

# Ansprengungen der Ex „Karlsruhe“

## Schalltechnische Stellungnahme der zu erwartenden Hydroschallimmissionen während der Ansprengungen

**Projekt Nr.: 3542**

Oldenburg, den 25. August 2020

Version 5

Auftraggeber: BioConsult SH GmbH & Co. KG  
Schobueller Str. 36  
25813 Husum

Bearbeiter: Patrick Remmers, B. Eng.  
Marina Rosemeyer, B. Sc.

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

Berichtsumfang: 26 Seiten



Messstelle nach §26 BImSchG  
für Geräusche und Erschütterungen

Akkreditiertes Prüflaboratorium nach  
DIN EN ISO 17025

**Telefon**

(0441) 570 61-0

**Fax**

(0441) 570 61-10

**Email**

info@itap.de

**Postanschrift**

Marie-Curie-Straße 8

26129 Oldenburg

**Geschäftsführer**

Dr. Michael Bellmann

Dipl. Phys. Hermann Remmers

**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

## Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse .....	3
2. Einleitung und Aufgabenstellung.....	4
3. Schalltechnische Grundlagen .....	5
3.1 Pegelgrößen .....	5
3.2 Schallausbreitung in flachen Gewässern.....	8
3.3 Einflüsse von Salzgehalts- und Temperaturschichtungen in der Ostsee .....	10
4. Berechnungsgrundlagen.....	12
4.1 Aufbau des verwendeten Prognosemodells .....	12
4.2 Einfluss der Wassertiefe .....	14
4.3 Schalltechnisch relevante Eingangsdaten .....	16
5. Ergebnisse der Prognose .....	17
5.1 (Einzahlige) Spitzenpegel und Einzelereignispegel in 1000 m Entfernung .....	17
5.2 Spitzenpegel und Einzelereignispegel über die Entfernung .....	17
5.3 Evaluation .....	20
5.4 Fehlerbetrachtung .....	21
6. Schallschutz .....	21
7. Verwendete Literatur.....	26

## 1. Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse

Die a. D. gestellte Fregatte Ex "Karlsruhe" dient als Erprobungsträger bei Ansprengungen mit unterschiedlicher Sprengkraft.

Die itap- Institut für technische und angewandte Physik GmbH wurde beauftragt, eine Stellungnahme zu den zu erwartenden Hydroschallimmissionen während der Ansprengungen durchzuführen.


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


- Es ergeben sich nachfolgende beurteilungsrelevante Pegelgrößen.

Sprengladung [kg TNT]	Einzelereignispegel (SEL <sub>05</sub> ) in 750 m [dB re 1 µPa <sup>2</sup> s]	Spitzenpegel (L <sub>p,pk</sub> ) in 750 m [dB re 1 µPa]
0,05	172	197
50	191	219
750	198	228

- Der „duale“ Lärmschutzwert für Rammschallimmissionen von 160 dB für den Einzelereignispegel (SEL) wird bei der maximalen Sprengladung von 750 kg TNT je nach Ausbreitungsrichtung ab Entfernungen zwischen 34,750 km Richtung Norden und 35,900 km Richtung Osten unterschritten. Der Lärmschutzwert bezüglich des Spitzenpegels (L<sub>p,pk</sub>) von 190 dB wird in Entfernungen ab 34,600 km Richtung Norden und 35,800 km in Richtung Osten unterschritten.
- Durch den Einsatz eines Blasenschleiers lassen sich die Entfernungen, in denen der Lärmschutzwert überschritten wird, deutlich reduzieren. Bei der Annahme, dass der Blasenschleier 10 dB Dämpfung erzielt, reduzieren sich die Entfernungen auf 15,75 km für den Einzelereignispegel (SEL) und 15,65 km für den Spitzenpegel (L<sub>p,pk</sub>).

Oldenburg, den 25. August 2020

  
Patrick Remmers, B. Eng.

  
Marina Rosemeyer, B. Sc.

## 2. Einleitung und Aufgabenstellung

Die a. D. gestellte Fregatte Ex "Karlsruhe" dient als Erprobungsträger zur Durchführung von zwei Versuchsreihen:

Versuchsreihe 1 Ansprenung zur Untersuchung der Schocksicherheit mit den Schwerpunkten:

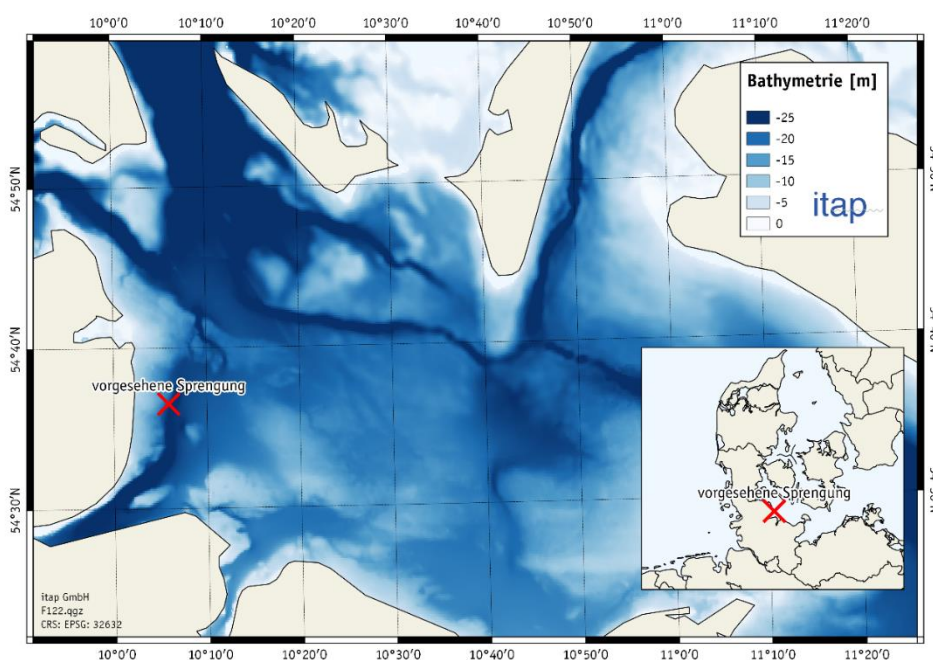
- Sicherheit der Besatzung
- Standkraft bei Schockeinwirkung

Versuchsreihe 2 zur Waffenwirkungsuntersuchung mit den Schwerpunkten:

- Beschuss
- Blast

Bei diesen Versuchen werden Messungen der Schockbelastung an der Schiffsstruktur (Beschleunigungsmessungen, Wegmessungen, Dehnungsmessungen) zur Gewinnung von Messdaten bei hohen Schocklasten durchgeführt. Die gewonnenen Messdaten sollen u. a. zur Validierung von Simulationsprogrammen genutzt werden. Es werden maximal 6 Ansprenungen mit ansteigender Schockbelastung durchgeführt.

Die *itap- Institut für technische und angewandte Physik GmbH* wurde beauftragt, eine Stellungnahme zu den zu erwartenden Hydroschallimmissionen während der Sprengungen, ohne den Einsatz von Schallminderungssystemen, durchzuführen.



**Abbildung 1:** Position der vorgesehenen Ansprenungen und Bathymetrie (Quelle: EMODnet) in der Umgebung des Vorhabens.

### 3. Schalltechnische Grundlagen

Schall ist eine rasche, oft periodische Schwankung des Drucks, die den Umgebungsdruck (im Wasser der hydrostatische Druck) additiv überlagert. Dabei handelt es sich um eine Hin- und Her-Bewegung der Wasserteilchen, die üblicherweise durch deren Geschwindigkeit, der sogenannten Schallschnelle  $v$  (engl. particle velocity), beschrieben wird. Die Schallschnelle kennzeichnet die Wechselgeschwindigkeit eines um seine Ruheposition in einem Medium schwingenden Teilchens. Die Schallschnelle ist nicht zu verwechseln mit der Schallgeschwindigkeit  $c_{Wasser}$ , also der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schall in einem Medium, die in der Regel bei Wasser im Bereich von  $c_{Wasser} = 1.500 \text{ m/s}$  liegt. Die Schallschnelle  $v$  ist deutlich geringer als die Schallgeschwindigkeit  $c$ .

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

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

Im Fernfeld, d. h. in einigen Wellenlängen Abstand<sup>1</sup> (frequenzabhängig) von der Schallquelle, ist die Kennimpedanz gegeben durch:

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

mit  $\rho$  - Dichte des Mediums

und  $c$  - Ausbreitungsgeschwindigkeit.

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

#### 3.1 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).

---

<sup>1</sup> 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  $\geq 5\lambda$ .

Allerdings gibt es verschiedene Schallpegelgrößen:

- (Energie-) äquivalenter Dauerschallpegel SPL (Mittelungspegel),
- Einzelereignispegel SEL,
- Spitzenpegel  $L_{p,pk}$ .

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

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

### (Energie-) äquivalenter Dauerschallpegel SPL

Der  $L_{eq}$  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  $\mu\text{Pa}$ ),  
 $T$  - Mittelungszeit.

### Einzelereignispegel (SEL)

Zur Charakterisierung von Rammgeräuschen ist der SPL allein kein ausreichendes Maß, da er nicht nur von der Stärke der Rammschläge abhängt, sondern auch von der Mittelungszeit und von den Pausen zwischen den Rammschlägen. Besser geeignet ist der Einzelereignispegel SEL bzw.  $L_E$ , der folgendermaßen definiert ist:

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

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 Pegel (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 den mittleren Einzelereignispegel (SEL) von  $n$  Schallereignissen (Rammschlägen) aus nur einer Schalldruckpegel (SPL)-Messung.

Im Falle, dass der Hintergrundpegel zwischen den Rammschlägen deutlich geringer als der Rammschall ist (z. B.  $> 10$  dB), kann mit hinreichender Genauigkeit mit einer Vereinfachung von Gleichung 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 kurzzeitige Schalldruckmaxima. Im Gegensatz zum Schalldruckpegel (SPL) und Einzelereignispegel (SEL) gibt es keine Mittelwertbildung:

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

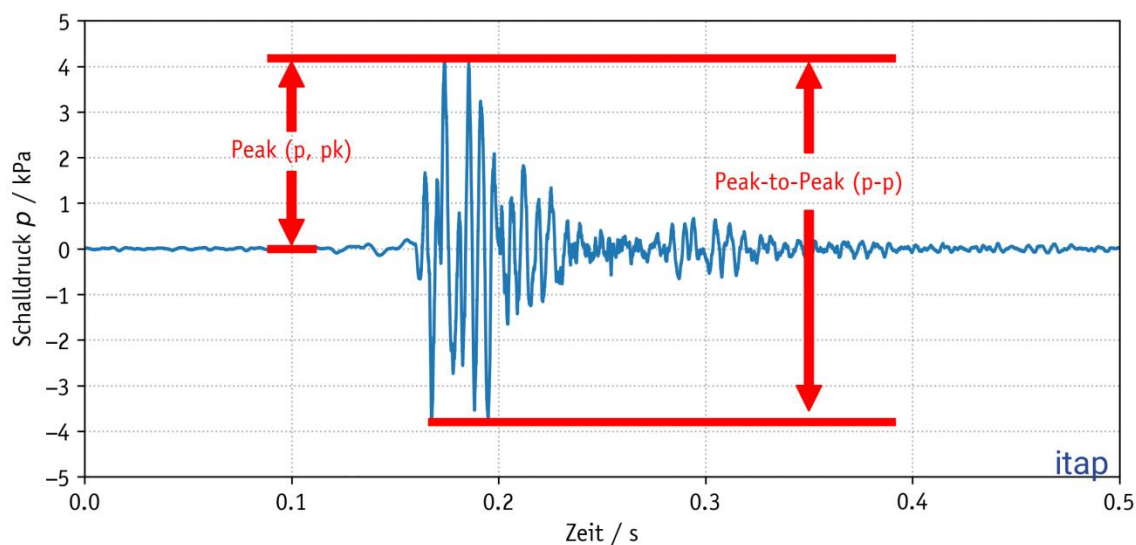
mit

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

Ein Beispiel ist in Abbildung 2 dargestellt. Der Spitzenpegel  $L_{p,pk}$  ist stets höher als der Einzelereignispegel (SEL). 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. Einige Autoren bevorzugen den Peak-to-Peak-Pegel ( $L_{p,pk}$ ) anstelle des  $L_{p,pk}$ . Eine Definition dieses Parameters ist in Abbildung 2 gegeben. Dieser Faktor beschreibt nicht den maximal erreichten (absoluten) Einzelereignispegel (SEL), sondern die Differenz zwischen der negativen und der positiven Amplitude eines Impulses (Abbildung 2). Dieser Wert ist maximal 6 dB höher als der Spitzenpegel  $L_{p,pk}$ .



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

## 3.2 Schallausbreitung in flachen Gewässern

### 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:

$$TL = k \cdot \log_{10} \left( \frac{r_1}{r_2} \right) \text{ [dB]} \quad \text{Gl. 8}$$

mit

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

Häufig wird die Ausbreitungsdämpfung für den Abstand  $r_1 = 1$  m (fiktiver Abstand zur punktförmig gedachten Quelle) angegeben. Daraus wird die Schalleistung eines Ramm-



hammers in einem Abstand von 1 m berechnet. Oft wird dies als Quellpegel bezeichnet. Gleichung 8 vereinfacht sich dann zu  $TL = k \log(r/\text{Meter})$ . Zusätzlich ist zu beachten, dass die oben genannte Gleichung nur für das Fernfeld eines akustischen Signals gilt, d. h. in einiger Entfernung (frequenzabhängig) zur Quelle.

Darüber hinaus wird die Absorption im Wasser in Abständen von mehreren Kilometern deutlicher und führt zu einer weiteren Reduzierung des Schalldrucks. Dies wird mit einer Konstanten proportional zum Abstand betrachtet.

Gl. 8 erweitert sich auf:

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

In der "Richtlinie für Unterwasserlärm – Installation von Rammpfählen" (Energi Styrelsen, 2016) ist die folgende Ausbreitungsdämpfung für Lärmereignisse in der Ost- und Nordsee mit Wassertiefen bis zu 50 m angegeben.

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

Bei dieser einfachen Berechnung wird jedoch nicht berücksichtigt, dass eine Abnahme des Schalldrucks mit dem Abstand von der Frequenz abhängt. Darüber hinaus wirkt sich das Wetter auf den Schallpegel im Wasser in großen Entfernungen aus; der Schalldruckpegel ist bei starkem Wind und starker See geringer. Dies ist die Folge einer höheren Oberflächenrauigkeit des Meeres und stärkeren Lufteinschlüssen in der oberen Meeresschicht durch die Wellenschläge.

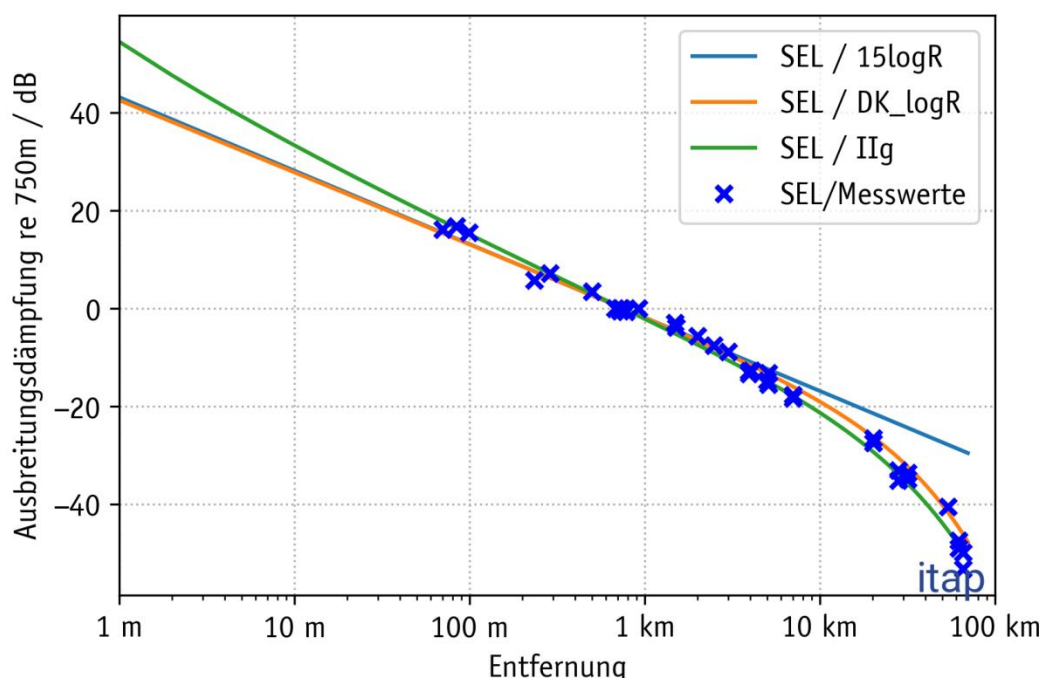
Thiele und Schellstede (1980) spezifizierten Näherungsgleichungen zur Berechnung der Schallausbreitung in verschiedenen Regionen der Nordsee sowie für "raue" und "glatte" See. Für die Installation der Fundamente ist eine "glatte" See erforderlich. Die folgende Gleichung für flaches Gewässer und ruhige See (IIg) kann daher mit den Messergebnissen verglichen werden:

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

mit

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

$R$  – Entfernung/Abstand.



**Abbildung 3:** Verschiedene, prognostizierte Durchgangsdämpfungs-Kurven (Transmission Loss - TL) gemäß dem semi-empirischen Ansatz von Thiele und Schellstede (1980) und Energi Styrelsen (2016) im Vergleich zu bestehenden Offshore-Messdaten. IIg: flaches Gewässer, ruhige See und  $15 \log_{10}(R)$ : allgemeine, geometrische Ausbreitungsdämpfung (TL) (konservativer Ansatz),  $DK_{\log R}$ :  $14,72 \log_{10}(R) + 0,00027 R$ ; Energi Styrelsen (2016).

Beide Gleichungen zeigen eine hohe Ähnlichkeit und eine hohe Übereinstimmung mit den Messwerten (siehe Abbildung 3). Nur für Abstände von weniger als 100 m unterscheiden sich beide Gleichungen voneinander.

### 3.3 Einflüsse von Salzgehalts- 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. Dies hat zur Folge, dass es gerade in den Sommermonaten zu Strömungsbedingungen kommen kann, bei denen eine vollständige Durchmischung des Wassers, wie es für die angenommene Ausbreitungsdämpfung nach Gleichung 11 vorausgesetzt wird, 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 darunterliegenden Schichtungen. Da sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls unter Wasser mit zunehmender Temperatur oder Salinität erhöht, kommt es an den Übergängen zweier Schichtungen zu einer Beugung des Schalls in Richtung der Schicht mit der geringeren Ausbreitungsgeschwindigkeit. Tritt dieser Effekt an zwei gegenüberliegenden Grenzschichten (z. B. oben: höhere Temperatur, unten: höherer Salzgehalt) auf, kann sich der Schall aufgrund einer gerichteten Verteilung der vorhandenen Schalleistung und geringerer Verluste durch Reflektionen innerhalb dieser Schichtung mit einer deutlich geringeren Dämpfung ausbreiten. Es entsteht ein „Schallkanal“. Dies funktioniert jedoch nur, wenn die Wellenlängen im Verhältnis zur Höhe des Schallkanals nicht zu groß werden. Damit die Schallimmissionen von Sprengungen, die üblicherweise im Frequenzbereich  $\ll 1000$  Hz (maximale Schalleintragung ins Wasser  $< 100$  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, 1992). Dieses ist bei Wassertiefen von ca. 25 m, wie sie im Testfeld vorliegen, nicht möglich.

Die Bundeswehr (WTD71) konnte in wenig befahrenen Bereichen in der Ostsee den Einfluss von derartigen Schallkanälen auf akustische Signale mehrfach messtechnisch nachweisen (Vortrag auf der 2. DUH Schallschutztagung, Berlin, 2014). Der Effekt der Schallkanäle betrug 10 dB und mehr auf einer Distanz von mehreren Kilometern. D. h. Schall innerhalb des Schallkanals wurde um 10 dB weniger bei der Schallausbreitung über mehrere Kilometer in der Amplitude reduziert, als Schall ober- und unterhalb dieses Schallkanals. Jedoch wurde in diesem Vortrag deutlich darauf hingewiesen, dass es sich bei den Testsignalen nicht um Tieffrequente Impulse, 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 Wellenlängen von  $1/10$  und weniger) als der in diesen Bericht betrachtete Impulsschall.

Während der Bauarbeiten im OWP *EnBW 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 langanhaltenden „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 OWP *EnBW Baltic 2* wurden permanent Messungen in Entfernungsbereichen zwischen 750 m und  $> 40$  km, z. T. in unterschiedlichen Hydrophonhöhen über Grund, durchgeführt. Es konnten bei den Installationen von 39 Monopiles und insgesamt 123 Pfählen für die 41 Jacket-Fundamentstrukturen zu keinem Zeitpunkt eine verminderte Schallabsorption bei der Ausbreitung im Wasser messtechnisch nachgewiesen werden (Bellmann *et al.*, 2014).

Eine Berücksichtigung dieser Einflüsse in der Prognose ist somit nicht erforderlich.

## 4. Berechnungsgrundlagen

### 4.1 Aufbau des verwendeten Prognosemodells

Soloway und Dahl (2014) entwickelten ein empirisches Modell zur Berechnung des erwarteten Lärmpegels bei Detonationen im Verhältnis zum Ladungsgewicht und zur Entfernung. Als Eingangsdaten dienten Messdaten von Detonationen in Entfernungen bis zu 7 km. Dieses Modell betrachtet eine frequenzunabhängige Ausbreitungsdämpfung im Wasser, was eine gute Annäherung für Entfernungen  $< 10$  km ist. In größeren Entfernungen gibt es jedoch relevante frequenzabhängige Einflüsse auf die Ausbreitungsdämpfung. Darüber hinaus steigt auch der Einfluss des Wetters auf den Schallpegel im Wasser mit der Entfernung; der Schalldruckpegel wird bei starkem Wind und starker See stärker gedämpft. Dies ist die Folge einer höheren Oberflächenrauigkeit des Meeres und stärkerer Lufteinschlüsse in der oberen Meeresschicht durch Wellenschlag, was sich insbesondere bei höheren Frequenzen auswirkt.

Um die Ungenauigkeit durch den frequenzunabhängigen Übertragungsverlust zu reduzieren, wird diese Prognose das Modell von Soloway und Dahl (2014) nur zur Abschätzung der Quellstärke verwenden. In diesem Fall sind das der erwartete Spitzenpegel ( $L_{p,pk}$ ) und der Einzelereignispegel (SEL) in 1.000 m.

Nach Soloway & Dahl (2014) kann der Spitzenschalldruck wie folgt berechnet werden:

$$p_{p,pk} = 52.4 \times 10^6 \left( \frac{R}{W^{\frac{1}{3}}} \right)^{-1.13} \quad \text{Gl. 12}$$

wobei  $p_{p,pk}$  der Spitzendruck in Pa ist, mit dem Radius  $R$  in Metern, dem Spitzenschalldruck  $p_{p,pk}$  in Pa und dem Ladungsgewicht  $W$  in kg TNT. Dadurch berechnet sich der Spitzenpegel  $L_{p,pk}$  als:

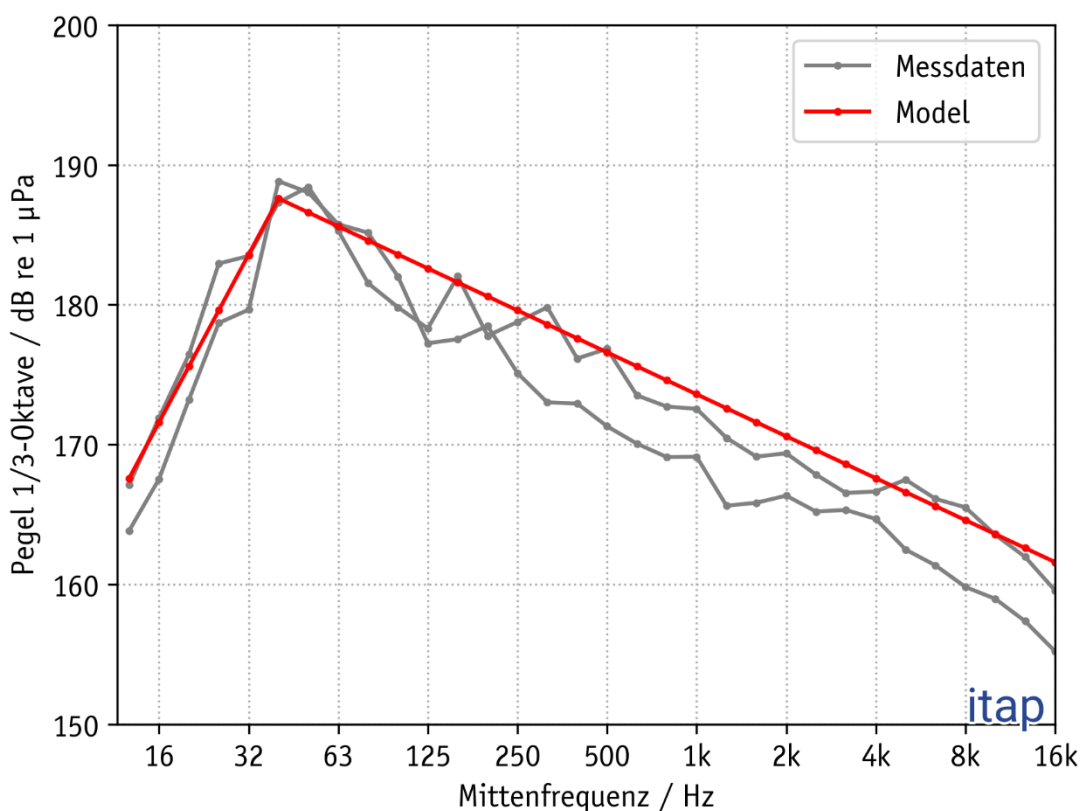
$$L_{p,pk} = 20 \log_{10} \left( \frac{p_{p,pk} 10^6}{p_0} \right) [\text{dB re } 1 \mu\text{Pa}] \quad \text{Gl. 13}$$

mit  $p_0 = 1 \mu\text{Pa}$ .

Der Einzelereignispegel (SEL) kann wie folgt berechnet werden:

$$SEL = 6.14 \times \log_{10} \left( W^{\frac{1}{3}} \left( \frac{R}{W^{\frac{1}{3}}} \right)^{-2.12} \right) + 219 \quad \text{Gl. 14}$$

Die frequenzabhängige Ausbreitungsdämpfung wird gemäß Thiele & Schellstede (1980) nach Gleichung 11 für flaches Wasser und glatte See berechnet. Um eine frequenzabhängige Ausbreitungsdämpfung für den Einzelereignispegel berücksichtigen zu können, müssen Abschätzungen über die Frequenzzusammensetzung (Spektrum) vorgenommen werden. Abbildung 4 zeigt die spektrale Verteilung des Einzelereignispegels (SEL) bei UX0-Detonationen in der Nordsee (graue Linien) in 1,5 km Entfernung. Daraus ergibt sich das rot dargestellte Modellspektrum.



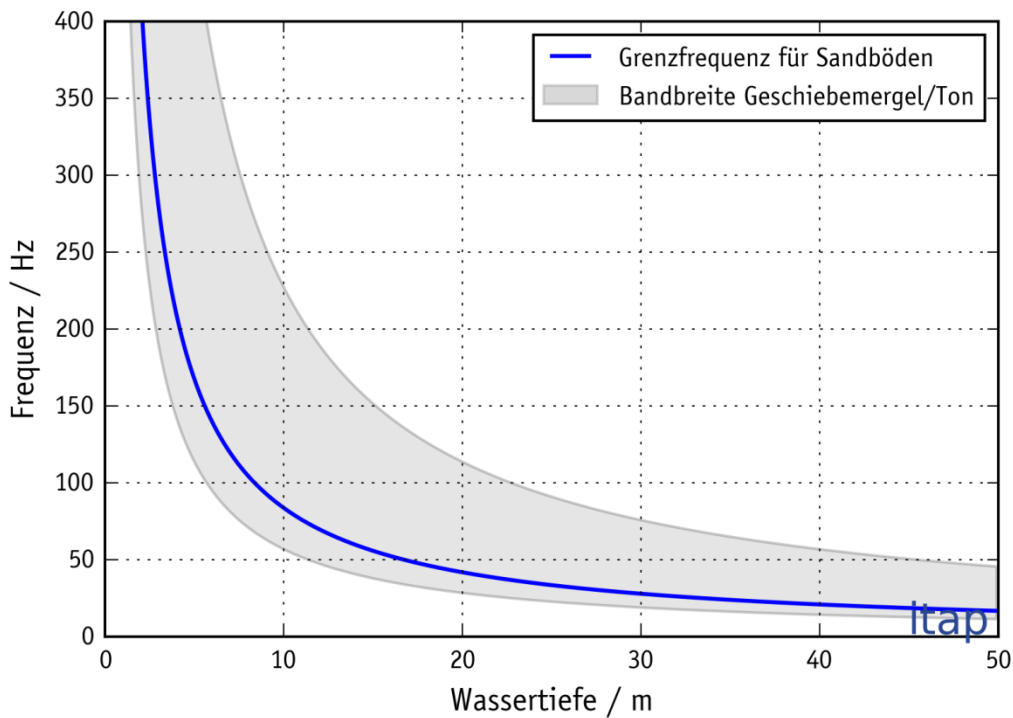
**Abbildung 4:** 1/3 Oktav-Spektren bei unterschiedlichen Uxo-Detonationen in der Nordsee in ca. 1,5 km Entfernung und das daraus resultierende Modellspektrum.

## 4.2 Einfluss der Wassertiefe

Die Schallausbreitung im Meer wird auch von der Wassertiefe beeinflusst. Unterhalb einer bestimmten Grenzfrequenz ist keine kontinuierliche Schallausbreitung möglich; je flacher das Gewässer umso höher ist diese (Grenz-) Frequenz.

In ca. 24 m tiefem Wasser liegt die Grenzfrequenz  $f_g$  je nach Sedimenttyp in der Größenordnung von deutlich unter 100 Hz (Urick, 1983). In der nachfolgenden Abbildung 5 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.*, 2000). Für die Prognose des Einzelereignispegels werden die Frequenzen unterhalb dieser Grenzfrequenz mit einer erhöhten Dämpfung von 12 dB pro Oktave berücksichtigt. Es zählt dabei die minimale Wassertiefe zwischen der Quelle und der betrachteten Position. Es wird in

der Prognose angenommen, dass die Differenz zwischen Spitzenpegel ( $L_{p,pk}$ ) und Einzelereignispegel (SEL) konstant über die Entfernung ist.



**Abbildung 5:** Theoretische untere Grenzfrequenz  $f_g$  für eine ungestörte Schallausbreitung im Wasser als Funktion der Wassertiefe für unterschiedliche Bodenschichtungen (Urlick, 1983; Jensen et al., 2000).

### 4.3 Schalltechnisch relevante Eingangsdaten

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

- Sprengstoff: TNT
- Sprengladungen: 50 g, 50 kg und 750 kg
- Modellspektrum: siehe Abbildung 4
- Wassertiefen: gemäß EMODnet
- Quellpegel: gemäß Soloway und Dahl (2014)
- Ausbreitungsdämpfung: gemäß Thiele & Schellstede (IIg, 1980)



## 5. Ergebnisse der Prognose

### 5.1 (Einzahlige) Spitzenpegel und Einzelereignispegel in 1000 m Entfernung

Gemäß den Gleichungen 13 und 14 ergeben sich in 1.000 m Entfernung die folgenden Einzelereignis- und Spitzenpegel für unterschiedliche Sprengladungen:

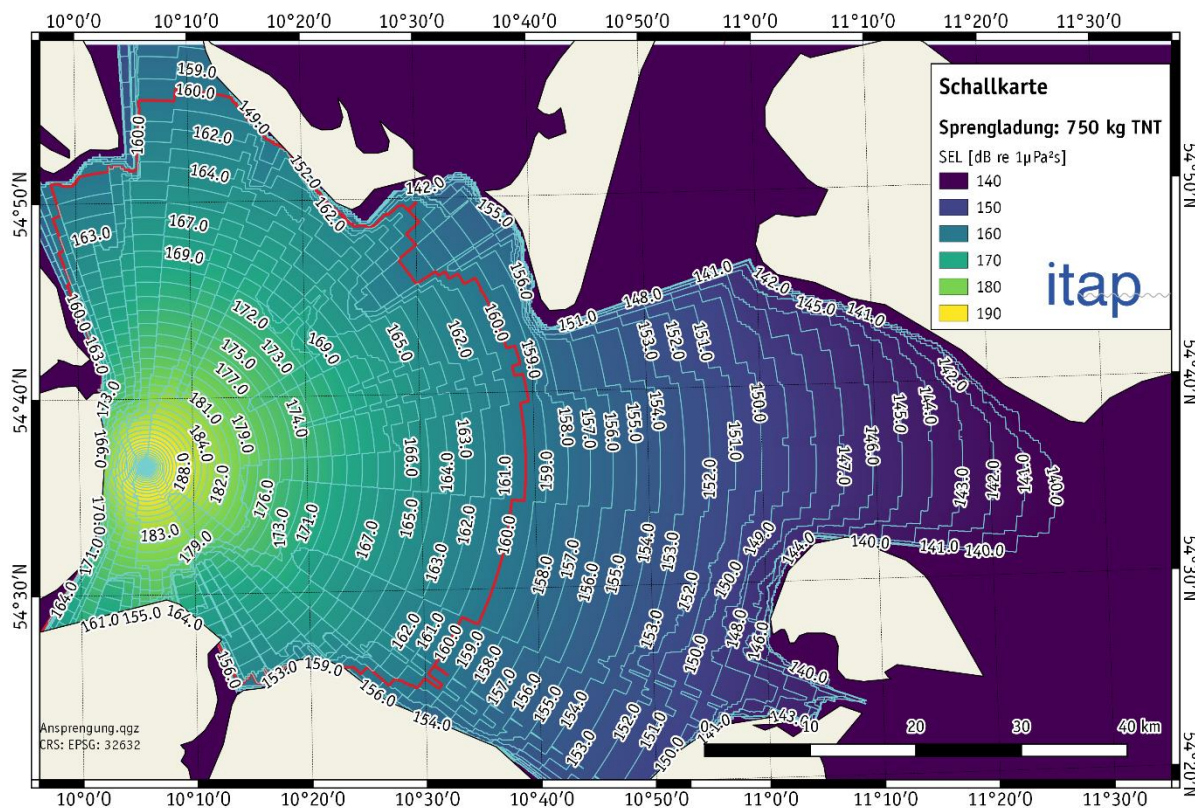
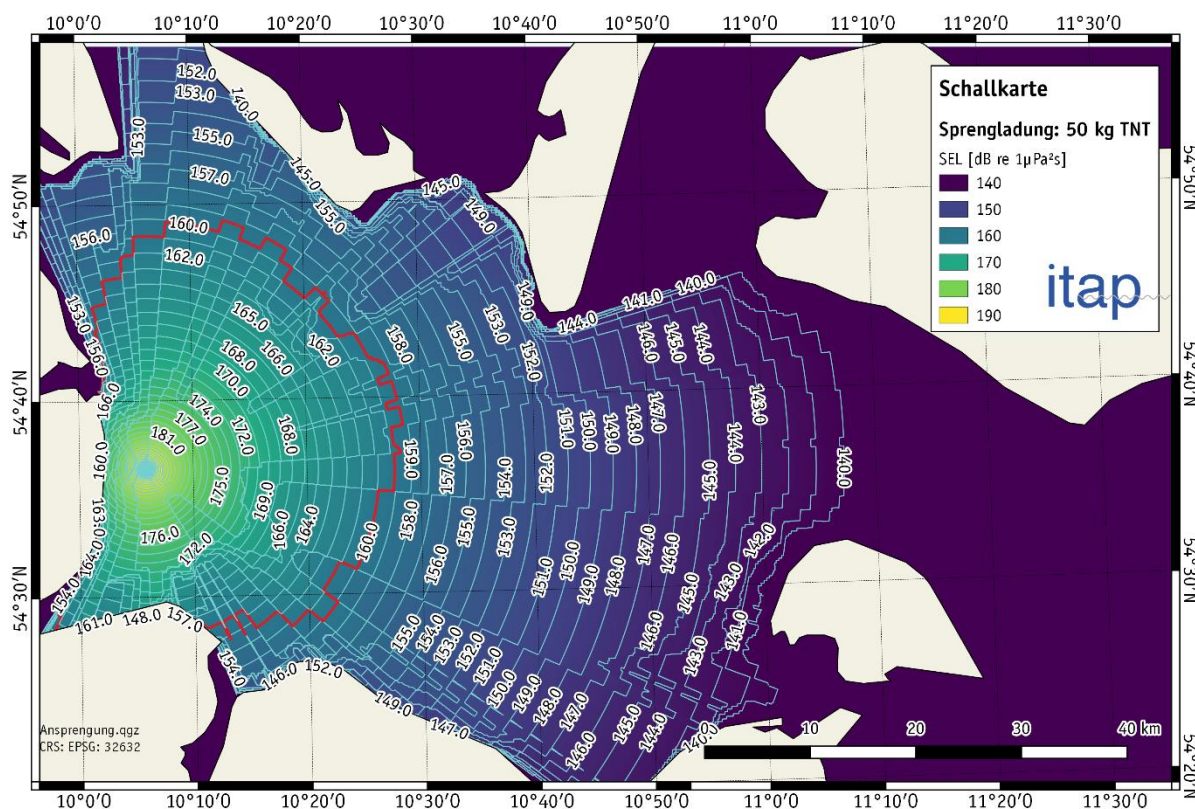
**Tabelle 1:** Prognostizierte Pegelgrößen in 1.000 m Entfernung in Abhängigkeit von der Sprengladung.

Sprengladung [kg TNT]	Einzelereignispegel ( SEL) in 1.000 m [dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ ]	Spitzenpegel ( $L_{p,pk}$ ) in 1.000 m [dB re 1 $\mu\text{Pa}$ ]
0,05	172	197
50	191	219
750	198	228

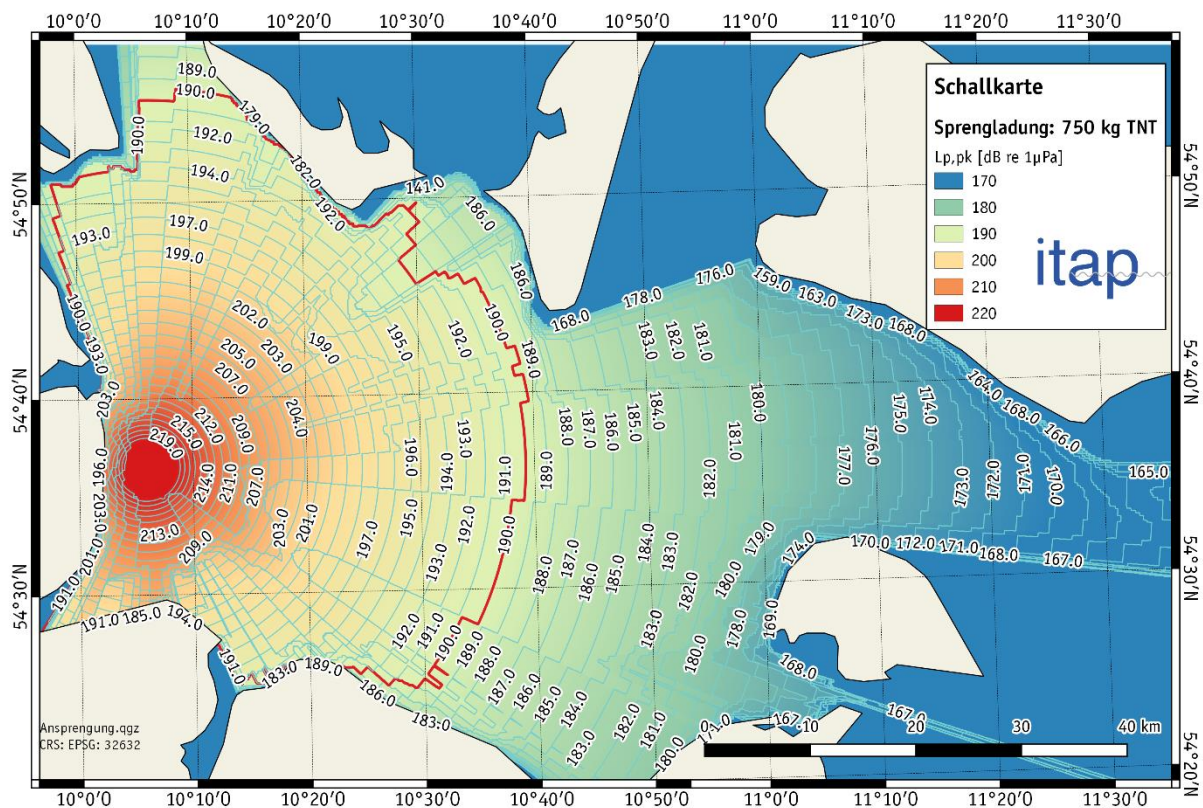
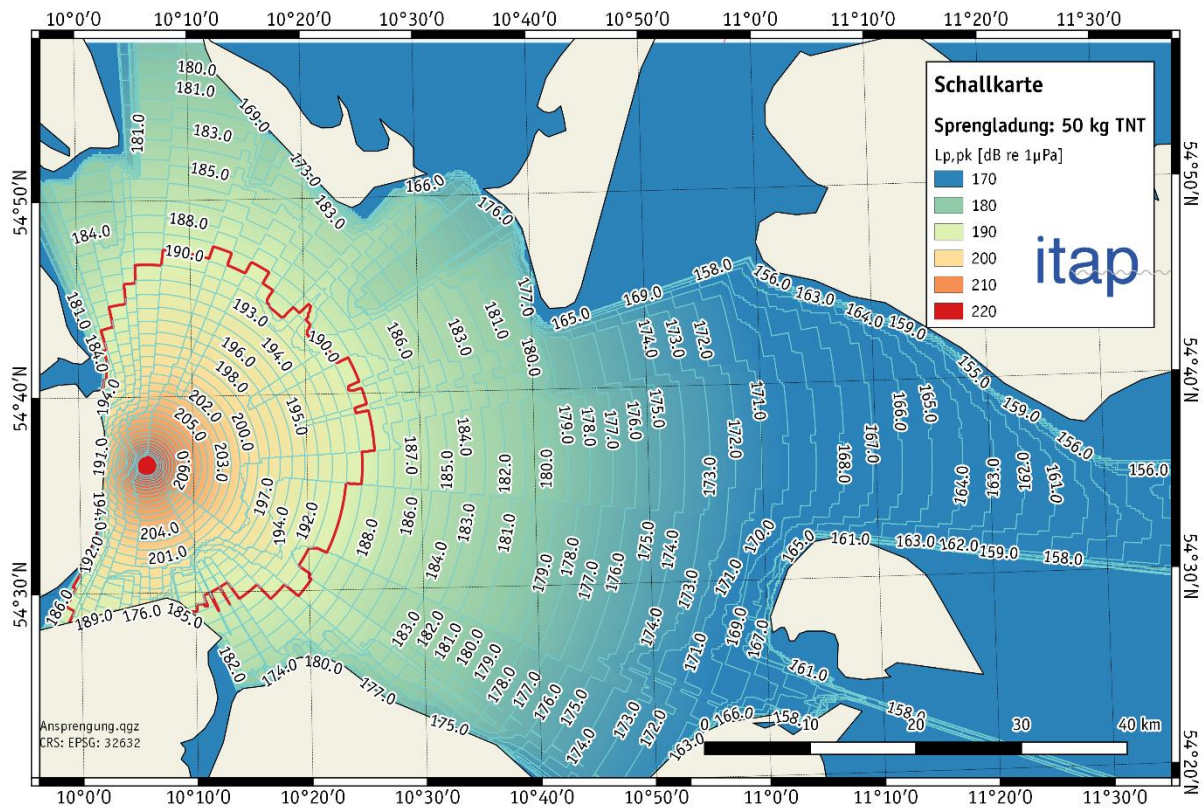
### 5.2 Spitzenpegel und Einzelereignispegel über die Entfernung

In den folgenden Abbildungen (Abbildung 6 und Abbildung 7) werden die zu erwartenden Schalldruckpegel während der Sprengungen für die Varianten mit 50 kg und 750 kg Sprengladung als Schallkarten im Vorhabengebiet für den Einzelereignispegel (SEL) und den Spitzenpegel ( $L_{p,pk}$ ) dargestellt.

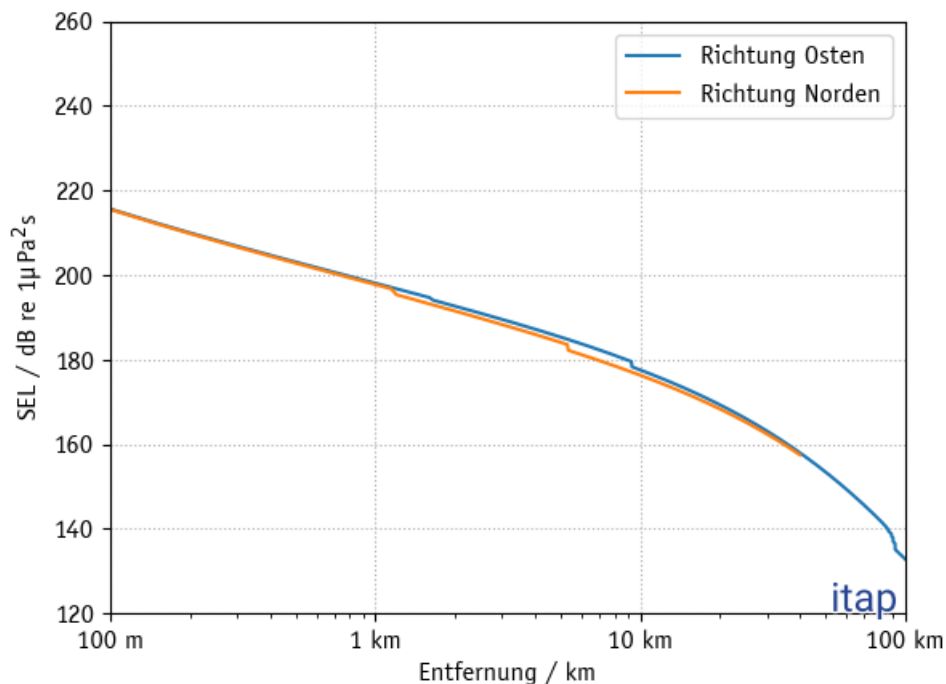
Die darauffolgende Abbildung 8 zeigt den Einzelereignispegel (SEL) bei einer Sprengladung von 750 kg TNT als Funktion über die Entfernung für die Ausbreitung in nördlicher als auch in östlicher Richtung.



**Abbildung 6:** Immissionsraster des Einzelereignispegels (SEL) während der Sprengung einer TNT Ladung. Oben mit 50 kg TNT und unten mit 750 kg TNT.



**Abbildung 7:** Immissionsraster des Spitzenpegels ( $L_{p,pk}$ ) während der Sprengung einer TNT Ladung. Oben mit 50 kg TNT und unten mit 750 kg TNT.



**Abbildung 8:** Vergleich des Einzelereignispegels über die Entfernung in unterschiedlichen Richtungen: Blau: Richtung Osten, Orange: Richtung: Norden.

### 5.3 Evaluation

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 dB<sub>SEL</sub> und den Spitzenpegel ( $L_{p,pk}$ ) von 190 dB<sub>L<sub>p,pk</sub></sub> festgesetzt, die es in 750 m Entfernung bei Rammarbeiten einzuhalten gilt. Diese Lärmschutzwerte sind insbesondere zum Schutz der Schweinswale gegen temporäre Hörschwellenverschiebungen entwickelt worden. Da es sich bei den Sprengungen ebenfalls um Impulsschall handelt, werden zur Beurteilung der Schallimmissionen diese Werte herangezogen.

Aufgrund der örtlichen Gegebenheiten ist keine omnidirektionale Schallausbreitung möglich. Auch können nicht in allen Richtungen Entfernungen erreicht werden, in denen die erwarteten Pegelgrößen bis auf die Beurteilungspegel abgeklungen sind. Aus diesen Grund werden in der folgenden Tabelle 2 die Entfernungen in denen die Beurteilungspegel von 160 dB für den Einzelereignispegel (SEL) und 190 dB für den Spitzenpegel ( $L_{p,pk}$ ) jeweils in nördlicher und in östlicher Richtung angegeben. Die Entfernung von 750 m in der beide Beurteilungspegel eingehalten werden sollten, wird bei den Ansprengungen deutlich überschritten.

**Tabelle 2:** Entfernungen in denen die Beurteilungspegel des Einzelereignispegels (SEL) von 160 dB, 164 dB und 184 dB und des Spitzenpegels ( $L_{p,pk}$ ) von 190 dB erreicht werden.

Richtung	Sprengladung [kg TNT]	Entfernung [km] in der ein SEL von 160 dB erreicht wird	Entfernung [km] in der ein SEL von 164 dB erreicht wird	Entfernung [km] in der ein SEL von 184 dB erreicht wird	Entfernung [km] in der ein $L_{p,pk}$ von 190 dB erreicht wird
Norden	0,05	4,400	2,700	0,200	2,400
	50	21,250	15,500	2,000	19,100
	750	34,750	27,100	5,050	34,600
Osten	0,05	4,400	2,700	0,200	2,400
	50	22,700	16,950	2,300	20,550
	750	35,900	28,500	5,850	35,800

## 5.4 Fehlerbetrachtung

In Soloway & Dahl (2014) zeigt der Vergleich zwischen Gleichung Nr. 1 mit den Messergebnissen Unsicherheiten zwischen  $\pm 1$  dB und  $\pm 5$  dB. Für Gleichung Nr. 3 wird ein quadratischer Mittelwertfehler von 1,1 dB angegeben. Die Messungen wurden in Abständen von bis zu 7 km durchgeführt.

Die Schallausbreitung über weite Entfernungen ist von vielen Faktoren abhängig wie Änderungen im Sediment, Wellenschlag, Wassertiefe, etc., somit nimmt auch die Prognoseunsicherheit mit wachsender Entfernung zu. Bei Sprengungen werden in erster Linie tiefe Frequenzen emittiert, wodurch die berücksichtigte Wassertiefe einen relevanten Einfluss auf das Prognoseergebnis hat. Dies birgt weitere Unsicherheiten, da die verwendeten Bathymetrie Daten eine nicht zu beziffernde Ungenauigkeit aufgrund der Rastergröße als auch der zeitlichen Varianz der tatsächlichen Wassertiefe durch Gezeiten und Sedimentbewegungen aufweisen.

## 6. Schallschutz

Derzeit lassen sich bei Rammarbeiten 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 2016 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  $\pm 2$  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.

Bei Sprengungen sind Schallschutzmaßnahmen jedoch nur mit einem Sicherheitsabstand möglich, somit ist der Blasenschleier das einzige Schallschutzsystem, dass bei Sprengungen eingesetzt werden kann.

Mit einem einfachen großen Blasenschleier (BBC) wurde in mehreren OWPs mit Wassertiefen bis 30 m Schallminderungen im Einzelereignispegel von  $10 \text{ dB} \leq 13 \text{ dB} \leq 15 \text{ dB}$  erzielt (z. B. *Borkum West II* und *Nordsee Ost*). 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 und Wassertiefen von bis zu 30 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  $L_{p,pk}$  konnte im Mittel um mehr als  $20 \text{ dB}_{\text{LPeak}}$  reduziert werden.

Allerdings zeigen Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben *OWF 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 als Mindestanforderung (kein Anspruch auf Vollständigkeit der Systemspezifikationen) nachfolgende optimierte Systemkonfigurationen

für einen einfachen (BBC) bzw. doppelten „Großen Blasenschleier“ (DBBC) 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<sub>SEL</sub>.

Einfacher / Doppelter „Großer Blasenschleier“, Systemkonfigurationen:

- Lochgröße (Durchmesser) und Lochabstand: 1 - 2 mm alle 20 - 30 cm,
- verwendete Luftmenge:  $\geq 0,5 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$ ,
- Abstand der Düsenschläuche:  $\geq$  eine Wassertiefe 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 Düsen Schlauchlängen so kurz wie möglich zu halten, da aus abgeschlossenen Bauvorhaben bekannt ist, dass bei beidseitiger Einspeisung der Düsen schläuche eine konstante Luftverteilung innerhalb der Düsen schläuche ab ca. 800 m Länge als technisch anspruchsvoll herausgestellt haben.

Aus der Praxis ist bekannt, dass der Unterschied zwischen einem einfachen und einem doppelten großen 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 oben genannte optimale Luftmenge von  $0,3 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{min})$  durch das eingesetzte Blasenschleier-System nicht erreicht werden, so kann eine Reduktion der oben genannten durchschnittlichen Schallminderung nicht ausgeschlossen werden.

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.

Durch die Anwendung einer optimierten DBBC-Systemkonfiguration und der Annahme, dass es bei Sprengungen zu einer ähnlichen Wirkung wie bei Rammschall kommt, sind Lärminderungen von bis zu 18 dB zu möglich.

Für die Ansprengungen der Ex „Kahlsruhe“ ist derzeit in der Diskussion, ob sich der Einsatz eines Blasenschleier Systems realisieren lässt. Da die messtechnischen Untersuchungen am Schiff auf keinen Fall durch eventuelle Reflektionen durch den Blasenschleier beeinflusst werden dürfen. Daher ist es erforderlich den Blasenschleier in einem Abstand von mindestens 500 m zu verlegen, eine rundum Verlegung nicht ist dann nicht mehr realisierbar. Aus diesem Grund ist der Einsatz eines halb offenen Blasenschleiers derzeit Gegenstand der Planungen. Dies bietet auch den Vorteil, dass die Schallausbreitung mit und ohne Schallschutzsystem während der Sprengungen gemessen werden kann.

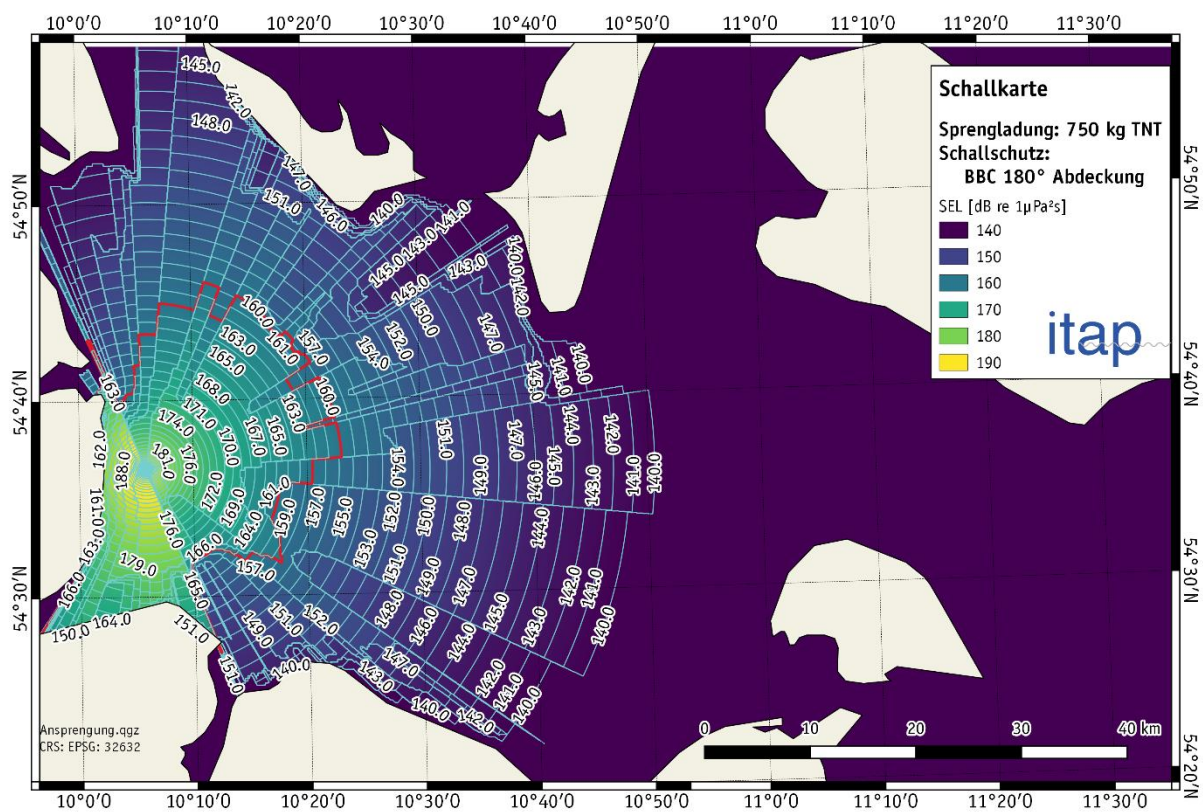
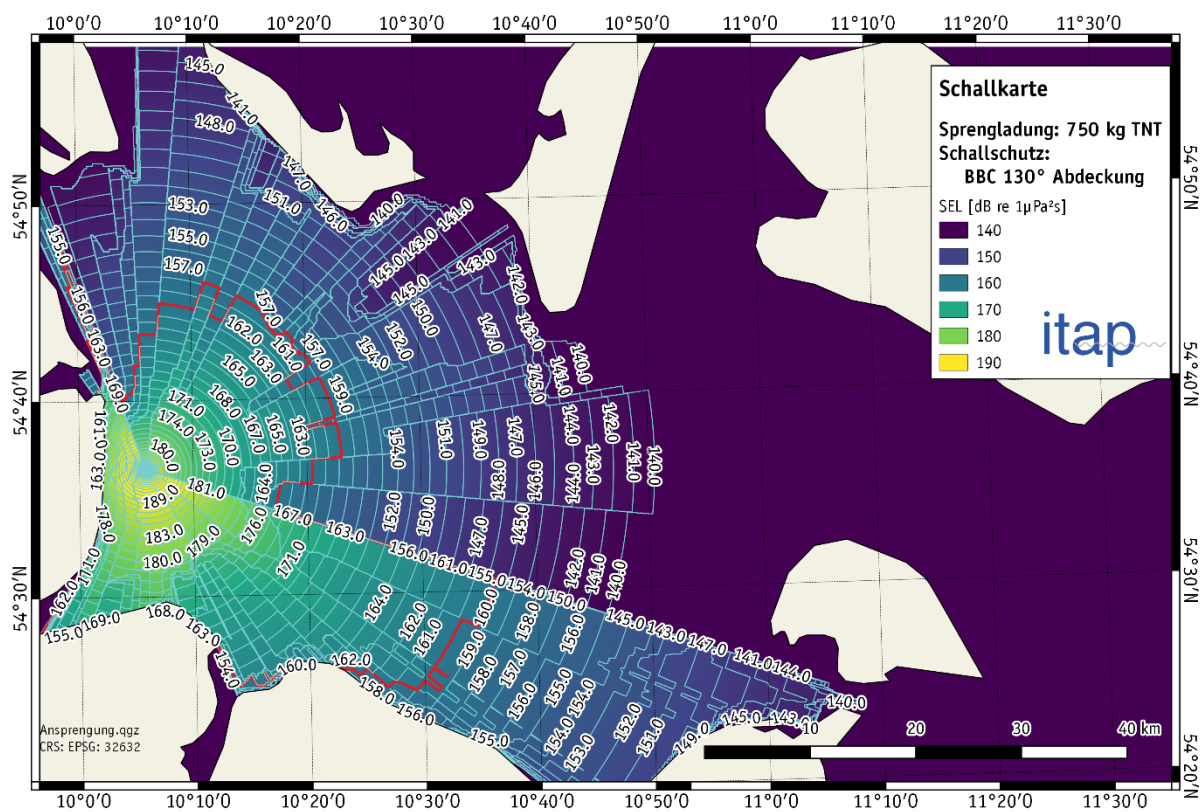
Nach derzeitigem Planungstand sind zwei mögliche Blasenschleier-Varianten realisierbar. Bei der einen Variante wird ein Abdeckungswinkel von 130° erreicht, bei der Anderen sind es 180°.

Die folgende Abbildung 9 zeigt beispielhaft die Immissionsraster möglicher Auslegungsvarianten mit beiden Abdeckungswinkeln. In den gezeigten Darstellungen wurde eine konstante Dämpfung von 10 dB angenommen. Tabelle 3 stellt dabei analog zu Tabelle 2 die Entfernungen dar, in denen blasenschleierseitig gewählte Schalldruckpegel erreicht werden.

**Tabelle 3:** Entfernungen in denen die Beurteilungspegel des Einzelereignispegels (SEL) von 160 dB, 164 dB und 184 dB und des Spitzenpegels ( $L_{p,pk}$ ) von 190 dB mit und ohne Blasenschleier erreicht werden.

Schallschutz/Richtung	Sprengladung [kg TNT]	Entfernung [km] in der ein SEL von 160 dB erreicht wird	Entfernung [km] in der ein SEL von 164 dB erreicht wird	Entfernung [km] in der ein SEL von 184 dB erreicht wird	Entfernung [km] in der ein $L_{p,pk}$ von 190 dB erreicht wird
Kein/Osten	0,05	4,400	2,700	0,200	2,400
	50	22,700	16,950	2,300	20,550
	750	35,900	28,500	5,850	35,800
BBC/Osten	0,05	1,250	0,730	0,050	0,650
	50	9,250	7,050	500	9,100
	750	15,750	11,300	1,600	15,650





**Abbildung 9:** Immissionsraster des Einzelereignispegels (SEL) während der Sprengung einer 750 kg TNT Ladung bei Verwendung eines z. T. offenen Blasenschleiers. Oben mit 130° Abdeckung und unten mit 180° Abdeckung.

## 7. Verwendete Literatur

- Bellmann (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.
- 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
- Energi Styrelsen (2016)** Guideline for underwater noise – Installation of impact-driven piles, Danish guidelines
- Jensen *et al.* (2010)** Jensen FB, Kuperman WA, Porter MB und Schmidt H (2010): Computational Ocean Acoustics. Springer Verlag, AIP Press
- D.H. Johnson (1992)** „The application of spectral estimation methods to bearing estimation problems“ Proc IEEE 70, 1018-102
- Soloway & Dahl (2014)** Soloway AG and Dahl PH: Peak sound pressure and sound exposure level from underwater explosions in shallow water, JASA Express Letters, EL218 J. Acoust. Soc. Am. 136 (3), September 2014
- StUK 4 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