

Neubau LNG-Terminal (Liegewand Bauabschnitt 1) in Stade

Unterwasserschallprognose für die Rammarbeiten

Oldenburg, 13. Februar 2023

Projekt Nr. 4064

Version 1

Auftraggeber: Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG
 Am Schleusenpriel 2
 27472 Cuxhaven

Durchführung: Dawid Fandrich M. Sc.
 Patrick Remmers, B. Eng.
 Dr. Michael A. Bellmann

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

Berichtsumfang: 34 Seiten

Akkreditiertes Prüflaboratorium nach ISO/IEC 17025:
Ermittlung von Erschütterungen und Unterwasserschall



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

Oldenburger Volksbank
IBAN:
DE95 2806 1822 0080 0880 00
BIC: GENO DEF1 EDE
Commerzbank AG
IBAN:
DE70 2804 0046 0405 6552 00
BIC: COBA DEFF XXX

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

Inhaltsverzeichnis

1.	Zusammenfassende Beurteilung	5
2.	Projektbeschreibung und Umfang des Dokumentes	7
3.	Schalltechnische Grundlagen	9
4.	Modellansätze	13
4.1	Schallausbreitung in flachen Gewässern	13
4.2	Modellbeschreibung	16
4.3	Bestimmung der Quelle und des Ausbreitungsgrades	18
4.4	Berechnungsverfahren	22
4.5	Unsicherheitsbetrachtung	23
5.	Beurteilungskriterien	25
6.	Modellierung von Szenarien	26
6.1	Vorhandene Bedingungen	26
6.2	Schalltechnisch relevante Eingangsdaten	27
7.	Modellierungsergebnisse	28
8.	Schalltechnische Beurteilung der Ergebnisse	32
9.	Literaturverzeichnis	33

Änderungsverzeichnis

Version	Datum	Kommentare
---------	-------	------------

1	13.02.2023	Erste Version
---	------------	---------------

Diese Version ersetzt alle vorherigen Versionen.

Einheiten:

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

dB - Dezibel

Hz - Hertz

kHz - Kilohertz

kJ - Kilojoule

mNHN - meter vom Normalhöhennull

Pa - Pascal

s - Sekunde

Messgrößen:

α - Absorptionskoeffizient

λ - Wellenlänge

ρ - Dichte eines Mediums

E - Schallbelastung

$F - 10 \log_{10}(f [\text{kHz}])$

L_{hg} - Hintergrundpegel

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

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

SEL - Einzelereignispegel

SEL_{05} - 5 % Überschreitung Einzelereignispegel

SPL - Dauerschalldruckpegel

T - Mittelungszeit

TL - Ausbreitungsdämpfung

Z - akustische Kennimpedanz

c - Schallgeschwindigkeit

f - Frequenz

f_g - Grenzfrequenz

k - Ausbreitungskonstante

n - Anzahl

p - Schalldruck

$p(t)$ - zeitvarianter Schalldruck

p_0 - Bezugsschalldruck

p_{pk} - maximaler Schalldruck

v - Schallschnelle

Abkürzungen:

AWZ - Ausschließliche Wirtschaftszone

BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

BSH - Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

IIg - Gebietsklassifizierung nach (Thiele und Schellstede 1980)

itap - Institut für technische und angewandte Physik, Institut für technische und angewandte Physik

LNG - Liquid Natural Gas

PTS - Permanenter Hörverlust (engl. Permanent Threshold Shift)

SRD - Bodenwiderstandswert - engl. soil resistance value

TTS - Vorübergehender Hörverlust (engl. Temporary Threshold Shift)

UBA - Umweltbundesamt

1. Zusammenfassende Beurteilung

Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG plant derzeit den Bau eines LNG-Terminals in Stade. Das Bauprojekt beinhaltet die Errichtung des Terminals an einer Liegewand und drei weiterer Wände (Querwand Süd, Längswand Ost und Flügelwand Nord). Derzeit ist der erste Bauabschnitt der Liegewand in Planung. Hierbei handelt es sich um eine kombinierte Rohrspundwand, deren Konstruktion die Verankerung verschiedener Pfahltypen (u. A. Dalben, Tragrohren und kombinierte Schrägpfähle) mittels Vibrations- und Impulsrammverfahren beinhaltet.

Im Rahmen der Genehmigungs- und Bauüberwachung soll dieses Gutachten zur Bewertung der Artenschutz- und Gebietsanforderungen bezüglich der durchzuführenden Rammarbeiten und der zu erwartenden, impulshaften Unterwasserschallimmissionen dienen.

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. Für das Vibrationsrammverfahren existieren keine nationalen oder internationalen Richt- oder Lärmschutzwerte, da Vibrationsrammschall im Sinne der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (MSRL, 2008) als Dauerschalleintrag ins Wasser zu werten ist. Zudem zählt die Vibrationsgründung als lärmarme Gründungsmethode, von der keine schädlichen Umweltbeeinträchtigungen für die Leitart Schweinswal bezüglich Unterwasserschall zu erwarten sind und wird in dieser Prognose nicht betrachtet. Zudem wird die *itap GmbH* im Februar 2023 Unterwasserschallmessungen an ausgewählten Impulsrammungen mit Pfahldurchmesser von bis zu 1,62 m ausführen, um diese Prognose weitergehend zu validieren.

Die Quellpegel der Impulsrammung werden in Abhängigkeit des Pfahldurchmessers, der Rammenergie und der Wassertiefe berechnet, da diese drei Parameter die größten Einflussfaktoren auf den Schalleintrag ins Wasser bei Impulsrammungen besitzen (Bellmann et al., 2020). Es werden die maximal möglichen Rammenergien berücksichtigt, die sich aus den unterschiedlichen zur Verfügung stehenden Rammhämmern (hier Rammhären) ergeben. Für alle Pfähle wird eine Wassertiefe von ca. 3 m angenommen. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass der Schalleintrag und die Weiterleitung im Wasser bei geringeren Wassertiefen abnehmen. Diese Modellszenarien beschreiben die akustische ungünstigste Parameterkombination der Impulsrammbedingungen des Bauvorhabens (lautestes Szenario). Die Modellierung umfasst sowohl den Einzelereignispegel (SEL), als auch den zero-to-peak-Spitzenpegel ($L_{p,pk}$).

Die Prognoseergebnisse für die Gründungsaktivitäten mittels Impulsrammverfahren ohne Schallschutz- bzw. Schallminderungsmaßnahmen sind in der folgenden Tabelle aufgelistet.

Durchmesser [m]	Rammenergie [kJ]	SEL in 750 m Entfernung [dB]	$L_{p,pk}$ in 750 m Entfernung [dB]
1,62	50	144	167
1,62	100	147	170
1,62	150	148	172
1,62	200	149	173
1,62	280	150	174
1,82	50	145	168
1,82	100	147	171
1,82	150	149	172
1,82	200	150	173
1,82	280	151	174
0,61	50	137	161
0,61	100	140	163
0,61	150	141	165

- Das Lärmwertkriterium von 160 dB für den Einzelereignispegel (SEL) wird voraussichtlich bei keiner Rammung überschritten. Der Lärmschutzwert von 190 dB $_{Lp,pk}$ für den Spitzenpegel ($L_{p,pk}$) kann bei allen Installationen eingehalten werden.
- Im lautesten anzunehmenden Fall (280 kJ Rammenergie bei 1,82 m Pfahldurchmesser) ist ein Einzelereignispegel (SEL) von 151 dB in 750 m Entfernung bei einer unmitigierten Impulsrammung zu erwarten. Der maximal zu erwartende Spitzenpegel ($L_{p,pk}$) in 750 m Entfernung beträgt 174 dB.
- Somit sind aus akustischer Sicht keine Schallschutzmaßnahmen für diese Baumaßnahme erforderlich, um die Lärmschutzwerte einzuhalten.

Oldenburg, 13. Februar 2023

D. Fandrich

D.Fandrich (Feb 14, 2023 18:58 GMT+1)

Dawid Fandrich, M. Sc.

Erstellt



Bellmann

Dr. Michael A. Bellmann

Geschäftsführer
Geprüft

2. Projektbeschreibung und Umfang des Dokumentes

Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG plant derzeit den Bau eines LNG-Terminals in Stade an der Elbe. Das Bauprojekt beinhaltet die Errichtung des Terminals an einer Liegewand und drei weiteren Wände (Querwand Süd, Längswand Ost und Flügelwand Nord). Derzeit ist der erste Bauabschnitt der Liegewand in Planung. Hierbei handelt es sich um eine kombinierte Rohrspundwand, deren Konstruktion die Verankerung verschiedener Pfahltypen mittels Impulsrammverfahren beinhaltet. Die Hauptwand wird teilweise ins Land gebaut, wofür zunächst eine Baugrube auf -2,5 m NHN. bis -3 m NHN ausgehoben wird, in welcher anschließend die neue Spundwand eingebaut wird. Im Anschluss wird dann erst die Hafentiefe in 2 Schritten hergestellt (Schritt 1: Aushub bis -6,0 m NHN; Schritt 2: Aushub bis -16 m NHN.). Somit beträgt die Wassertiefe zur Gründungsphase der Fundamente und Spundwände (Rammzeit) maximal -3 m NHN. Für die Spundwand werden drei Pfahltypen (Dalben, Tragrohre und kombinierte Schrägpfähle) verwendet. Die Dalben haben einen Durchmesser von 1,82 m und ihre zugehörigen Stützrohre (kombinierte Schrägpfähle) haben einen Durchmesser von 0,61 m. Der Durchmesser der Tragrohre beträgt 1,62 m. Der Baugrund im Umfeld des Vorhabensgebietes besteht im Wesentlichen aus Sand. Die Umgebung des LNG-Terminals ist in Abbildung 1 dargestellt.

Die ersten Meter erfolgt die Einbindung der Pfähle mittels Vibrationsrammverfahren; zur Erreichung der Endeinbindetiefe werden die Pfähle mittels Impulsrammverfahren in den Meeresboden eingebracht. Für die Installation der Pfähle soll ein Rammbar S-150 oder S-280 mit einer maximalen Rammenergie von 280 kJ zur Verfügung stehen. Für die Vibrationsrammungen steht ein entsprechender Vibrationsrammhammer zur Verfügung. Die Schalleinträge ins Wasser durch das Vibrationsrammverfahren gelten nach Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (MSRL 2008) als Dauerschall. Aufgrund der fehlenden Richt- und Lärmschutzwerte für Vibrationsrammung und der Tatsache, dass dieses Installationsverfahren im Allgemeinen als schallarme Gründungsmethode – insbesondere für sehr geringe Wassertiefen – anerkannt ist (BMU Schallschutzkonzept, 2013), wird die Vibrationsrammung im Folgenden schalltechnisch nicht weiter berücksichtigt. Im Gegensatz dazu werden durch das Impulsrammverfahren impulshaltige Schalleinträge nach der MSRL (2008) ins Wasser eingetragen, die Hörschäden oder Meidereaktion auf marine Säugetiere – Leitart in Deutschland ist der Schweinswal – verursachen können (Lucke, et al. 2009) (Kastelein, et al. 2015) (Southall, et al. 2019). Zudem sind für derartige Schalleinträge ins Wasser verbindliche Lärmschutzwerte in Deutschland festgeschrieben.

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. Zudem wird die *itap GmbH* im Februar 2023 Unterwasserschallmessungen an ausgewählten Impulsrammungen mit

Pfahldurchmesser von bis zu 1,62 m ausführen, um diese Prognose weitergehend zu validieren.

Im Rahmen der Genehmigungsphase und Bauüberwachung soll dieses Gutachten zur Bewertung der Arten- und Gebietsschutzanforderungen bezüglich der durchzuführenden Rammarbeiten und der zu erwartenden, impulshaften Unterwasserschallimmissionen dienen.

Sollte es zu möglichen Überschreitungen der Lärmschutzwerte für Impulsschall kommen, so können auf der Grundlage dieser Unterwasserschallprognose und durchgeführte in-situ Messungen vor der schweinswalsensitiven Zeit (ab März in der Elbe) ein Schallschutzkonzept entwickelt werden.

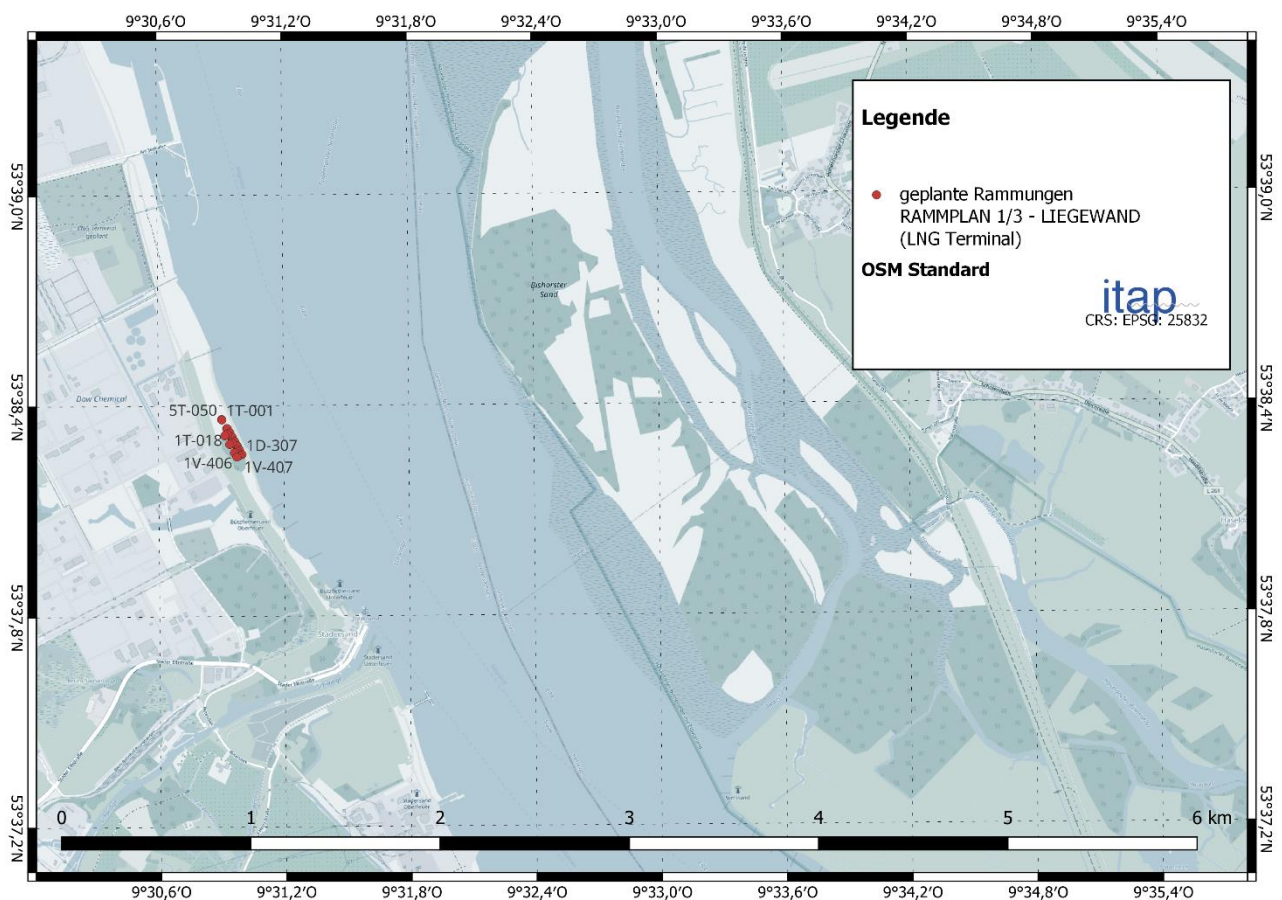


Abbildung 1: Übersichtsplan geplante Pfahlrammungen des LNG-Terminals

3. Schalltechnische Grundlagen

Schall ist eine rasche, oft periodische Schwankung des Drucks, die den Umgebungsdruck (im Wasser der hydrostatische Druck) additiv überlagert. Dabei handelt es sich um eine Hin- und Her-Bewegung der Wasserteilchen, die üblicherweise durch deren Geschwindigkeit, der sogenannten Schallschnelle v (engl. particle velocity), beschrieben wird. Die Schallschnelle kennzeichnet die Wechselgeschwindigkeit eines um seine Ruheposition in einem Medium schwingenden Teilchens. Die Schallschnelle ist nicht zu verwechseln mit der Schallgeschwindigkeit c_{Wasser} , also der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schall in einem Medium, die in der Regel bei Wasser im Bereich von $c_{\text{Wasser}} = 1.480 \text{ m/s}$ liegt. Die Schallschnelle v ist deutlich geringer als die Schallgeschwindigkeit c .

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

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

Gleichung 1

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

$$Z = \rho c$$

Gleichung 2

mit ρ – Dichte des Mediums und c – Schallgeschwindigkeit.

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

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 $\geq 5\lambda$.

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 variabler 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 2 dargestellt. Der zero-to-peak-Spitzenpegel ($L_{p,pk}$) ist stets höher als der Einzelereignispegel (SEL). In der Regel beträgt die Differenz zwischen dem $L_{p,pk}$ und dem SEL bei Rammarbeiten 20 dB bis 25 dB. Einige Autoren bevorzugen den Peak-to-peak-Spitzenpegel ($L_{pk,pk}$) anstelle des $L_{p,pk}$. Eine Definition dieses Parameters ist in Abbildung 2 gegeben, 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 ($L_{p,pk}$).

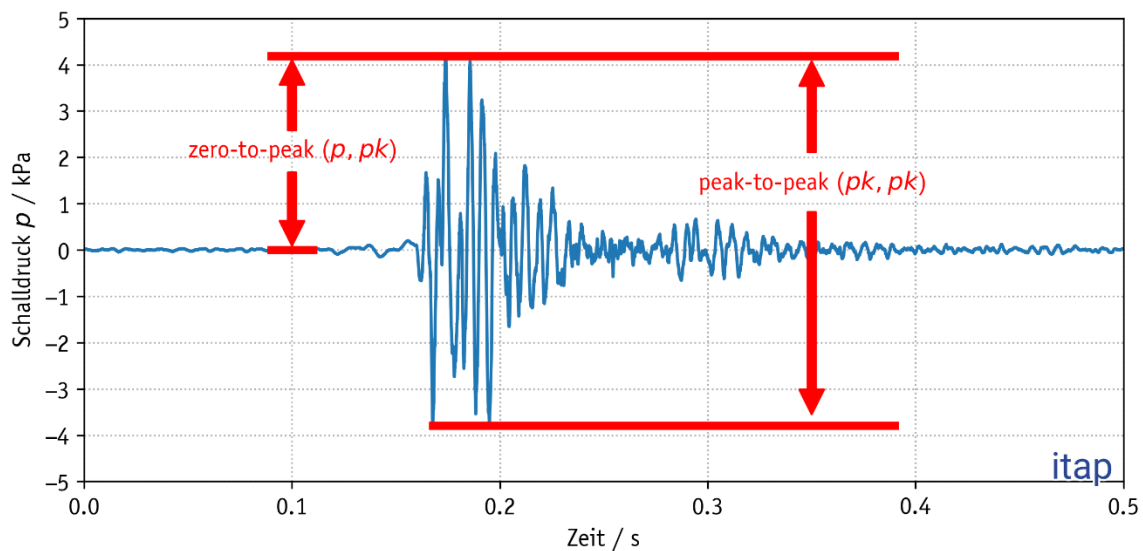


Abbildung 2: Typisches, gemessenes Zeitsignal des Unterwasserschalls bei Rammungen in einer Entfernung von einigen 100 m.

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 α proportional zur Entfernung berücksichtigt. Gleichung 9 erweitert sich zu:

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

Gleichung 10

Für Regionen in der Nordsee mit Wassertiefen unter 50 m führt die folgende Gleichung 11 zu realistischen Ergebnissen im Vergleich zu Lärmmessungen in verschiedenen Regionen der Nordsee. Das Beispiel in der "Richtlinie für Unterwasserlärm - Installation von Pfählen im Impulsrammverfahren" (Danish Energy Agency 2016) berücksichtigte die gleiche Ausbreitungsdämpfung.

$$TL = -14.72 \log_{10}(r) + 0.00027 r \text{ [dB]}$$

Gleichung 11

Thiele and Schellstede (1980) spezifizierten frequenzabhängige Näherungsgleichungen für die Berechnung der Schallausbreitung in verschiedenen Regionen der Nordsee sowie für "raue" und "glatte" See. Für die Installation der Fundamente ist eine "glatte" See erforderlich. Daher wird die folgende Gleichung für Flachwasser und glatte See (IIg) mit Messergebnissen von verschiedenen Offshore-Windparks in der Nordsee in Abbildung 3 verglichen:

$$TL = -(23 + 0.7 F) \log_{10} r + (0.3 + 0.05 F + 0.005 F^2) r \cdot 10^{-3} \text{ [dB]}$$

Gleichung 12

mit

$F = 10 \log_{10}(f \text{ [kHz]})$, mit der Frequenz f [Hz],

r – Entfernung [m].

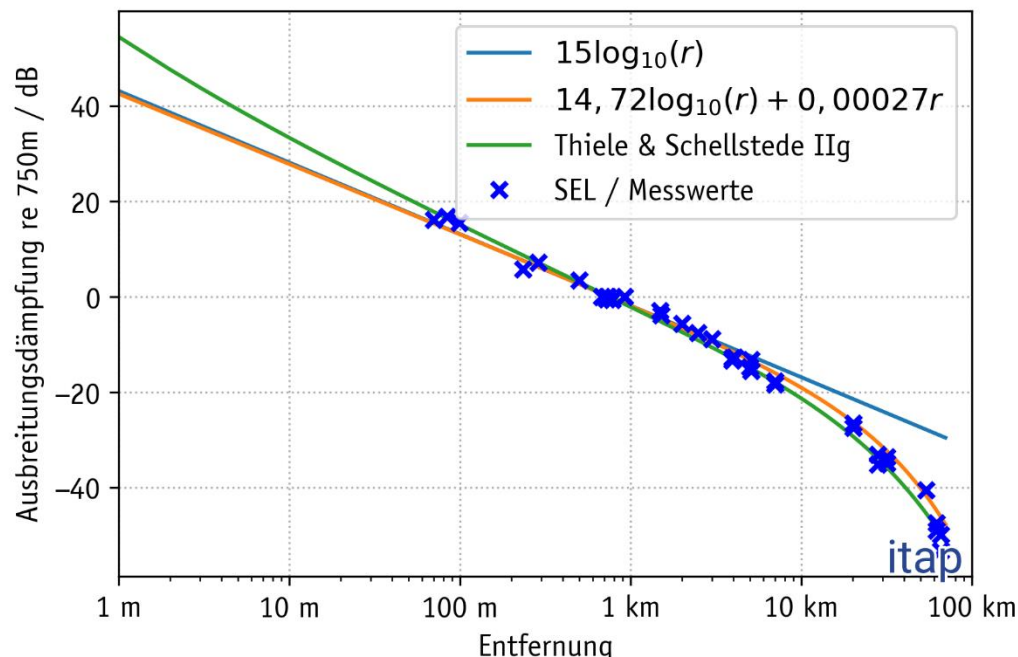


Abbildung 3: Unterschiedlich prognostizierte Ausbreitungsdämpfung (TL)-Kurven gemäß Gleichung 9 ($15 \log_{10} R$), Gleichung 11 ($14.72 \log_{10} R + 0.00027 R$) und des halbempirischen Ansatzes von Thiele und Schellstede IIg (1980) (Gleichung 12), verglichen mit vorhandenen Offshore-Messdaten. Die Messdaten stammen aus Rammerschallmessungen von verschiedenen Offshore-Windparks in der Nordsee in Deutschland und den Niederlanden. Die Wassertiefe betrug in allen Windparks weniger als 50 m.

Gleichung 11 und Gleichung 12 zeigen eine hohe Ähnlichkeit und eine hohe Übereinstimmung mit den Messwerten des Einzelereignispegels (SEL) während der Rammungen (siehe Abbildung 3) mit vergleichbaren Wassertiefen. Nur für Entfernungen von weniger als 100 m weichen die Gleichungen voneinander ab. Für die Prognose wird angenommen, dass eine vollständige

Durchmischung des Wassers sowie kein ausgeprägtes Schallgeschwindigkeitsprofil im Untersuchungsgebiet zum Zeitpunkt der Rammarbeiten vorliegen. Für die Modellierung wird die Ausbreitungsdämpfung richtungsunabhängig nach Gleichung 12 berücksichtigt. Standortsspezifische Änderungen in der Bathymetrie, insbesondere in Ufernähe, gehen durch den frequenzabhängigen Einfluss der Wassertiefe in die Modellierung ein.

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). Schall um die Grenzfrequenz (f_g) wird mit zunehmendem Abstand zur Schallquelle stärker reduziert oder gedämpft, als es mit Gleichung 12 berechnet wird.

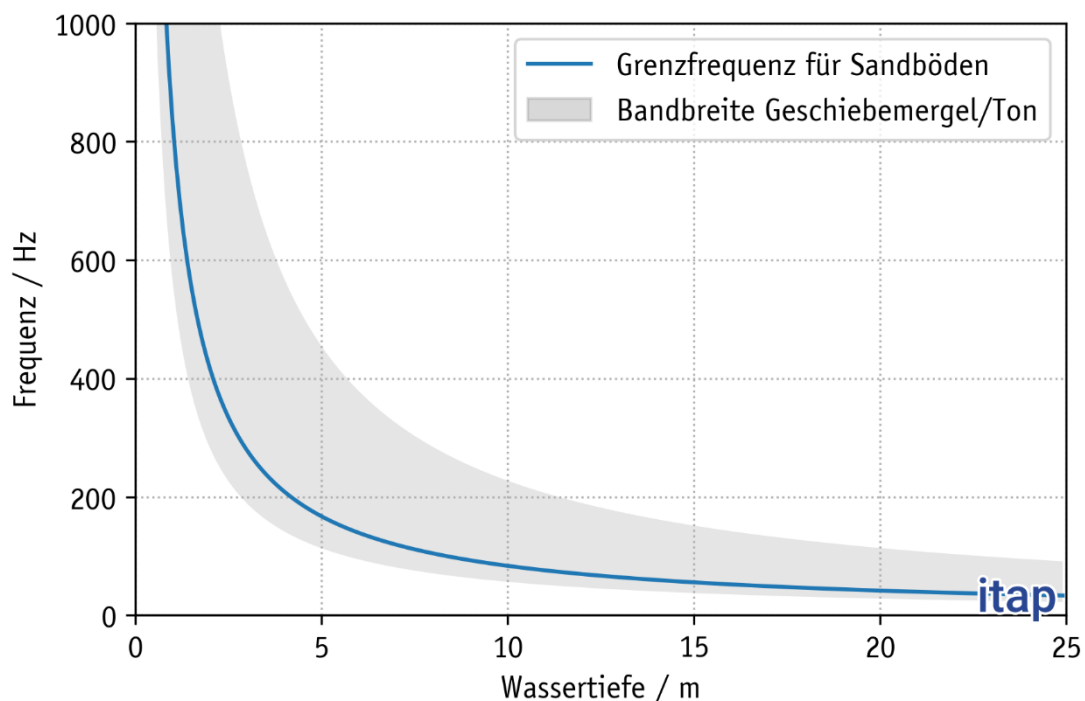


Abbildung 4: Theoretische, untere (Grenz-) Frequenz (f_g) für eine ungestörte Schallausbreitung im Wasser als Funktion der Wassertiefe für verschiedene Bodenschichtungen (Beispiel übernommen von (Urlick 1983) (Jensen, et al. 2011); das Beispiel zeigt den möglichen Bereich, der durch verschiedene Schichten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

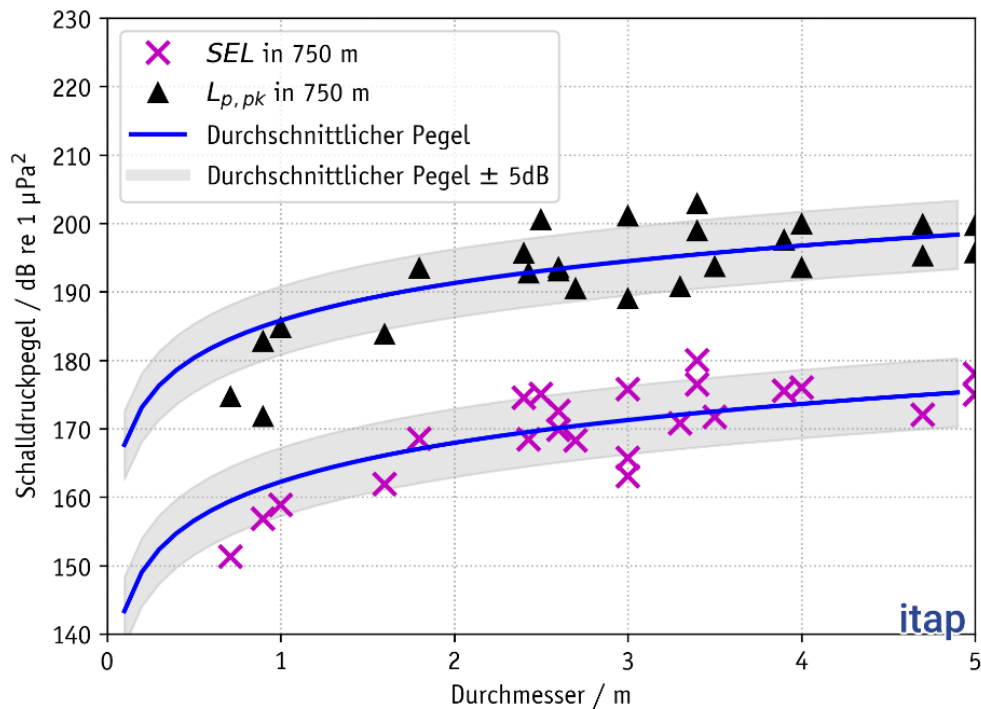


Abbildung 5: Gemessener zero-to-peak-Spitzenpegel ($L_{p,pk}$) und breitbandige 5 % Überschreitungs-Einzelereignispegel (SEL_{05}) bei Rammarbeiten bei einer Reihe von OWP als Funktion des Pfahldurchmessers.

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 "Pfahldurchmesser" 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 ± 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 "Pfahldurchmesser", "maximale Rammenergie" und "Einbindetiefe" konnte eine Modellunsicherheit von ± 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 kann davon ausgegangen werden, dass die Modellunsicherheit unter Berücksichtigung der oben genannten Zu- und Abschlüge deutlich minimiert werden kann.

4.3 Bestimmung der Quelle und des Ausbreitungsgrades

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. Abschlüge von 2,5 dB pro Verdopplung/Halbierung für höhere bzw. niedrigere, maximale Rammenergien veranschlagt.

In der nachstehenden Prognose für die Impulsrammung beim Bau der LNG-Terminal *Stade* wird mit einer maximalen Rammenergie von 280 kJ gerechnet (mit dem Auftraggeber abgestimmt). 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 unterschiedlicher Studien (Abbildung 5). Die Schallausbreitung im Meer ist jedoch sehr frequenzabhängig; siehe Kapitel 4.1. Deshalb müssen für die Berechnung Schätzungen der Frequenzzusammensetzung der entsprechenden Quellpegel² 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 -3 m NHN im Baufeld der LNG-Terminal *Stade* wird die Grenzfrequenz bei 279 Hz liegen.

Aus den Messungen der letzten Jahre hat sich gezeigt, dass sowohl der Pfahlhammertyp, als auch der Pfahldurchmesser einen Einfluss auf das zu erwartende Rammschallspektrum haben können. Tendenziell verschiebt sich das lokale Maximum bei größeren Pfahlhammertypen und

² "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.

größeren Pfahldurchmessern zu niedrigeren Frequenzen. Diese Einflussfaktoren können derzeit jedoch nicht mit statistischer Validität abgeschätzt werden.

Im Einzelnen ist der spektrale Verlauf eines Rammschallereignisses nach heutigem Kenntnisstand nicht genau prognostizierbar. Für die Modellierung wird daher aus den Messdaten vergleichbarer Bauvorhaben ein idealisiertes Modellspektrum für den Einzelereignispegel extrahiert. Abbildung 6 zeigt die Form des für die Prognose verwendeten mittleren 1/3-Oktav-Spektrums (blaue Linie). Die frequenzabhängigen Amplituden werden so gemessen, dass der Summenpegel dieses Spektrums in 750 m Entfernung den zuvor ermittelten Quellpegeln entspricht (in Abbildung 6 bereits berücksichtigt). Seit 2016 berechnet das *itap*-Modell die beurteilungsrelevanten Pegelwerte auf den gemessenen Einzelereignispegel (5%-Überschreitungspegel, SEL_{05}) und den zero-to-peak-Spitzenpegel ($L_{p,pk}$).

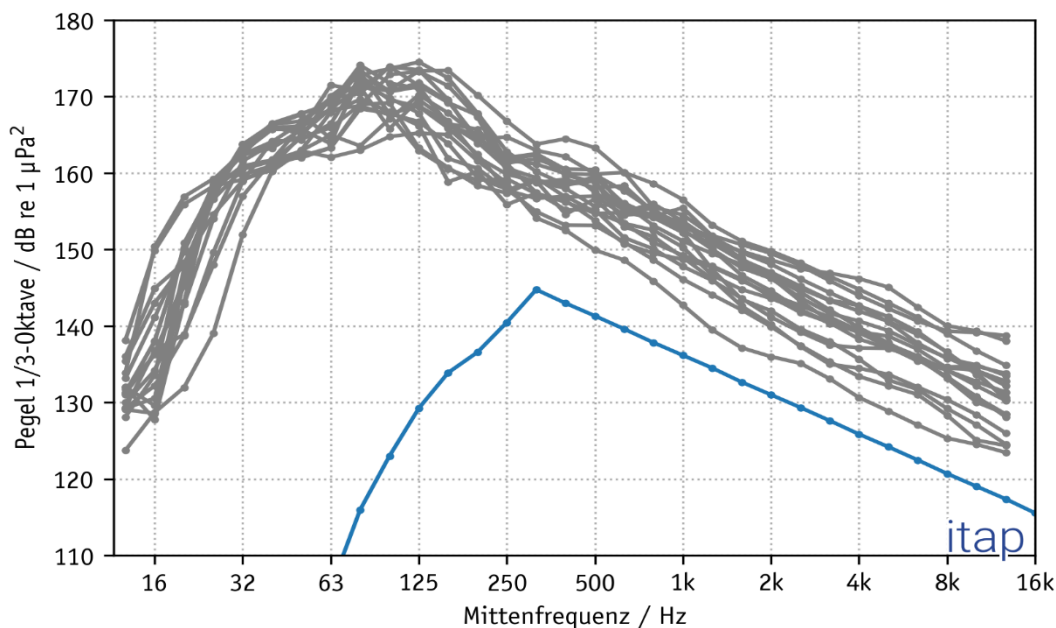


Abbildung 6: Das für den Rammschall geschätzte Modellspektrum (blau) – Einfluss von projekt-spezifischer Wassertiefe und Rammenergie ist berücksichtigt, basierend auf verschiedenen Messdaten (grau: Messdaten) für Zugangsbrücken-Stützpfähle.

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 Bo-

denwiderstand (SRD-Wert) einer Bodenschicht zunimmt. Die in Kapitel 4.2, Abbildung 5 gezeigten Messdaten wurden weitgehend auf sandigem und mitteldichtem, tonigem Untergrund ermittelt. Da es sich im Baubereich um ebenfalls um sandigen Untergrund handelt, 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 3 m. Dies führt zu einer unteren Grenzfrequenzen von 279 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 12 berücksichtigt. Gleichung 12 zeigt ein hohes Maß an Übereinstimmung mit den Messungen in der Nord- und Ostsee und berücksichtigt auch die Absorption im Wasser. Der Einfluss des Absorptionsparameters α nimmt mit der Entfernung zu, so dass er für größere Entfernungen relevant wird. Bei der Modellierung der Ausbreitungsdämpfung über eine solche Ausbreitungsfunktion wird eine einfache Schallwelle im Wasser angenommen. Dies ist nur bei größeren Entfernungen $>$ Wassertiefe vom Pfahl der Fall, wenn der direkt vom Pfahl abgestrahlte Schall mit den ersten Reflektionen von der Wasseroberfläche und dem Sediment überlagert wird. In einer Entfernung von < 50 m vom Pfahl hat sich innerhalb der Wassersäule kein ebenes Wellenfeld gebildet; der Schallpegel wird unter dem mit Gleichung 12 berechneten Pegel liegen. Im Modell ist der Schallpegel für die ersten 50 m vom Pfahl konstant.

4.3.7 Modellanforderungen

Das empirische Rammschall-Modell der itap GmbH erfüllt die nationalen Richtlinien der Regulierungsbehörden in Deutschland (BSH 2013) und Dänemark (Danish Energy Agency 2016)

für Rammprognosen einschließlich der erforderlichen Ergebnisse. Internationale Richtlinien oder Standards gibt es gegenwärtig nicht. Auch andere Nationen haben keine festen Richtlinien für die Prognosen; normalerweise werden die Anforderungen an die Prognosen für jedes Bauprojekt gesondert festgelegt. Dieses Modell wurde bereits in mehreren Ländern angewandt, z. B. in Deutschland, Dänemark, den Niederlanden, Großbritannien, Belgien, Frankreich, den USA, Australien und Taiwan.

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
- (iv) Sicherheitszuschläge für z.B. akustische Ankopplungseffekte zwischen Pfahl und Jacket-Fundament-Struktur

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 Johns) 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 stellte 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 Baumonitoring 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 Monopiles und die daraus resultierende

erhöhte Steifigkeit des zu rammenden Pfahls. Dieses „Verhalten“ ist jedoch stark abhängig vom Fundamentstandort (individuelle Bodenbeschaffenheit).

Aus der Bestimmung des Quellpegels nur unter Verwendung des Eingangsparameters „Pfahldurchmessers“ resultiert eine Unsicherheit von ± 5 dB (Abbildung 5). 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 ± 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 "Pfahldurchmesser" 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).

Im vorliegenden Fall ist zudem die Wassertiefe ein ebenfalls großer Unsicherheitsparameter, das sehr flache Gewässer i.d.R. als Hochpass dienen und somit nur hochfrequenter Schall sich über größere Entfernungen ausbreiten kann. Die Grenzfrequenz ist dabei sehr stark von der Bodenbeschaffenheit abhängig und kann im Allgemeinen nur grob abgeschätzt werden.

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 umso 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.

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 im Jahre 2008, zum ersten Mal weltweit, ein duales Lärmschutzwertkriterium von 160 dB_{SEL} (einzuhalten durch den Einzelereignispegel (*SEL*)) und 190 dB_{L_{p,pk}} (einzuhalten durch den Spitzenschalldruckpegel (*L_{p,pk}*)). 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. Im vorliegenden Bauvorhaben wird die Schallausbreitung durch die Bathymetrie der Elbe beeinflusst, wodurch davon ausgegangen werden kann, dass sich die Schallausbreitung anders verhält als auf offener See; es ist mit einer eingeschränkten Ausbreitung von Rammschall in der Elbe auszugehen. Für die Elbe gilt eine schweinswalsensitive Zeit von März bis April, da in diesem Zeitraum eine Nutzung der Elbe als Zuwegung zur Nordsee nicht ausgeschlossen werden kann.

6. Modellierung von Szenarien

6.1 Vorhandene Bedingungen

Die Wassertiefe am Fundamentstandort beträgt zum Zeitpunkt der Impulsrammungen max. 3 m (NHN). Die theoretisch maximale Rammenergie beträgt 280 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 unerwarteterweise 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 1.480 m/s angenommen. Die Schallgeschwindigkeit im Wasser hängt vom Salzgehalt und der Temperatur ab und hat einen geringen Einfluss auf die durch die Wassertiefe verursachte Grenzfrequenz (Urlick 1983), (Jensen, et al. 2011)

Technischer Hinweis: Das Modell berücksichtigt keinen Hintergrundschaallpegel 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 Hintergrundschaallpegel und dem Rammschall des Bauvorhabens kommen.

6.2 Schalltechnisch relevante Eingangsdaten

Für das Modell werden die folgenden Eingangsdaten berücksichtigt:

Eingangsparameter

- Pfahltyp:	Stahlrohrpfahl
- Pfahldurchmesser:	1,62 m, 0,61 m und 1,82 m
- Wassertiefe:	3 m (NHN)
- Rammenergien:	50 kJ 150 kJ 200 kJ und 280 kJ
- Wasserbeschaffenheit:	Gute Durchmischung des Wassers ohne ausgeprägtes Schallgeschwindigkeitsprofil.

Modellannahmen:

- Eingangsparameter #1:	Pfahldurchmesser
- Eingangsparameter #2:	2,5 dB Zu- oder Abschlag pro Verdoppelung bzw. Halbierung der Rammenergie (bezogen auf einen Referenzwert).
- Bodenbeschaffenheit:	-2 dB
- Pfahloberfläche:	konstant, keine Zu- oder Abschlüsse
- Wassertiefe:	279 Hz Grenzfrequenz
- Einbindetiefe:	Keine Zu- oder Abschlüsse (siehe mögliche Auswirkungen in Kapitel 4.3.4).
- Akustische Kopplung	+0 dB (Stahlrammpfahl ohne Rammschablone)
- Ausbreitungsdämpfung:	gemäß Gleichung 12

7. Modellierungsergebnisse

Unter Berücksichtigung der Modellansätze in Kapitel 4 werden die folgenden Pegel in 750 m Entfernung erwartet (Tabelle 1). In den darauffolgenden Abbildungen sind exemplarisch die Schallausbreitungen von drei Rammszenarien als Funktion der Entfernung und Wassertiefe als Schallkarte dargestellt. Abbildung 7 repräsentiert in dieser Auswahl die niedrigste Schallausbreitung - die Rammung des Pfahls 5T-050 (1,62 m Durchmesser) mit einer Rammenergie von 150 kJ. Abbildung 8 zeigt die Rammung des Pfahls 1T-052 mit 1,62 m Durchmesser und einer maximalen Rammenergie von 280 kJ und ist als mittleres Szenario ausgewählt. In Abbildung 9 ist repräsentativ für den höchsten anzunehmenden Pegel die Rammung des Pfahls 1D-307 mit 1,82 m Durchmesser und einer maximalen Rammenergie von 280 kJ dargestellt.

Tabelle 1: Berechneter Pegel des ungeminderten Einzelereignispegels (SEL) und des ungeminderten zero-to-peak-Spitzenpegels ($L_{p,pk}$) in 750 m Entfernung für alle eingesetzten Pfahldurchmesser und unterschiedlichen Rammenergien.

Durchmesser [m]	Rammenergie [kJ]	SEL in 750 m Entfernung [dB]	$L_{p,pk}$ in 750 m Entfernung [dB]
1,62	50	144	167
1,62	100	147	170
1,62	150	148	172
1,62	200	149	173
1,62	280	150	174
1,82	50	145	168
1,82	100	147	171
1,82	150	149	172
1,82	200	150	173
1,82	280	151	174
0,61	50	137	161
0,61	100	140	163
0,61	150	141	165

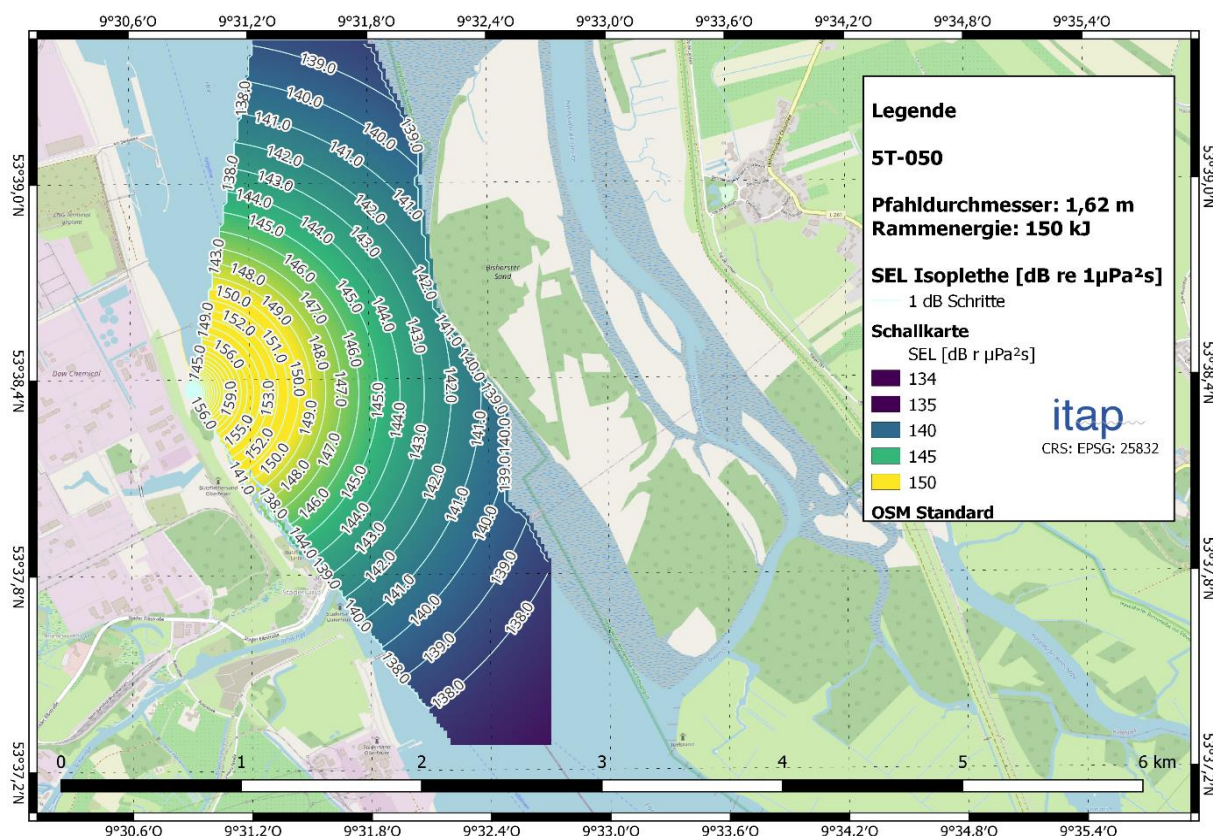


Abbildung 7: Schallkarte des Einzelereignispegels (SEL) für den Pfahl 5T-050 mit 1,62 m Durchmesser und einer Rammenergie von 150 kJ. Die Rammung ist unmitigiert, d.h. keine Schallschutzsysteme oder Schallminderungsmaßnahmen wurden berücksichtigt.

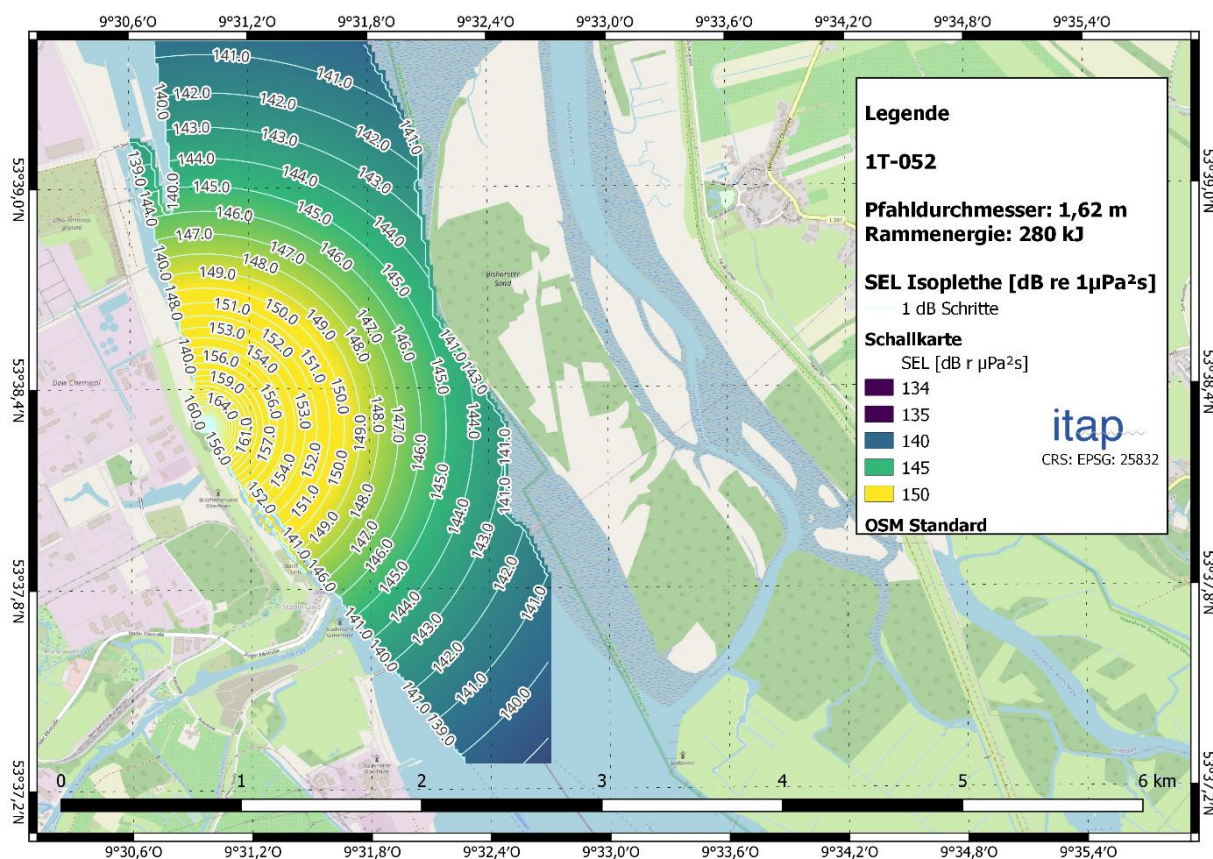


Abbildung 8: Schallkarte des Einzelereignispegels (SEL) für den Pfahl 1T-052 mit 1,62 m Durchmesser und einer Rammenergie von 280 kJ. Die Rammung ist unmitigiert, d.h. keine Schallschutzsysteme oder Schallminderungsmaßnahmen wurden berücksichtigt.

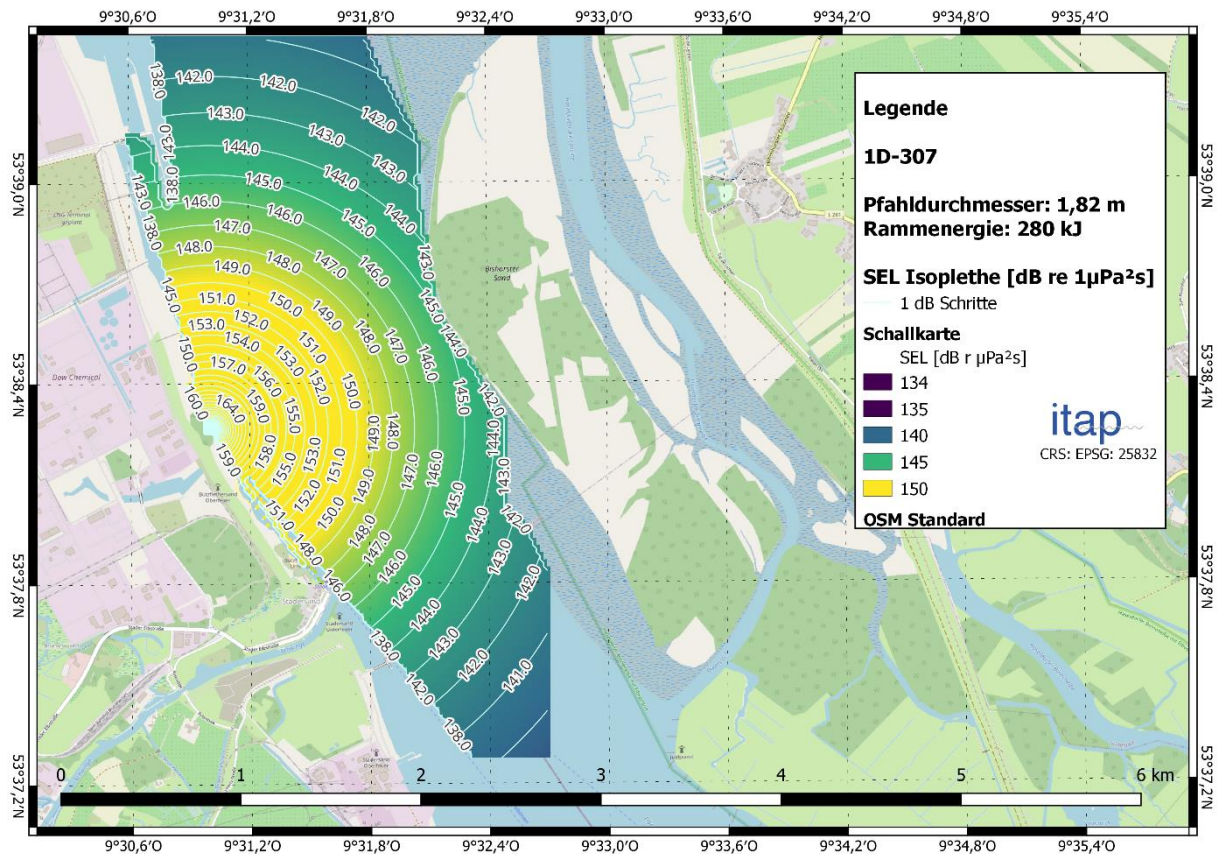


Abbildung 9: Schallkarte des Einzelereignispegels (SEL) für den Pfahl 1D-307 mit 1,82 m Durchmesser und einer Rammenergie von 280 kJ. Die Rammung ist unmitigiert, d.h. keine Schallschutzsysteme oder Schallminderungsmaßnahmen wurden berücksichtigt.

8. Schalltechnische Beurteilung der Ergebnisse

Die Beurteilung des Unterwasserschalleintrages durch die Impuls-Rammarbeiten beim Bau des LNG-Terminals erfolgt durch das duale Lärmschutzwertkriterium von 160 dB_{SEL} und 190 dB_{Lp,pk}, wie in Kapitel 5 beschrieben, durch dessen Einhaltung eine Verletzung der Tiere durch eine mögliche temporäre Hörschädigung vermieden wird. Wie Tabelle 1 zu entnehmen ist, wird weder das Lärmwertkriterium von 160 dB für den Einzelereignispegel (*SEL*) noch der Lärmschutzwert von 190 dB_{Lp,pk} für den Spitzenpegel ($L_{p,pk}$) in einer Entfernung von 750 m überschritten.

Der Einsatz von Schallschutzmaßnahmen sind somit für die Einhaltung der Lärmschutzwerte nicht notwendig.

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, Lean Hoek, und Jennifer Covi. „Hearing thresholds of a harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) for narrow-band sweeps.“ *The Journal of the Acoustical Society of America* 138 (October 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.
- MSRL. „Richtlinie 2008/56/eg des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Juni 2008 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Meeresumwelt (Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie).“ 2008.

Southall, Brandon L., et al. „Marine mammal noise exposure criteria: updated scientific recommendations for residual hearing effects.“ *Aquatic Mammals* 45 (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.

4064_Prognose_LNG_Terminal_Stade_v1_b4

Final Audit Report

2023-02-14

Created:	2023-02-14
By:	Michael Bellmann (bellmann@itap.de)
Status:	Signed
Transaction ID:	CBJCHBCAABAAAtA4c6AGmKtmwUqycLbTKme9jnQeK_Xlu


"4064_Prognose_LNG_Terminal_Stade_v1_b4" History

 Document created by Michael Bellmann (bellmann@itap.de)

2023-02-14 - 5:55:43 PM GMT- IP address: 217.87.204.195

 Document emailed to fandrich@itap.de for signature

2023-02-14 - 5:56:21 PM GMT

 Email viewed by fandrich@itap.de

2023-02-14 - 5:57:38 PM GMT- IP address: 80.147.106.68

 Signer fandrich@itap.de entered name at signing as D.Fandrich

2023-02-14 - 5:58:01 PM GMT- IP address: 80.147.106.68

 Document e-signed by D.Fandrich (fandrich@itap.de)

Signature Date: 2023-02-14 - 5:58:03 PM GMT - Time Source: server- IP address: 80.147.106.68

 Agreement completed.

2023-02-14 - 5:58:03 PM GMT