

# FSRU Schiffsanleger LNG Voslapper Groden Nord 2



## Unterwasserschallprognose für die Rammarbeiten

Oldenburg, 16. Februar 2024

Projekt Nr. 4207

Version 3

Auftraggeber: IMDC  
Van Immerseelstraat 66  
B-2018 Antwerp

Durchführung: Johanna Beier, B. Eng.  
Patrick Remmers, B. Eng

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

Berichtsumfang: 30 Seiten

### Sitz

itap GmbH  
Marie-Curie-Straße 8  
26129 Oldenburg

Amtsgericht Oldenburg  
HRB: 12 06 97

### Kontakt

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

### Geschäftsführer

Dr. Michael A. Bellmann

### Bankverbindung

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

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

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

## Inhaltsverzeichnis

1.	Zusammenfassende Beurteilung .....	4
2.	Projektbeschreibung und Umfang des Dokumentes .....	6
3.	Schalltechnische Grundlagen .....	8
4.	Modellansätze .....	12
4.1	Schallausbreitung in flachen Gewässern.....	12
4.2	Modellbeschreibung .....	13
4.3	Quellpegelbestimmung .....	15
4.4	Berechnungsverfahren .....	20
4.5	Unsicherheitsbetrachtung .....	22
5.	Beurteilungskriterien .....	23
6.	Modellierung von Szenarien.....	24
6.1	Vorhandene Bedingungen .....	24
6.2	Schalltechnisch relevante Eingangsdaten.....	25
7.	Modellierungsergebnisse.....	26
8.	Schalltechnische Beurteilung der Ergebnisse .....	28
9.	Literaturverzeichnis .....	29

## Änderungsverzeichnis

Version	Datum	Kommentare
1	31.01.2024	Erster Version
2	05.02.2024	Zweite Version (Änderungen IDMC)
3	16.02.2024	Dritte Version (Änderungen Arcadis)

Diese Version ersetzt alle vorherigen Versionen.

### Einheiten:

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

m - Meter

dB - Dezibel

Pa - Pascal

kJ - Kilojoule

s - Sekunde

### Messgrößen:

$\alpha$  - Absorptionskoeffizient

TL - Ausbreitungs-dämpfung

$\lambda$  - Wellenlänge

Z - akustische Kennimpedanz

$\rho$  - Dichte eines Mediums

c - Schallgeschwindigkeit

E - Schallbelastung

$f_g$  - Grenzfrequenz

$L_{hg}$  - Hintergrundpegel

k - Ausbreitungskonstante

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

n - Anzahl

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

p - Schalldruck

SEL - Einzelereignispegel

$p(t)$  - zeitvarianter Schalldruck

$SEL_{05}$  - 5 % Überschreitung Einzelereignispegel

$p_0$  - Bezugsschalldruck

SPL - Dauerschalldruckpegel

$p_{pk}$  - maximaler Schalldruck

T - Mittelungszeit

v - Schallschnelle

### Abkürzungen:

AWZ - Ausschließliche Wirtschaftszone

BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

itap - Institut für technische und angewandte Physik

LNG - Liquid Natural Gas

PTS - Permanenter Hörverlust (engl. Permanent Threshold Shift)

SRD - Bodenwiderstandswert - engl. soil resistance value

TTS - Vorrübergehender Hörverlust (engl. Temporary Threshold Shift)

UBA - Umweltbundesamt

LAT - Lowest Astronomical Tide

## 1. Zusammenfassende Beurteilung

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) ist im September 2022 an die Tree Energy Solutions GmbH (TES) herangetreten und hat die gemeinsame Realisierung eines schwimmenden Flüssigerdgas (Liquefied Natural Gas – LNG)-Importterminals (Floating Storage and Regasification Unit – FSRU) angefragt. Das BMWK hat dazu im Februar 2023 die FSRU „Excelsior“ für maximal 60 Monate gechartert. Das Projekt soll in Kooperation mit ENGIE realisiert werden. Als Vorhabenträgerin wurde die „FSRU Wilhelmshaven GmbH“ gegründet. Das Teilprojekt des Bootsanlegers (Ponton) umfasst einen schwimmenden Bootsanleger, der durch insgesamt 12 Pfähle verankert wird. Die Durchmesser der geplanten 12 Pfähle betragen jeweils 1,5 m.

Im Rahmen des wasserrechtlichen Planfeststellungsverfahrens soll dieses Gutachten zur Bewertung der Arten- und Gebietsschutzanforderungen bezüglich der durchzuführenden Rammarbeiten und der zu erwartenden, impulshaften Unterwasserschallimmissionen dienen. 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 Pfähle zu erwartenden Hydroschallimmissionen durchzuführen. Die nachstehende Prognose berücksichtigt maximale Rammenergien von 120 kJ und 150 kJ, sowie die o. g. Durchmesser der Pfähle. Die Prognose erfolgt auf dem aktuellen Planungsstand von maximal 150 kJ als maximale Rammenergie. Als Beispielpfahl für die Prognose wird exemplarisch PP-06 mit einer Wassertiefe von ca. 12 m angenommen. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass der Schalleintrag und die Weiterleitung im Wasser bei geringeren Wassertiefen abnehmen. Die Modellierung umfasst sowohl den Einzelereignispegel (*SEL*), als auch den zero-to-peak-Spitzenpegel ( $L_{p,pk}$ ).

Unter Berücksichtigung der Unsicherheitsbetrachtung ist das Überschreiten der festgelegten Grenzwerte des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) sehr unwahrscheinlich, jedoch nicht ausgeschlossen.

Oldenburg, 16. Februar 2024



Johanna Beier, B. Eng.

Erstellt



Patrick Remmers, B. Eng.

Sachgebietsleiter Unterwasserschall-Prognosen

Geprüft

## 2. Projektbeschreibung und Umfang des Dokumentes

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) ist im September 2022 an die Tree Energy Solutions GmbH (TES) herangetreten und hat die gemeinsame Realisierung eines schwimmenden Flüssigerdgas (Liquefied Natural Gas – LNG)-Importterminals (Floating Storage and Regasification Unit – FSRU) angefragt. Das BMWK hat dazu im Februar 2023 die FSRU „Excelsior“ für maximal 60 Monate gechartert. Das Projekt soll in Kooperation mit ENGIE realisiert werden. Als Vorhabenträgerin wurde die „FSRU Wilhelmshaven GmbH“ gegründet. Das Teilprojekt des Bootsanlegers (Ponton) umfasst einen schwimmenden Bootsanleger, der mit insgesamt 12 Pfählen verankert wird. Die Durchmesser der geplanten 12 Pfähle betragen jeweils 1,5 m.

Für die Installation der Pfähle sind zwei Rammhammer im Gespräch IQIP S-150 und S-120, welche zum Einsatz kommen könnten.

Der Baugrund im Umfeld des Vorhabengebietes besteht im Wesentlichen aus Sand (ACP Geotechnik 2023). Für die Prognosen des gesamten Gebiets wurden die Wassertiefen von EMODnet verwendet. Obwohl hochaufgelöste Wassertiefendaten des Auftraggebers zur Verfügung standen, wurden die Daten von EMODnet verwendet, da es keine signifikanten Unterschiede gab. Die Umgebung des Bootsanlegers (Ponton) und die Wassertiefen gemäß EMODnet sind in Abbildung 1 dargestellt, während Abbildung 2 die genaue Lage des Bootsanlegers zeigt.

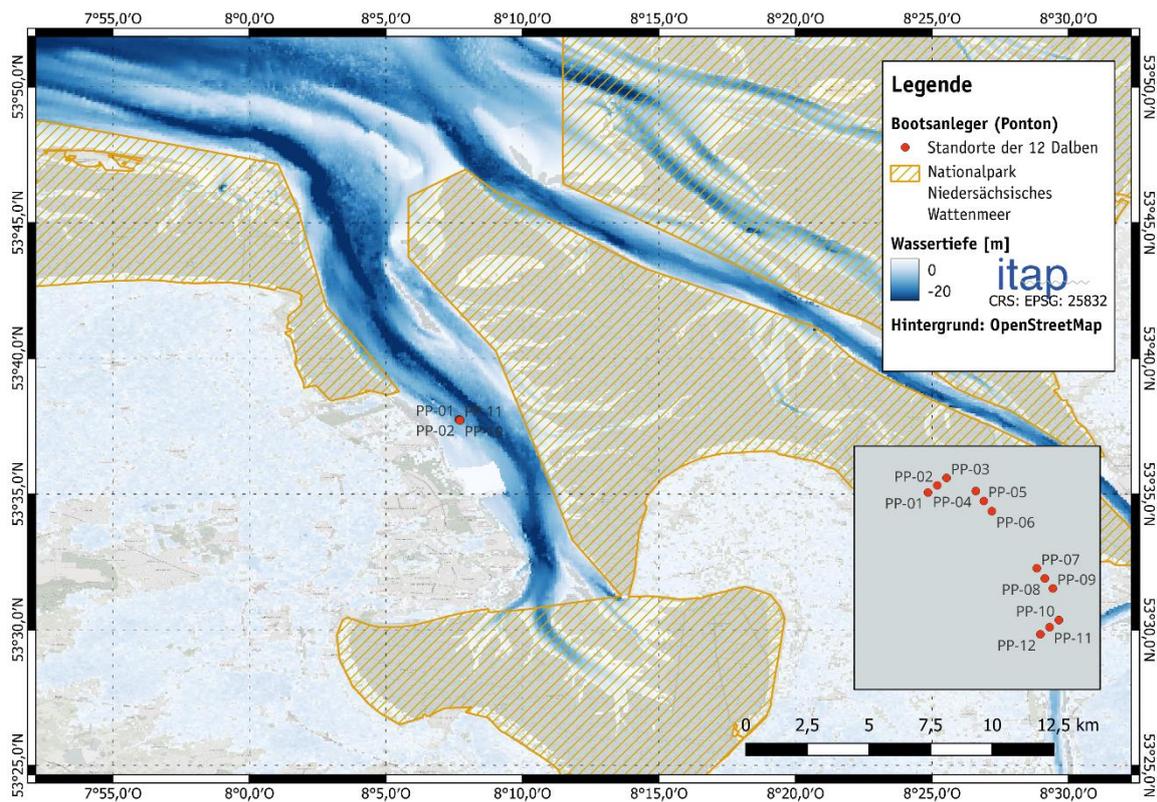


Abbildung 1: Übersichtsplan des Bootsanlegers.

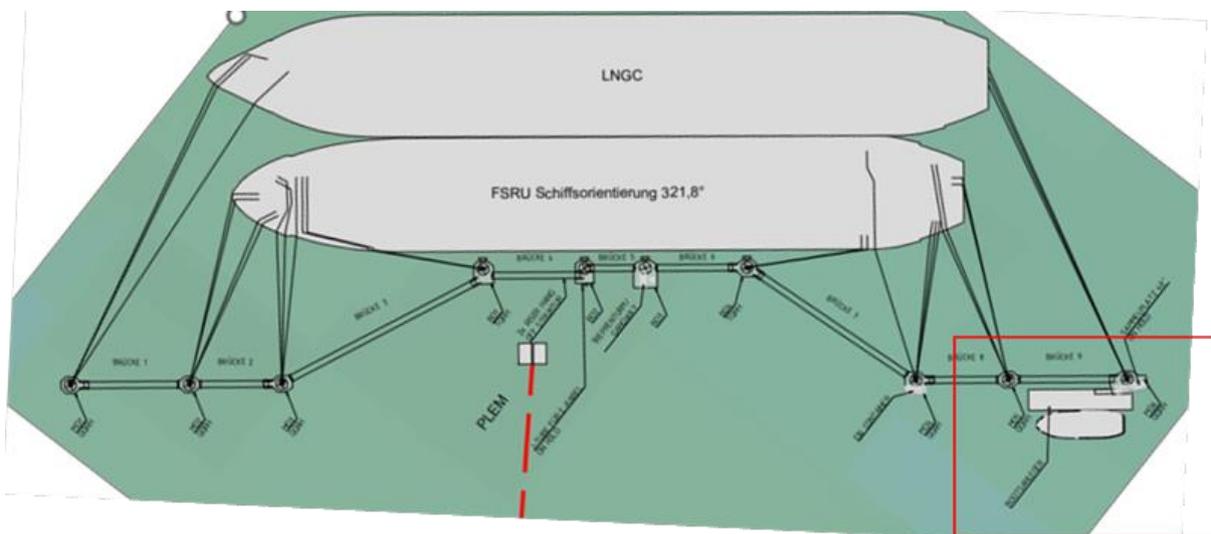


Abbildung 2: Lage des Bootsanlegers (Auftraggeber IDMC).

Die itap- Institut für technische und angewandte Physik GmbH wurde beauftragt, Prognoseberechnungen für die während der Erstellung der Stahlrohrpfahlgründung mittels Impulsrammverfahren zu erwartenden Unterwasserschalleinträge durchzuführen.

Im Rahmen des wasserrechtlichen Planfeststellungsverfahrens soll dieses Gutachten zur Bewertung der Arten- und Gebietsschutzanforderungen bezüglich der durchzuführenden Rammarbeiten und der zu erwartenden, impulshaften Unterwasserschallimmissionen dienen. Sollte es zu Überschreitungen der Lärmschutzwerte für Impulsschall kommen, so können auf der Grundlage dieser Unterwasserschallprognose ein Schallschutzkonzept entwickelt werden.

### 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  $c_{\text{Wasser}}$ , also der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schall in einem Medium, die in der Regel bei Wasser im Bereich von  $c_{\text{Wasser}} = 1.480 \text{ m/s}$  liegt. Die Schallschnelle  $v$  ist deutlich geringer als die Schallgeschwindigkeit  $c$ .

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

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

*Gleichung 1*

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

$$Z = \rho c$$

*Gleichung 2*

mit  $\rho$  – Dichte des Mediums und  $c$  – Schallgeschwindigkeit.

Für eine Schalldruckamplitude von beispielsweise 1 Pa (entspricht bei einem sinusförmigen Signal einem Schalldruckpegel von 117 dB re 1  $\mu\text{Pa}^2$  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  $\mu\text{m/s}$ .

---

<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  $\geq 5\lambda$ .

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

- (Energie-) äquivalenter Dauerschalldruckpegel – *SPL* (Mittelungspegel) ,
- Einzelereignispegel – *SEL*,
- zero-to-peak-Spitzenpegel  $L_{p,pk}$ .

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

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

### **(Energie-) äquivalenter Dauerschallpegel (*SPL*)**

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

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

Gleichung 3

mit

$p(t)$  - zeitlich varianter Schalldruck,

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

$T$  - 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.

Die Schallbelastung  $E$  oder vielmehr der resultierende Einzelereignispegel *SEL* sind besser geeignet. Beide Werte sind folgendermaßen definiert:

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

Gleichung 4

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

Gleichung 5

mit

$T_1$  und  $T_2$  - Anfangs- bzw. Endzeit der Mittelungen (sind so zu wählen, dass das Schallereignis zwischen  $T_1$  und  $T_2$  liegt),

$T_0$  - Referenz 1 Sekunde.

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

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

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

Gleichung 6

mit

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

$T_0$  - 1 Sekunde,

$L_{hg}$  - Stör- bzw. Hintergrundpegel zwischen den einzelnen Rammschlägen.

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

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

Gleichung 7

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

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

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

Gleichung 8

mit

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

Ein Beispiel ist in Abbildung 3 dargestellt. Der zero-to-peak-Spitzenpegel ( $L_{p,pk}$ ) ist stets höher als der Einzelereignispegel ( $SEL$ ). In der Regel beträgt die Differenz zwischen dem  $L_{p,pk}$  und dem  $SEL$  bei Rammarbeiten 20 dB bis 25 dB. Einige Autoren bevorzugen den Peak-to-peak-Spitzenpegel ( $L_{pk,pk}$ ) anstelle des  $L_{p,pk}$ . Eine Definition dieses Parameters ist in Abbildung 3 gegeben, jedoch ist diese  $L_{pk,pk}$  Metrik nicht in der (ISO 18405 2017) definiert. Dieser Faktor beschreibt nicht den maximal erreichten (absoluten) Einzelereignispegel ( $SEL$ ), sondern die Differenz zwischen der negativen und der positiven Amplitude eines Impulses. Dieser Wert ist maximal 6 dB höher als der zero-to-peak-Spitzenpegel ( $L_{p,pk}$ ).

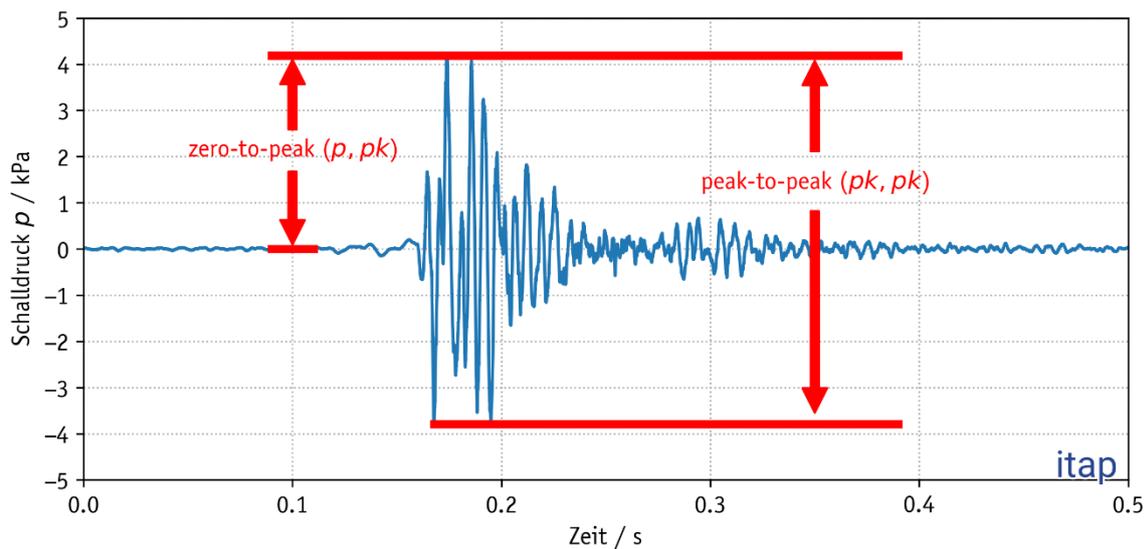


Abbildung 3: Typisches, gemessenes Zeitsignal des Unterwasserschalls bei Rammungen in einer Entfernung von einigen 100 m.

## 4. Modellansätze

### 4.1 Schallausbreitung in flachen Gewässern

#### 4.1.1 Einfluss der Entfernung

Für überschlägige Berechnungen kann davon ausgegangen werden, dass der Schalldruck nach einem Potenzgesetz mit der Entfernung abnimmt. Der Pegel in dB wird etwa reduziert um:

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

*Gleichung 9*

mit

$r_1$  und  $r_2$  - die Entfernung zur Schallquelle steigt von  $r_1$  auf  $r_2$ ,

$TL$  - Ausbreitungsdämpfung,

$k$  - absoluter Begriff ( $k = 15$ , wird oft verwendet für flache Gewässer,  $k = 20$ , für sphärische Ausbreitung).

Häufig wird die Ausbreitungsdämpfung für die Entfernung  $r_1 = 1$  m angegeben (fiktiver Abstand zu einer angenommenen Punktquelle). Diese wird zur Berechnung der Schallleistung eines Rammhammers in 1 m Entfernung verwendet. Diese wird häufig Quellpegel genannt. Gleichung 9 wird dann reduziert auf  $TL = -k \log_{10}(r)$ . Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass die oben genannte Gleichung nur für das Fernfeld eines akustischen Signals, d. h. in einiger Entfernung (frequenzabhängig) zur Quelle, gültig ist.

Zusätzlich macht sich die Absorption im Wasser bei Entfernungen von mehreren Kilometern stärker bemerkbar und führt zu einer weiteren Reduzierung des Schalldrucks. Dies wird mit einer Konstanten  $\alpha$  proportional zur Entfernung berücksichtigt. Gleichung 9 erweitert sich zu:

$$TL = -(k \log_{10}(r) + \alpha r) \text{ [dB]}$$

*Gleichung 10*

#### 4.1.2 Einfluss der Wassertiefe

Die Schallausbreitung im Meer wird auch durch die Wassertiefe beeinflusst. Unterhalb einer bestimmten Grenzfrequenz ( $f_g$ ) ist eine kontinuierliche Schallausbreitung nicht möglich. Je flacher das Gewässer, umso höher ist die Grenzfrequenz. Die Grenzfrequenz ( $f_g$ ) hängt ebenfalls vom Sedimenttyp ab. Die untere Grenzfrequenz für vorwiegend sandigen Boden als Funktion

der Wassertiefe ist in Abbildung 4 dargestellt. Darüber hinaus sind die Bandbreiten der unteren Grenzfrequenz ( $f_g$ ) an verschiedenen Bodenschichten, z. B. Ton und Kreide (Geschiebemergel oder Moräne), in Grau dargestellt (Jensen, et al. 2011).

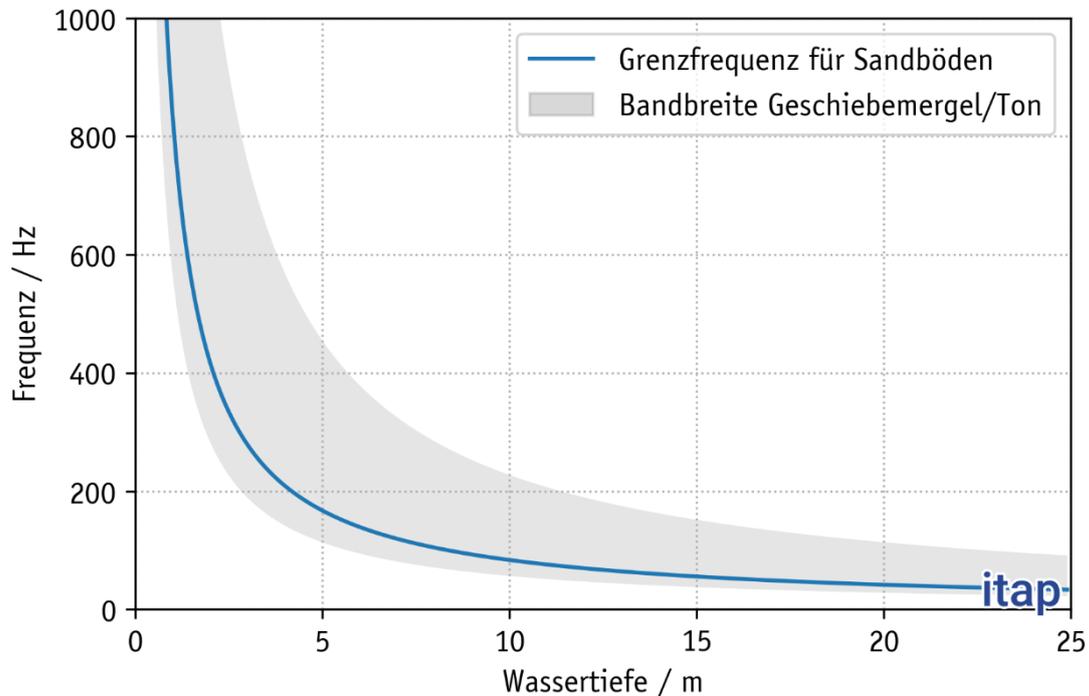


Abbildung 4: Theoretische, untere (Grenz-) Frequenz ( $f_g$ ) für eine ungestörte Schallausbreitung im Wasser als Funktion der Wassertiefe für verschiedene Bodenschichtungen (Beispiel übernommen von (Urlick 1983) (Jensen, et al. 2011); das Beispiel zeigt den möglichen Bereich, der durch verschiedene Schichten verursacht wird; die Schicht entspricht nicht den Schichten im Konstruktionsfeld).

## 4.2 Modellbeschreibung

Das (Standard-) Modell der *itap GmbH* ist ein empirisches Modell, d. h., es basiert auf gemessenen Werten für den Einzelereignispegel ( $SEL$ ) und für den zero-to-peak-Spitzenpegel ( $L_{p,pk}$ ) früherer Projekte. Daher ist diese Art Modell ein "adaptives" Modell, welches mit zunehmenden Eingabedaten immer "präziser" wird.

Der abgestrahlte Schallpegel hängt von vielen verschiedenen Faktoren ab, wie z. B. Wanddicke, Rammenergie, Durchmesser und Bodenzusammensetzung (Bodenwiderstand) sowie Wassertiefe. Da jedoch alle genannten Parameter miteinander interagieren können, ist es nicht möglich, genaue Aussagen über die Wirkung eines einzelnen Parameters zu machen. In einem ersten Schritt wird nur ein Parameter, der "Pfahldurchmesser", betrachtet.

Abbildung 5 zeigt Schallpegel über den Eingangsparameter “Pfahldurchmesser”, die bei verschiedenen Rammarbeiten in der Vergangenheit gemessen wurden. Je größer die schallabstrahlende Fläche im Wasser ist, desto größer ist der Schalleintrag. Das heißt, die beurteilungsrelevanten Pegelwerte nehmen mit zunehmender Pfahlfläche, also dem Pfahldurchmesser, zu. Es ist auch zu beachten, dass der Zusammenhang nicht linear ist.

Die Modellunsicherheit beträgt  $\pm 5$  dB nur unter Berücksichtigung des Eingangsparameters “Pfahldurchmesser” und basiert auf der Streuung der tatsächlich vorhandenen Messergebnisse aus Abbildung 5, was wahrscheinlich auf weitere Einflussfaktoren, wie z. B. Rammenergie und reflektierende Pfahloberfläche, zurückzuführen ist.

Der folgende Vergleich zwischen den prognostizierten Werten und den tatsächlich gemessenen Pegelwerten wurde in jedem Fall durch die angegebene Modellunsicherheit ( $\pm 5$  dB) ausreichend abgedeckt. In den meisten Fällen überschätzte das Modell den Pegelwert in 750 m Entfernung leicht (nicht publizierte Daten). Daher ist eine Anwendung im vorliegenden Fall aus praktischer Sicht möglich. Das Modell ist also wahrscheinlich konservativ.

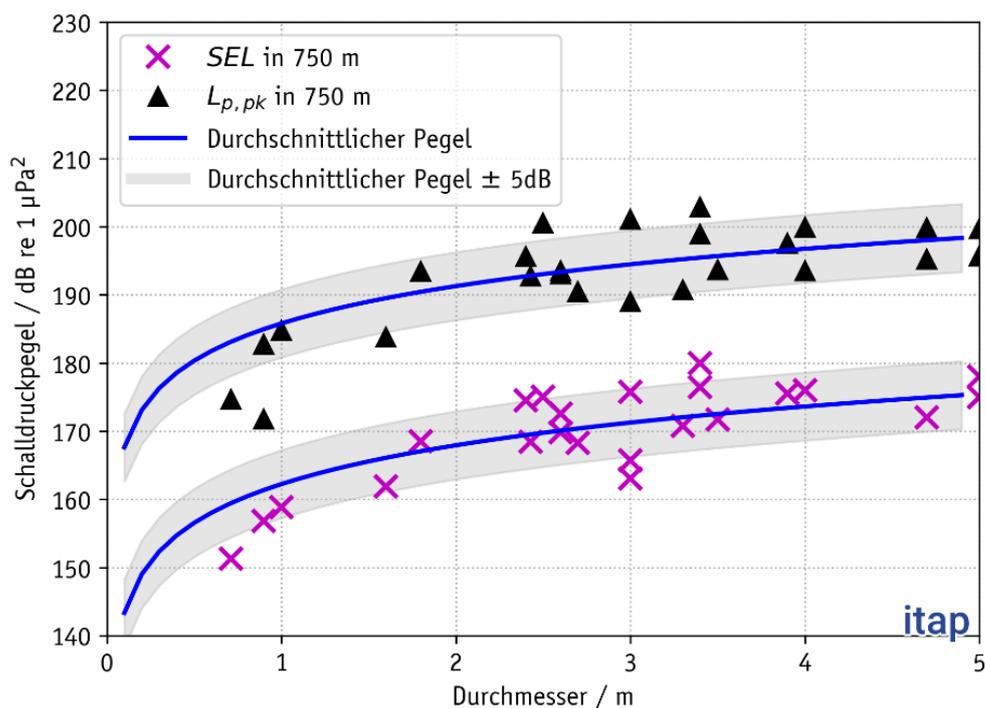


Abbildung 5: Gemessener zero-to-peak-Spitzenpegel ( $L_{p,pk}$ ) und breitbandige 5 % Überschreitungs-Einzelereignispegel ( $SEL_{05}$ ) bei Rammarbeiten bei einer Reihe von OWPs als Funktion des Pfahldurchmessers.

Darüber hinaus werden in diesem Modell in einem zweiten Schritt Zu- bzw. Abschläge für sehr hohe und sehr niedrige, maximale Rammenergien verwendet. Betrachtet man die tatsächlich angewandte, maximale Rammenergie bzw. die im Modell geschätzte, maximale Rammenergie,

so ergeben sich normalerweise Differenzen zwischen dem Modell und den realen Messwerten von ca. 2 dB. In den meisten Fällen überschätzte das Modell den Pegelwert in einer Entfernung von 750 m mit den Eingangsdaten "Pfähldurchmesser" und "maximale Rammenergie" leicht.

Im Rahmen einer Masterarbeit bei der *itap GmbH* wurde festgestellt, dass die Auswirkung der verwendeten Rammenergie im Durchschnitt etwa 2,5 dB pro Verdopplung der Rammenergie beträgt (Gündert 2014). Diese Erkenntnis ergab sich aus Untersuchungen an verschiedenen Fundamenten, bei denen die Variationen der Rammenergie während der Rammung (Eindringtiefe) statistisch mit entsprechenden Niveauänderungen (jeweils vom Soft-Start bis zur maximalen Rammenergie) verglichen wurden.

Daher ist dieses Zusatzmodul für das bestehende Modell der *itap GmbH* in der Lage, die beurteilungsrelevanten Pegelwerte für jeden einzelnen Rammschlag mit gegebenen Verläufen der Rammenergie zu prognostizieren. Die Modellunsicherheit dieses statistischen Modells (*itap GmbH* Basismodell + Erweiterung) beträgt nachweislich  $\pm 2$  dB; eine leichte Überschätzung dieses Modells konnte ebenfalls nachgewiesen werden.

Gündert (2014) zeigt, dass die verwendeten Rammenergien und die Einbindetiefe die resultierende Schallbelastung deutlich mit einem signifikanten Zusammenhang von Einbindetiefe und eingesetzter Rammenergie beeinflussen. Unter Berücksichtigung der Einflussfaktoren "Pfähldurchmesser", "maximale Rammenergie" und "Einbindetiefe" konnte eine Modellunsicherheit von  $\pm 2$  dB im Bereich der Messunsicherheit erreicht werden. Der größte Teil der gemessenen Varianzen konnte somit auf die drei oben genannten Einflussfaktoren zurückgeführt werden.

Da eine exakte Modellierung der einzusetzenden Rammenergie über die gesamte Einbindetiefe (pro Rammschlag) nicht ohne weitere "Unsicherheiten" möglich ist, werden Zu- und Abschlüge für die maximale Rammenergie berücksichtigt.

Aufgrund der Erfahrungen der letzten Jahre und der Erkenntnisse aus der Masterarbeit (Gündert (2014)) kann davon ausgegangen werden, dass die Modellunsicherheit unter Berücksichtigung der oben genannten Zu- und Abschlüge deutlich minimiert werden kann.

### 4.3 Quellpegelbestimmung

Der Einzelereignispegel (*SEL*) variiert im Verlauf einer Rammung und hängt, wie bereits erwähnt, von mehreren Parametern ab (z. B. abstrahlende/reflektierende Pfahlmantelfläche, Rammenergie, Bodenbeschaffenheit, Wanddicke, usw.). Das angewandte Modell berücksichtigt in einem ersten Schritt lediglich den Pfahldurchmesser als Einflussparameter. Um ein statistisch valides Ergebnis der lautesten zu erwartenden Rammschläge zu erhalten, basiert

das empirische Modell auf der 5%-Überschreitung des Einzelereignispegels ( $SEL_{05}$ ) während einer Pfahlinstallation.

### 4.3.1 Rammenergie

Die beurteilungsrelevanten Pegelwerte ( $SEL$  und  $L_{p,pk}$ ) steigen mit wachsender Rammenergie. Basierend auf den Erfahrungen früherer Bauprojekte wird von einem Ausgangspunkt für die Ermittlung der Einflussgröße "Rammenergie" ausgegangen. Davon ausgehend werden im Modell Zu- bzw. Abschläge von 2,5 dB pro Verdopplung/Halbierung für höhere bzw. niedrigere, maximale Rammenergien veranschlagt.

In der nachstehenden Prognose für die Impulsrammung beim Bau des Projektes FSRU LNG VGN 2 wird mit einer maximalen Rammenergie von 150 kJ gerechnet. Um die Endtiefe zu erreichen, wird die maximale Rammenergie des Rammhammers (falls überhaupt erforderlich) erfahrungsgemäß nur kurzzeitig zum Ende einer Rammung eingesetzt.

Eine Erhöhung der Rammenergie ist erforderlich, wenn eine bestimmte Anzahl von Rammschlägen zur Erreichung der Einbindetiefe von z. B. 0,25 m überschritten wird (Risiko von Materialverschleiß aufgrund einer zu hohen Anzahl an Rammschlägen). Die Erfahrungen aus der Praxis zeigen, dass meistens niedrigere Rammenergien eingesetzt werden, als vorher für den Extremfall prognostiziert.

### 4.3.2 Hydraulikhammer

In der Prognose wird der Rammhammer nur mit dem Einflussparameter Rammenergie berücksichtigt. Einflüsse sonstiger Variablen, wie die technische Ausführung, Konfiguration der Rammhaube und das Rammverfahren konnten bisher nicht empirisch ermittelt werden und bleiben in der Prognose unberücksichtigt.

### 4.3.3 Spektrum des Rammschalls

Die in Kapitel 4.2 gezeigten Schätzungen des breitbandigen Einzelereignispegels ( $SEL$ ) und des u. g. zero-to-peak-Spitzenpegels ( $L_{p,pk}$ ) basieren auf den Breitband-Messdaten unter-

schiedlicher Studien (Abbildung 5). Die Schallausbreitung im Meer ist jedoch sehr frequenzabhängig. Deshalb müssen für die Berechnung Schätzungen der Frequenzzusammensetzung der entsprechenden Quellpegel<sup>2</sup> gemacht werden.

Abbildung 6 zeigt die spektrale Verteilung der Einzelereignispegel (*SEL*), die bei den Rammarbeiten an verschiedenen Pfählen festgestellt wurden (graue Linien). Die bei unterschiedlichen Entfernungen sowie bei unterschiedlichen Rammenergien und Pfahldurchmessern ermittelten Spektren verlaufen ähnlich. Das Frequenzspektrum zeigt ein Maximum im Bereich von 60 Hz - 250 Hz. Bei Frequenzen über ca. 250 Hz nimmt der Pegel allmählich ab, während bei Frequenzen unterhalb von ca. 60 Hz ein steiler Pegelabfall zu beobachten ist. Die Grenzfrequenz für den steilen Abfall bei niedrigen Frequenzen hängt von der Wassertiefe ab. Je tiefer das Wasser ist, desto niedriger ist die Grenzfrequenz.

Für die maximale Wassertiefe von ~ 12 m (EMODnet) im Baufeld des Projektes FSRU LNG VGN 2 wird die Grenzfrequenz bei ~ 70 Hz liegen.

---

<sup>2</sup> "Quellpegel" bezieht sich auf den Einzelereignispegel (*SEL*) oder Zero-to-peak-Spitzenpegel ( $L_{p,pk}$ ) bei einer fiktiven Entfernung von 750 m zu einer imaginären Punktschallquelle.

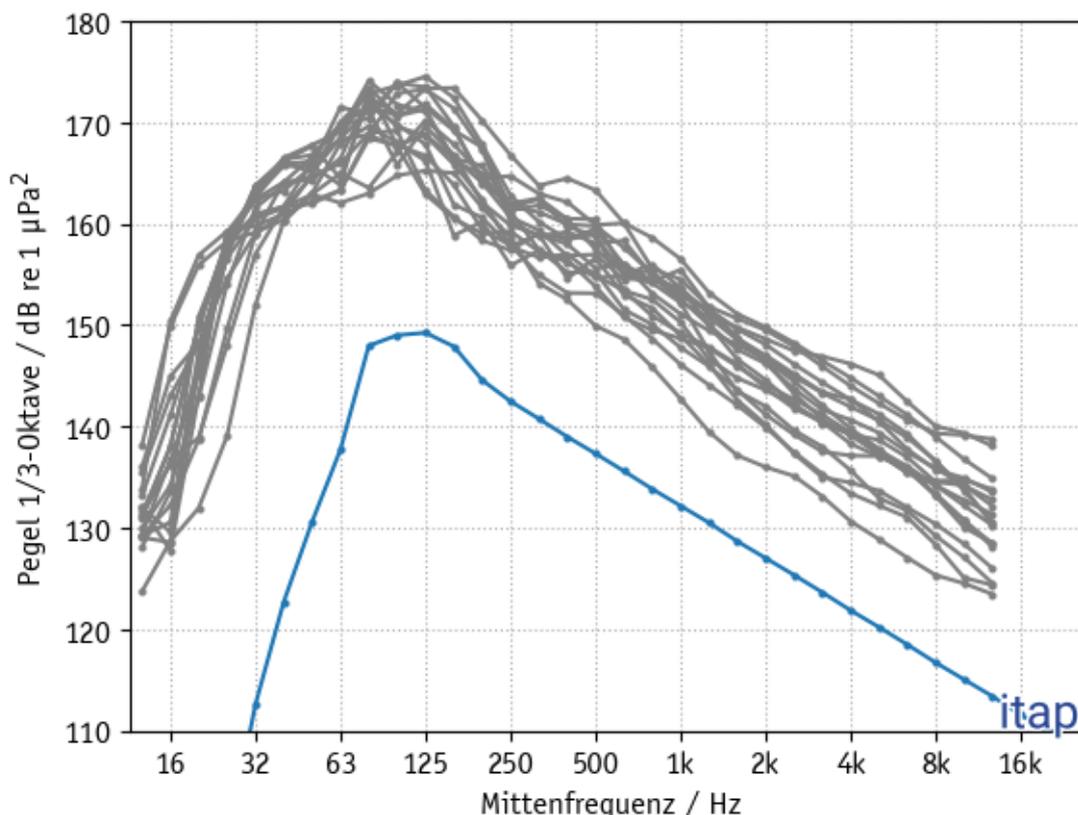


Abbildung 6: Geschätztes Modellspektrum (blau) – Einfluss von projektspezifischer Wassertiefe von ~ 12 m einen Pfahldurchmesser von 1,5 m und einer Rammenergie von 150 kJ ist berücksichtigt im Vergleich zu verschiedenen Messdaten von Monopfahl Installationen von Offshore Windenergieanlagen mit größeren Pfahldurchmessern in Wassertiefen zwischen 20 (grau: Messdaten).

#### 4.3.4 Bodenkopplungen

Der Einfluss unterschiedlicher Bodenverhältnisse wird derzeit noch erforscht. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die eingesetzte Rammenergie auch mit zunehmendem Bodenwiderstand (SRD-Wert) einer Bodenschicht zunimmt. Die in Kapitel 4.2, Abbildung 5 gezeigten Messdaten, welche aus den Erfahrungen der itap GmbH zusammen getragen wurden, wurden weitgehend auf sandigem und mitteldichtem, tonigem Untergrund ermittelt. Da es sich im Baubereich um ebenfalls um sandigen Untergrund handelt (ACP Geotechnik 2023), kann davon ausgegangen werden, dass die zu erwartenden Schallemissionen nicht höher sind gegenüber der in Abbildung 5 dargestellten Regressionsgeraden.

### 4.3.5 Wassertiefe

Die Schallausbreitung im Meer wird ebenfalls durch die Wassertiefe beeinflusst. Unterhalb einer bestimmten Grenzfrequenz ist eine kontinuierliche Schallausbreitung nicht möglich. Je flacher das Wasser ist, desto höher ist diese Frequenz. Abbildung 4 in Kapitel 4.1 zeigt die Grenzfrequenzen für eine ungestörte Schallausbreitung. Für die Modellierung werden alle Frequenzen unterhalb dieser Grenzfrequenz mit 12 dB/Oktave abnehmen. Ausschlaggebend ist die minimale Wassertiefe zwischen Quelle und Empfänger. Die Wassertiefe am Ort der prognostizierten Stahlrohrpfahlgründung beträgt ~12 m (LAT). Dies führt zu einer unteren Grenzfrequenzen von ~ 70 Hz. Der Einfluss der projektspezifischen Wassertiefe ist im verwendeten Modellspektrum (blaue Linie) in Abbildung 6 berücksichtigt.

### 4.3.6 Ausbreitungsdämpfung

Bei der Modellierung wird *Gleichung 10* berücksichtigt. Um die Schallausbreitungskonstante  $k$  und den Absorptionskoeffizienten  $\alpha$  an die örtlichen Gegebenheiten anzupassen, wurde die Ausbreitungsdämpfung für 24° Raumrichtungen von der Quelle für jedes einzelne 1/3 Oktav-Band zwischen 20 Hz und 20 kHz mit Hilfe des Range-dependent Acoustic Model (RAM) nach Michael D Collins (1995) bestimmt (Abbildung 7). Aus den numerischen Ergebnissen werden die Ausbreitungskonstante  $k$  und der Absorptionskoeffizient  $\alpha$  mit der Ordinary least squares Methode bestimmt. Für ein Beispiel für 160 Hz in 45° Raumrichtung ist in Abbildung 7 dargestellt. Es zeigt die numerische Ausbreitungsdämpfung und die resultierenden Ausbreitungskonstanten  $k$  und Absorptionskoeffizienten  $\alpha$ . Für die Wassertiefen wird das EMODnet Wassertiefenraster herangezogen. Aufgrund der geringen Wassertiefen sind in diesem Beispiel Frequenzen von 160 Hz nur unterhalb von 2 km ausbreitungsfähig.

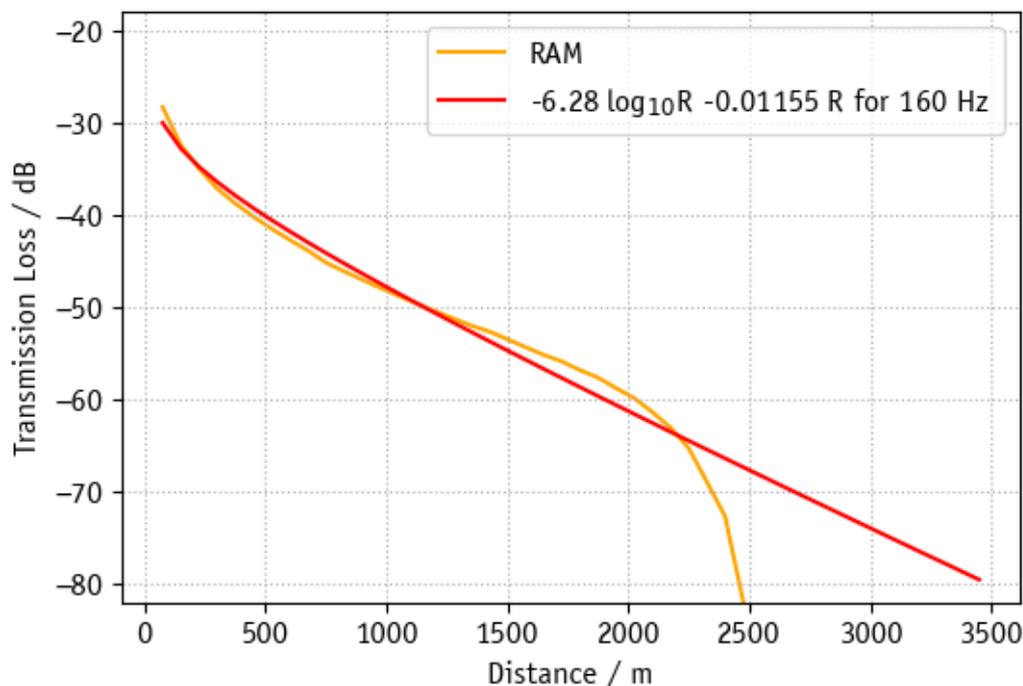


Abbildung 7: RAM-basierte Ausbreitungsdämpfung für das 160 Hz 1/3 Oktavband und eine exemplarische Ausbreitungsrichtung von 45°. Aufgrund des flachen Wassers ist eine Ausbreitung in Entfernungen > 2 km kaum möglich.

#### 4.3.7 Modellanforderungen

Das empirische Rammschall-Modell der itap GmbH erfüllt die nationalen Richtlinien der Regulierungsbehörden in Deutschland (BSH 2013) für Rammprognosen. Internationale Richtlinien oder Standards gibt es gegenwärtig nicht.

### 4.4 Berechnungsverfahren

In den folgenden Unterkapiteln werden unterschiedliche Berechnungsverfahren/-schritte und Untermodellläufe im Detail beschrieben.

#### 4.4.1 Schritt 1: zero-to-peak-Pegel und Breitband-Einzelereignispegel in 750 m

Das itap-Rammschall Modell prognostiziert den Einzelereignispegel ( $SEL$ ) und den zero-to-peak-Spitzenpegel ( $L_{p,pk}$ ) auf der Grundlage der empirischen Datenbank in einer spezifizierten Entfernung von 750 m zur Quelle nach den Anforderungen der Deutschen Messanleitung (BSH

2013) und der internationalen Norm (ISO 18406 2017). Die Modellergebnisse hängen von den folgenden Parametern ab:

- (i) dem Pfahldurchmesser,
- (ii) der Rammenergie und
- (iii) der Wassertiefe

Im Verlauf einer Rammung ist die Streuung der jeweiligen zero-to-peak-Spitzenpegel ( $L_{p,pk}$ ) oftmals größer als die der Einzelereignispegel ( $SEL$ ). In dieser Prognose werden die berechneten zero-to-peak-Spitzenpegel ( $L_{p,pk}$ ) auf die Maximalwerte einer gesamten Fundamentinstallation bezogen. Die Unsicherheit ist damit wie in Kapitel 4.4.3 beschrieben, vergleichbar mit der des Einzelereignispegels ( $SEL$ ).

#### 4.4.2 Schritt 2: Frequenzabhängigkeit des Quellpegels und Ausbreitungsdämpfung

Schätzungen zum Wert des Breitband-Einzelereignispegels ( $SEL$ ) und des zero-to-peak-Spitzenpegels ( $L_{p,pk}$ ) basieren auf gemessenen Breitband-Daten verschiedener Studien, z. B. Bellmann, et al. (2020). Die Schallausbreitung im Meer ist jedoch frequenzabhängig, wie in Kapitel 4.1 erläutert.

Die spektralen Ansätze für den Rammschall in 750 m werden aus empirischen Daten ermittelt (siehe Kapitel 4.3.3) und ein Ansatz für die Ausbreitungsdämpfung (TL) wird berücksichtigt. Die Auswahl der spektralen Form auf der Grundlage empirischer Daten und der Amplitude wird an den prognostizierten Breitband-Einzelereignispegel ( $SEL$ ) angepasst. Der Einzelereignispegel ( $SEL$ ) ist ein energetischer Wert, bei dem die Energie auf verschiedene Frequenzfenster verteilt ist. Für die Breitband-Darstellung wird lediglich ein Frequenzfenster über den gesamten Frequenzbereich verwendet. Im Gegensatz dazu stellt der zero-to-peak-Spitzenpegel ( $L_{p,pk}$ ) den maximalen Schalldruck bei einem Rammschlag dar, welcher frequenzunabhängig ist. So ist der  $L_{p,pk}$  nur ein Einzahlwert.

#### 4.4.3 Schallkarte

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

## 4.5 Unsicherheitsbetrachtung

Sowohl die Modellierung der "Quellstärke" bzw. des "Quellpegels" des Rammgeräusches, als auch die Rammanalyse zur Bestimmung der maximalen Rammenergien sowie die Modellierung der Schallausbreitung unter Wasser (z. B. die Ausbreitungsdämpfung gemäß (Danish Energy Agency 2016) oder (Thiele und Schellstede 1980); Kapitel 4.1) sind mit einer gewissen Unsicherheit behaftet und damit auch die abgeleiteten, berechneten/prognostizierten Pegelwerte sowie deren Wirkungsbereich.

Messungen aus den letzten Bauvorhaben (nicht veröffentlichte Daten aus dem Bauminitoring in den Jahren 2010 bis 2020 der *itap GmbH*) mit großen Monopfählen zeigen allerdings vereinzelt, 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 Monopfähle und die daraus resultierende erhöhte Steifigkeit des zu rammenden Pfahls. Dieses „Verhalten“ ist jedoch stark abhängig vom Fundamentstandort (individuelle Bodenbeschaffenheit).

Aus der Bestimmung des Quellpegels nur unter Verwendung des Eingangsparameters „Pfähldurchmessers“ resultiert eine Unsicherheit von  $\pm 5$  dB (Abbildung 5). Zur Verringerung der Unsicherheit werden Annahmen für den zweiten relevanten Effektivparameter "Rammenergie" getroffen und Zu- und Abschläge auf der Basis eines Ausgangswertes berücksichtigt.

Durch die Berücksichtigung des effektiven Parameters "Rammenergie" wird die Unsicherheit deutlich reduziert. Der Vergleich des Modells mit realen Messdaten von 2012 bis jetzt zeigt eine Unsicherheit von  $\pm 2$  dB (nicht veröffentlichte Daten aus verschiedenen Projekten) für den Einzelereignispegel in einer Entfernung von 750 m zum Rammereignis mit der Tendenz, dass das Modell mit den Eingangsdaten "Pfähldurchmesser" und "Rammenergie" die Pegelwerte in den meisten Fällen leicht überschätzt.

Der wichtigste Einflussparameter bezüglich der Prognoseunsicherheit ist die Ausbreitungsdämpfung (TL), da dieser Parameter wesentlich vom Wetter (Wind und Wellen) abhängt. Das bedeutet, dass bei Prognosen von Pegeln über große Entfernungen ( $< 10$  km) Unsicherheiten von mehr als 2 dB auftreten können. In der Regel unterschätzen alle halb-empirischen und theoretischen Ansätze für die Ausbreitungsdämpfung über große Entfernungen die Ausbreitungsdämpfung, was einer Überschätzung der Pegel in großen Entfernungen entspricht. Aber der Effekt der prognostizierten Schallpegel in einer Entfernung von 750 m zum Pfahl durch Anwendung verschiedener empirischer und halb-empirischer Ansätze für die Ausbreitungsdämpfung ist sehr begrenzt (Kapitel 4.1).

Für dieses spezielle Bauvorhaben ist zudem von einer großen Unsicherheit bzgl. der Wassertiefe auszugehen, siehe Kapitel 4.2. Da die Schallabstrahlung als auch die Schallausbreitung maßgeblich von der Wassertiefe abhängt; je flacher desto hochfrequenter der Rammschall und

desto leiser. Es ist somit zu erwarten, dass die dargestellten Prognosewerte den lautesten anzunehmenden Fall darstellen und bei Messungen in unterschiedlichen Raumrichtungen es aufgrund der unterschiedlichen Wassertiefe zu geringeren Schallpegeln kommen wird. Dieser Effekt kann im mittleren einstelligen Dezibel-Bereich liegen.

Unter Berücksichtigung der Unsicherheitsbetrachtung ist das Überschreiten der festgelegten Grenzwerte des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) sehr unwahrscheinlich, jedoch nicht ausgeschlossen.

## 5. Beurteilungskriterien

Die Emission von Unterwasserschall bei Rammungen ist ein Eingriff des Menschen in die Meeresumwelt, der negative Auswirkungen auf die Meeresfauna haben kann. Hohe Schalldruckpegel können das Potenzial haben, Meeressäuger oder Fische zu schädigen, was möglicherweise zu Verhaltensstörungen, vorübergehendem Hörverlust (TTS, engl. Temporary Threshold Shift) oder permanentem Hörverlust (PTS, engl. Permanent Threshold Shift) führen kann (Lucke, et al. 2009) (Kastelein, et al. 2015) (Southall, et al. 2019).

Das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) ist die Regulierungs- und Überwachungsbehörde für Offshore-Projekte in der deutschen Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ). Dem Vorsorgeprinzip folgend, erließ das BSH in Jahre 2008, zum ersten Mal weltweit, ein duales Lärmschutzwertkriterium von 160 dB<sub>SEL</sub> (einzuhalten durch den Einzelereignispegel (*SEL*)) und 190 dB<sub>L<sub>p,pk</sub></sub> (einzuhalten durch den Spitzenschalldruckpegel (*L<sub>p,pk</sub>*)). Die Lärmschutzwerte basieren auf der Grundlage wissenschaftlicher Empfehlungen des Umweltbundesamts (UBA) und Ergebnissen aus Forschungsprojekten. Diese Lärmschutzwerte müssen in einer Entfernung von 750 m vom Emissionspunkt während Rammarbeiten eingehalten werden.

Zudem hat das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) 2013 das Schallschutzkonzept für Schweinswale in der deutschen Nordsee herausgegeben, in dem die Einhaltung der Lärmschutzwerte und ein Habitat-Ansatz zur Vermeidung und Minimierung kumulativer Effekte verfolgt werden (Bellmann, et al. 2020). Dort sind auch Vorgaben zur Schallminderung definiert, um einen signifikanten Verlust von Lebensraum für Meeressäuger zu verhindern (Reaktion oder Störung von Meeressäugern aufgrund von impulsivem Schalleintrag). Auf der Grundlage dieser Richtlinie dürfen zu keinem Zeitpunkt mehr als 10% der deutschen AWZ oder des Natura 2000-Gebiets durch impulsive Schallereignisse mit dem Potenzial, Schweinswale erheblich zu stören, belastet werden.

Auf der Grundlage des Schallschutzkonzepts (BMU 2013) sind in Entfernungen bis zu 8 km von Rammarbeiten Reaktionen und zeitliche Lebensraumverluste zu erwarten, wenn die allgemeinen Lärmschutzwerte von 160 dB für den Einzelereignispegel und 190 dB für den Spitzenpegel in 750 m Entfernung eingehalten werden – dies entspricht einem Einzelereignispegel ( $SEL$ ) von etwa 140 dB in 8 km Entfernung. Ein Lebensraumverlust ist also die Fläche des Lebensraumes, die ( $SEL$ )-Werten von 140 dB und mehr ausgesetzt ist. Darüber hinaus dürfen in der für Meeressäuger sensiblen Zeit von Mai bis August nicht mehr als 10% des Natura 2000-Schutzgebietes durch mehr als 140 dB $_{SEL5}$  belastet werden (BMU 2013), wenn die Schweinswalvermehrung kein besonderes Schutzziel des Schutzgebietes ist.

## 6. Modellierung von Szenarien

### 6.1 Vorhandene Bedingungen

Die Wassertiefe am Fundamentstandort beträgt  $\sim 12$  m (EMODnet). Die theoretisch maximale Rammenergie beträgt 150 kJ und wird vom Pfahldesign hinsichtlich Einbindetiefe und Pfahldurchmesser abhängig sein. Somit wird mit dem Pfahldurchmesser als auch mit der max. Rammenergie von einem „lautesten anzunehmenden Fall“ ausgegangen.

Für das Projektgebiet kann i. d. R. von einer guten Durchmischung des Wassers ohne ausgeprägtes Schallgeschwindigkeitsprofil ausgegangen werden. Sollte es unerwarteter Weise zu einer thermischen/salinen Schichtung kommen, so ist dieser Einfluss auf die Schallausbreitung von tieffrequentem Rammschall nach derzeitigem Kenntnisstand auszuschließen. Somit wird im Folgenden von einer konstanten Schallgeschwindigkeit über die gesamte Wassertiefe ausgegangen. Für das Modell wird eine mittlere Schallgeschwindigkeit von 1.485 m/s angenommen. Diese resultiert aus einem Salzgehalt von 32 ‰ und einer angenommenen Temperatur von 10°C.

Technischer Hinweis: Das Modell berücksichtigt keinen Hintergrundschallpegel durch z. B. Freizeitlärm oder Seeschifffahrt. Insbesondere bei der Betrachtung von Szenarien mit geringen Schallpegeln aufgrund von kleinen Pfahldurchmesser, geringen Rammenergie und sehr flachem Wasser, wie im vorliegenden Fall, könnte es bereits in wenigen hundert Metern von der Rammbaustelle zu einer vollständigen Vermischung zwischen dem permanent anwesenden Hintergrundschallpegel und dem Rammschall des Bauvorhabens kommen.

## 6.2 Schalltechnisch relevante Eingangsdaten

Für das Modell werden die folgenden Eingangsdaten berücksichtigt:

<b>Eingangsparameter</b>	
- Pfahltyp:	Pontonpfähle
- Pfahldurchmesser:	1,5 m
- Wassertiefe:	~ 12 m am Fundamentstandort
- Rammenergien:	120 kJ, 150 kJ
- Wasserbeschaffenheit:	Gute Durchmischung des Wassers ohne ausgeprägtes Schallgeschwindigkeitsprofil.
<b>Modellannahmen:</b>	
- Eingangsparameter #1:	Pfahldurchmesser
- Eingangsparameter #2:	2,5 dB Zu- oder Abschlag pro Verdoppelung bzw. Halbierung der Rammenergie (bezogen auf einen Referenzwert).
- Bodenbeschaffenheit:	0 dB
- Pfahloberfläche:	konstant, keine Zu- oder Abschlüge
- Wassertiefe:	~ 70 Hz Grenzfrequenz
- Einbindetiefe:	Keine Zu- oder Abschlüge (siehe mögliche Auswirkungen in Kapitel 4.3.4).
- Akustische Kopplung	0 dB
- Ausbreitungsdämpfung:	Siehe Kapitel 4.4

## 7. Modellierungsergebnisse

Unter Berücksichtigung der Modellansätze in Kapitel 5 werden die folgenden Pegel in 750 m Entfernung erwartet (Tabelle 1). In der darauffolgenden Abbildung ist exemplarisch die Schallausbreitung von einem Rammszenarium mit einer maximalen Rammenergie von 150 kJ als Funktion der Entfernung und Wassertiefe als Schallkarte dargestellt. In den Natura 2000-Gebieten liegen die Pegel unterhalb von 140 dB, was aus der Schallkarte in Abbildung 8 zu entnehmen ist.

**Tabelle 1:** Berechneter Pegel des ungeminderten Einzelereignispegels ( $SEL$ ) und des ungeminderten zero-to-peak-Spitzenpegels ( $L_{p,pk}$ ) in 750 m Entfernung für beide angegebenen maximalen Rammenergien.

Durchmesser [m]	Rammenergie [kJ]	$SEL$ in 750 m Entfernung [dB]	$L_{p,pk}$ in 750 m Entfernung [dB]
1,5	120	156	180
1,5	150	157	181

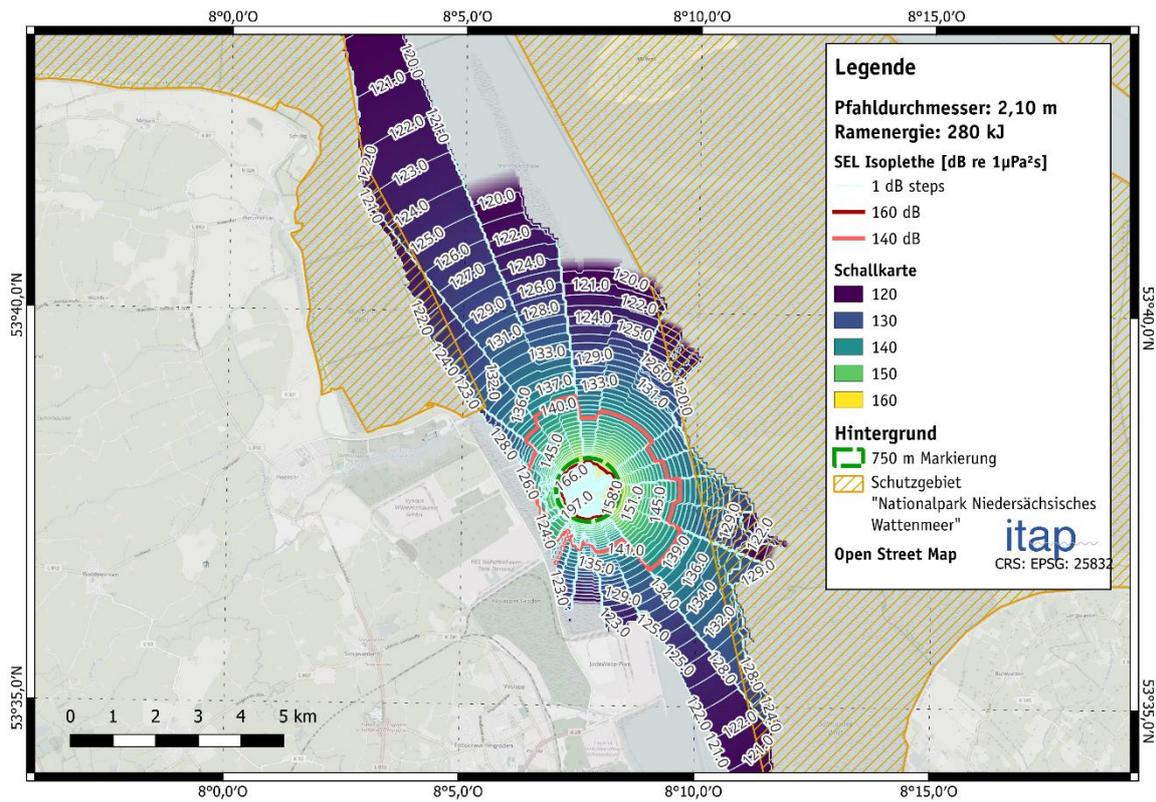


Abbildung 8: Schallkarte des Einzelereignispegels (SEL) für einen der 12 Pontonpfähle (exemplarisch PP-06) mit einem Durchmesser von 1,5 m und einer maximalen Rammernergie von 150 kJ in ~ 12 m Wassertiefe. Die Rammung ist unmitigiert, d. h. keine Schallschutzsysteme oder Schallminderungsmaßnahmen wurden berücksichtigt.

## 8. Schalltechnische Beurteilung der Ergebnisse

Die Beurteilung des Unterwasserschalleintrages durch die Impuls-Rammarbeiten des Projektes FSRU LNG VGN 2 erfolgt durch das duale Lärmschutzwertkriterium von  $160 \text{ dB}_{\text{SEL}}$  und  $190 \text{ dB}_{\text{Lp,pkr}}$  wie in Kapitel 5 beschrieben. Wie Tabelle 1 zu entnehmen ist, werden beide Kriterien voraussichtlich in einer Entfernung von 750 m eingehalten.

Der Einsatz von Schallschutzmaßnahmen ist somit für die Einhaltung der Lärmwerte nicht notwendig. Das gilt auch für die Vergrämungsmaßnahmen. Eine Kontrollmessung im Rahmen der Umweltbaubegleitung wird zu Beginn des Projekts während der Rammung des ersten Pfahls durchgeführt.

## 9. Literaturverzeichnis

- Bellmann, Michael A., Jana Brinkmann, Adrian May, Torben Wendt, Stephan Gerlach, und Patrick Remmers. „Unterwasserschall während des Impulsrammverfahrens: Einflussfaktoren auf Rammschall und technische Möglichkeiten zur Einhaltung von Lärmschutzwerten. Gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), FKZ UM16 881500. Beauftragt und geleitet durch das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Auftrags-Nr. 10036866. Editiert durch die itap GmbH.“ Tech. rep., itap GmbH, 2020.
- BMU. „Konzept für den Schutz der Schweinswale vor Schallbelastungen bei der Errichtung von Offshore-Windparks in der deutschen Nordsee (Schallschutzkonzept).“ Tech. rep., Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2013.
- BSH. „Offshore-Windparks – Prognosen für Unterwasserschall – Mindestmaß an Dokumentation – Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie.“ *Bericht Nr. M.100004/29*, 2013.
- Danish Energy Agency. „Guideline for underwater noise – Installation of Impact-driven piles.“ *Energistyrelsen, Center for Energiressourcer*, 2016.
- Gündert, S. „Empirische Prognosemodelle für Hydroschallimmissionen zum Schutz des Gehörs und der Gesundheit von Meeressäugern.“ *Masterarbeit an der Universität Oldenburg, Institut für Physik, AG Akustik*, 2014.
- ISO 18405. „ISO 18405:2017, Underwater acoustics — Terminology.“ Standard, International Organization for Standardization, Geneva, CH, 2017.
- ISO 18406. „ISO 18406:2017, Underwater acoustics – Measurement of radiated underwater sound from percussive pile driving.“ Standard, International Organization for Standardization, Geneva, CH, 2017.
- Jensen, Finn B., William A. Kuperman, Michael B. Porter, und Henrik Schmidt. *Computational ocean acoustics*. Springer Science & Business Media, 2011.
- Kastelein, Ronald, Jessica Schop, Hoek. Lean, und Jennifer Covi. „Hearing thresholds of a harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) for narrow-band sweeps.“ *The Journal of Acoustical Society of America*, 2015: 2508-2512.
- Lucke, K., U. Siebert, P. A. Lepper, und M. A. Blanchet. „Temporary shift in masked hearing thresholds in a harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) after exposure to seismic airgun stimuli.“ *Journal of the Acoustical Society of America* 425 (2009): 4060-4070.
- Southhall, Brandon L, et al. „Marine mammal noise exposure criteria: updated scientific recommendations for residual hearing effects.“ *Aquatic Mammals*, 2019.

Thiele, R., und G. Schellstede. „Standardwerte zur Ausbreitungsdämpfung in der Nordsee.“  
*FWG-Bericht 1980-7, Forschungsanstalt der Bundeswehr für Wasserschall und Geophysik,*  
1980.

Urick, R. J. *Principles of underwater sound.* 3. McGraw-Hill, Inc., 1983.

# 4207\_Prognose\_LNG\_Terminal\_WHV\_Pontoon\_IDMC\_v3\_b2

Final Audit Report

2024-02-16

Created:	2024-02-16
By:	Patrick Remmers (p.remmers@itap.de)
Status:	Signed
Transaction ID:	CBJCHBCAABAAnkFL72PK9vtEDxPbD53p0oA6NhExzX7D

## "4207\_Prognose\_LNG\_Terminal\_WHV\_Pontoon\_IDMC\_v3\_b2" History

-  Document created by Patrick Remmers (p.remmers@itap.de)  
2024-02-16 - 1:22:04 PM GMT- IP address: 84.144.154.84
-  Document emailed to Johanna Beier (beier@itap.de) for signature  
2024-02-16 - 1:22:11 PM GMT
-  Email viewed by Johanna Beier (beier@itap.de)  
2024-02-16 - 1:46:36 PM GMT- IP address: 93.239.40.252
-  Document e-signed by Johanna Beier (beier@itap.de)  
Signature Date: 2024-02-16 - 1:47:00 PM GMT - Time Source: server- IP address: 93.239.40.252
-  Agreement completed.  
2024-02-16 - 1:47:00 PM GMT