweise, dass die zu erzielende Schallminderung nur bei Verwendung der PULSE Einheit in Kombination mit einem schalloptimiertem Rammverfahren, aber ohne Nah- und Fernfeld Schallschutzsysteme größer ausfällt. Damit ist indirekt der Nachweis geführt, dass die spektrale Verbreiterung und zeitgleiche Verschiebung zu tieferen Frequenzen die Einfügungsdämpfung jedes Schallschutzsystems nach Stand der Technik negativ beeinflusst, da eine Schallminderung zu tieferen Frequenzen technisch immer schwieriger wird.

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 oben beschriebene Frequenzverschiebung zu tieferen Frequenzen mit zeitgleicher spektraler Verbreiterung ebenfalls zu beobachten ist. Allerdings liegen derzeit keine verlässlichen Pfahlüberwachungsdaten (engl. pile monitoring) vor, so dass derzeit nicht

quantifiziert werden kann, ob und wie viele Energieverluste durch diese neue Hammertechnologie entstehen. Zudem fehlen ebenfalls empirische Messdaten unter Verwendung mit und ohne MNRU, sowie Anwendungen ohne zusätzliche Nah- und Fernfeld Schallschutzsysteme.

Daher wird die gleiche Annahme hinsichtlich der Gesamtschallreduzierung (4 bis 5 dB Breitband) zugrunde gelegt und keine Frequenzverschiebung oder Energieverluste berücksichtigt.

8.2 Schallschutzsysteme (NAS)

Derzeit sind Schallminderungen für den *SEL* von bis zu 15 dB durch die Verwendung eines einzelnen NAS möglich, und durch die Anwendung einer Kombination von zwei NAS konnten Schallminderungen von 20 dB bei Wassertiefen von bis zu 40 m und moderaten Strömungen ($\leq 0,75$ m/s) erreicht werden (Bellmann et al., 2020). Die Gesamtreduktion jedes NAS hängt wesentlich von technisch-konstruktiven Faktoren wie die Integration im Errichtungsprozess und standortspezifischen Faktoren wie z. B. der Wassertiefe ab. Daher müssen alle NAS projektspezifisch angepasst werden.

Die erzielte Gesamtschallreduzierung eines einzelnen NAS oder von Kombinationen aus zwei NAS weist Abweichungen von mehreren Dezibel auf, insbesondere bei der Anwendung von NAS-Kombinationen, selbst wenn technische Probleme oder Fehlfunktionen der verwendeten NAS ausgeschlossen werden können (Bellmann et al., 2020), (Bellmann et al., 2018). Die Erfahrungen haben jedoch gezeigt, dass nicht projektspezifisch optimierte NAS oder technische Probleme die Gesamtschallreduzierung erheblich beeinträchtigen (Bellmann et al., 2020). Außerdem ist die Gesamtschallreduzierung stark frequenzabhängig. So hängt die resultierende (einstellige) Schallminderung von der spektralen Zusammensetzung des ungeminderten Rammschalls ab (ungemindertes Rammschallspektrum). Eine Erhöhung der Gesamtprognoseunsicherheit von mehreren Dezibel für die geminderte Rammung ist wahrscheinlich auf die Unsicherheiten bei der Prognose des ungeminderten Spektrums sowie auf die erreichbare Schallminderung durch das angewandte NAS zurückzuführen.

8.2.1 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 und 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 wird die Gesamtschallreduzierung leicht zunehmen.

Ausschlaggebend für einen erfolgreichen Einsatz sind:

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

Die benötigte Luftmenge hängt von der Wassertiefe ab, die sich aus dem statischen Druck des umgebenden Wassers ergibt. 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 (DP, verankertes schwimmendes Schiff oder Hub(schlepp)kahn) 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):

- Lochgröße (Durchmesser) und Lochabstand: 1 – 2 mm alle 20 – 30 cm
- Verwendete Luftmenge: $\geq 0,5 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$
- Abstand der Düsenschläuche: \geq eine Wassertiefe zwischen 1. und 2. BBC
- Der typische Düsenschlauchdurchmesser beträgt derzeit 100 mm, was die Gesamtlänge eines einfachen BBC aufgrund der dynamischen Grenzen der Luftströmung auf 1.000 m begrenzt.
- Regelmäßige Wartung der verwendeten Düsenschläuche.
- Keine turbulenzerzeugenden 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).

8.2.2 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.

8.2.3 IQIP -Noise Mitigation Screen (IHC-NMS)

Das IQIP-Noise Mitigation Screen (IQIP -NMS)) wurde von der Firma *IQIP bv* entwickelt und gebaut. Er 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.

³ Typischerweise kann der Druck der Druckluft an Bord des BBC-Versorgungsschiffes am Verteiler gemessen werden. Erfahrungsgemäß sinkt der Druck in den Düsenschläuchen mit zunehmender Entfernung zum Verteiler aufgrund physikalischer Parameter wie Wasser, Temperatur, etc. sowie aufgrund der Tatsache, dass die Luft den Düsenschlauch auf dem Meeresboden verlässt. 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.

Bei der Anwendung dieses pfahlnahen Lärmschutzsystems mit mehreren hundert Anwendungen innerhalb von neun deutschen OWP-Bauprojekten 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 eingesetzt werden kann.

Bisher wurde das IHC-NMS von Jack-Up Schiffen und schwimmenden Installationsschiffen in der Nordsee aus eingesetzt. Die mit dem IHC-NMS 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 2018/19 zeigen, dass Monopfähle mit einem Durchmesser von ca. 8 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.

Eine Anwendung für Monopfähle mit einem max. Durchmesser von bis zu 10 m ist für 2024 in der Nordsee geplant. Laut Herstellerangaben gilt es für unwahrscheinlich, dass eine weitere Variante für noch größere Monopfähle entwickelt wird.

8.2.4 Hydroschalldämpfer (Hydro Sound Damper – HSD)

Der Hydroschalldämpfer ist ein pfahlnahes Schallschutzsystem, welches nur in Kombination mit einem einfachen oder doppelten Großen Blasenschleier in Deutschland zum Einsatz kommen kann.

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 Monopile-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 (bis max. 12 dB).

8.2.5 AdBm Resonanzsystem

Derzeit wird ein weiteres pfahlnahes Schallminderungssystem der Firma *AdBm Corp* entwickelt. Die Wirkungsweise ist im Prinzip vergleichbar mit dem Hydroschalldämpfer (HSD) (Bellmann et al., 2020).

Stationäre "Helmholtz-Resonatoren", sogenannte Blockformen, mit einem festen (Luft-) Volumen werden durch eine Art Vorhang in der Wassersäule positioniert. Mittels einer Hebe- und Absenkmimik (ähnlich wie beim HSD-System) unterhalb des Pfahlgreifers (Pile Gripper) können die Blockformen auf den Meeresboden abgesenkt werden und den gesamten Monopfahl in der gesamten Wassersäule abdecken.

Die Größe der Blockformen, die Materialwahl und die Anzahl der Resonatoren sowie der Vorhang bzw. die Anzahl der Vorhänge sind einstellbar, so dass die resultierende Schallminderung sowie der jeweilige Frequenzbereich variiert und projektbezogen optimiert werden können, ähnlich wie beim HSD-System.

Bei der ersten Anwendung eines AdBm-Prototyps in einem niederländischen OWP-Projekt wurde eine Schallminderung erzielt, die etwas geringer ist als beim HSD (7 bis 8 dB, siehe <https://adbmttech.com/reporting/>). Auf der Grundlage der ersten Testanwendungen wurden jedoch mehrere Verbesserungsmöglichkeiten identifiziert, wie die Gesamtzahl der Resonatoren bzw. Vorhänge und die Größe bzw. das Volumen der Blockformen. Aus akustischer Sicht wird erwartet, dass mit mehreren Blockformgrößen und einer ausreichenden Anzahl von Blockformen eine ähnliche Gesamtschallreduzierung wie bei einem HSD-System erreicht werden kann.

Bei der ersten Offshore-Anwendung außerhalb der deutschen AWZ wurde jedoch nur eine Blockformgröße verwendet und es wurde eine breitbandige Schallminderung im unteren Frequenzbereich um die Eigenfrequenz der Blockform herum beobachtet. Das aktualisierte AdBm-System wird verschiedene Vorhänge mit unterschiedlichen Blockformgrößen enthalten, so dass erwartet werden kann, dass ein ähnlicher Frequenzbereich wie beim HSD-System gemindert werden kann.

Das AdBm entspricht jedoch weder in seiner ursprünglichen noch in der aktualisierten Systemform dem aktuellen Stand der Technik. Vor einem möglichen Serieneinsatz dieses neuartigen Schallschutzsystems sind Test- und Referenzmessungen nach DIN SEP 45653 (2017) notwendig.

9. Literaturverzeichnis

- Bellmann, Michael A.; Brinkmann, Jana; May, Adrian; Wendt, Torben; Gerlach, Stephan; Remmers, Patrick. „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, 2020.
- BMU. „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, 2013.
- BSH. „Measuring instruction for underwater sound monitoring – Current approach with annotations - Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie.“ 2011.
- BSH. „Standard: Untersuchung der Auswirkungen von Offshore-Windenergieanlagen auf die Meeresumwelt (StUK4).“ 2013.
- Collins, Michael D. „User’s Guide for RAM Versions 1.0 and 1.0 p.“ *Naval Research Lab, Washington, DC* 20375 (1995): 14.
- Danish Energy Agency. „Guidelines for underwater noise.“ *Energistyrelsen, Center for Energiressourcer*, 2023.
- GEBCO. *GEBCO Bathymetry - General Bathymetric Chart of the Oceans*. 2023. www.gebco.net.
- Gündert, S. „Empirische Prognosemodelle für Hydroschallimmissionen zum Schutz des Gehörs und der Gesundheit von Meeressäugern.“ *Masterarbeit an der Universität Oldenburg, Institut für Physik, AG Akustik*, 2014.
- ISO 18406. „ISO 18406:2017, Underwater acoustics – Measurement of radiated underwater sound from percussive pile driving.“ Standard, International Organization for Standardization, Geneva, CH, 2017.
- Kastelein, Ronald A., Jessica Schop, Lean Hoek, und Jennifer Covi. „Hearing thresholds of a harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) for narrow-band sweeps.“ *The Journal of the Acoustical Society of America* (Acoustical Society of America (ASA)) 138 (10 2015): 2508–2512.
- Koschinski, S., und K. Lüdemann. „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*, 2019: 1–42.

- Koschinski, S., und K. Lüdemann. „Stand der Entwicklungen schallminimierender Maßnahmen beim Bau von Offshore-Windenergieanlagen, report on behalf of BfN.“ *Bonn, Germany*, 2011: 1–83.
- Koschinski, Sven, und K. Lüdemann. „Development of noise mitigation measures in offshore wind farm construction.“ *Commissioned by the Federal Agency for Nature Conservation*, 2013: 1–102.
- Lucke, K., P. A. Lepper, M. A. Blanchet, und U. Siebert. „Testing the auditory tolerance of harbour porpoise hearing for impulsive sound.“ *Poster at: The Effects of Noise on Aquatic Life. International Conference Nyborg, Denmark*, 2007.
- MSRL. „Richtlinie 2008/56/eg des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Juni 2008 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Meeresumwelt (Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie).“ 2008.
- Nehls, G., und M. A. Bellmann. „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.*, 2015.
- Porter, M. B. „The BELLHOP manual and user's Guide.“ 31. January 2011. <http://oalib.hlsresearch.com/Rays/HLS-2010-1.pdf>.
- Thiele, R., und G. Schellstede. „Standardwerte zur Ausbreitungsdämpfung in der Nordsee.“ *FWG-Bericht 1980-7, Forschungsanstalt der Bundeswehr für Wasserschall und Geophysik*, 1980.
- Verfuss, Ursula K., Rachael R. Sinclair, und Carol Sparling. „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, 2019.