

Offshore Windpark „Gode Wind 3“

Prognose der zu erwartenden Hydroschallimmissionen während der Rammarbeiten

Projekt Nr.: 3384

Oldenburg, 31. März 2020

Version 8

Auftraggeber: Ørsted Wind Power A/S
Van-der-Smissen-Straße 9
22767 Hamburg

Bearbeiter: Patrick Remmers, B. Eng.
Robert Kühler, M. Sc.
Stephan Gerlach, M. Sc.
Dr. Michael A. Bellmann

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

Berichtsumfang: 31 Seiten



INSTITUT FÜR TECHNISCHE UND
ANGEWANDTE PHYSIK GMBH

Messstelle nach §29b BImSchG
für Geräusche

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

Dipl. Phys. Hermann Remmers
Dr. Michael A. Bellmann

Bankverbindung

Raiffeisenbank Oldenburg
IBAN:
DE80 2806 0228 0080 0880 00
BIC: GENO DEF1 OL2

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

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

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Aufgabenstellung.....	3
2. Schalltechnische Grundlagen	5
2.1 Pegelgrößen	5
2.2 Schallausbreitung in der Nordsee.....	8
3. Berechnungsgrundlagen.....	12
3.1 Aufbau des verwendeten Prognosemodells	12
3.2 Ermittlung des Quellpegels	14
3.3 Schalltechnisch relevante Eingangsdaten	17
4. Ergebnisse der Prognose	18
4.1 Spitzenpegel und Einzelereignispegel in 750 m Entfernung	18
4.2 Frequenzabhängiger Einfluss des Abstandes	18
4.3 Fehlerbetrachtung	22
5. Schallschutz	24
5.1 Verwendung von Schallschutzsystemen.....	24
5.1.1 Großer Blasenschleier (engl. Big Bubble Curtain)	25
5.1.2 IHC-NMS System	26
5.1.3 Hydroschalldämpfer (Hydro Sound Damper – HSD).....	26
5.1.4 Kombination aus Schallschutzsystemen	27
5.2 Reduzierung der Rammenergie	28
6. Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse	29
7. Verwendete Literatur.....	31

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Die *Ørsted Wind Power A/S* plant die Errichtung des Offshore-Windparks (OWP) *Gode Wind 3* in der deutschen Nordsee. Die Realisierung des Projekts ist für das Jahr 2023 geplant.

In dem geplanten Windpark sollen Offshore-Windenergieanlagen (OWEA) sowie das dazu notwendige Umspannwerk (USW) auf Monopfähle mit Durchmessern von bis zu 11,0 m errichtet werden. In dieser Prognose wird davon ausgegangen, dass der Baugrund in allen Plangebieten, ähnlich wie in den benachbarten Windparks, im Wesentlichen aus Sand und einem Sand-Ton-gemisch besteht.

Im Rahmen des Genehmigungsverfahrens sind u. a. die Auflagen des „*Standard, Untersuchung der Auswirkung von Offshore-Windenergieanlagen auf die Meeresumwelt (StUK 4)*“ des *Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)* zu beachten. In der Tabelle 4.3 der Technischen Anleitung des *StUK 4* 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.

Die *itap- Institut für technische und angewandte Physik GmbH* wurde beauftragt, Prognoseberechnungen für die während der Installation der Monopfähle zu erwartenden Unterwasserschalleinträge durchzuführen. Die nachstehende Prognose berücksichtigt maximale Ramme-nergien von 1.000 kJ bis 4.000 kJ für die Installation der Monopfähle mit 10,0 m und 11,0 m Durchmesser unabhängig ob diese als Fundament für das Umspannwerk oder die OWEAs dienen.

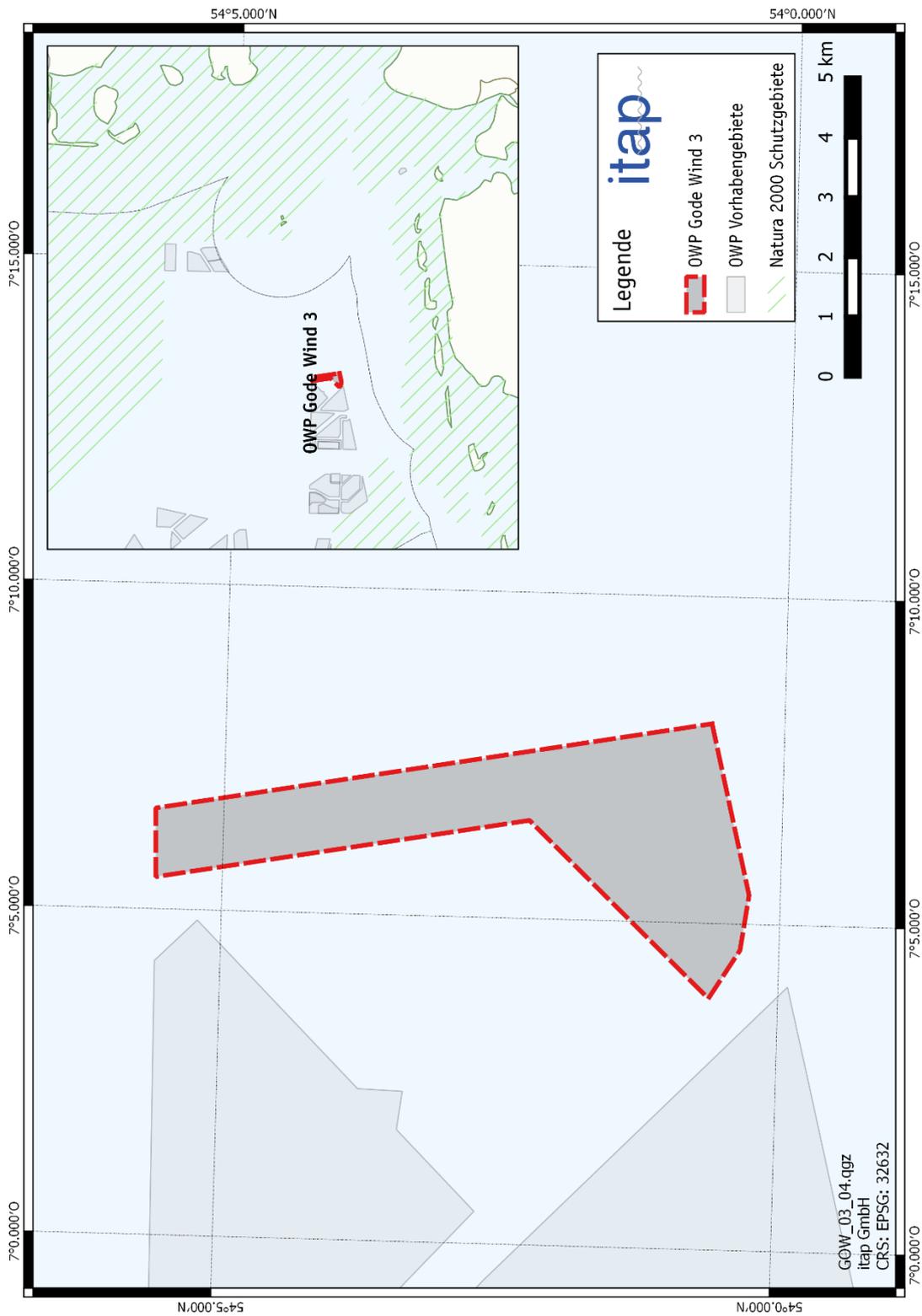


Abbildung 1: Lage des Windparks „Gode Wind 3“ in der deutschen AWZ.

2. Schalltechnische Grundlagen

Schall ist eine rasche, oft periodische Schwankung des Drucks, die dem Umgebungsdruck (im Wasser dem hydrostatischen Druck) additiv überlagert ist. Damit einher geht 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, mit der ein Teilchen um seine Ruhelage in einem Medium schwingt. Die Schallschnelle ist nicht mit der Schallgeschwindigkeit c_{Wasser} , also der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalles in einem Medium zu verwechseln, die in der Regel bei Wasser im Bereich von $c_{Wasser} = 1.500 \text{ m/s}$ liegt. Die Schallschnelle v ist deutlich kleiner als die Schallgeschwindigkeit c .

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

$$Z = \frac{p}{v} \quad \text{Gl. 1}$$

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

$$Z = \rho c \quad \text{Gl. 2}$$

mit ρ - Dichte des Mediums.

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 $\mu\text{m/s}$.

2.1 Pegelgrößen

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. Für die vorliegende Untersuchung sind folgende Pegelgrößen von Bedeutung:

- (Energie-) Äquivalenter Dauerschallpegel 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 $\geq 5\lambda$.

- 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). Mit dem vom *BSH* genannten Richtwert von 160 dB in 750 m Entfernung zu den Rammarbeiten ist der breitbandige Einzelereignispegel SEL (Einzahlwert) gemeint.

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

(Energie-) Äquivalenter Dauerschallpegel SPL

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

$$SPL = 10 \log \left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p(t)^2}{p_0^2} dt \right) \quad [\text{dB re } 1 \mu\text{Pa}^2] \quad \text{Gl. 3}$$

mit

- $p(t)$ - zeitlich varianter Schalldruck,
- p_0 - Bezugsschalldruck (bei Unterwasserschall 1 μPa),
- T - Mittelungszeit.

Einzelereignispegel SEL bzw L_E

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. Besser geeignet ist der Einzelereignis-pegel SEL der folgendermaßen definiert ist:

$$SEL = 10 \log \left(\frac{1}{T_0} \int_{T_1}^{T_2} \frac{p(t)^2}{p_0^2} dt \right) \quad [\text{dB re } 1 \mu\text{Pa}^2\text{s}] \quad \text{Gl. 4}$$

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, Abbildung 2),
- T_0 - 1 Sekunde.

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

Der SEL und der SPL können ineinander umgerechnet werden:

$$SEL = 10 \log \left(10^{SPL/10} - 10^{L_{hg}/10} \right) - 10 \log \frac{nT_0}{T} \quad [\text{dB re } 1 \mu\text{Pa}^2\text{s}] \quad \text{Gl. 5}$$

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 5 liefert somit aus einer L_{eq} -Messung den mittleren Einzelereignispegel SEL von n Schallereignissen (Rammschlägen). 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 5 folgendermaßen gerechnet werden:

$$SEL \approx SPL - 10 \log \frac{nT_0}{T} \quad [\text{dB re } 1 \mu\text{Pa}^2\text{s}] \quad \text{Gl. 6}$$

Spitzenpegel $L_{p,pk}$

Diese Größe ist ein Maß für Schalldruckspitzen. Im Gegensatz zum SPL und SEL gibt es keine Mittelwertbildung:

$$L_{p,pk} = 20 \log \left(\frac{|p_{peak}|}{p_0} \right) \quad [\text{dB re } 1 \mu\text{Pa}] \quad \text{Gl. 7}$$

mit

p_{peak} - maximal festgestellter positiver oder negativer Schalldruck.

Ein Beispiel ist in Abbildung 2 dargestellt. Der Spitzenpegel $L_{p,pk}$ ist stets höher als der Einzelereignispegel. In der Regel beträgt der Unterschied zwischen dem $L_{p,pk}$ und dem SEL bei Rammarbeiten 20 dB bis 25 dB. Gemäß der Empfehlung von Lärmschutzwerten bei der Errichtung von Offshore-Windenergieanlagen (Umweltbundesamt, 2011) soll statt des $L_{p,pk}$ der $L_{Peak-to-Peak}$ zur Beurteilung von Rammschallimmissionen herangezogen werden. Diese Größe beschreibt nicht den maximalen erreichten (absoluten) Schalldruckpegel, sondern die Differenz zwischen der negativen und der positiven Amplitude eines Impulses (Abbildung 2). Dieser Wert ist maximal 6 dB höher als der Spitzenpegel $L_{p,pk}$.

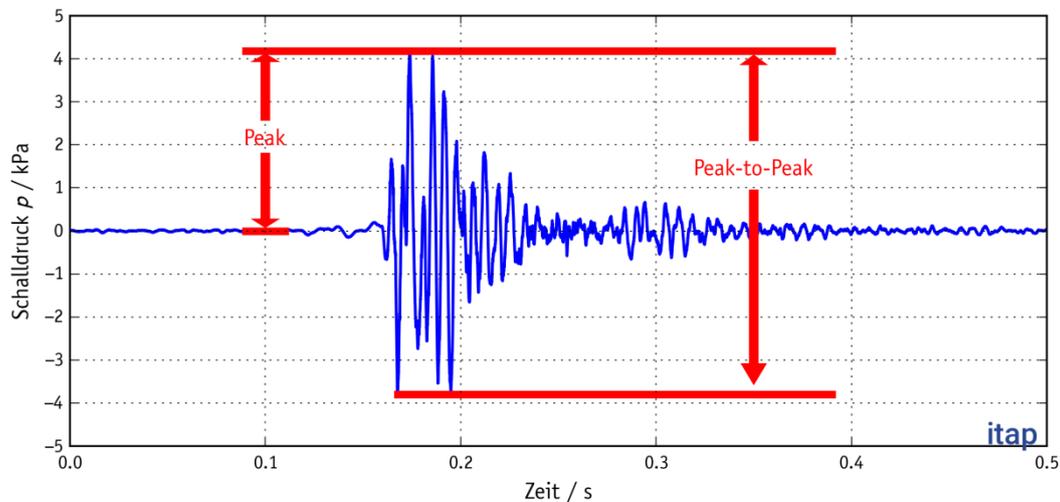


Abbildung 2: Typisches gemessenes Zeitsignal des Unterwasserschalls bei einem Rammschlag in 750 m Metern Entfernung.

2.2 Schallausbreitung in der Nordsee

Einfluss des Abstands

Für überschlägige Rechnungen kann angenommen werden, dass der Schalldruck mit der Entfernung nach einem einfachen Potenzgesetz abnimmt. Der Pegel in dB verringert sich dann um:

$$TL = k \cdot \log\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \text{ [dB]} \quad \text{Gl. 8}$$

mit

- r_1 und r_2 - Entfernung zur Schallquelle vergrößert sich von r_1 auf r_2 ,
- TL - Durchgangsdämpfung; engl. **T**ransmission **L**oss,
- k - Konstante (für die Nordsee kann $k = 15$ angesetzt werden).

Häufig wird die Durchgangsdämpfung bzw. TL für einen Abstand $r_1 = 1$ m (fiktiver Abstand zur punktförmig gedachten Quelle) angegeben. Die daraus zu berechnende Schallleistung eines Rammschlages in 1 m Entfernung wird auch als Quellpegel bezeichnet. Gleichung 8 vereinfacht sich dann zu $TL = k \log(r/\text{Meter})$. Diese einfache Rechnung berücksichtigt allerdings nicht die frequenzabhängige Abnahme des Schalldrucks mit zunehmender Entfernung. Zusätzlich gilt die o. g. Formel nur für das „Fernfeld“ eines akustischen Signals, d. h. in einem Abstand (frequenzabhängig) von der Quelle.

Zudem macht sich bei Abständen von einigen Kilometern die Absorption im Wasser bemerkbar und bewirkt eine weitere Verringerung des Schalldrucks. Die Absorption wird i.d.R. mit der Konstanten α proportional zum Abstand r beschrieben:

$$TL = k \cdot \log_{10} r + \alpha \cdot r \text{ [dB]} \quad \text{Gl. 9}$$

Die nachfolgende Ausbreitungsdämpfung ist für impulshaften Rammschall mit Wassertiefen von bis zu 50 m für die Nord- und Ostsee in der dänischen Richtlinie „Guideline for underwater noise – Installation of impact-driven piles“ (Energi Styrelsen, 2016) definiert:

$$TL = 14.72 \cdot \log_{10} r + 0.00027 \cdot r \text{ [dB]} \quad \text{Gl 10}$$

Die Gleichungen 9 und 10 berücksichtigen allerdings keine Frequenzabhängigkeit der Ausbreitung über größere Entfernungen. Bei großen Entfernungen besitzt zudem das Wetter einen Einfluss auf den Schallpegel im Wasser; bei starkem Wind und Seegang ist der Schalldruckpegel niedriger. Dies liegt an der größeren Oberflächenrauigkeit des Meeres und vor allem an dem erhöhten Lufteintrag durch Wellenschlag in die obere Meeresschicht.

Von Thiele und Schellstede (1980) wurden Näherungsformeln zur Berechnung der Schallausbreitung für verschiedene Gebiete der Nordsee sowie für „glatte“ und für „raue“ See veröffentlicht. Im Vergleich der Näherungsformeln mit Messdaten aus vergangenen Projekten (siehe Abbildung 3) führte die Näherungsformel für flache Gewässer bei glatter See (IIg) zu den geringsten Abweichungen:

$$TL = (27 + 1.1F)(\log(R) + 3) + (0.7 + 0.135F + 0.013F^2)R \text{ [dB]} \quad \text{Gl.11}$$

mit

$$F = 10 \log(f / [\text{kHz}]),$$

R – Abstand.

Strenggenommen gelten die Zusammenhänge aus Gleichung 11 nur für die Nordsee (Deutsche Bucht) bei guter Durchmischung des Wassers und ohne ausgeprägtes Schallgeschwindigkeitsprofil. Für die Prognose wird angenommen, dass eine vollständige Durchmischung des Wassers sowie kein ausgeprägtes Schallgeschwindigkeitsprofil im Untersuchungsgebiet zum Zeitpunkt der Rammarbeiten vorliegen.

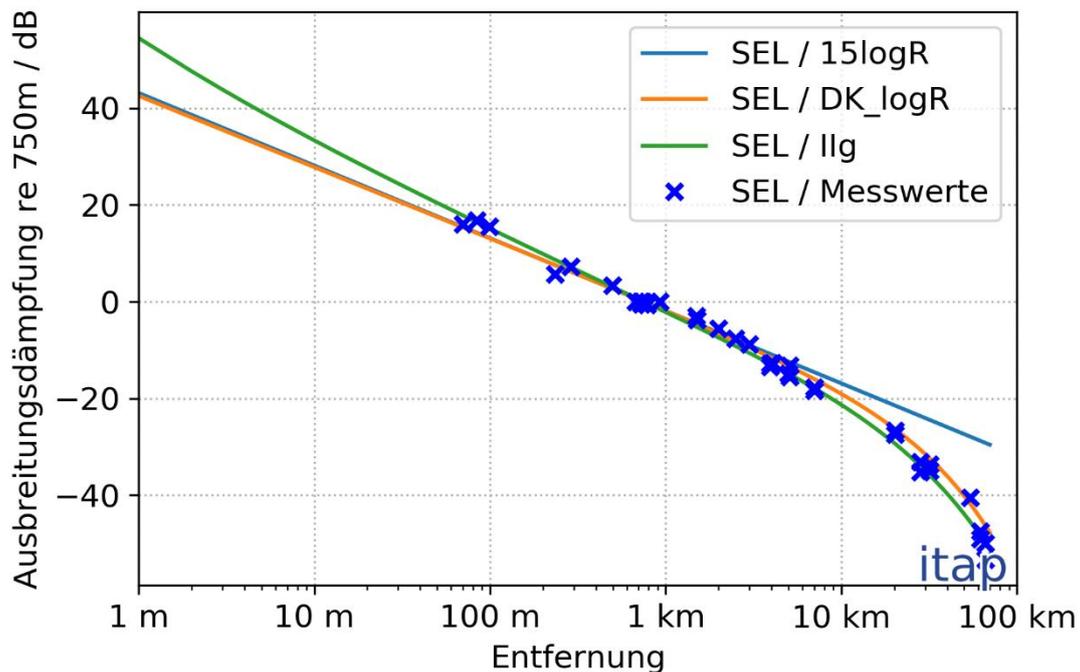


Abbildung 3: Vergleich unterschiedlicher Ausbreitungs­dämpfungen mit vorhandenen Messwerten. $15\log R$: geometrische Ausbreitungsfunktion, DK_logR : Ansatz nach dänischer Richtlinie (Energi Styreslsen (2016) (Gl. 10), IIg : semi-empirischer Ansatz nach Thiele und Schellstede (1980) für flaches Gewässer bei glatter See (Gl. 11).

Die Gleichung 10 und 11 weisen eine hohe Übereinstimmung mit realen Messdaten von impulshaltigen Rammschallmessungen ab Entfernungen von >100 m. Lediglich bei sehr geringen Entfernungen zur Quelle zeigen sich z.T. erhebliche Abweichungen zwischen den beiden Ansätzen zur Ausbreitungs­dämpfung. Aufgrund der Tatsache, dass der semi-empirischen Ansatz von Thiele & Schellstede (1980) explizit für die dt. AWZ der Nordsee gilt, wird dieser Ansatz im nachfolgenden verwendet.

Einfluss der Wassertiefe

Die Schallausbreitung im Meer wird ebenfalls von der Wassertiefe beeinflusst. Unterhalb einer bestimmten Grenzfrequenz ist keine kontinuierliche Schallausbreitung möglich; je flacher das Gewässer, umso höher ist diese Frequenz.

In Wassertiefen von ca 25 m liegt die Grenzfrequenz f_g je nach Sedimenttyp < 50 Hz (Urlick, 1983). In Abbildung 4 ist die untere Grenzfrequenz für vorwiegend sandige Böden als Funktion

der Wassertiefe dargestellt. Zudem sind die Bandbreiten der unteren Grenzfrequenz bei unterschiedlichen Bodenschichtungen, wie z. B. Ton und Geschiebemergel, schattiert dargestellt (Jensen *et al.*, 2010). Schall in der Nähe der Grenzfrequenz wird mit wachsender Entfernung zur Schallquelle stärker abgeschwächt bzw. gedämpft, als z. B. durch Gleichung 9 berechnet.

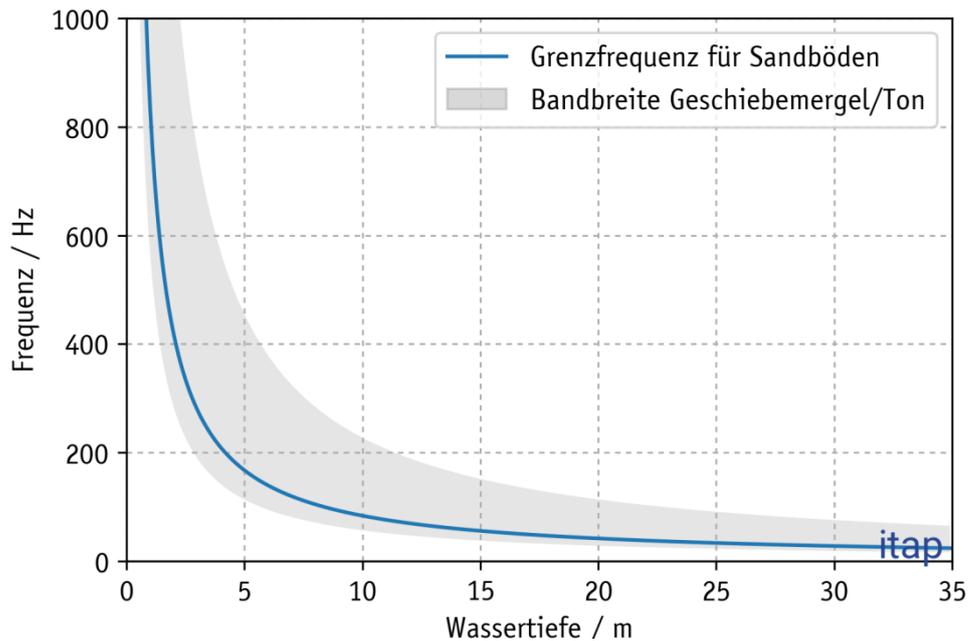


Abbildung 4: Theoretische untere Grenzfrequenz f_g für eine ungestörte Schallausbreitung im Wasser als Funktion der Wassertiefe für unterschiedliche Bodenschichtungen (Urlick, 1983; Jensen *et al.*, 2010).

3. Berechnungsgrundlagen

3.1 Aufbau des verwendeten Prognosemodells

Das (Standard-) Prognosegrundmodell der *itap GmbH* ist ein empirisches Modell, d. h. dieses basiert auf Messwerten für den Einzelereignispegel (SEL) und für den Spitzenpegel ($L_{p,pk}$) vergangener Projekte. Bei dieser Art von Modellen handelt es sich um ein „lernfähiges“ Modell, das mit zunehmenden Eingangsdaten „präziser“ wird.

Der abgestrahlte Schallpegel hängt von vielen unterschiedlichen Faktoren ab, wie z. B. der Wandstärke, der Rammenergie, dem Durchmesser und den Bodenbeschaffenheiten (Bodenwiderstand). Da jedoch alle genannten Parameter auch in Wechselwirkung zueinanderstehen können, können z. T. keine genauen Aussagen über den Einfluss eines einzelnen Parameters getroffen werden. Vielmehr werden im vorliegenden Modell alle Faktoren im ersten Schritt zu einem Parameter, dem „Pfahldurchmesser“, zusammengefasst.

In Abbildung 5 sind einige Messdaten, die bei verschiedenen Rammarbeiten in der Vergangenheit gemessen wurden, über den Eingangsparameter „Pfahldurchmesser“ aufgetragen. Je größer die schallemittierende Fläche im Wasser ist, je größer ist auch der Schalleintrag. Das heißt, dass sich die beurteilungsrelevanten Pegelgrößen mit zunehmender Pfahloberfläche, also dem Pfahldurchmesser, erhöhen. Dieser Effekt ist jedoch nicht linear.

Die Prognoseunsicherheit beträgt unter alleiniger Berücksichtigung des Eingangsparameters „Pfahldurchmesser“ ± 5 dB und basiert auf der Streuung der tatsächlich vorhandenen Messergebnisse aus Abbildung 5, die vermutlich auf weitere Einflussfaktoren, wie z. B. die Rammenergie und abstrahlende Mantelfläche, zurückzuführen ist.

Ein derartiges, empirisches Modell ist nur statistisch valide innerhalb seiner „gemessenen“ Parametervariationen, d. h. im vorliegenden Fall für den Pfahldurchmesser von 0,8 m bis 8,10 m. Für kleinere oder größere Pfahldurchmesser dürfte aus wissenschaftlicher und statistischer Sicht diese Art des Prognosemodells nicht angewendet werden. Hintergrund ist, dass aus wissenschaftlicher Sicht bei einem empirischen Modell außerhalb der Parametervariation „keine belastbaren“ Aussagen über die Prognoseunsicherheit gewährleistet werden können.

Dieses Vorhersagemodell der *itap GmbH* wurde jedoch bereits in der Vergangenheit für größere Pfahldurchmesser als bisher gemessen eingesetzt, z. B. bei der Prognose der Windparks *Meerwind Süd/Ost*, *DanTysk* oder *Butendiek* in den Jahren 2012 und 2013 mit Pfahldurchmessern von 6,0 m (Prognose) bei damaligen vorliegenden gemessenen Pfahldurchmessern von max. 4,5 m oder dem Windpark *Hohe See* (2018) mit Pfahldurchmessern von 7,50 m (Prognose) bei tatsächlich installierten Pfählen mit 8,0 m Durchmesser. Der anschließende Abgleich zwischen den prädiktierten (Prognose) und den tatsächlich später gemessenen Pegelwerten wurde in jedem Fall durch die angegebene Prognoseunsicherheit (± 5 dB) adäquat abgedeckt. In den meisten Fällen überschätzte das Prognosemodell den Pegelwert in 750 m Entfernung leicht.

Somit ist eine Anwendung auch im vorliegenden Fall aus rein praktischen Gesichtspunkten möglich.

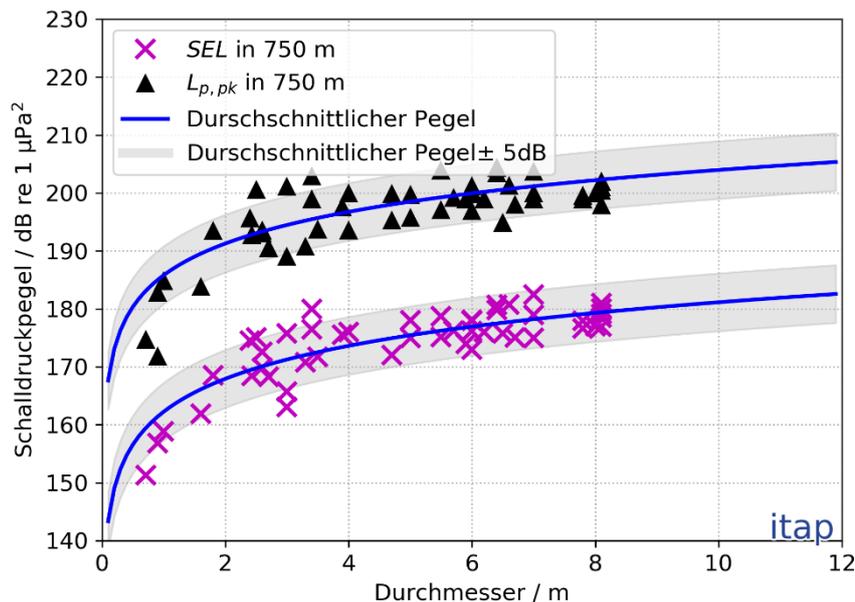


Abbildung 5: Gemessene Spitzenpegel ($L_{p,pk}$) und breitbandige Einzelereignispegel (SEL_{05}) bei Rammarbeiten diverser OWPs als Funktion des Pfahldurchmessers.

Zudem werden im Prognosemodell in einem zweiten Schritt Zu- bzw. Abschläge für besonders hohe und besonders geringe max. Rammenergien verwendet. Unter Berücksichtigung der tatsächlich eingesetzten bzw. in der Prognose angesetzten maximalen Rammenergie wurden i. d. R. Differenzen zwischen Prognose und realen Messwerten von um die 2 dB erzielt. In den meisten Fällen überschätzte das Prognosemodell mit den Eingangsdaten „Pfahldurchmesser“ und „max. Rammenergie“ den Pegelwert in 750 m Entfernung leicht.

Im Rahmen einer Masterarbeit in der *itap GmbH* konnte wissenschaftlich nachgewiesen werden, dass der Einfluss der verwendeten Rammenergie durchschnittlich rund 2,5 dB pro Verdopplung der Rammenergie beträgt (Gündert, 2014). Dieser Einfluss resultierte aus Untersuchungen an unterschiedlichen Fundamenten, an denen die Änderungen der Rammenergie im Verlauf einer Rammung (Eindringtiefe) mit den damit verbundenen Pegeländerungen statistisch verglichen wurden (jeweils von Soft-Start bis max. Rammenergie). Dieses Zusatzmodul für das bestehende Modell der *itap GmbH* ist somit in der Lage, bei genau vorgegebenen Rammenergieverläufen die beurteilungsrelevanten Pegelgrößen rammschlaggenau vorherzusagen. Die Prognoseunsicherheit dieses statistischen Modells (*itap GmbH* Grundmodell + Erweiterung) beträgt nachweislich ± 2 dB, wobei ebenfalls eine geringfügige Überschätzung durch dieses Modell nachgewiesen werden konnte.

Aus dieser wissenschaftlichen Arbeit geht hervor, dass die verwendeten Rammenergien und die Eindringtiefe ebenfalls einen großen Einfluss auf die resultierenden Schallimmissionen besitzen, wobei die Eindringtiefe signifikant mit der verwendeten Rammenergie korreliert ist. Unter Berücksichtigung der Einflussfaktoren „Pfahldurchmesser“, „max. Rammenergie“ und „Eindringtiefe“ konnte eine Prognoseunsicherheit im Bereich der Messgenauigkeit erreicht werden. Der größte Anteil der gemessenen Varianzen (siehe Abbildung 5) konnte somit auf die drei o. g. Einflussgrößen zurückgeführt werden.

Dieses Zusatzmodul kann im vorliegenden Fall jedoch nicht angewendet werden, da eine exakte Vorhersage der einzusetzenden Rammenergien über die gesamte Eindringtiefe (pro Schlag) nicht bzw. nicht ohne weitergehende „Unsicherheiten“ möglich ist. Aus diesem Grund werden Zu- und Abschläge für die maximale Rammenergie auf das bestehende (Standard-) Prognosemodell addiert (Prognosemodell mit zwei Schritten: 1. „Pfahldurchmesser“ und 2. „max. Rammenergie“). Basierend auf den Erfahrungen der vergangenen Jahre und den Erkenntnissen aus der Masterarbeit ist davon auszugehen, dass sich die Prognoseunsicherheit aufgrund der Berücksichtigung der o. g. Zu- und Abschläge erheblich verringern lässt.

3.2 Ermittlung des Quellpegels

Gemäß der Messvorschrift für Unterwasserschallmessungen (BSH, 2011) und der StUK4 ist zur Beurteilung der Rammschallimmissionen in Deutschland der Einzelereignispegel heranzuziehen, der bei 95 % aller Rammschläge an einem Fundament unterschritten wird (95 % Perzentilpegel entspricht dem SEL_{05}). Dieser variiert im Verlauf einer Rammung und hängt, wie bereits geschildert, von mehreren Parametern ab (z. B. abstrahlende Mantelfläche, Rammenergie, Bodenverhältnisse, Wandstärke, etc.). Für die Prognose wird im ersten Schritt lediglich der Pfahldurchmesser als Einflussparameter berücksichtigt.

Rammenergie: Die beurteilungsrelevanten Pegelgrößen (Einzelereignispegel und Spitzenpegel) erhöhen sich mit zunehmender Rammenergie (Kapitel 3.1). Basierend auf den Erfahrungen der vorangegangenen Bauvorhaben, insbesondere die Gründung von Monopfählen mit Durchmessern bis zu 8,0 m, wird ein Ausgangspunkt für die Bestimmung des Einflussparameters „max. Rammenergie“ angenommen. Davon ausgehend werden Zu- bzw. Abschläge von 2,5 dB pro Verdopplung/Halbierung für höhere bzw. niedrigere max. Rammenergien in der nachfolgenden Prognose angesetzt. Nach derzeitigem Planungsstand wird für die Installation der Monopiles vermutlich ein Rammhammer mit einer max. Rammenergie von bis zu 4.000 kJ eingesetzt. In der nachstehenden Prognose für die Monopiles werden unterschiedliche Szenarien mit maximalen Rammenergien zwischen 1.000 kJ und 4.000 kJ betrachtet, da derzeit noch keine abschließende Rammbarkeitsanalyse vorliegt.

Die Prognose wird unabhängig von dem einzusetzenden Rammhammer durchgeführt, da derzeit keine statistisch valide Absicherung der Einflussfaktor „verwendeter Rammhammertyp“ existiert.

Die o. g. Rammenergie des Rammhammers wird (falls überhaupt notwendig) erfahrungsgemäß nur kurzzeitig zum Ende einer Rammung für die Erreichung der Endtiefe genutzt.

Bodenkopplungen: Der Einfluss unterschiedlicher Bodenverhältnisse ist derzeit noch Gegenstand der Forschung. Jedoch ist zu vermuten, dass sich die verwendete Rammenergie mit zunehmendem Bodenwiderstand (SRD-Wert) einer Bodenschichtung ebenfalls erhöhen wird. Es ist jedoch nicht zu erwarten, dass es bedingt durch die Bodenverhältnisse im Baufeld zu erhöhten Schallimmissionen kommt. Ähnlich der in Abbildung 5 dargestellten Messdaten zu Grunde liegenden örtlichen Gegebenheiten besteht das Sediment im Baufeld überwiegend aus sandigen und schluffhaltigen Schichtungen. Ein Sicherheitszuschlag zur Berücksichtigung ungünstiger Bodenbeschaffenheiten ist nicht erforderlich.

Wassertiefe: Die Schallausbreitung im Meer wird ebenfalls von der Wassertiefe beeinflusst. Unterhalb einer bestimmten Grenzfrequenz ist keine kontinuierliche Schallausbreitung möglich; je flacher das Gewässer, umso höher ist diese Frequenz. Der Einfluss der Wassertiefe ist vernachlässigbar, sobald eine Mindesttiefe erreicht ist und alle Frequenzen ausbreitungsfähig sind (siehe Kapitel 2.2). Aufgrund der Wassertiefen in den Projektgebieten von bis zu 34 m sind keine Einflüsse der Wassertiefe auf die (einzahligen) akustischen Kenngrößen Einzelerignispegel und Spitzenpegel zu erwarten.

Spektrum des Rammschalls: Die in Kapitel 4.1 dargestellten Abschätzungen des einzahligen SEL- und $L_{p,pk}$ -Wertes basieren auf den breitbandigen Messdaten verschiedener Studien (Abbildung 5), d. h. auf Einzahlwerten. Die Schallausbreitung im Meer ist hingegen z. T. hochgradig frequenzabhängig, siehe Kapitel 2.2.

Für die Prognoseberechnungen müssen aus diesem Grund auch Annahmen über die Frequenzzusammensetzung der jeweiligen Quellpegel² getroffen werden.

Abbildung 6 zeigt die spektrale Verteilung der Einzelerignispegel, die bei Rammarbeiten an verschiedenen Pfählen messtechnisch ermittelt wurden (graue Linien). Die in unterschiedlichen Entfernungen sowie bei unterschiedlichen Rammenergien und Pfahldurchmessern ermittelten Spektren verlaufen ähnlich. Im Bereich von ca. 100 Hz bis 160 Hz weisen die Spektren

² Unter „Quellpegel“ ist der Einzelerignispegel oder der Spitzenpegel in einer fiktiven Entfernung von 1 m von der punktförmig gedachten Schallquelle zu verstehen.

für Monopfähle ein Maximum auf; zu hohen Frequenzen hin fallen diese flach, hingegen zu tiefen Frequenzen steil ab.

Aus Messungen der letzten zwei Jahre zeichnet sich ab, dass sowohl der Rammhammertyp, als auch der Pfahldurchmesser einen Einfluss auf das zu erwartende Rammschallspektrum haben kann. Tendenziell verschiebt sich das lokale Maximum bei größeren Rammhammertypen und größeren Pfahldurchmessern zu tieferen Frequenzen. Diese Einflussfaktoren sind jedoch derzeit statistisch noch nicht valide abzuschätzen.

Im Detail ist der spektrale Verlauf eines Rammschallereignisses nach heutigem Kenntnisstand nicht exakt vorhersagbar. Für die Prognoseberechnung wird deshalb ein idealisiertes Modellspektrum für den Einzelereignispegel aus den Messdaten vergleichbarer Bauvorhaben extrahiert. Die Form dieses idealisierten 1/3-Oktave-Spektrums ist in Abbildung 6 rot dargestellt. Die frequenzabhängigen Amplituden werden so bemessen, dass der Summenpegel dieses Spektrums in 750 m Entfernung den zuvor ermittelten Quellpegeln entspricht.

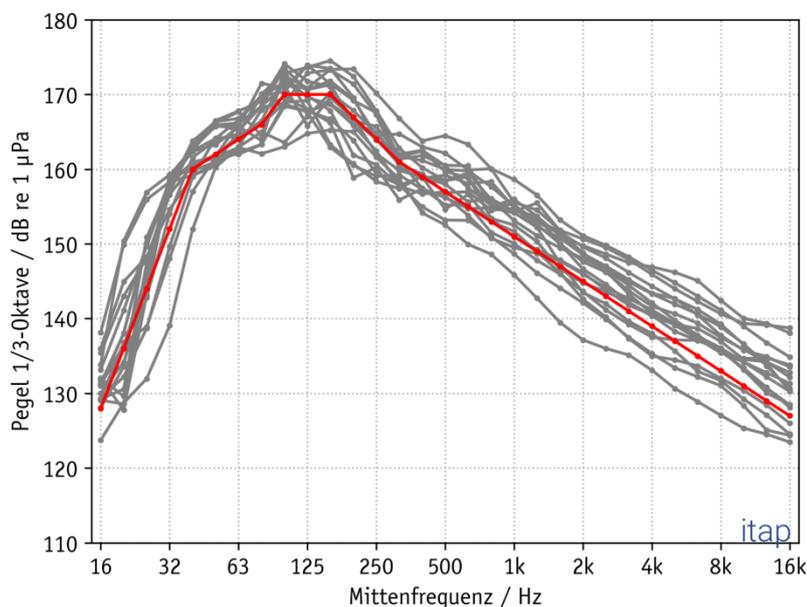


Abbildung 6: Für die Prognose des Rammschalls angesetztes Modellspektrum (rot) basierend auf verschiedenen Messdaten (grau dargestellt: Messdaten).

3.3 Schalltechnisch relevante Eingangsdaten

Für die Hydroschall-Prognoseberechnungen werden folgende Eingangsdaten und Modellannahmen verwendet:

Eingangsdaten für die Prognose

Monopfähle für OWEA und USW:

- Fundamenttyp: Monopile
- Rammmethode: pre-piling
- Pfahldurchmesser: 10,00 m / 11,00 m
- Wassertiefe: 28 bis 34 m (LAT)
- Rammenergie: 1.000, 1.500, 2.000, 2.500, 3.000 & 4.000 kJ

Modellannahmen für die Prognose:

- Eingangsparameter #1: Pfahldurchmesser
- Eingangsparameter #2: Rammenergie: Ausgangswert 2.600 kJ;
2,5 dB Zu- oder Abschlag pro Verdopplung bzw.
Halbierung der Rammenergie;
- Bodenverhältnisse: keine Zu- oder Abschlüge
- Mantelfläche: konstant, keine Zu- oder Abschlüge,
siehe Kapitel 4.3
- Wassertiefe: keine Zu- oder Abschlüge
- Rammverfahren: keine Zu- oder Abschlüge
- Ausbreitungsdämpfung: nach Thiele & Schellstede (1980) II_g

4. Ergebnisse der Prognose

4.1 Spitzenpegel und Einzelereignispegel in 750 m Entfernung

Folgende beurteilungsrelevante Pegelgrößen sind bei der Errichtung der Monopiles und der Umspannstation bei unterschiedlichen Rammenergien in 750 m Entfernung zur Baustelle zu erwarten:

Table 1: Prognostizierte Pegelgrößen in 750 m Entfernung.

Durchmesser [m]	Max. Rammenergie [kJ]	Einzelereignispegel SEL ₀₅ in 750 m [dB re 1 µPa ² s]	Spitzenpegel L _{p,pk} in 750 m [dB re 1 µPa]
10 (Monopile)	1.000	178	201
	1.500	179	202
	2.000	180	203
	2.500	181	204
	3.000	182	205
	4.000	183	206
11 (Monopile)	1.000	178	201
	1.500	180	203
	2.000	181	204
	2.500	182	204
	3.000	182	205
	4.000	183	206

Für die Prognose wird der Einzelereignispegel (SEL₀₅) und der Spitzenpegel (L_{p,pk}) basierend auf den vorhandenen Eingangsdaten (Kapitel 3.3) separat und mittels des vorliegenden empirischen Prognosemodells berechnet (Modell-Version: 1.03).

4.2 Frequenzabhängiger Einfluss des Abstandes

Die in Kapitel 4.1 dargestellten Abschätzungen bzgl. des einzahligen SEL- und L_{p,pk}-Wertes basieren auf den breitbandigen Messdaten verschiedener Studien, d. h. auf Einzahlwerten. Die Schallausbreitung im Meer ist hingegen frequenzabhängig, siehe Kapitel 2.2 und 3.2.

Für das lauteste Szenario (4.000 kJ Rammenergie) sind für die in Tabelle 1 aufgeführten Pegelgrößen in 750 m Entfernung in Tabelle 2 bis Tabelle 3 Entfernungsbereiche angegeben, in denen ausgewählte Einzelereignispegel und Spitzenpegel bei Verwendung der halbempirischen Näherungsformel für die Ausbreitungsdämpfung nach Thiele & Schellstede (Gleichung 11) unter Berücksichtigung der spektralen Annahmen aus Abbildung 6 (Kapitel 3.2) erreicht werden.

Die darauffolgenden Abbildungen stellen die berechneten Einzelereignispegel für das lauteste Szenario (10 m Monopile und 11 m Monopile mit 4.000 kJ Rammenergie) grafisch dar.

Tabelle 2: Darstellung der berechneten Entfernungsbereiche, in denen ausgewählte Einzelereignispegel (SEL) bei der Rammung von Pfählen mit einem Durchmesser von 10,0 m und 11,0 m und maximaler Rammenergie von 4.000 kJ ohne Verwendung eines Schallschutzsystems erreicht werden.

Durchmesser [m]	Einzelereignispegel SEL [dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$]	max. Entfernung bei +5 dB Toleranz [km]	Entfernung bei erreichtem SEL ₀₅ [km]	min Entfernung bei -5 dB Toleranz [km]
10	180	2,11	1,01	0,57
	164	12,78	7,79	4,44
	160	18,11	11,65	6,99
	150	36,37	26,39	18,11
	145	47,93	36,37	26,39
11	180	2,25	1,18	0,60
	164	13,39	8,20	4,70
	160	18,84	12,20	7,37
	150	37,43	27,28	18,84
	145	49,13	37,43	27,28

Table 3: Darstellung der berechneten Entfernungsbereiche, in denen ausgewählte Spitzenpegel $L_{p,pk}$ bei der Rammung von Pfählen mit einem Durchmesser von 10,00 m und 11,0 m und maximaler Rammenergie von 4.000 kJ ohne Verwendung eines Schallschutzsystems erreicht werden.

Durchmesser [m]	Spitzenpegel $L_{p,pk}$ [dB re 1 μ Pa]	max. Entfernung bei +5 dB Toleranz [km]	Entfernung bei erreichtem $L_{p,pk}$ [km]	min Entfernung bei -5 dB Toleranz [km]
10	230	0,06	0,03	0,02
	224	0,13	0,07	0,04
	206	1,40	0,73	0,37
	200	3,02	1,60	0,83
	190	9,42	5,50	3,02
11	230	0,06	0,03	0,02
	224	0,14	0,07	0,04
	206	1,49	0,77	0,40
	200	3,12	1,70	0,88
	190	9,87	5,79	3,20

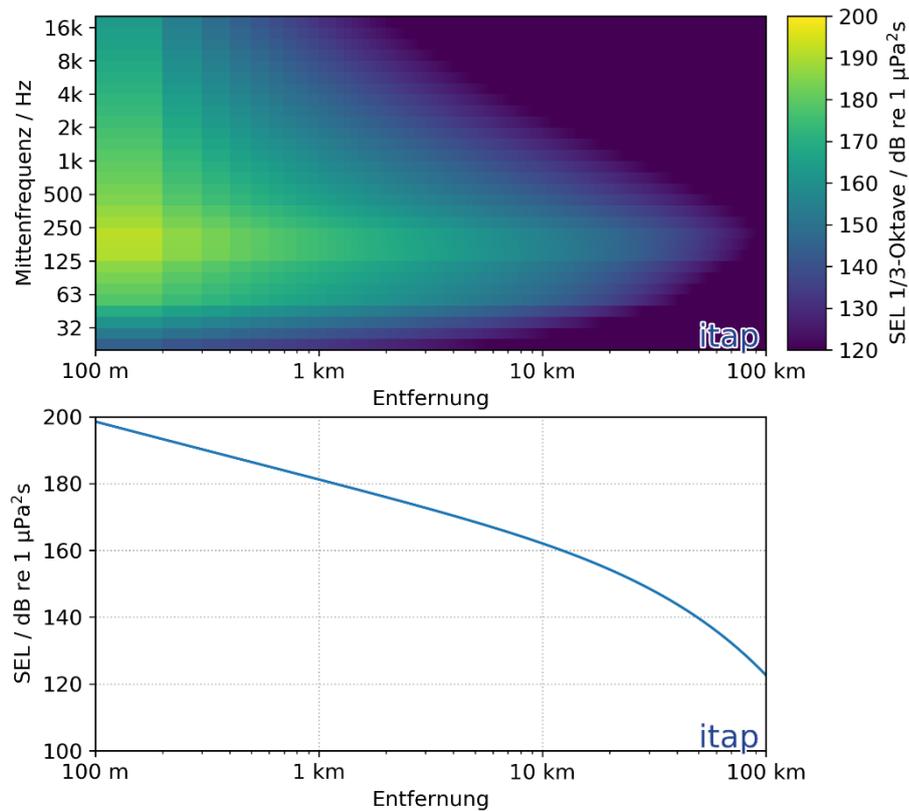


Abbildung 7: Prognostizierte Einzelereignispegel (SEL) der Rammgeräusche beim Rammen der Pfähle mit einem Durchmesser von 11,0 m ohne Verwendung eines Schallschutzsystems bei einer maximalen Rammenergie von 4.000 kJ als Funktion der Entfernung. Oben: frequenz aufgelöst in 1/3 Oktaven, unten: breitbandig.

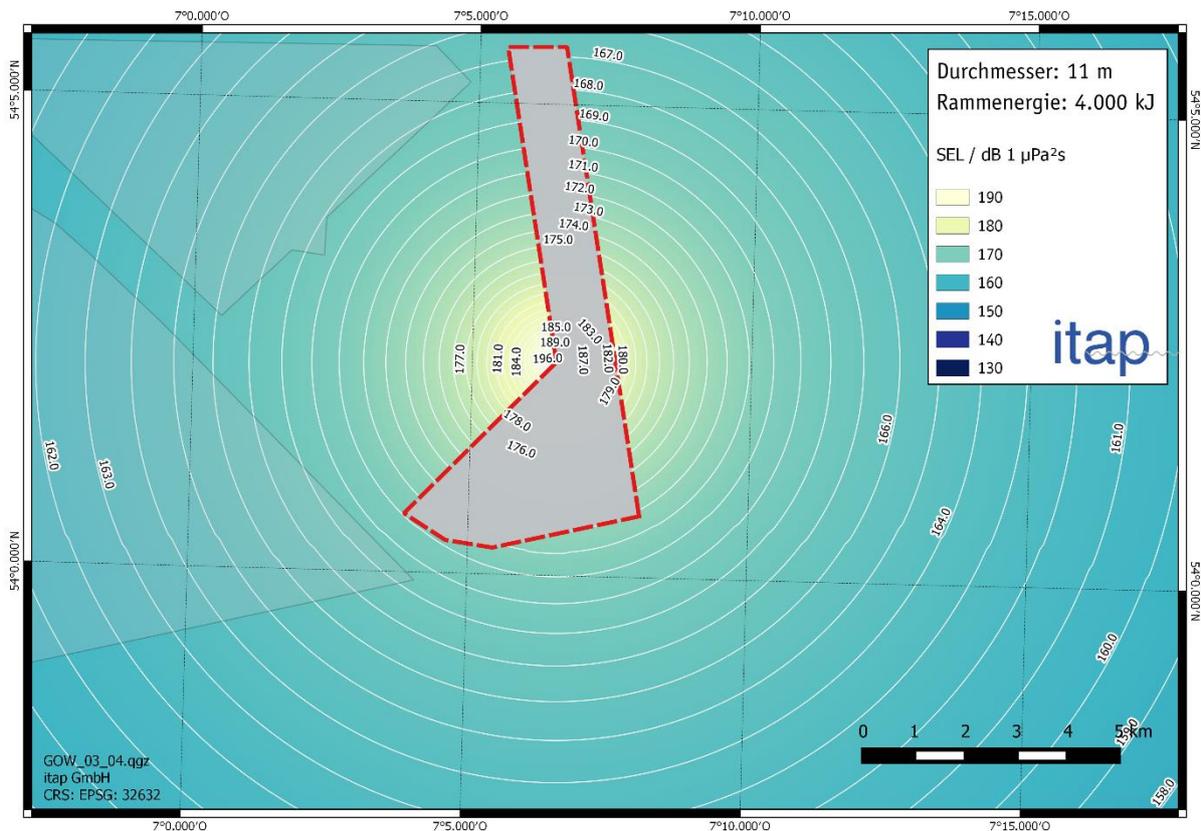


Abbildung 8: Schallausbreitung des prognostizierten Einzelereignispegels in der Nordsee. In diesem Modell wurden Monopiles mit einem Durchmesser von 11,00 m ohne Verwendung eines Schallschutzsystems bei einer maximalen Rammenergie von 4.000 kJ berücksichtigt.

4.3 Fehlerbetrachtung

Sowohl die Prognose der „Quellstärke“ bzw. „Quellpegels“ des Rammgeräusches und die Rammanalyse zur Festlegung der max. Rammenergien als auch die Prognose der Schallausbreitung unter Wasser (z. B. nach Thiele & Schellstede; Kapitel 2.2) sind mit einer gewissen Unsicherheit behaftet und damit auch die Ableitung von berechneten Pegelgrößen sowie ihren Einwirkradien, Kapitel 4.1 und 4.2.

Messungen aus den letzten Bauvorhaben (nicht veröffentlichte Daten aus dem Baumonitoring in den Jahren 2010 bis 2018 der *itap GmbH*) mit großen Monopiles zeigen allerdings vereinzelt, dass der Einzelereignispegel zum Ende einer Rammungen (trotz Erhöhung der Rammenergie um bis zu 25 %) konstant bleibt bzw. geringfügig abnimmt. Ein möglicher Erklärungsansatz hierfür ist ggfs. die hohe Einbindetiefe der Monopiles und die daraus resultierende erhöhte Steifigkeit des zu rammenden Pfahls. Dieses „Verhalten“ ist jedoch stark abhängig vom Fundamentstandort (individuelle Bodenbeschaffenheit).

Aus der Bestimmung des Quellpegels nur unter Verwendung des Eingangsparameters „Pfahldurchmessers“ resultiert eine Unsicherheit von ± 5 dB (Abbildung 5). In einem zweiten Schritt wurden Annahmen für den zweiten maßgeblichen Einflussparameter „max. Rammenergie“ getroffen und ausgehend von einem Ausgangswert Zu- bzw. Abschlüge berücksichtigt.

Aufgrund der vorliegenden Erkenntnisse zwischen Prognose und vorliegenden Messdaten ist davon auszugehen, dass sich die Prognoseunsicherheit unter Berücksichtigung des Einflussparameters „max. Rammenergie“ in der derzeitigen Version des verwendeten Prognosemodells deutlich reduziert. Ein Vergleich der Prognosen mit realen Messdaten aus den Jahren 2012 bis jetzt zeigt i. d. R. Unsicherheiten von ± 2 dB mit der Tendenz, dass das Prognosemodell mit den Eingangsparametern „Pfahldurchmesser“ und „max. Rammenergie“ die Pegelgrößen leicht überschätzt.

5. Schallschutz

Der Schalleintrag ins Wasser durch Rammaktivitäten (Rammschall) führt zu impulshaltigen Schallemissionen (sogenannter Rammschall), die die Meereslebewesen schädigen können (z. B. Lucke et al., 2009). Für den naturverträglichen Ausbau der regenerativen Energiequellen auf See ist daher die Reduzierung dieses Schalleintrags ins Wasser zwingend erforderlich. Dem Vorsorgeprinzip folgend setzte das BSH seit 2008 unter Einbeziehung der wissenschaftlichen Grundlagen und Anforderungen des Umweltbundesamts erstmalig weltweit ein duales Lärmschutzwertkriterium von 160 dB_{SEL} (einzuhalten durch den 5% Überschreitungspegel des Einzelereignispegels) und 190 dB_{Lp,pk} (einzuhalten durch den zero-to-peak Spitzenpegel), welches in 750 m Entfernung zum Emissionsort bei sämtlichen, lärmintensiven Bautätigkeiten mit impulshaften Schalleinträgen einzuhalten ist, fest.

Für die Einhaltung des dualen Lärmschutzwertkriteriums sind somit Maßnahmen zwingend notwendig:

- (i) Anwendung von (sekundären) Schallschutzsystemen (siehe Kapitel 5.1),
- (ii) Anwendung von Schallminderungsmaßnahmen (siehe Kapitel 5.2).

5.1 Verwendung von Schallschutzsystemen

Schallschutzsysteme reduzieren den durch den Rammvorgang ins Wasser eingeleiteten Schall. Derzeit sind durch den Einsatz eines einzigen Schallschutzsystems Schallreduzierungen für den Einzelereignispegel von bis zu 17 dB_{SEL} je nach projektspezifischen Rahmenbedingungen, wie Wassertiefe und Strömung, und technisch-konstruktiven Bedingungen, wie z. B. Fundamentdesign, möglich.

Durch die Kombination von zwei Schallschutzsystemen konnten projektspezifisch Schallreduzierungen von mehr als 20 dB_{SEL} erreicht werden. Dennoch sind alle verfügbaren Schallschutzmaßnahmen an die spezifischen Projektbedingungen anzupassen. Alle entwickelten und unter Offshore-Bedingungen getesteten Schallschutzsysteme weisen zudem teilweise hohe Abweichungen in der erzielten Schallminderung auf (Bellmann, 2014; Bellmann et al., 2018). Varianzen von > 5 dB konnten zumeist auf technische Probleme, Funktionsstörungen oder nicht projektspezifisch optimierte Systemkonfigurationen (insbesondere bei der Anwendung von Großen Blasenschleiern) des jeweiligen Schallschutzsystems zurückgeführt werden. Dennoch variieren die erzielten Schallminderungen auch bei optimierten Schallschutz-Systemkonfigurationen noch im einstelligen Dezibel-Bereich. Dies wurde sowohl bei einer Rammung an einem Standort (meist mehrere tausend Rammschläge pro Standort), als auch beim Vergleich mehrerer Standorte mit und ohne Schallschutzsystem festgestellt (Bellmann et al., 2018).

Darüber hinaus ist die Schalldämmung jedes Schallschutzsystems stark frequenzabhängig, so dass die resultierende (einzahlige) Schalldämmung von der spektralen Zusammensetzung des Rammschalls abhängt, ohne dass eine Schallschutzmaßnahme angewendet wird.

5.1.1 Großer Blasenschleier (engl. Big Bubble Curtain)

Eines der am häufigsten eingesetzten Schallschutzsysteme ist der Große Blasenschleier in einfacher und doppelter Ausführung (engl. single Big Bubble Curtain – BBC; double Big Bubble Curtain – DBBC). Der Große Blasenschleier ist dabei das einzige pfahlferne Schallschutzsystem, welches bereits im Serieneinsatz zur Anwendung kam und offshore-tauglich ist. Der Große Blasenschleier wurde dabei für alle bestehenden Fundamentstrukturen, die im Impulsrammverfahren am Meeresboden verankert wurden, eingesetzt.

Die Schallreduzierung von Großen Blasenschleiern hängt jedoch von vielen Faktoren ab. Nach derzeitigem Kenntnisstand sind nachfolgende Systemkonfigurationen für einen einfachen bzw. doppelten Großen Blasenschleier notwendig, um zweistellige Dezibel-Werte für die Schallminderungen zu erzielen. Bei Unterschreitungen der nachfolgenden Systemkonfigurationen zeigten sich z. T. Schallminderungen von deutlich unter 10 dB_{SEL}.

Systemkonfigurationen für einen optimierten einfachen / doppelten Großer Blasenschleier:

- Lochgröße (Durchmesser) und Lochabstand: 1 - 2 mm alle ca. 20 - 30 cm.
- Verwendete Luftmenge: $\geq 0,5 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$.
- Abstand der Düsensläuche: \geq eine Wassertiefe für einen doppelten BBC (strömungsabhängig).
- Gesamtlänge beider Düsensläuche: $\leq 1.800 \text{ m}$.
- Regelmäßige Wartung der eingesetzten Düsensläuche.
- Keine turbulenzerzeugenden Hindernisse in den Düsensläuchen.

Zudem ergaben sich in der Anwendung eines BBC/DBBC in den Jahren 2018/19 nachfolgende Erfahrungen, die in zukünftigen Projekten seitens des BSH vermutlich gefordert werden:

- Anzahl der Kompressoren wird begrenzt auf voraussichtlich 20 + 2 Ersatz.
- Es sind nur ölfreie Kompressoren (entspricht Luftqualität der Klasse 0 der ISO 8573-1, 2010 und einem Einsatz von Treibstoff nach EN590) einsetzbar.
- Es sind grundsätzlich neue Düsensläuche einzusetzen.

Aus der Praxis ist bekannt, dass der Unterschied zwischen einem einfachen und einem doppelten, optimierten Großen Blasenschleier mit annähernd vergleichbaren Systemkonfigurationen im Schnitt 3 dB beträgt. Erfahrungen haben gezeigt, dass Schallminderungen von 15 bis 16 dB mit einem DBBC bei Wassertiefen um 40 m möglich sind.

Die genaue Anpassung des Blasenschleiers an die örtlichen Gegebenheiten ist nicht Bestandteil der Prognose. Aufgrund der hohen Varianzen durch unterschiedliche Systemkonfigurationen lassen sich auch keine genauen Aussagen über die zu erwartende Lärmreduzierung treffen. Um die maximale Schallreduzierung eines Blasenschleiers zu erreichen, ist eine kontinuierliche Überwachung erforderlich, damit Störungen sofort behoben und Neueinstellungen schnell vorgenommen werden können.

5.1.2 IHC-NMS System

Das IHC-NMS-System ist ein pfahlnahes Schallschutzsystem und wurde bei bisher acht OWP-Bauvorhaben in der Nordsee bis zu Wassertiefen von ca. 40 m eingesetzt. Je nach Pfahldurchmesser und Wassertiefe wurden unterschiedliche Varianten des IHC-NMS eingesetzt. 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 bis 17 dB unabhängig von der Strömung installiert werden konnten.

Das IHC-NMS wurde allerdings bisher noch nicht in der Ostsee eingesetzt, so dass derzeit nicht abgeschätzt werden kann, ob ggfs. die besonderen Bodenverhältnisse mit Geschiebemergel und Kreide die zu erzielende Schallminderung aufgrund von Bodenkopplungen mindern könnte.

5.1.3 Hydroschalldämpfer (Hydro Sound Damper – HSD)

Der Hydroschalldämpfer ist ein weiteres, 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. 8 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 10 dB.

Bei einer Anwendung des HSD-Systems in der Ostsee ergaben sich geringere Schallminderungen, wobei derzeit nicht geklärt werden konnte, ob diese verminderte Schallminderung durch die speziellen Bodenverhältnisse in der Ostsee (Bodenkopplung) oder ein nicht optimales Design der Absenkvorrichtung verursacht wurde.

Das HSD-System wurde bisher nur einmalig als Prototyp bei der Pfahlgründung einer Jacket-Konstruktion im Pre-Piling-Verfahren eingesetzt, so dass die serienmäßige Verwendung bei den Rammarbeiten des OSS-Jackets derzeit nicht zur Verfügung steht.

5.1.4 Kombination aus Schallschutzsystemen

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass sich die Schallminderungen jedes einzelnen (separat) eingesetzten Schallminderungssystems in der (einzahligen) Summe nicht addieren, sondern spektral aufsummiert werden, d. h. zwei Schallminderungssysteme von je 13 dB Schallminderung bei Einzelanwendung ergeben bei zeitgleicher Anwendung in der Summe nicht 26 dB Schallminderung, sondern eine deutlich geringere Gesamtschallminderung.

IHC-NMS und einfacher bzw. doppelter Großer Blasenschleier

Die Kombination aus einem einfachen bzw. doppelten Großen Blasenschleier und einem IHC-NMS konnte in der Nordsee bei Pfahldurchmessern von bis zu 8 m und Wassertiefen bis zu 40 m erfolgreich zur Anwendung gebracht werden.

Mit der Kombination aus DBBC und IHC-NMS konnten im Mittel Schallminderungen von etwas mehr als 20 dB erzielt werden; bei der Verwendung eines einfachen statt eines doppelten BBCs zeigten sich im Mittel Schallminderungen von bis zu 19 dB.

HSD und einfacher bzw. doppelter Großer Blasenschleier

Zumeist wurde die Kombination aus HSD und DBBC in der Nord- und Ostsee bei Pfahldurchmessern von bis zu 8 m und Wassertiefen bis zu 40 m eingesetzt. In der Nordsee ergaben sich im Mittel Schallminderungen von 18 bis 19 dB.

In einem OWP Bauvorhaben in der deutschen Ostsee wurde diese Kombination ebenfalls einmalig in Serie eingesetzt. Hierbei zeigte sich eine deutlich größere Varianz in der erzielten Schallminderung, die vermutlich auf den Effekt der Bodenkopplung und dem ggfs. nicht

schalloptimierten Design der Hebevorrichtung des HSD-Systems zurückzuführen ist. Tendenziell lassen sich jedoch vermutlich etwas höhere Schallminderungen als in der Nordsee mit dieser Kombination aus Schallschutzsystemen aufgrund der sehr geringen Strömung – und damit geringen Verdriftungseffekte beim DBBC – erzielen.

5.2 Reduzierung der Rammenergie

Eine weitere Möglichkeit der Unterwasserschallreduzierung ist, wie bereits erwähnt, die Reduzierung der eingesetzten Rammenergie (Gündert, 2014). Hierbei handelt es sich um eine Schallminderungsmaßnahme, d. h. nicht der bereits ins Wasser eingetragene Schall wird gedämmt, sondern der Quellpegel wird reduziert.

Empirisch ist von einer Reduzierung von ca. 2 bis 3 dB pro Halbierung der Rammenergie auszugehen (Gündert, 2014). Basierend auf diesen Erkenntnissen hat sich in den letzten Jahren ein sogenanntes „schalloptimiertes“ Rammverfahren in Deutschland etabliert. Dabei wird ein möglichst großer Rammhammer der neuesten Generation (≥ 3.000 kJ) mit einer reduzierten Kapazität von ca. 50 bis 60 % der maximal möglichen Rammenergie eingesetzt. Zeitgleich wird durch Anhebung der Schlagwiederholungsfrequenz (engl. blow rate) und der Anzahl der Rammschläge pro 25 cm Einbindetiefe (engl. blow count) der Rammprozess derart optimiert, dass die Vorgaben des BSH an die Gesamttrammdauer von 180 min für Monopfähle und 140 min für Jacket-Pfähle inkl. Vergrämungsmaßnahme eingehalten werden können.

Der Einsatz eines „schalloptimierten“ Rammverfahrens hängt sowohl von projektspezifischen Randbedingungen, wie z. B. Bodenwiderstand, als auch von technisch-konstruktiven Bedingungen, wie z. B. max. Einbindetiefe und Auswahl des Rammhammers inkl. hydraulischer Ansteuerung, ab.

Für die Anwendung eines „schalloptimierten“ Rammverfahrens wird eine Echtzeit-Unterwasserschallüberwachung in einem Abstand von 750 m nach BSH-Messvorschrift dringend empfohlen.

Quantitativ ist der Einsatz eines „schalloptimierten“ Rammverfahrens projektspezifisch auf wenige Dezibel beschränkt. Qualitativ ist die durch die Anwendung eines „schalloptimierten“ Rammverfahrens erhaltene Reduzierung der Quellstärke additiv zu der Anwendung von sekundären Schallschutzsystemen anzusehen.

6. Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse

Beim Bau der Offshore-Windparks *Gode Wind 3* sollen Offshore-Windenergieanlagen und das dazugehörige Umspannwerk auf Monopfähle mit Durchmessern bis zu 11,00 m errichtet werden. Im Rahmen des Genehmigungsverfahrens zum Bau der Windparks sind vor Baubeginn u. a. die zu erwartenden Unterwasserschallimmissionen während der Bauphase durch Prognoseberechnungen zu ermitteln. Die *itap- Institut für technische und angewandte Physik GmbH* wurde beauftragt, entsprechende Prognoseberechnungen durchzuführen.

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

- Es ergeben sich nachfolgende beurteilungsrelevante Pegelgrößen.

Durchmesser [m]	Max. Rammenergie [kJ]	Einzelereignispegel SEL ₀₅ in 750 m [dB re 1 µPa ² s]	Spitzenpegel L _{p,pk} in 750 m [dB re 1 µPa]
10 (Monopile)	1.000	178	201
	1.500	179	202
	2.000	180	203
	2.500	181	204
	3.000	182	205
	4.000	183	206
11 (Monopile)	1.000	178	201
	1.500	180	203
	2.000	181	204
	2.500	182	204
	3.000	182	205
	4.000	183	206

Bewertung der Unterwasserschalleinträge für die OWEA-Fundamente (Monopfähle)

- Der Lärmschutzwert von 160 dB_{SEL} wird voraussichtlich vom Einzelereignispegel (SEL₀₅) ohne Schallschutzmaßnahmen im Bereich von 18 dB bis zu 23 dB überschritten.
- Der Lärmschutzwert des Spitzenpegels von (L_{p,pk}) von 190 dB_{Lp,pk} wird voraussichtlich im Bereich von 11 dB bis zu 16 dB überschritten.

- Für die Einhaltung der o. g. Lärmschutzwerte sind entsprechende Schallschutzmaßnahmen zwingend erforderlich.
- Je nach verwendeter Rammenergie und ggfs. eingesetztem „schalloptimierten“ Rammverfahren ist das duale Lärmschutzwertkriterium z.B. durch die Anwendung einer Kombination aus IHC-NMS und BBC bzw. DBBC oder HSD und DBBC basierend auf Erfahrungen nach derzeitigem Kenntnisstand möglich. Alle eingesetzten Schallschutzsysteme müssten allerdings in einer projektspezifischen und optimierten Systemkonfiguration zum Einsatz kommen.
- Bis zum voraussichtlichen Baubeginn 2023 ist zudem zu erwarten, dass Rammhämmer einer neueren Generation mit Rammenergien von > 4.000 kJ auf dem Markt sind. Zudem werden gerade von beiden Rammhammerherstellern Modifikationen am Rammhammer entwickelt, die zu einer Reduzierung der Kraftspitzen und zu einer Verlängerung der Kraftübertragung zwischen Rammhammer und Pfahlkopf führen. Erste Anwendungen dieser modifizierten Rammhämmer sind für 2020 geplant. Es ist grundsätzlich davon auszugehen, dass ein derartiges Rammverfahren die Schallquelle reduziert und somit ggfs. die Anforderungen an die zu verwendenden Schallschutzsysteme reduziert. Es bleibt somit abzuwarten, in welcher Höhe diese Modifikationen die Schallquelle tatsächlich reduzieren können und diese neuen Rammhämmer ein offshore-taugliche Schallminderungsmaßnahme darstellen. 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. Grundsätzlich stellt die Wassertiefe im geplanten Bauvorhaben grundsätzlich für den Einsatz eines optimierten doppelten Großen Blasenschleiers derzeit schon kein Problem dar.
- Erst im Rahmen eines projektspezifischen Schallschutzkonzeptes ist nach der Auswahl der jeweiligen Schallschutzsystemhersteller und der Benennung der projekt-spezifischen Systemkonfiguration der ausgewählten Schallschutzsysteme eine empirische Evaluation der tatsächlich zu erwartenden Schallminderung durchzuführen.

Oldenburg, 31. März 2020



Patrick Remmers, B. Eng.



Dr. Michael A. Bellmann

7. Verwendete Literatur

- Bellmann, MA (2014)** Overview of existing Noise Mitigation Systems for reducing Pile-Driving Noise. Proceeding auf der Internoise 2014, Melbourne Australien.
- Bellmann MA., Kühler R., Matuschek R., Müller M., Betke K., Schuckenbrock J., Gündert S. and Remmers P. (2018)** Noise Mitigation for large foundations (Monopiles L & XL) – Technical options for complying with noise limits, presentation on the BfN Noise Mitigation Conference, November 22nd/23rd 2018 in Berlin.
- BSH (2011)** Messvorschrift für Unterwasserschallmessungen – Aktuelle Vorgehensweise mit Anmerkungen. Bericht im Rahmen des Forschungsvorhabens „Ökologische Begleitforschung am Offshore-Testfeldvorhaben Alpha Ventus zur Evaluierung des Standarduntersuchungskonzeptes des BSH (StUKplus)“, Förderkennzeichen 0327689A
- BSH (2013)** Offshore-Windparks – Prognosen für Unterwasserschall (Mindestmaß an Dokumentation. Bericht Nr. M100004/29 der Müller-BBM GmbH)
- Diederichs A, Pehlke H, Nehls G, Bellmann M, Gerke P, Oldeland J, Grunau C & Witte S (2014)** Entwicklung und Erprobung des „Großen Blasenschleiers zur Minderung der Hydroschallemissionen bei Offshore-Rammarbeiten (HYDROSCHALL OFF BW II), technischer Abschlussbericht, Förderkennzeichen 0325309 A/B/C.
- Danish Energy Agency (2016)** Guideline for underwater noise – Installation of impact-driven piles. Energistyrelsen, Center for Energiressourcer, April 2016.
- 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 18406 (2017)** Underwater acoustics – Measurement of radiated underwater sound from percussive pile-driving
- Jensen *et al.* (2010)** Jensen FB, Kuperman WA, Porter MB und Schmidt H (2010): Computational Ocean Acoustics. Springer Verlag, AIP Press
- Lucke K, Siebert U, Lepper PA & Blanchet MA (2009)** Temporary shift in masked hearing thresholds in a harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) after exposure to seismic airgun stimuli. The Journal of the Acoustical Society of America 125/6, S: 4060–4070. ISSN: 0001-4966
- Thiele & Schellstede (1980)** Standardwerte zur Ausbreitungsdämpfung in der Nordsee. FWG-Bericht 1980-7, Forschungsanstalt der Bundeswehr für Wasserschall und Geophysik
- TNO report (2011)** Standard for measurement and monitoring of underwater noise, Part II: procedures for measuring underwater noise in connection with offshore wind farm licensing, TNO, Den Haag
- Urlick (1983)** Principles of underwater sound, 3rd ed. Pensinsula Publishing, Los Altos