

Offshore Windpark „Gennaker“

Prognose der zu erwartenden Hydroschallimmissionen während der Rammarbeiten



Messstelle nach §26 BImSchG
für Geräusche und Erschütterungen

Akkreditiertes Prüflaboratorium nach
DIN EN ISO 17025

Akkreditiert durch:



Projekt Nr.: 2786-16

Oldenburg, 02. Juni 2016

Version 4

Auftraggeber: OWP Gennaker GmbH
Stephanitorsbollwerk 3
28217 Bremen

Bearbeiter: Patrick Remmers, B. Eng.
Dr. Michael A. Bellmann
Siegfried Gündert, M. Sc.

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

Telefon

(0441) 570 61-0

Fax

(0441) 570 61-10

Email

info@itap.de

Postanschrift

Marie-Curie-Straße 8
26129 Oldenburg

Geschäftsführer

Dr. Manfred Schultz-von-Glahn
Dipl. Phys. Hermann Remmers
Dr. Michael A. Bellmann

Sitz

Marie-Curie-Str. 8
26129 Oldenburg
Amtsgericht Oldenburg
HRB: 12 06 97

Bankverbindung

Raiffeisenbank Oldenburg
Kto.-Nr. 80 088 000
BLZ: 280 602 28

Berichtsumfang: 43 Seiten

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Aufgabenstellung.....	3
2. Schalltechnische Grundlagen	4
2.1 Pegelgrößen	5
2.2 Schallausbreitung in der Ostsee.....	8
3. Berechnungsgrundlagen.....	12
3.1 Aufbau des verwendeten Prognosemodells	12
3.2 Ermittlung des Quellpegels	15
3.3 Schalltechnisch relevante Eingangsdaten	19
4. Ergebnisse der Prognose	21
4.1 (Einzahlige) Spitzenpegel und Einzelereignispegel in 750 m Entfernung.....	21
4.2 Frequenzabhängigkeit des Quellpegels.....	22
4.2.1 OWEA Fundamente (Monopiles)	22
4.2.2 Umspannplattform (Jackets).....	25
4.3 Fehlerbetrachtung	29
5. Schallschutz	31
5.1 Allgemeine Anforderungen an ein Schallschutzsystem	31
5.2 Übersicht verschiedener Schallschutzsysteme	32
5.2.1 IHC-NMS System	32
5.2.2 Einfacher „Großer Blasenschleier“ (BBC)	33
5.2.3 Hydro Sound Damper (HSD)	35
5.2.4 Grout Annulus Bubble Curtain (GABC).....	36
5.2.5 AdBm Resonatorsystem.....	37
5.2.6 Geführter Blasenschleier – Conducted Bubble Curtain (CBC)	38
5.2.7 Kombination aus Schallschutzsystemen	38
5.3 Einfluss der verwendeten Rammenergie	40
6. Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse	41
7. Verwendete Literatur.....	44

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Die OWP *Gennaker GmbH* plant die Errichtung des Windparks (OWP) *Gennaker* in der deutschen Ostsee. Das Planungsgebiet des Windparks liegt ca. 15 km nördlich der Halbinsel Fischland-Darß-Zingst innerhalb der 12 Seemeilenzone und umschließt den bereits bestehenden Windpark *Baltic I* (Abbildung 1).

Im geplanten Windpark *Gennaker* sollen 103 Windenergieanlagen auf Monopiles mit Durchmessern von 7,00 m bis max. 8,00 m und zwei Umspannplattformen (USP) auf Jacket-Fundamenten errichtet werden. Der Baugrund im Plangebiet besteht im Wesentlichen aus Sand, Kreide, Geschiebelehm und tonigen Schichten.

Im Rahmen des Genehmigungsverfahrens wird u. a. gefordert, dass vor Baubeginn die zu erwartenden Unterwasserschallimmissionen während der Bauphase durch Prognoseberechnungen zu ermitteln sind. Die Prognoseberechnungen erfolgen gemäß der technischen Anleitung *Offshore-Windparks – Prognosen für Unterwasserschall* – (BSH, 2013).

Die *itap – Institut für technische und angewandte Physik GmbH* wurde beauftragt, Prognoseberechnungen für die während der Installation der Monopiles und der Umspannplattformen zu erwartenden Hydroschallimmissionen durchzuführen. Die nachstehende Prognose berücksichtigt maximale Rammenergien von 1.000 kJ bis 4.000 kJ in 1.000 kJ Schritten sowie die o. g. Durchmesser der Monopiles. Nach derzeitigem Planungsstand wird davon ausgegangen, dass 2.000 kJ nicht überschritten werden. Für die Gründung der Umspannplattformen sind Pfähle mit 3,00 m Durchmesser geplant. Eine Rammenergie von 1.000 kJ pro Schlag wird dabei voraussichtlich nicht überschritten. Die Prognose erfolgt dennoch für alle o. g. Rammenergien.

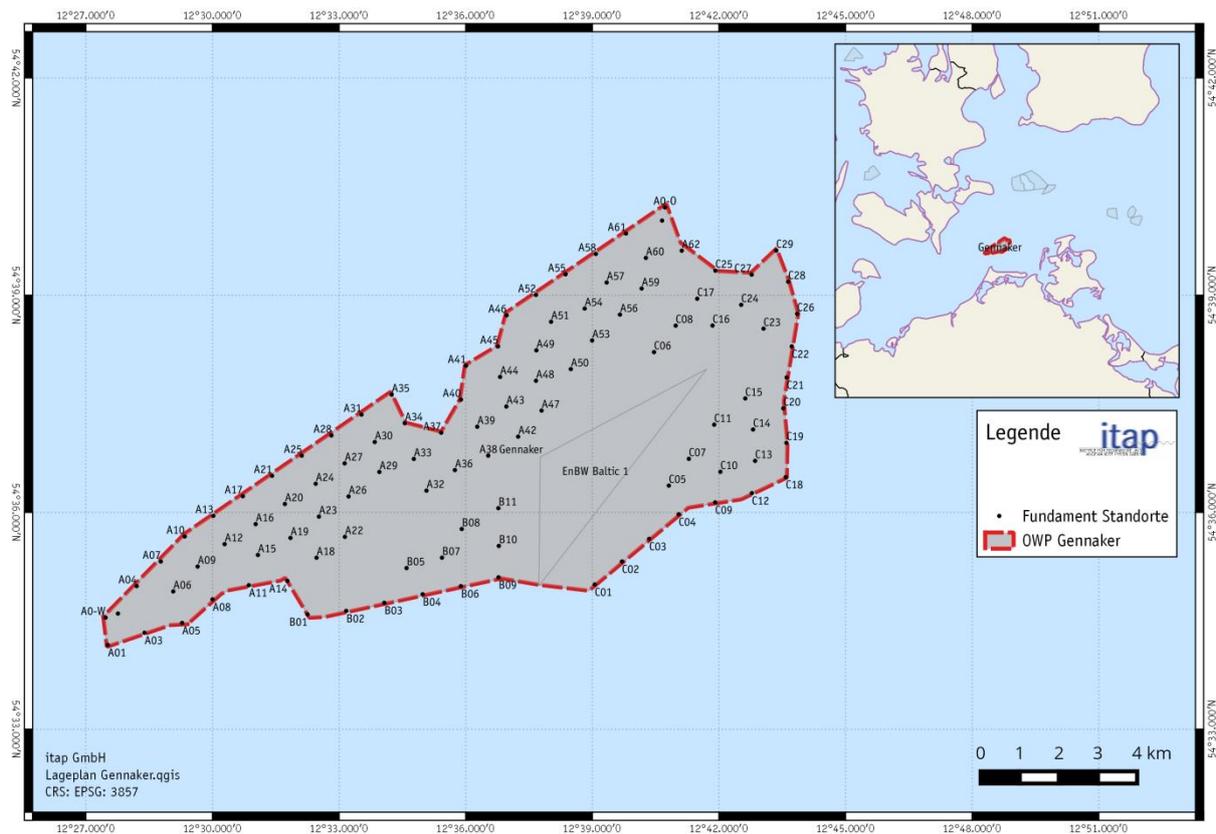


Abbildung 1: Lage des Windparks „Gennaker“.

2. Schalltechnische Grundlagen

Schall ist eine rasche, oft periodische Schwankung des Drucks, die dem Umgebungsdruck (im Wasser also 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 $c_{\text{Wasser}} = 1500 \text{ m/s}$ 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 im 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 L_{eq} (Mittelungspegel),
- Einzelereignispegel L_{E} (engl. Sound Exposure Level –SEL),
- Spitzenpegel L_{Peak} .

Der L_{eq} und der L_{E} bzw. SEL können sowohl frequenzunabhängig angegeben werden, d. h. als breitbandige Einzahlwerte, als auch frequenz aufgelöst, z. B. in 1/3-Oktav-Bändern (Terzspektrum). Zur besseren Unterscheidung vom Dauerschallpegel wird der Einzelereignispegel im Folgenden als SEL (von engl.: Sound Exposure Level) bezeichnet. Mit dem vom *BSH* und *Umweltbundesamt* 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.

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

(Energie-) Äquivalenter Dauerschallpegel L_{eq}

Der L_{eq} ist die gebräuchlichste Messgröße in der Akustik und ist definiert als

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

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 L_{eq} 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 Einzelereignispegel SEL bzw. L_E , der folgendermaßen definiert ist:

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

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 Pegel (L_{eq}) eines kontinuierlichen Schalls von 1 s Dauer und der gleichen Schallenergie wie der Impuls.

Der SEL und der L_{eq} können ineinander umgerechnet werden:

$$SEL = 10 \log \left(10^{L_{eq}/10} - 10^{L_{hg}/10} \right) - 10 \log \frac{n T_0}{T} \quad [dB \text{ re } 1 \mu Pa^2 s] \quad Gl. 5$$

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:

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

Spitzenpegel L_{Peak}

Diese Größe ist ein Maß für Schalldruckspitzen. Im Gegensatz zu L_{eq} und SEL gibt es keine Mittelwertbildung:

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

mit

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

Ein Beispiel ist in Abbildung 2 dargestellt. Der Spitzenpegel L_{Peak} ist stets höher als der Einzelereignispegel. In der Regel beträgt der Unterschied zwischen dem L_{Peak} 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_{Peak} 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_{Peak} .

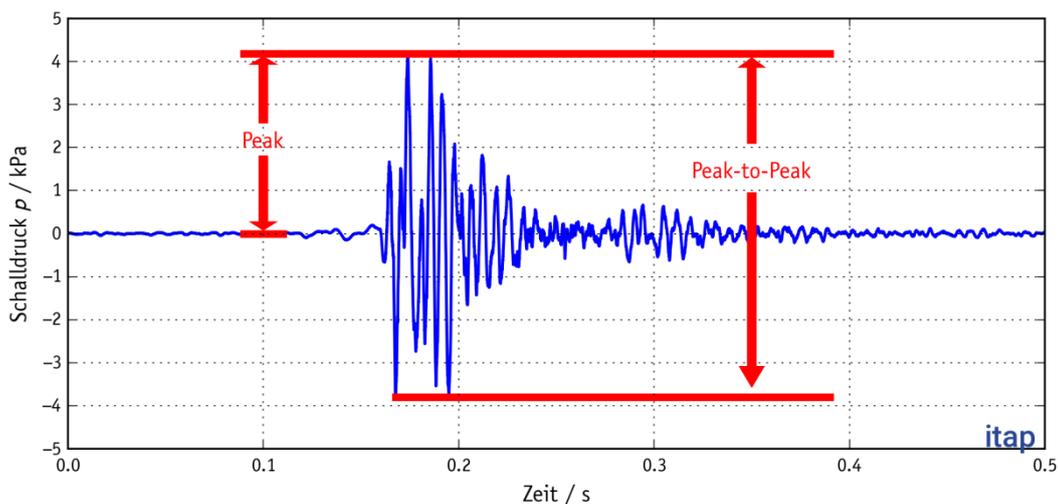


Abbildung 2: Typisches gemessenes Zeitsignal des Unterwasserschalls bei einem Rammschlag in 750 m Metern Entfernung.

2.2 Schallausbreitung in der Ostsee

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:

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

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 und Ostsee 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 einigem 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. Bei solch großen Entfernungen hat das Wetter ebenfalls 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.

Thiele und Schellstede (1980) haben 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. Für die Prognose wird daher dieselbe Ausbreitungsdämpfung (IIg) berücksichtigt:

$$TL = (27 + 1.1F)(\log(R) + 3) + (0.7 + 0.135F + 0.013F^2)R \text{ [dB]} \quad \text{Gl. 9}$$

mit

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

R – Abstand.

Vorraussetzung für eine Ausbreitungsdämpfung gemäß Gleichung 9 ist eine gute Durchmischung des Wassers 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.

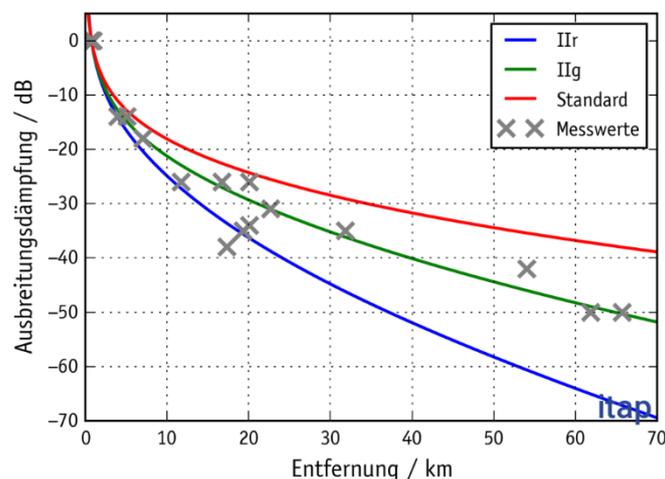


Abbildung 3: Vergleich unterschiedlicher Ausbreitungsdämpfungen nach Thiele und Schellstede mit vorhandenen Messwerten. IIr: flaches Gewässer bei rauher See, IIg: flaches Gewässer bei glatter See und Standard: allgemeine Formel (konservativer Ansatz).

Einflüsse von Salinen- und Temperaturschichtungen in der Ostsee

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

Infolge der unterschiedlichen Schichtungen können sich Kanäle bilden, in denen sich die Schallwellen mit einer deutlich geringeren Dämpfung ausbreiten können. Diese sogenannten „Schallkanäle“ entstehen in Bereichen, in denen die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls niedriger ist, als in den darüber und darunter liegenden Schichtungen. Da sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls unter Wasser mit zunehmender Temperatur oder Salinität erhöht, kommt es an den Übergängen zweier Schichtungen zu einer Beugung des Schalls in Richtung der Schicht mit der geringeren Ausbreitungsgeschwindigkeit. Tritt dieser Effekt an zwei gegenüberliegenden Grenzschichten (z. B. oben: höhere Temperatur, unten: höherer Salzgehalt) auf, kann sich der Schall aufgrund einer gerichteteren Verteilung der vorhandenen Schalleistung und geringerer Verluste durch Reflektionen innerhalb dieser Schichtung mit einer deutlich geringeren Dämpfung ausbreiten. Es entsteht ein „Schallkanal“. Dies funktioniert jedoch nur, wenn die Wellenlängen im Verhältnis zur Höhe des Schallkanals nicht zu groß werden. Damit die Schallmissionen von Rammschlägen, die üblicherweise im Frequenzbereich $\ll 1000$ Hz (maximale Schalleintragung ins Wasser zwischen 100 Hz und 200 Hz) liegen, in solchen Kanälen übertragen werden können, wären Schallkanäle mit einer tiefenabhängigen Ausdehnung $\gg 30$ m, d. h. horizontale Kanäle mit einer Höhe von $\gg 30$ m, erforderlich (Johnson, 1982). Dieses ist bei Wassertiefen von ca. 12 m bis 20 m, wie im Baufeld des Windparks vorliegen, nicht möglich.

Die Bundeswehr (WTD71) konnte in wenig befahrenen Bereichen der Ostsee den Einfluss von derartigen Schallkanälen auf akustische Signale mehrfach messtechnisch nachweisen (Vortrag auf der 2. DHU Schallschutztagung, Berlin, 2014). Der Effekt der Schallkanäle betrug 10 dB und mehr auf einer Distanz von mehreren Kilometern. D. h., Schall innerhalb des Schallkanals wurde um 10 dB weniger bei der Schallausbreitung über mehrere Kilometer in der Amplitude reduziert, als Schall ober- und unterhalb dieses Schallkanals. Jedoch wurde in diesem Vortrag deutlich darauf hingewiesen, dass es sich bei den Testsignalen nicht um Rammschall, sondern um (Sinus- oder Puls-) Signale in Frequenzbereichen von mehreren kHz handelte. Zudem betrug die Ausdehnung dieser Schallkanäle (in der Höhe) nur wenige

Meter. Somit sind die dort eingesetzten Schallsignale um einen Faktor 10 und mehr in der Frequenz höher (entspricht einer Wellenlänge von 1/10 und weniger), als der im vorliegenden Bericht betrachtete Rammschall. Zudem sei angesprochen, dass bei den Versuchen der Bundeswehr eine Punktschallquelle verwendet wurde, ein zu rammender Pfahl hingegen eine räumlich ausgedehnte Linienschallquelle darstellt. Der Einfluss der Quellcharakteristik auf die Weiterleitung in Schallkanälen ist derzeit noch nicht hinreichend wissenschaftlich untersucht worden.

Im abgeschlossenen Bauvorhaben *EnBW Windpark Baltic 2* wurden von der *itap GmbH* entsprechende Messungen der Salz-, Temperatur- und Schallgeschwindigkeitsprofile über die Wassertiefe an mehreren Tagen und Messpositionen nach Maßgabe des BSH mittels CTD-Sonden messtechnisch erfasst. Bei einer Messung im Spätsommer 2013, nach einer lang anhaltenden „Schönwetterperiode“, konnte einmalig ein Schallkanal messtechnisch erfasst werden. Die Ausdehnung dieses Kanals betrug um die 10 m in der Höhe. Diese räumliche Ausdehnung wurde ebenfalls durch vorhandene Messstationen in der Ostsee über die letzten Jahre seitens des BSH messtechnisch bestätigt. Zu dem Zeitpunkt wurde der Hydroschall zeitgleich in drei unterschiedlichen Höhen über Grund während der Rammaktivitäten aufgezeichnet. Dabei befanden sich ein Hydrophon unterhalb des Schallkanals, ein Hydrophon in der Mitte und ein Hydrophon am oberen Rand des Schallkanals. Die Messergebnisse bei dieser Rammung in mehreren Hydrophonhöhen besitzen eine Varianz von < 2 dB bei einer Messunsicherheit von 2 dB.

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

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 um die 18 m liegt die Grenzfrequenz f_g je nach Sedimenttyp in der Größenordnung von zwischen 40 Hz und 120 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.

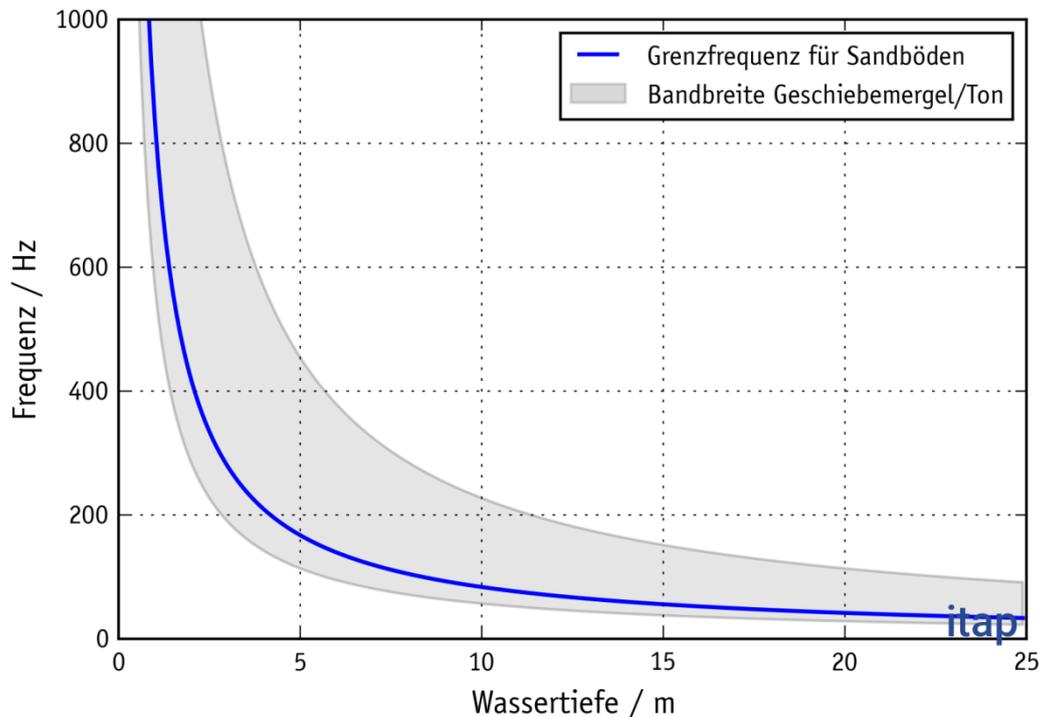


Abbildung 4: Theoretische untere Grenzfrequenz f_g für eine ungestörte Schallausbreitung im Wasser als Funktion der Wassertiefe für unterschiedliche Bodenschichtungen (Urlick, 1983; Jensen et al., 2010).

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_{Peak}) aus einer Vielzahl vergangener Projekte in der Nord- und Ostsee. Bei dieser Art von Modellen handelt es sich um „lernfähige“ Modelle, die mit zunehmenden Eingangsdaten „präziser“ werden.

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 zueinander stehen 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, desto 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 Pfahldurchmesser von 0,8 m bis 7 m. Für kleinere oder größere Pfahldurchmesser fehlen bislang wissenschaftliche Eingangsdaten. Hintergrund ist, dass aus wissenschaftlicher Sicht bei einem empirischen Modell außerhalb der Parametervariation „keine belastbaren“ Aussagen über die Prognoseunsicherheit vorgenommen 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. 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 und sinnvoll.

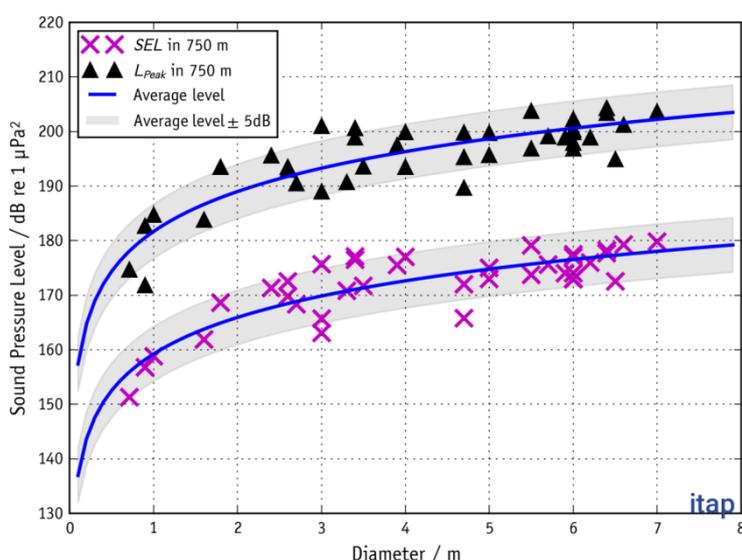


Abbildung 5: Gemessene Spitzenpegel (L_{Peak}) und breitbandige Einzelereignispegel (SEL_{50}) bei Rammarbeiten diverser OWPs als Funktion des Pfahldurchmessers.

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 Messungenauigkeit

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) zu diesem Zeitpunkt 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 dem 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 Pfählen mit Durchmessern bis zu 7 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.

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

Die o. g. maximale Rammenergie des Rammhammers wird (falls überhaupt notwendig) erfahrungsgemäß nur kurzzeitig zum Ende einer Rammung für die Erreichung der Endtiefe genutzt. Die Notwendigkeit einer Anhebung der Rammenergie besteht, wenn eine bestimmte Anzahl Schläge zur Erreichung einer Eindringtiefe überschritten wird (Risiko der

Materialermüdung bei zu hohen Schlagzahlen). Die Erfahrungen aus der Praxis zeigen, dass zumeist geringere Rammenergien verwendet werden, als zuvor im „worst case“ prognostiziert.

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. Da im Baufeld ein kreidehaltiger Untergrund mit teilweise festen Geschiebelehm-Einlagerungen vorhanden ist und die in Abbildung 5 dargestellten Messdaten größtenteils auf sandigem und mittelfestem, tonhaltigem Untergrund ermittelt worden sind, kann nicht ausgeschlossen werden, dass die zu erwartenden Schallimmissionen etwas oberhalb der in Abbildung 5 dargestellten Regressionsgeraden liegen. In der Prognose wird aus diesem Grund ein frequenzunabhängiger Sicherheitszuschlag von 2,0 dB für die Bodenbeschaffenheiten (Bodenkopplung) berücksichtigt. Diese Annahme bestätigte sich größtenteils bei Messungen in unterschiedlichen Offshore Windparks in der Ostsee.

Akustische Ankopplungen an die Jacket-Struktur: Für die Errichtung von Jacket-Fundamenten sind zwei unterschiedliche Installationsverfahren möglich. Das Pre-piling- und das Post-piling Verfahren. Beim Pre-piling, welches zur Installation der Jacket-Fundamente im OWP *Gennaker* eingesetzt werden soll, werden erst die Pfähle mittels Rammschablone in den Boden eingebracht und anschließend wird das Jacket-Fundament an die vorgesehene Position gesetzt. Im Post-piling Verfahren wird hingegen erst das Jacket-Fundament an die vorgesehene Position gesetzt und anschließend mit dem Rammpfählen am Grund fixiert. Aus schalltechnischer Sicht bergen beide Varianten das Risiko, dass sich Schallbrücken zwischen Pfahl und Fundamentstruktur oder Rammschablone bilden können, wodurch die Schwingungen des Pfahls auf das Fundament oder die Schablone übertragen werden. Die Folge wäre ein höherer Schalleintrag ins Wasser. Um eine mögliche akustische Ankopplungen zu berücksichtigen, wird in der Prognose für die Rammschallimmissionen der Jacket-Pfähle ein Sicherheitszuschlag von 2,5 dB vergeben.

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 Wassertiefe im Projektgebiet von ca. 12 bis 20 m sind keine beurteilungsrelevanten Einflüsse der Wassertiefe auf die (einzahligen) akustischen Kenngrößen Einzelereignispegel und Spitzenpegel zu erwarten.

Spektrum des Rammschalls: Die in Kapitel 4.1 dargestellten Abschätzungen des einzahligen SEL- und L_{Peak} -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 Einzelereignispegel, die bei Rammarbeiten an verschiedenen Pfählen messtechnisch ermittelt wurden (rote Linie). Die in unterschiedlichen Entfernungen sowie bei unterschiedlichen Rammenergien und Pfahldurchmessern ermittelten Spektren verlaufen ähnlich. Im Bereich von ca. 100 Hz bis 400 Hz weisen die Spektren ein Maximum auf, zu hohen Frequenzen hin fallen diese flach, hingegen zu tiefen Frequenzen steil ab. Unterschiede existieren in der Frequenzzusammensetzung der Rammschallspektren, insbesondere im Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 400 Hz.

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 blau dargestellt. Die frequenzabhängigen Amplituden werden so bemessen, dass der Summenpegel dieses Spektrums in 750 m Entfernung den zuvor ermittelten Quellpegeln entspricht. Das Prognosemodell der *itap GmbH* berechnet seit 2016 die beurteilungsrelevanten Pegelgrößen auf dem gemessenen Einzelereignispegel (SEL_5) und dem Spitzenpegel (L_{Peak}). Zuvor basierte das Modell auf mittlere Einzelereignispegel (SEL_{50}).

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

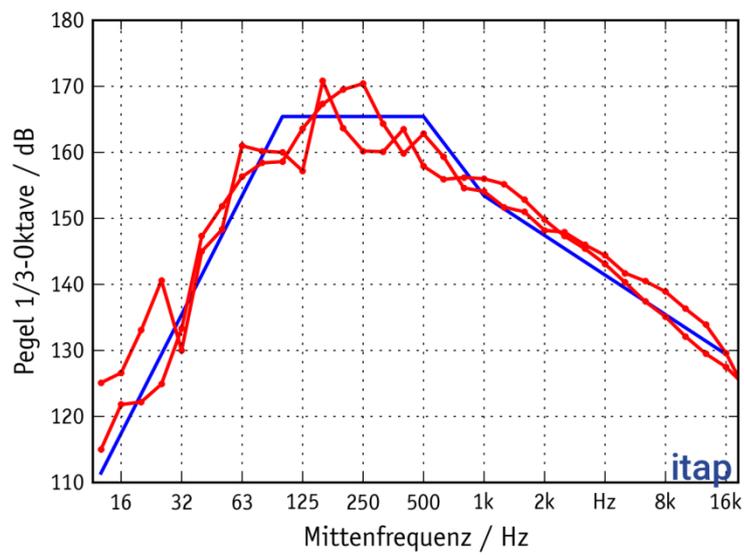


Abbildung 6: Für die Prognose des Rammschalls angesetztes Modellspektrum (blau) basierend auf verschiedenen Messdaten (rot dargestellt: Messdaten, 2 Beispiele).

3.3 Schalltechnisch relevante Eingangsdaten

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

Eingangsdaten für die Prognose

Monopiles:

- Fundamenttyp: Monopile
- Pfahldurchmesser: 7,00 m, 8,00 m („worst case“)
- Wassertiefe: ca. 12 -20 m
- Rammenergie: 1.000 kJ, 2.000 kJ, 3.000 kJ und 4.000 kJ

Modellannahmen für die Prognose:

- Eingangsparameter #1: Pfahldurchmesser
- Eingangsparameter #2: Rammenergie: Ausgangswerte je nach Pfahldurchmesser 1.900 kJ bis 7,00 m und 2.000 kJ für 8,00 m, 2,5 dB Zu- oder Abschlag pro Verdopplung bzw. Halbierung der Rammenergie

- Bodenverhältnisse: 2 dB
- Mantelfläche: konstant, keine Zu- oder Abschlüge, siehe Kapitel 4.3
- Wassertiefe: keine Zu- oder Abschlüge

Umspannplattform (USP):

- Fundamenttyp: Jacket (pre-piling mit Rammschablone)
- Pfahldurchmesser: ca. 3,00 m
- Wassertiefe: ca. 12 - 20 m
- Rammenergie: 1.000 kJ, 2.000 kJ, 3.000 kJ und 4.000 kJ.

Modellannahmen für die Prognose:

- Eingangsparameter #1: Pfahldurchmesser
- Eingangsparameter #2: Rammenergie: 1.100 kJ
2,5 dB Zu- oder Abschlag pro Verdopplung bzw.
Halbierung der Rammenergie

- Bodenverhältnisse: 2 dB
- Mantelfläche: konstant, keine Zu- oder Abschlüge,
siehe Kapitel 4.3
- Kopplungseffekte: 2,5 dB (Pile - Rammschablone)
- Wassertiefe: keine Zu- oder Abschlüge.

4. Ergebnisse der Prognose

4.1 (Einzahlige) Spitzenpegel und Einzelereignispegel in 750 m Entfernung

Folgende beurteilungsrelevante Pegelgrößen für die OWEA- (Monopiles) und die USP-Fundamente (Jackets) sind bei unterschiedlichen maximalen Rammenergien in 750 m Entfernung zur Baustelle zu erwarten. Nach derzeitigem Planungsstand wird davon ausgegangen, dass bei den Monopiles eine maximale Rammenergie von 2.000 kJ nicht überschritten wird. Zur Errichtung der Umspannplattform sind voraussichtlich 1.000 kJ ausreichend. Die Varianten mit höheren Rammenergien dienen somit als „worst case“ Betrachtungen und berücksichtigen die maximal möglichen Rammenergien der in Frage kommenden Rammhämmer.

Tabelle 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 _{Peak} in 750 m [dB re 1 µPa]
7,00	1.000	178	201
	2.000	181	204
	3.000	182	205
	4.000	184	206
8,00	1.000	179	202
	2.000	182	204
	3.000	183	206
	4.000	184	207
3,00 (USP)	1.000	175	198
	2.000	178	201
	3.000	179	203
	4.000	180	204

Für die Prognose wird angenommen, dass die Differenz zwischen Spitzenpegel (L_{Peak}) und Einzelereignispegel (SEL) sowie zwischen den einzelnen Perzentilwerten des Einzelereignispegels unabhängig von der Entfernung ist. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Differenzen zwischen den einzelnen Perzentilwerten des Einzelereignispegels stark vom zeitlichen Verlauf der eingesetzten Rammenergie abhängen können. Im vorliegenden Fall wurde eine kontinuierliche, stufenweise Anhebung über die gesamte Rammdauer angenommen. Sollte die max. Rammenergie bereits im ersten Drittel der gesamten Rammung erreicht werden, so reduziert sich i. d. R. die Differenz vom SEL₉₀ zum SEL₀₅ Wert um bis zu 3 dB, d. h. der SEL₉₀ und SEL₅₀ Wert werden „lauter“.

4.2 Frequenzabhängigkeit des Quellpegels

4.2.1 OWEA Fundamente (Monopiles)

In Tabelle 2 bis Tabelle 5 sind Entfernungsbereiche angegeben, in denen ausgewählte Einzelereignispegel und Spitzenpegel bei Verwendung der halbempirischen Näherungsformel für die Ausbreitungsdämpfung nach Thiele & Schellstede (Gleichung 9) erreicht werden. Dabei werden zwei der oben aufgeführten Varianten betrachtet. Die erste Variante stellt ein wahrscheinliches Szenario dar (8,00 m Pfahldurchmesser und 2.000 kJ Rammenergie). Die zweite Variante ist eine „worst case“ Betrachtung (8,00 m Pfahldurchmesser und 4.000 kJ Rammenergie). Weiterhin sind bei den Werten in Tabelle 2 bis Tabelle 5 die spektralen Annahmen aus Abbildung 6 (Kapitel 3.2) berücksichtigt worden.

Einzelereignispegel (SEL)

Tabelle 2: Darstellung der berechneten Entfernungsbereiche, in denen ausgewählte Einzelereignispegel (SEL) bei der Rammung von Pfählen mit einem Durchmesser von 8,00 m und maximaler Rammenergie von 2.000 kJ ohne Verwendung eines Schallschutzsystems erreicht werden (bei 181 dB in 750 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]
180	1,67	0,86	0,44
164	10,74	6,43	3,59
160	15,36	9,75	5,75
150	31,49	22,61	15,36
145	41,97	31,49	22,61

Tabelle 3: Darstellung der berechneten Entfernungsbereiche, in denen ausgewählte Einzelereignispegel (SEL) bei der Rammung von Pfählen mit einem Durchmesser von 8,00 m und maximaler Rammenergie von 4.000 kJ ohne Verwendung eines Schallschutzsystems erreicht werden (bei 184 dB in 750 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]
180	2,58	1,35	0,69
164	14,54	9,15	5,35
160	20,05	13,33	8,26
150	38,35	28,40	20,05
145	45,00	38,35	28,40

Spitzenpegel L_{Peak}

Tabelle 4: Darstellung der berechneten Entfernungsbereiche, in denen ausgewählte Spitzenpegel L_{Peak} bei der Rammung von Pfählen mit einem Durchmesser von 8,00 m und maximaler Rammenergie von 2.000 kJ ohne Verwendung eines Schallschutzsystems erreicht werden. (bei 204 dB in 750 m)

Spitzenpegel L_{Peak} [dB re 1 μ Pa]	max. Entfernung bei +5 dB Toleranz [km]	Entfernung bei erreichtem L_{Peak} [km]	min. Entfernung bei -5 dB Toleranz [km]
230	0,04	0,02	0,01
224	0,10	0,05	0,03
206	1,06	0,54	0,28
200	2,33	1,21	0,62
190	7,61	4,34	2,33

Tabelle 5: Darstellung der berechneten Entfernungsbereiche, in denen ausgewählte Spitzenpegel L_{Peak} bei der Rammung von Pfählen mit einem Durchmesser von 8,00 m und maximaler Rammenergie von 4.000 kJ „worst case“ ohne Verwendung eines Schallschutzsystems erreicht werden. (bei 207 dB in 750 m)

Spitzenpegel L_{Peak} [dB re 1 μ Pa]	max. Entfernung bei +5 dB Toleranz [km]	Entfernung bei erreichtem L_{Peak} [km]	min. Entfernung bei -5 dB Toleranz [km]
230	0,07	0,04	0,02
224	0,15	0,08	0,04
206	1,63	0,83	0,42
200	3,50	1,85	0,95
190	10,52	6,28	3,50

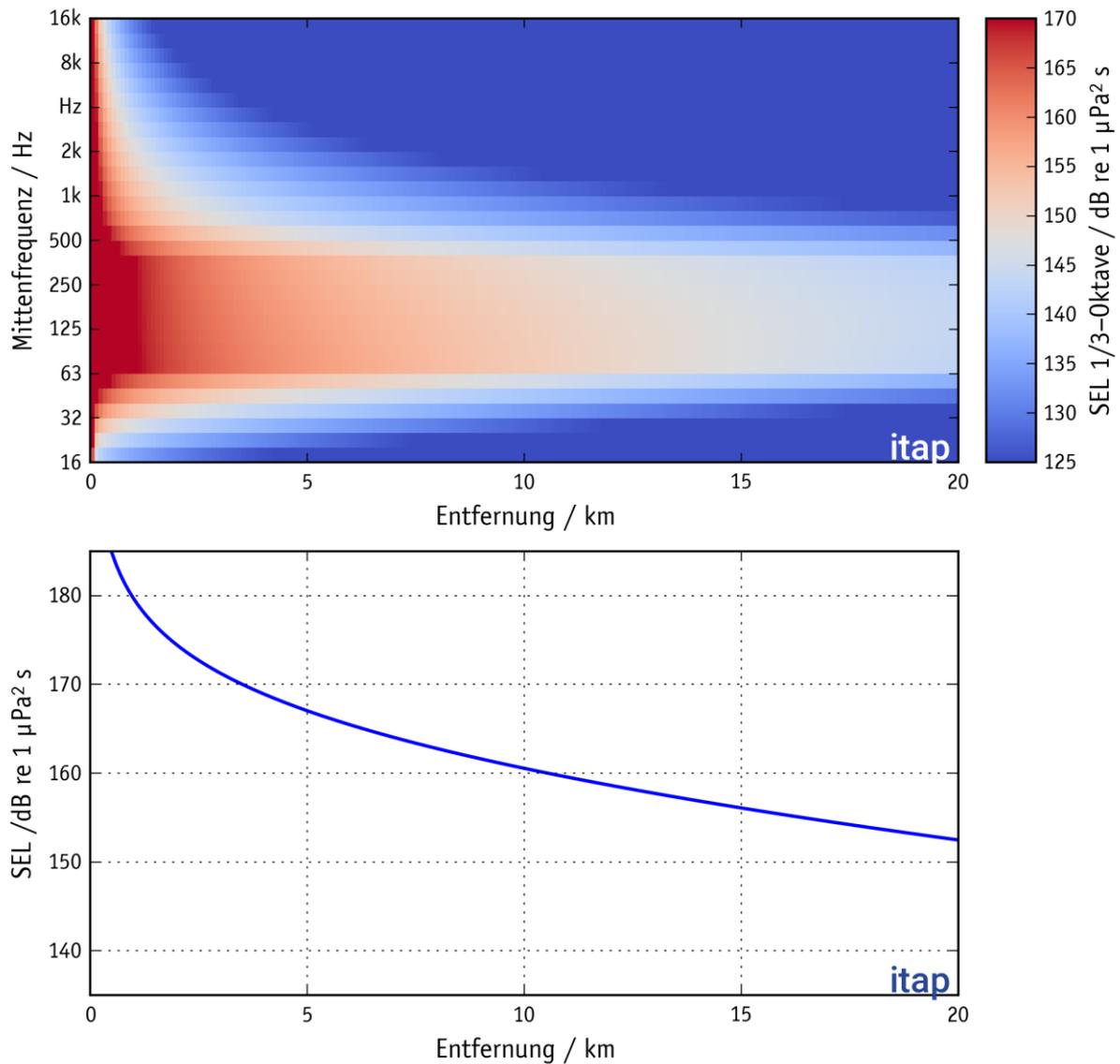


Abbildung 7: Prognostizierte Einzelereignispegel (SEL) der Rammgeräusche beim Rammen der Pfähle mit einem Durchmesser von 8,00 m. Ohne Verwendung eines Schallschutzsystems bei einer maximalen Rammenergie von 2.000 kJ als Funktion der Entfernung. Oben: frequenz aufgelöst in 1/3 Oktaven, unten: breitbandig.

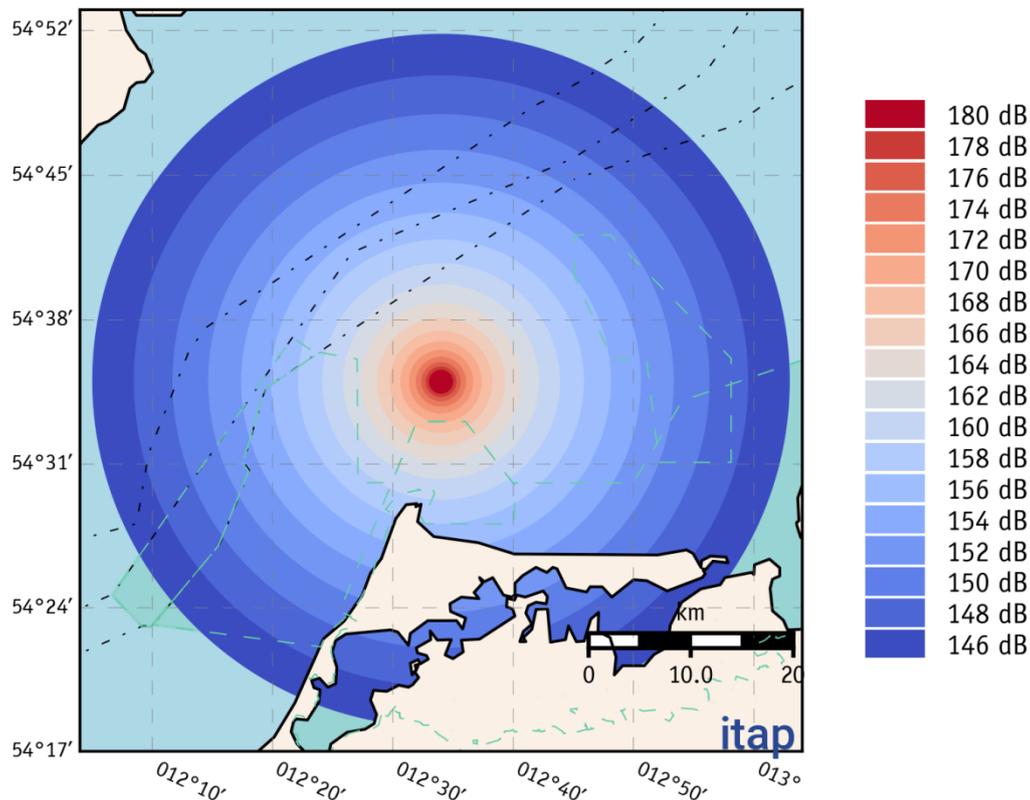


Abbildung 8: Schallausbreitung des prognostizierten Einzelereignispegels in der Ostsee. In diesem Model wurden Monopiles mit einem Durchmesser von 8,00 m ohne Verwendung eines Schallschutzsystems bei einer maximalen Rammenergie von 2.000 kJ berücksichtigt (Annahme, dass es keine Einflüsse der Bathymetrie auf die Schallausbreitung gibt). Zudem ist davon auszugehen, dass die Hydroschallpegel zwischen Festland und Halbinsel aufgrund der Barrierewirkung deutlich geringer ausfallen.

4.2.2 Umspannplattform (Jackets)

In Tabelle 7 bis Tabelle 8 sind Entfernungsbereiche angegeben, in denen ausgewählte Einzelereignispegel und Spitzenpegel bei Verwendung der halbempirischen Näherungsformel für die Ausbreitungsdämpfung nach Thiele & Schellstede (Gleichung 9) erreicht werden. Dabei werden zwei der oben aufgeführten Varianten betrachtet. Die erste Variante stellt ein wahrscheinliches Szenario dar (3,00 m Pfahldurchmesser und 1.000 kJ Rammenergie). Die zweite Variante ist eine „worst case“ Betrachtung (3,00 m Pfahldurchmesser und 2.000 kJ Rammenergie).

Weiterhin sind bei den Werten in Tabelle 7 bis Tabelle 8 die spektralen Annahmen aus Abbildung 6 (Kapitel 3.2) berücksichtigt worden.

Einzelereignispegel (SEL)

Tabelle 6: Darstellung der berechneten Entfernungsbereiche, in denen ausgewählte Einzelereignispegel (SEL) bei der Rammung von Pfählen mit einem Durchmesser von 3,00 m und maximaler Rammenergie von 1.000 kJ ohne Verwendung eines Schallschutzsystems erreicht werden (bei 175 dB in 750 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]
180	0,75	0,41	0,23
164	5,00	2,82	1,56
160	7,70	4,47	2,51
150	19,57	12,64	7,70
145	28,56	19,57	12,64

Tabelle 7: Darstellung der berechneten Entfernungsbereiche, in denen ausgewählte Einzelereignispegel (SEL) bei der Rammung von Pfählen mit einem Durchmesser von 3,00 m und maximaler Rammenergie von 2.000 kJ „worst case“ ohne Verwendung eines Schallschutzsystems erreicht werden (bei 178 dB in 750 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]
180	1,03	0,56	0,31
164	6,61	3,79	2,11
160	9,99	5,93	3,38
150	23,92	15,93	9,99
145	33,93	23,92	15,93

Spitzenpegel L_{Peak}

Tabelle 8: Darstellung der berechneten Entfernungsbereiche, in denen ausgewählte Spitzenpegel L_{Peak} bei der Rammung von Pfählen mit einem Durchmesser von 3,00 m und maximaler Rammenergie von 1.000 kJ ohne Verwendung eines Schallschutzsystems erreicht werden (bei 189 dB in 750 m).

Spitzenpegel L_{Peak} [dB re 1 μ Pa]	max. Entfernung bei +5 dB Toleranz [km]	Entfernung bei erreichtem L_{Peak} [km]	min. Entfernung bei -5 dB Toleranz [km]
230	0,03	0,02	0,01
224	0,07	0,04	0,02
206	0,55	0,30	0,17
200	1,14	0,62	0,34
190	3,72	2,07	1,14

Tabelle 9: Darstellung der berechneten Entfernungsbereiche, in denen ausgewählte Spitzenpegel L_{Peak} bei der Rammung von Pfählen mit einem Durchmesser von 3,00 m und maximaler Rammenergie von 2.000 kJ „worst case“ ohne Verwendung eines Schallschutzsystems erreicht werden (bei 201 dB in 750 m).

Spitzenpegel L_{Peak} [dB re 1 μ Pa]	max. Entfernung bei +5 dB Toleranz [km]	Entfernung bei erreichtem L_{Peak} [km]	min. Entfernung bei -5 dB Toleranz [km]
230	0,04	0,03	0,01
224	0,09	0,05	0,03
206	0,75	0,41	0,23
200	1,55	0,85	0,46
190	4,98	2,81	1,55

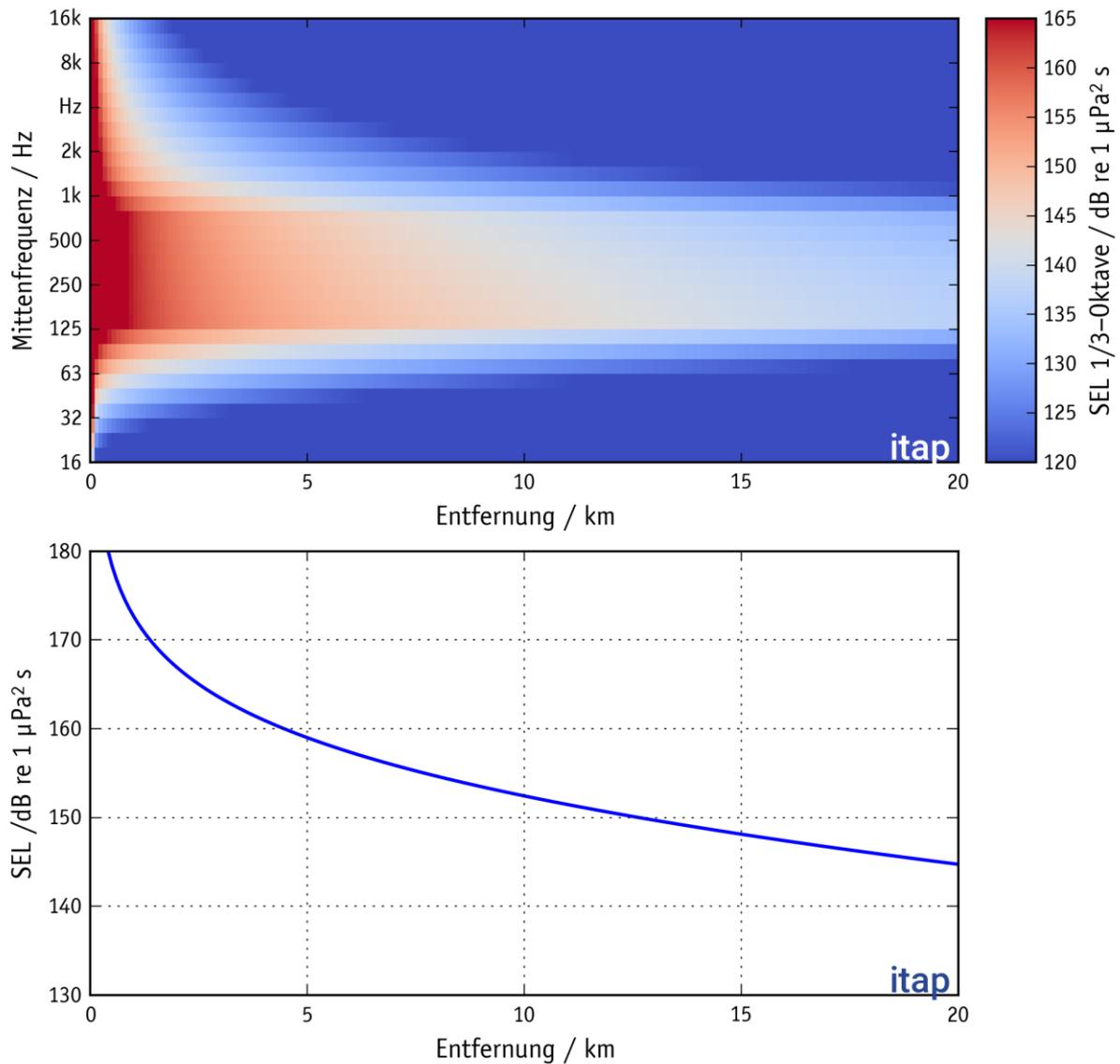


Abbildung 9: Prognostizierte Einzelereignispegel (SEL) der Rammgeräusche beim Rammen der Pfähle mit einem Durchmesser von 3,00 m. Ohne Verwendung eines Schallschutzsystems bei einer maximalen Rammenergie von 1.000 kJ als Funktion der Entfernung. Oben: frequenz aufgelöst in 1/3 Oktaven, unten: breitbandig.

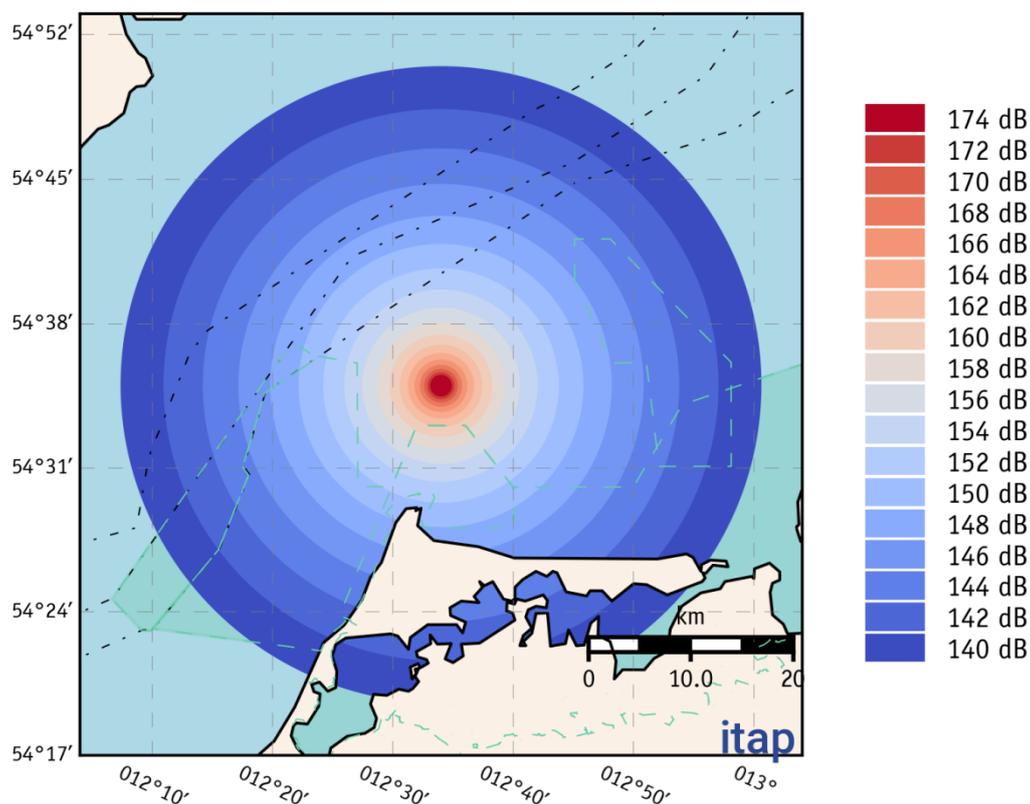


Abbildung 10: Schallausbreitung des prognostizierten Einzelereignispegels in der Ostsee. In diesem Model wurden Monopiles mit einem Durchmesser von 3,00 m ohne Verwendung eines Schallschutzsystems bei einer maximalen Rammenergie von 1.000 kJ berücksichtigt (Annahme, dass es keine Einflüsse der Bathymetrie auf die Schallausbreitung gibt). Zudem ist davon auszugehen, dass die Hydroschallpegel zwischen Festland und Halbinsel aufgrund der Barrierewirkung deutlich geringer ausfallen.

4.3 Fehlerbetrachtung

Sowohl die Prognose der „Quellstärke“ bzw. des „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 2015 der *itap GmbH*) mit großen Monopiles zeigen allerdings, dass der Einzelereignispegel zum Ende einer Rammung (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. Vereinzelt stiegen jedoch die Einzelereignispegel bis

zur Erreichung der maximalen Einbindetiefe (und zeitgleicher Anhebung der Rammenergie) stetig an. Aus diesem Grund wird immer die max. Rammenergie für sämtliche Berechnungen verwendet.

Bei Rammungen von Tripod- oder Jacket-Konstruktionen enden die zu rammenden Pfähle immer wenige Meter über dem Sediment, d. h. die Rammung kann oberhalb der Wasseroberfläche beginnen, endet jedoch immer unterhalb der Wasseroberfläche dicht oberhalb des Meeresbodens. Somit verringert sich die schallabstrahlende Mantelfläche mit fortlaufender Rammung stetig (Diederichs *et al.*, 2014). Im Gegensatz dazu erhöht sich zumeist die verwendete Rammenergie mit fortlaufender Rammung, da der Bodenwiderstand (SRD-Wert) stetig zunimmt. I. d. R. nehmen bei derartigen Rammungen die beurteilungsrelevanten Pegelgrößen mit zunehmender Rammenergie innerhalb der ersten 50 % bis 65 % der kompletten Rammungen (Einbindetiefe) stetig zu. Dabei wird zumeist 75 % bis 80 % der max. Rammenergie erreicht. Zum Ende einer Rammung reduzieren sich jedoch die Pegelgrößen um mehrere Dezibel trotz weiterer Anhebung der Rammenergie aufgrund der abnehmenden Mantelfläche. Somit ist theoretisch für eine Prognose der zu erwartenden beurteilungsrelevanten Pegelgrößen die verwendete Rammenergie und die schallabstrahlende Mantelfläche zu berücksichtigen.

Im vorliegenden Prognosemodell wird jedoch der Abfall bzw. die Konstanz der Pegelgrößen zum Ende einer Rammung bei zeitgleicher Anhebung der Rammenergie nicht berücksichtigt. Durch die Berücksichtigung der maximalen „prognostizierten“ Rammenergie mit Zu- und Abschlägen und den Vergleichen zwischen Prognosen und realen Messergebnissen kann sowohl für Monopiles als auch für Tripod- und Jacket-Konstruktionen davon ausgegangen werden, dass i. d. R. eine leichte „Überschätzung“ der zu erwartenden Pegelgrößen aufgrund des Eingangsparameters „max. Rammenergie“ vorgenommen wird.

Aus der Bestimmung des Quellpegels nur unter Verwendung des Eingangsparameters „Pfahldurchmesser“ 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. Abschläge 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

5.1 Allgemeine Anforderungen an ein Schallschutzsystem

Zum Schutz der Meeresfauna ist es erforderlich, bei den lärmintensiven Rammarbeiten den Schalleintrag ins Wasser möglichst gering zu halten, um Beeinträchtigungen der Meeresbewohner durch Schalleinträge zu vermeiden. Hierzu wurden vom BSH unter Vorarbeit des UBA die Lärmschutzwerte für den Einzelereignispegel (SEL) von $160 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ und den Spitzenpegel (L_{Peak}) von $190 \text{ dB}_{L_{\text{Peak}}}$ festgesetzt, die es in 750 m Entfernung zur Rammbaustelle einzuhalten gilt. Für die Einhaltung des $160 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ Lärmschutzwertes ist der 5 % Perzentilpegel des Einzelereignispegels (SEL_{05}) maßgeblich, d. h. der SEL_{05} muss $\leq 160 \text{ dB}$ betragen. Diese Lärmschutzwerte sind insbesondere zum Schutz der Schweinswale gegen temporäre Hörschwellenverschiebungen entwickelt worden.

Derzeit lassen sich mit einzelnen Schallschutzsystemen Schallminderungen von bis zu 15 dB erzielen. Durch die Kombination von zwei Schallschutzsystemen konnten bisher Schallminderungen von über 20 dB erzielt werden. Sämtliche bisher entwickelten und unter Offshore-Bedingungen getesteten Schallschutzsysteme zeigten jedoch eine zum Teil sehr hohe Varianz in der erzielten Schallminderung (Bellmann, 2014; nicht veröffentlichte Messergebnisse aus Bauvorhaben der Jahre 2011 bis 2015 der *itap GmbH*). Ein Großteil der Varianzen konnte in den meisten Fällen auf technische Probleme oder Ausfälle des jeweiligen Schallschutzsystems zurückgeführt werden.

Bei jeder Anwendung eines Schallschutzsystems ohne Ausfälle und technische Probleme zeigt sich, dass die schallmindernde Wirksamkeit jedes bisher eingesetzten Schallschutzsystems sowohl während einer Rammung an einem Standort (i. d. R. mehrere tausend Schläge pro Standorte), als auch beim Vergleich von mehreren Standorten mit und ohne Schallschutzsysteme Varianzen im Mittel von $\pm 2 \text{ dB}$ ergaben (Bellmann, 2014).

Zudem ist die Schallminderung jedes Schallschutzsystems stark frequenzabhängig und somit ist die resultierende (einzahlige) Schallminderung abhängig von der spektralen Zusammensetzung des Rammschallspektrums, ohne den Einsatz einer Schallminderungsmaßnahme. Für einen besseren Vergleich von erzielten Schallminderungen eines Schallschutzsystems bei mehrfacher Anwendung wurde im Forschungsvorhaben *OFF BW II* (Diederichs *et al.*, 2014) von der *itap GmbH* eine pragmatische Auswertungsmethode entwickelt, die es ermöglicht, Aussagen über die mittlere Schallminderung eines Schallschutzsystems über alle Anwendungen inkl. der Abweichungen zu treffen.

Die Lärmschutzwerte des BSH werden bei den Rammarbeiten an den geplanten OWEA-Fundamentstrukturen des OWP *Gennaker* um 22 dB (2.000 KJ und 8 m Pfahldurchmesser) ohne Verwendung eines Schallschutzsystems durch den Einzelereignispegel und 14 dB durch

den Spitzenpegel überschritten (siehe Tabelle 1). Für die Umspannplattformen (USP) ergeben sich Überschreitungen von 15 dB für den Einzelereignispegel und 8 dB für den Spitzenpegel (1.000 KJ und 3 m Pfahldurchmesser). Somit sind für eine Einhaltung der Lärmschutzwerte Maßnahmen zur Schallreduzierung zwingend erforderlich.

Im Nachfolgenden werden verschiedene Schallschutzsysteme und Kombinationen aus Schallschutzsystemen kurz zusammengefasst.

5.2 Übersicht verschiedener Schallschutzsysteme

Ein einzelnes, ausgereiftes Schallschutzsystem, das eine sichere Unterschreitung der o. g. Lärmschutzwerte durch Reduzierung des Rammschalls um 22 dB garantieren kann, ist derzeit nicht erhältlich. Jedoch ist eine wirksame Schallminderung des Rammschalls durch den Einsatz einer Kombination aus Schallschutzsystemen und/oder durch Reduzierung der verwendeten Rammenergie zu erzielen.

Die derzeit am häufigsten eingesetzten und praxistauglichsten Schallschutzsysteme für Monopile-Installationen stellen das IHC-NMS System, das HSD-System und der „Große Blasenschleier“ (BBC) in einfacher und doppelter Ausführung dar. Das IHC-NMS-System und der BBC wurden mehrfach einzeln (IHC-NMS > 150 Anwendungen und BBC > 600 Anwendungen) sowie in Kombination (IHC-NMS + BBC > 120 Anwendungen) in mehreren aktuellen Bauvorhaben serienmäßig eingesetzt (Bellmann, 2014). Das HSD-System wurde ebenfalls mehrfach in Kombination mit einem großen Blasenschleier eingesetzt (HSD + BBC > 80 Anwendungen). Für diese Schallschutzsysteme bei Monopile-Installationen liegen somit statistisch recht verlässliche Werte für die zu erwartende Schallminderung vor.

Für die Gründungen von Jacket-Konstruktionen wurden bisher vorwiegend „Große Blasenschleiersysteme“ als primäres Schallschutzsystem eingesetzt. Vereinzelt kamen auch sogenannte „kleine Blasenschleier“ zwischen der Jacket-Gründungsstruktur und dem zu rammenden Pfahl zum Einsatz. Eine weitere Option, die derzeit getestet wird, ist der Einsatz eines HSD-Systems bei einer Jacket-Installation. Aufgrund von technischen Herausforderungen ist jedoch eine Vorhersage der damit erzielten Schallminderungen derzeit nicht statistisch valide möglich.

5.2.1 IHC-NMS System

Das IHC-NMS6000 System wurde bisher bei den Gründungsarbeiten in den OWPs *Riffgat*, *Borkum Riffgrund I*, *Amrumbank West*, *GodeWind I/II*, *Nordsee One* und *Butendiek* (Monopiles mit Durchmessern bis 7,8 m) eingesetzt. Aufgrund der stetigen Weiterentwicklungen an

diesem Schallschutzsystem und dem Fehlen von Rammungen ohne den Einsatz dieses Schallschutzsystems im OWP *Riffgat*, wurden in den OWPs *Butendiek* und nachfolgenden Bauvorhaben mehrfach Referenzmessungen nach Maßgabe und Messvorschrift des *BSH* (Müller & Zerst, 2013) ohne Verwendung eines Schallschutzsystems durchgeführt, um die schallmindernde Wirksamkeit statistisch zu evaluieren. Die schallmindernde Wirksamkeit dieses Systems betrug dabei gemittelt über alle Anwendungen $10 \text{ dB} \leq 13 \text{ dB} \leq 15 \text{ dB}$. Neueste Ergebnisse aus den OWPs *GodeWind I/II* und *Nordsee One* mit dem überarbeiteten IHC-NMS8000 sind derzeit noch nicht öffentlich zugänglich. Andeutungsweise könnten sich durch die zahlreichen Modifikationen leicht höhere Schallminderungen ergeben. Die für die Schallminderung wohl maßgebliche Weiterentwicklung war die Vergrößerung des Zwischenraumes zwischen dem inneren und dem äußeren Hüllrohr von 400 mm auf 555 mm. Zudem wurde der innenliegende Blasenschleier dorthin optimiert, dass die Lufteinspeisung ins Wasser auf Sedimenthöhe, anstatt ca. 1,5 m über Grund, wie beim IHC-NMS6000er System, erfolgte.

5.2.2 Einfacher „Großer Blasenschleier“ (BBC)

Ähnliche schallmindernde Werte wie für das IHC-NMS6000 System wurden mit einem einfachen Blasenschleier (BBC) in mehreren OWPs mit Wassertiefen bis 30 m erzielt (z. B. *Borkum West II* und *Nordsee Ost*): $10 \text{ dB} \leq 13 \text{ dB} \leq 15 \text{ dB}$. Im OWP *Meerwind Süd/Ost* wurde der doppelte „Große Blasenschleier“ dann erstmals als standardmäßiges Schallschutzsystem bei der Installation von Monopiles mit Durchmessern von knapp 6,0 m eingesetzt und weiterentwickelt. Bei optimaler Systemkonfiguration des doppelten „Großen Blasenschleiers“ konnten mittlere Schallreduktionen des breitbandigen Einzelereignispegels von bis zu $17 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ erzielt werden. Der Spitzenpegel L_{Peak} konnte im Mittel um mehr als $20 \text{ dB}_{\text{LPeak}}$ reduziert werden.

Allerdings zeigen Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben *OFF BW II* (Diederichs *et al.*, 2014) und weiteren Anwendungen in derzeitigen Bauvorhaben, dass die erzielte Schallminderung wesentlich von folgenden Faktoren abhängig ist:

- (i) verwendete Luftmenge,
- (ii) Lochgröße und Lochabstand,
- (iii) sowie beim doppelten Blasenschleier der Abstand zwischen den beiden am Boden ausgelegten Düsenschläuchen.

Nach derzeitigem Kenntnisstand sind nachfolgende Systemkonfigurationen für einen einfachen bzw. doppelten „Großen Blasenschleier“ als Mindestanforderung (kein Anspruch auf Vollständigkeit der Systemspezifikation) 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}.

Einfacher / Doppelter „Großer Blasenschleier“, Systemkonfigurationen:

- Lochgröße (Durchmesser) und Lochabstand: 1 - 2 mm alle 20 - 30 cm,
- verwendete Luftmenge: $\geq 0,3 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$,
- Abstand der DüsenSchläuche: \geq eine Wassertiefe für einen doppelten BBC,
- regelmäßige Wartung der eingesetzten DüsenSchläuche,
- keine turbulenz erzeugenden Hindernisse in den DüsenSchläuchen.

Derzeit wird bei Bauvorhaben in der deutschen Nordsee zumeist eine elliptische Auslegungsform mit der längeren Seite in Strömungsrichtung verwendet, um die DüsenSchlauchlängen so kurz wie möglich zu halten und dennoch eine vollständige Einhüllung der Gründungsstruktur vom Blasenschleier gewährleisten zu können (Stichwort: Verdriftung der Luftblasen). In abgeschlossenen Bauvorhaben stellte es sich als eine technisch anspruchsvolle Herausforderung heraus, eine konstante Luftverteilung innerhalb der DüsenSchläuche, bei einer Schlauchlänge $> 800 \text{ m}$ bei beidseitiger Einspeisung zu gewährleisten. Hierfür wurden in einem Forschungsvorhaben im OWP *Global Tech I* sogenannte in-situ Druckmessensoren entwickelt, mit deren Hilfe die Druckverteilung während des Betriebs gemessen wird und somit die Lochkonfiguration optimiert werden kann (Bellmann *et al.*, 2015; Nehls & Bellmann, 2015).

Aus der Praxis ist bekannt, dass der Unterschied zwischen einem einfachen und einem doppelten Blasenschleier mit annähernd vergleichbaren Systemkonfigurationen im Schnitt 3 dB beträgt.

Maßgeblich für die resultierende Schallminderung eines Blasenschleiersystems ist das Luft-Wasser-Gemisch; je höher der Lufteintrag ins Wasser ist, desto größer ist die Schallminderung. Sollte die o. g. Luftmenge von $0,3 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{min})$ durch das einzusetzende Blasenschleiersystem nicht erreicht werden können, so ist eine Verringerung der o. g. mittleren Schallminderungen nicht auszuschließen.

Aus abgeschlossenen Bauvorhaben in Wassertiefen bis zu 45 m hat sich ebenfalls herausgestellt, dass bei gleicher Systemkonfiguration die Schallminderung des eingesetzten Großen Blasenschleiers bei zunehmender Wassertiefe um mehrere Dezibel aufgrund des

statischen Wasserdrucks abnimmt. Aufgrund der Wassertiefe und Erfahrungen aus aktuellen Bauvorhaben ist zu prüfen, ob die o.g. Luftmenge von $>0,3 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$ ggfs. auf ca. $0,4 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$ angehoben werden kann. Dadurch wird sich vermutlich die Schallminderung nicht oder nur im geringfügigen Maße erhöhen, jedoch zeigte sich bei jüngsten Anwendungen, dass damit eine deutlich konstantere Schallminderung in alle Raumrichtungen möglich ist.

Bei einer Wassertiefe von bis zu 20 m, wie im vorliegenden Fall, ist anzunehmen, dass die o.g. Schallminderungen von bis zu 17 dB mit einem optimalen doppelten „Großen Blasenschleier“ in der Ostsee erreicht werden kann.

5.2.3 Hydro Sound Damper (HSD)

Der Hydro Sound Damper besteht aus einem kreisförmigen Schwimmkörper und einem kreisförmigen Ballastring. Zwischen diesen beiden Komponenten befindet sich ein Netz, an dem unterschiedliche Schaumstoffelemente (HSD-Elemente) in verschiedenen Größen montiert sind. Jedes HSD-Element ist dabei auf unterschiedliche Frequenzen und Wassertiefen abgestimmt. Das gesamte System (Ballastringe, Netze und HSD-Elemente, sowie Auftriebskörper) kann für den Transport, sowie zur Mobilisierung und Demobilisierung mittels Windensystemen teleskopartig ineinander gefahren werden.

Die Erfahrungen bei Monopile-Installationen von dem Projekt *ESRa* (Wassertiefe $\approx 8 \text{ m}$) über OWP *London Array* (Wassertiefe $\approx 15 \text{ m}$) bis zum OWP *Amrumbank West* (Wassertiefen bis 22 m) haben gezeigt, dass durch die kontinuierliche Weiterentwicklung der HSD-Elemente und der stetigen Zunahme von „großen“ formstabilen und skalierbaren HSD-Elementen zu höheren Wassertiefen eine konstante Schallminderung im unteren zweistelligen Dezibel-Bereich erreicht werden konnte. Dies konnte auch bei derzeitigen Bauvorhaben mit Wassertiefen bis 40 m in der Nordsee bestätigt werden.

Es ist somit zu erwarten, dass eine Schallminderung im unteren zweistelligen Dezibel-Bereich auch für dieses Bauvorhaben bei Verwendung eines auf dieses Projekt optimierten HSD-Systems bei den Monopile-Installationen zu erwarten ist.

Bisher wurde dieses Schallschutzsystem nur für Monopile-Installationen eingesetzt. Derzeit läuft auch erstmalig ein Bauvorhaben mit einer Jacket-Konstruktion, allerdings im pre-piling Verfahren. Hier kann die Ballastbox des HSD-Systems nur auf dem Rammtemplate aufliegen und kann somit nicht die gesamte Wassertiefe abdecken. Somit ist eine verminderte Schallminderung zu erwarten. Alternativ kann für die „Lücke“ zwischen Meeresboden und HSD-Ballastbox weitere fest installierte HSD-Netze am Pile-Sleeve/Template befestigt

werden, oder durch Verwendung eines GABC-System geschlossen werden. Die Ergebnisse der ersten Jacket-Installationen sind derzeit noch nicht öffentlich zugänglich und sollten im Herbst verfügbar sein.

5.2.4 Grout Annulus Bubble Curtain (GABC)

Bei der Errichtung aufgelöster Fundamentstrukturen im post-piling Verfahren, wie z. B. Jackets, werden die zu rammenden Pfähle durch sogenannte Pile-Sleeves oder Pfahlführungen gerammt. Dabei gibt es zwei mögliche Arten von Pile-Sleeves:

- (i) der Pile-Sleeve ist ein fester Bestandteil der Jacket-Konstruktion und reicht von der Unterkante bis zur Oberkante der gesamten Jacket-Struktur, d.h. die Pfähle werden immer oberhalb der Wasseroberfläche gerammt und der Pile-Sleeve deckt die gesamte Wassersäule ab.
- (ii) die Pile-Sleeves sind lediglich mehrere Meter hoch und sind an der Unterkante starr mit der Jacket-Struktur verbunden. Die Pfähle (Skirt-Piles genannt) werden somit im Rammverlauf unterhalb der Wasseroberfläche gerammt und enden nur wenige Meter oberhalb des Sediments bzw. des Pile-Sleeves.

Bei den beiden beschriebenen Verfahren kann zwischen dem Spalt Pfahl – Pile-Sleeve komprimierte Luft eingeführt werden. Die Pressluft wird an der Unterkante des Pile-Sleeve eingeführt. Die Luftblasen steigen im Spalt zwischen Pile und Pile-Sleeve nach oben auf. Der Spalt füllt sich somit mit einem Luft-Wasser-Gemisch.

Im Fall von Pfahlführungen, die nicht bis zur Wasseroberfläche reichen, kann an der Oberkante des Pile-Sleeve die aufsteigende Luft (Luftbläschen) entweichen und steigt bis zur Wasseroberfläche auf. Um den Pfahl bildet sich somit bis zur Wasseroberfläche ein „kleiner“ Blasenschleier aus (Grout Annulus Bubble Curtain). Strömungen, wie z. B. in der Nordsee, führen zur Verdriftung der Luftblasen oberhalb des Pile-Sleeves. Aus diesem Grund ist nicht auszuschließen, dass strömungsabhängige große Öffnungen im Blasenschleier entstehen. Dieses Prinzip ist vergleichbar mit dem „Little Bubble Curtain“, der im OWP Alpha Ventus einmalig getestet wurde. Hier gab es allerdings keine „Führung“ im unteren Bereich, sodass aufgrund der starken Strömung sämtliche Luftblasen sich auf einer Seite des Pfahles befanden. Damit konnte eine Schallminderung im hohen einstelligen Dezibel-Bereich auf der einen Seite des Pfahles gemessen werden. Auf der gegenüberliegenden Seite konnte keine Schallminderung festgestellt werden.

Im vorliegenden Fall befindet sich das Bauvorhaben in der Ostsee in der i. d. R. wenig Strömung vorliegt und somit von nur wenigen Verdriftungseffekten auszugehen ist. Aus

akustischer Sicht ist davon auszugehen, dass durch die Führung der Luftbläschen in der Pfahlführung (Skirt-Piles) zumindest eine geringe Schallminderung (< 4 dB) in alle Raumrichtungen erzielt werden kann. In Richtung der Strömung wird sich vermutlich eine nicht omnidirektionale weitergehende Schallminderung ergeben. Es ist im vorliegenden Fall beabsichtigt, mit dem GABC die möglichen Ankopplungseffekte (~ 3 dB) weitestgehend zu minimieren.

Reicht die Pfahlführung bis zur Wasseroberfläche, so wird der Grout Annulus Bubble Curtain bis zur Wasseroberfläche geführt.

Für den letzteren Fall gibt es bereits Erfahrungen aus dem Bauvorhaben HelWin beta (Matuschek, 2014).

Aufgrund von technischen Herausforderungen, sowie aufgrund von nicht durchgeführten Rammungen mit nur dem Grout Annulus Bubble Curtain und gänzlich ohne Schallschutz ist eine exakte Evaluation eines derartigen Schallschutzsystems nicht exakt möglich, belief sich jedoch quantitativ im Bereich von 4-6 dB.

Es ist davon auszugehen, dass die Spaltbreite und die Menge an eingeführter Luft einen maßgeblichen Einfluss auf die erzielte Schallminderung besitzen. Aus schalltechnischer Sicht ist jedoch in jedem Fall von einer Schallminderung von $\ll 10$ dB auszugehen.

Im vorliegenden Fall ist die Pfahlführung der Jacket-Konstruktion in der überwiegenden Zahl nicht vom Meeresboden bis zur Wasseroberfläche durchgängig gegeben, sondern beginnt ca. 1 m über Meeresboden und endet auf halber Wassertiefe. Ein innenliegender GABC wird somit vermutlich Schallminderungen von wenigen Dezibel bewirken.

5.2.5 AdBm Resonatorsystem

Derzeit ist ein weiteres, pfahlnahes Schallschutzsystem der Fa. *AdBm Corp* in der Entwicklung. Der Wirkungsmechanismus ist prinzipiell vergleichbar zum HSD-System. Es werden sogenannte ortsfeste Helmholtz-Resonatoren in der Wassersäule platziert. Durch die Größe, Wahl der Materialien und die Anzahl der Resonatoren kann sowohl die resultierende Schallminderung, als auch der jeweilige Frequenzbereich, ähnlich wie beim HSD-System, in gewissem Maße variiert und projektspezifisch optimiert werden.

Bislang gab es nur Laborversuche und zwei kleinmaßstäbliche Offshore-Versuche mit diesem neuartigen Schallschutzsystem. Diese Tests haben gezeigt, dass eine Schallminderung prinzipiell möglich ist, die Ergebnisse dieser Tests lassen sich allerdings nicht auf großmaßstäbliche Versuche unter realen Offshore-Bedingungen übertragen.

Aus akustischer und theoretischer Sicht ist eine vergleichbare Schallminderung wie für das HSD-System für dieses Schallschutzsystem zu erwarten.

5.2.6 Geführter Blasenschleier – Conducted Bubble Curtain (CBC)

Derzeit ist ein weiteres, pfahlnahes Schallschutzsystem in der Entwicklung und könnte möglicherweise in der ersten Jahreshälfte 2016 unter Offshore-Bedingungen getestet werden. Zum jetzigen Zeitpunkt liegen keine belastbaren Labor- oder Nearshore-Ergebnisse vor. Aus akustischer Sicht ist dieses neuartige Schallschutzsystem mit einem kleinen Blasenschleier (Small Bubble Curtain), wie im OWP *BARD Offshore I*, zu vergleichen. Je nach Luftmenge und Strömungsbedingungen lagen als Ergebnis Schallminderungen im zweistelligen Dezibel-Bereich (Bellmann *et al.*, 2013) vor. Eine derartige Schallminderung ist ebenfalls bei diesem Schallschutzsystem zu erwarten.

5.2.7 Kombination aus Schallschutzsystemen

IHC-NMS und „Großer Blasenschleier“

Bei der Kombination aus der IHC-NMS6000er Baureihe mit einem Blasenschleier der Fa. *Hydrotechnik Lübeck GmbH* konnten im OWP *Butendiek* und *Amrumbank West* Schallminderungen von $17 \text{ dB} \leq 19 \text{ dB} \leq 23 \text{ dB}$ ohne weitergehende Reduzierung der Rammenergie messtechnisch ermittelt werden.

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 in der Summe nicht 26 dB Schallminderung bei zeitgleicher Anwendung, sondern eine geringere Gesamtschallminderung.

Ebenfalls sei darauf hingewiesen, dass bislang nur Ergebnisse des Einsatzes eines IHC-Systems in Wassertiefen von bis zu 24 m vorliegen. Im OWP *GodeWind 01/02* liegen die Wassertiefen in einem Bereich von 25 m bis 35 m. In diesem OWP wurde eine Kombination aus optimiertem, einfachen Großen Blasenschleier und einem verbesserten und optimierten IHC-NMS8000 System eingesetzt. Erste Ergebnisse liegen jedoch noch nicht offiziell vor. In einem weiteren Bauvorhaben wird derzeit ebenfalls diese Kombination von IHC-NMS8000 und einem optimierten Großen Blasenschleier (BBC) bei Wassertiefen von ca. 28 m eingesetzt. Erste Ergebnisse lassen auf eine ähnliche bis tendenziell eine etwas höhere schallmindernde Wirksamkeit, wie in den OWPs *Butendiek* und *Amrumbank West*, schließen (nicht veröffentlichte Messergebnisse der *itap GmbH* aus einem aktuellen Bauvorhaben).

Hydro-Sound Damper und „Großer Blasenschleier“

Diese beiden Schallschutzsysteme lassen sich aus logistischer und akustischer Sicht ebenfalls gut kombinieren, da der „Große Blasenschleier“ in einigem Abstand zur Rammbaustelle (i. d. R. mindestens 70 m) von einem eigenen Schiff aus operiert und das HSD-System vom Installationsschiff direkt bedient werden kann. In einem aktuellen Bauvorhaben wird das komplette HSD-System unterhalb des Pile-Grippers befestigt und von dort aus in Position gebracht.

Ein Vorteil der Anwendung eines HSD-Systems in Kombination mit einem doppelten „Großen Blasenschleier“ ist, dass das HSD-System noch hinsichtlich seiner zu erzielenden Schallminderungen im laufenden Betrieb verbessert bzw. projektspezifisch optimiert werden kann. Beim HSD könnten im Vorfeld durch geeignete Auswahl die HSD-Elemente auf bestimmte Frequenzen abgestimmt und optimiert werden, zudem ließe sich die Anzahl der HSD-Elemente vermutlich jederzeit durch den Komplettaustausch eines Netzes erhöhen.

Mit einer derartigen Kombination ließen sich bereits Schallminderungen um die 15 dB bis 17 dB realisieren (Ergebnis aus einem abgeschlossenen Bauvorhaben in 2014).

In einem derzeitigen Bauvorhaben wird ein optimiertes HSD-System in Kombination mit einem optimierten, doppelten Großen Blasenschleier (DBBC) bei Wassertiefen bis 35 m eingesetzt. Die resultierende Schallminderung beträgt ca. 21 dB (nicht veröffentlichte Messergebnisse der *itap GmbH* aus einem laufenden Bauvorhaben).

„Großer Blasenschleier“ und Grout Annulus Bubble Curtain

Der GABC stellt aus schalltechnischer Sicht eine gute ergänzende Schallschutzmaßnahme zu einem „großen Blasenschleier“ dar, da durch die räumliche Trennung zwei komplett eigenständige Schallschutzsysteme parallel betrieben werden.

Eine quantitative Abschätzung der resultierenden Schallminderung aus der Kombination aus GABC und DBBC ist aufgrund von fehlenden Erfahrungen derzeit noch nicht möglich. Ein Bauvorhaben im Jahr 2016 wird erste Ergebnisse liefern, wenn Skirt Piles unter Verwendung eines GABC Systems gerammt werden.

Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass sich die Schallminderungen jedes einzelnen (separat) eingesetzten Schallminderungssystems in der (einzahligen) Summe nicht addieren, sondern spektral aufsummiert werden müssen, d. h. zwei Schallminderungssysteme mit z. B. 17 dB und 6 dB Schallminderung bei Einzelanwendung ergeben in der Summe nicht notwendigerweise 23 dB Schallminderung bei zeitgleicher Anwendung, sondern eine geringere Gesamtschallminderung.

„Großer Blasenschleier“ und AdBm

Eine derartige Kombination wurde bisher noch nicht getestet, sodass keine Abschätzung möglich ist.

5.3 Einfluss der verwendeten Rammenergie

Eine weitere Möglichkeit der Schallminderungen ist, wie bereits erwähnt, die Reduzierung der verwendeten Rammenergie. Erfahrungsgemäß reduzieren sich die akustischen Kenngrößen um ca. 2,5 dB bei einer Halbierung der Rammenergie (Gündert, 2014). Durch Verwendung von „intelligenten“ Rammverfahren, wie z. B. HiLo, lässt sich unter Umständen die geringere Rammenergie durch eine Anhebung der Schlagfrequenz annähernd kompensieren. Hierbei sind jedoch im Vorfeld die Auswirkungen der höheren Anzahl an Rammschlägen auf Materialermüdungserscheinungen am Pfahl und am Rammhammer zu überprüfen. Zudem ist die Verwendung eines intelligenten Rammverfahrens abhängig vom Bodenwiderstandswert, der meist hochgradig von der Einbindetiefe abhängt; je höher die Einbindetiefe ist, desto höher muss i. d. R. die Rammenergie sein.

Das Schallminderungspotenzial von „intelligenten“ Rammverfahren wird derzeit bodenabhängig auf 2 dB bis 5 dB abgeschätzt, falls ein derartiges Rammverfahren überhaupt praktikabel ist. Im vorliegenden Fall ist davon auszugehen, dass eine Reduzierung der max. Rammenergie max. 5 dB aufgrund der ggf. hohen max. Rammenergie betragen könnte.

6. Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse

Beim Bau des Offshore-Windparks *Gennaker* sollen 103 Windenergieanlagen auf Monopiles mit einem Durchmesser von 7,00 m bis max. 8,00 m, sowie zwei Umspannplattformen auf Jacket-Fundamenten mit Pfählen von ca. 3,00 m Durchmesser errichtet werden.

Im Rahmen des Genehmigungsverfahrens 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, entsprechende Prognoseberechnungen durchzuführen.

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

- In der Prognose wurden 12 unterschiedliche Szenarien für drei Pfahldurchmesser und 4 unterschiedliche maximale Rammenergien betrachtet. Die Spannweite der untersuchten Rammenergien basiert auf der grundsätzlich zur Verfügung stehenden Leistung des in Frage kommenden Hammers. Die folgende Tabelle zeigt zusammenfassend die beurteilungsrelevanten Pegelgrößen für unterschiedliche Szenarien mit unterschiedlichen Rammenergien. Nach derzeitigem Kenntnisstand sind Rammenergien von 2.000 kJ für die Monopile Fundamente und 1.000 kJ für die Umspannplattformen ausreichend.

Durchmesser [m]	max. Rammenergie [kJ]	Einzelereignispegel SEL ₀₅ in 750 m [dB re 1 µPa ² s]	Spitzenpegel L _{Peak} in 750 m [dB re 1 µPa]
7,00	1.000	178	201
	2.000	181	204
	3.000	182	205
	4.000	184	206
8,00	1.000	179	202
	2.000	182	204
	3.000	183	206
	4.000	184	207
3,00 (USP)	1.000	175	198
	2.000	178	201
	3.000	179	203
	4.000	180	204

- Der „duale“ Lärmschutzwert von $160 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ wird entsprechend dieser schalltechnischen Prognose in 750 m beim Errichten der Gründungspfähle ohne Schallschutzmaßnahmen durch den Einzelereignispegel (SEL_{05}) um bis zu 22 dB für Monopiles und bis zu 15 dB für Jacket-Fundamente überschritten. Der Lärmschutzwert des Spitzenpegels L_{Peak} von $190 \text{ dB}_{L_{\text{Peak}}}$ wird voraussichtlich um bis zu 14 dB für Monopiles und bis zu 8 dB für die Jacket-Fundamente überschritten.
- Um eine Einhaltung der Lärmschutzwerte zu ermöglichen, sind Maßnahmen zur Schallreduzierung erforderlich.
- **OWEA-Fundamente (Monopile):** Mit einem optimierten Schallminderungskonzept, basierend auf den bisher eingesetzten Schallminderungsmaßnahmen vorangegangener Bauvorhaben (Kapitel 5.1), könnte die Einhaltung des dualen Lärmwertkriteriums mit einer Kombination aus Schallschutzsystemen in Kombination mit einer reduzierten Rammenergie (z. B. HiLo- Verfahren oder Smart-Pile-Driving-Verfahren) möglich sein. Voraussetzung ist jedoch eine optimale Funktion aller eingesetzten Schallschutzsysteme und ein auf die Installation angepasstes, optimiertes Schallschutzkonzept. Basierend auf Erfahrungen ist für eine Einhaltung der Lärmschutzwerte eine Kombination aus einem pfahlnahen und einem pfahlfernen Schallschutzsystem erforderlich, z. B. eines optimierten „Großen Blasenschleiers“ und eines HSD-Systems bzw. IHC-NMS-Systems. Zur Einschätzung der zu erwartenden Schallminderung der eingesetzten Schallschutzsysteme bzw. Schallminderungsmaßnahmen müssen allerdings für jedes System detaillierte Beschreibungen wesentlicher Systemkonfigurationen vorliegen und für den Einsatz projektspezifisch optimiert sein.
- **Umspannplattform (Jacket-Fundamente):** Mit einem optimierten Schallminderungskonzept, basierend auf den bisher eingesetzten Schallminderungsmaßnahmen vorangegangener Bauvorhaben (Kapitel 5.1), könnte die Einhaltung des dualen Lärmwertkriteriums mit einer Kombination aus mindestens einem Schallschutzsystem mit einer reduzierten Rammenergie (z. B. HiLo- Verfahren oder Smart-Pile-Driving-Verfahren) möglich sein. Voraussetzung ist jedoch eine optimale Funktion aller eingesetzten Schallminderungsmaßnahmen und ein auf die Installation angepasstes, optimiertes Schallschutzsystem. Basierend auf Erfahrungen kann durch reduzierte Rammenergie bis ca. 1.000 kJ in Kombination mit einem optimierten doppelten „Großen Blasenschleiers“ eine Einhaltung der Lärmschutzwerte möglich sein. Bei höheren notwendigen Rammenergien müsste gegebenenfalls ein zweites unabhängiges pfahlnahes Schallschutzsystem vorgehalten

werden. Zur Einschätzung der zu erwartenden Schallminderung der eingesetzten Schallschutzsysteme bzw. Schallminderungsmaßnahmen müssen allerdings für jedes System detaillierte Beschreibungen wesentlicher Systemkonfigurationen vorliegen und für den Einsatz projektspezifisch optimiert sein.

Oldenburg, den 01. Juni 2016



Patrick Remmers, B. Eng.



Dr. Michael A. Bellmann

7. Verwendete Literatur

- Bellmann M, Gündert S & Gerke P (2013)** Offshore Messkampagne 1 (OMK 1) für das Projekt BORA im Windpark BARD Offshore 1 - BORA: Entwicklung eines Berechnungsmodells zur Vorhersage des Unterwasserschalls bei Rammarbeiten zur Gründung von OWEA, itap Messbericht Nr. 1924-12-mb für das geförderte Forschungsprojekt BORA des BMWi und PTJ FKZ 0325421A
- Bellmann M (2014)** Overview of existing Noise Mitigation Systems for reducing Pile-Driving Noise. Proceeding auf der Internoise 2014, Melbourne Australien
- Bellmann M, Holst H, Gündert S, Müller M, Remmers P & Schultz-von Glahn M (2015)** Neue Erkenntnisse zur Wirkungsweise eines „Großen Blasenschleiers“ (GBS) durch Druckverteilungs- und Hydroschallmessungen, Vortrag auf der Abschlussveranstaltung zum geförderten Forschungsprojekt des BMWi und PTJ FKZ 0325645A/B/C/D im Rahmen des AK-Hydroschalls am 25. März 2015 an der TUHH.
- Betke K, Schultz-von Glahn M & Matuschek R (2004):** Underwater noise emissions from offshore wind turbines. In: Proceedings of the joint congress CFA/DAGA'04, pp. 591-592, Strasbourg
- BMU (2013)** Konzept für den Schutz der Schweinswale vor Schallbelastungen bei der Errichtung von Offshore-Windparks in der deutschen Nordsee (Schallschutzkonzept), https://www.bfn.de/fileadmin/BfN/awz/Dokumente/schallschutzkonzept_BMU.pdf
- 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
- 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
- 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
- Jensen FB, Kuperman WA, Porter MB & Schmidt H (2010):** Computational Ocean Acoustics. Springer Verlag, AIP Press
- Johnson DH (1982):** The application of spectral estimation methods to bearing estimation problems, Proc. IEEE 70, 1018-1028.
- Nehls G & Bellmann MA (2015)** Weiterentwicklung und Erprobung des „Großen Blasenschleiers“ zur Minderung der Hydroschallemissionen bei Offshore-Rammarbeiten. Gefördert durch PTJ und BMWi, FKZ 0325645A/B/C/D.

- Remmers P, Bellmann M (2015)** Untersuchung und Erprobung von Hydroschalldämpfern (HSD) zur Minderung von Unterwasserschall bei Rammarbeiten für Gründungen von Offshore-Windenergieanlagen, itap Messbericht Nr. 1918-d-mb für das geförderte Forschungsprojekt BORA des BMWi und PTJ 0325365
- StUK4 BSH (2013)** Standard Untersuchung der Auswirkungen von Offshore-Windenergieanlagen auf die Meeresumwelt (StUK4), Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg
- Thiele & Schellstede (1980)** Standardwerte zur Ausbreitungsdämpfung in der Nordsee. FWG-Bericht 1980-7, Forschungsanstalt der Bundeswehr für Wasserschall und Geophysik
- Umweltbundesamt (2011)** Empfehlung von Lärmschutzwerten bei der Errichtung von Offshore-Windenergieanlagen (OWEA). Information Unterwasserlärm, Umweltbundesamt Berlin
- Urlick (1983)** Principles of underwater sound, 3rd ed. Pensinsula Publishing, Los Altos