

Müller-BBM Industry Solutions GmbH
Niederlassung Hamburg
Bramfelder Str. 110b
22305 Hamburg

Telefon +49(40)692145 0
Telefax +49(40)692145 11

www.mbbm-ind.com

Dipl.-Ing. (FH) Matthias Wildemann
Telefon +49(40)692145 22
matthias.wildemann@mbbm-ind.com

14. September 2023
M172921/06 Version 4 WLM/HTL

Tree Energy Solutions GmbH

Errichtung einer FSRU am Standort Wilhelmshaven

Prognose des Unterwasserschalls verursacht durch Rammarbeiten am FSRU

Bericht Nr. M172921/06

Revision: 2

Auftraggeber:	Tree Energy Solutions GmbH Emsstraße 20 26382 Wilhelmshaven
Bearbeitet von:	Dipl.-Ing. (FH) Matthias Wildemann M. Sc. Ramona Eigenmann Dr. rer. nat. Carsten Zerbs
Berichtsumfang:	Insgesamt 28 Seiten, davon 26 Seiten Textteil, 2 Seiten Anhang.

Müller-BBM Industry Solutions GmbH
Niederlassung Hamburg
HRB München 86143
USt-IdNr. DE812167190

Geschäftsführer:
Joachim Bittner, Walter Grotz,
Dr. Carl-Christian Hantschk,
Dr. Alexander Ropertz

Inhaltsverzeichnis

1	Situation und Aufgabe	3
2	Berücksichtigte Unterlagen	4
3	Kurzbeschreibung der geplanten Baustellen und zu untersuchende Lastfälle	6
3.1	Position Baufeld	6
3.2	Kurzbeschreibung der geplanten Baustelle	7
3.3	Zu untersuchender Lastfall Wasserschall	9
4	Akustische Metrik, Immissionsrichtwerte, Immissionsorte	10
4.1	Einleitung	10
4.2	Akustische Metriken	10
4.3	Immissionsrichtwerte und Immissionsorte	12
4.4	Terzsummenschalldruckpegel	12
5	Berechnungsschritte der Schallemission und Schallimmission	13
5.1	Bathymetrie	13
5.2	Einfluss der Wassertiefe	15
5.3	Schallausbreitung	16
5.4	Wasserschallprognose	18
6	Schallemission und Schallimmission	22
6.1	Einzelereignispegel und Spitzenpegel in 750 m	22
6.2	Immissionsprognose, Isophone	24
6.3	Prognosegenauigkeit	25
7	Abschließende Bemerkung	26

Anhang: Abbildungen

Änderungsdokumentation Version 3 (Revision 2): Stand: 24.02.2023

Folgende Punkte wurden auf Wunsch des AG geändert:

- Berücksichtigung der Neuen Position des LNG-FSRU-Anlegers (Stand: 22.02.2023) und der davon abhängigen Berechnungen.
- Kleinere Klarstellungen im Text.

1 Situation und Aufgabe

Die Tree Energy Solutions GmbH (TES) beabsichtigt die Errichtung und den Betrieb eines LNG-FSRU-Anlegers vor dem TES-Grundstück (Voslapper Groden Süd) am Westufer in der Jademündung im Hafengebiet von Wilhelmshaven zur Regasifizierung von seeseitig angeliefertem Flüssigerdgas (LNG = *Liquefied Natural Gas*; FSRU = *Floating Storage and Regasification Unit*). Der Anleger wird an das europäische Kerngasnetz angeschlossen.

Die FSRU des Anlegers soll über eine geplante LNG-Speicherkapazität von rund 138.000 Kubikmetern verfügen. Betreiber des Anlegers wird die FSRU Wilhelmshafen GmbH, eine Tochtergesellschaft des TES. Die FSRU soll für die nächsten fünf Jahre an der neuen Anlegestelle (bestehend aus Dalben) festgemacht werden und das LNG über LNG-Tanker aufnehmen.

Der neue Anleger für die FSRU soll aus Anlege- und Verankerungs-Dalben gebaut werden. Diese werden mit Plattformen ausgestattet, welche über Brücken miteinander verbunden werden. Der aktuelle Entwurf der Anlegestelle bevorzugt eine Monopile-Lösung für alle Anlege- und Verankerungs-Dalben. Der Pfahldurchmesser wird in dieser Entwurfsphase mit 4,5 m angesetzt. Das LNG wird über eine Pipeline auf dem Meeresboden an die Landstation gefördert.

Für den geplanten Betrieb der FSRU ist u. a. ein immissionsschutzrechtliches Genehmigungsverfahren erforderlich. Entsprechend sollen in diesem Zusammenhang sowohl die während der Bauphase als auch die beim Betrieb des LNG-FSRU-Anlegers zu erwartenden Schallimmissionen gutachterlich prognostiziert werden.

Die Gutachten teilen sich in unterschiedliche Fachgebiete (Luftschall- und Wasserschallimmissionen) auf. In diesem Bericht werden die Auswirkungen des Vorhabens auf die Umwelt (z. B. Säugetiere) hinsichtlich des Unterwasserschalls während der Bautätigkeiten untersucht.

2 Berücksichtigte Unterlagen

- [1] ISO 1996: Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise. Part 1: Basic quantities and assessment procedure.
- [2] ISO 1996: Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise. Part 2: Determination of environmental noise levels.
- [3] IEC 61672-1: Electroacoustics – Sound level meters. Part 1: Specifications.
- [4] BSH-Messvorschrift „Offshore-Windparks, Messvorschrift für Unterwasserschallmessungen, aktuelle Vorgehensweise mit Anmerkungen, Anwendungshinweise“, Homepage des BSH, Publikationen, Stand Oktober 2011.
- [5] UBA, Empfehlung von Lärmschutzwerten bei der Errichtung von Offshore-Windenergieanlagen (OWEA), 2011.
- [6] BMU-Schallschutzkonzept, Konzept für den Schutz der Schweinswale vor Schallbelastungen bei der Errichtung von Offshore-Windparks in der deutschen Nordsee, 2013.
- [7] Thiele und Schellstede (1980, Standardwerte zur Ausbreitungsdämpfung in der Nordsee. FWG-Bericht 1980-7, Forschungsanstalt der Bundeswehr für Wasserschall und Geophysik).
- [8] Bellmann M.A., Brinkmann J., May A., Wendt T., Gerlach S. & Remmers P. (2020) 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.
- [9] Rainer Matuschek, Klaus Betke, itap, Measurement of Construction Noise During Pile Driving of Offshore Research Platforms and Windfarms, NAG/DAGA 2009 – Rotterdam.
- [10] Müller-BBM Bericht M159775/01 „Uniper Technologies GmbH, LNG FSRU Import-Terminal Wilhelmshaven, Berechnung und Beurteilung des Baustellenlärms“, Stand Entwurf Dezember 2020.
- [11] K. Betke, M. Schultz-von Glahn, Prognose des Unterwassergeräusches beim Bau und beim Betrieb des Offshore-Windparks Borkum-West („alpha ventus“) und Messung des Hintergrundgeräusches im Planungsgebiet. Beauftragt und geleitet durch die Stiftung Offshore-Windenergie und editiert durch die itap GmbH.
- [12] Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (2021), Datenquellen: http://sg.geodatenzentrum.de/web_public/Datenquellen_TopPlus_Open_27.01.2021.pdf.
- [13] Europäische Union, enthält Copernicus Sentinel-2 Daten [2019], verarbeitet durch das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG).

- [14] The European Marine Observation and Data Network (EMODnet) (2020): Bathymetrie, Mean Depth, <https://www.emodnet-bathymetry.eu/data-products>, Stand 27.01.21.
- [15] Müller-BBM Bericht Nr. M145466/09 „Uniper Technologie GmbH, LNG FSRU Import-Terminal Wilhelmshaven – Prognose des Unterwasserschalls verursacht durch Rammarbeiten am Terminal“, Stand 15.03.2021.
- [16] Geplanter „Energiepark Wilhelmshaven Jetty FSRU“, Dokument: *TES-WHV-VGN_OJT_MATU1_DRW_PLT_PLA-GIP_2023_02_17_R00_FI_Jetty_FSRU_Koord...-2.pdf*.
- [17] TES-Bericht: „Marinestrukturen – Vorläufige Gebäudebeschreibung“, Dokument: *TES-WHV-VGN-FSRU-ST-DOC-2001.00_Explanatory Report_r0.pdf*.
- [18] TES-Bericht „Wilhelmshaven FSRU: Preliminary Noise Assessment Report“, Dokument: *TES-WHV-VGN-FSRU-ENV-DOC-2020.00_Noise Assessment Report.pdf*.
- [19] Geo-Positionen der Dalben,
Dokument: *20221102_Wilhelmshaven_Dolphin_centrepoints.pdf*, aktuelle Positionen siehe [16].
- [20] Aktualisierte Abbildungen zur Übersicht über das geplante Baufeld (Abb. 1) und Lageplan Dalben (Abb. 2) übermittelt durch das beauftragte Planungsbüro Arcadis (Hr. Fank) am 13.09.2023.

3 Kurzbeschreibung der geplanten Baustellen und zu untersuchende Lastfälle

3.1 Position Baufeld

Das geplante Baufeld befindet sich im Stadtteil Voslapper Groden der Stadt Wilhelmshaven.

Dort befindet sich aktuell ein Anleger, bestehend aus einer 1,35 km langen Umschlagbrücke und einem 675 m langen Ausleger. In der Verlängerung dieses Anlegers hat die LNG Terminal Wilhelmshaven GmbH den „LNG Terminal WHV“ errichtet. Das LNG-Terminal Wilhelmshaven GmbH befindet sich bereits in Betrieb.

Weiter südlich befindet sich die Tankerumschlaganlage „Inselanleger HES Wilhelmshaven“. Auf dem bestehenden HES Wilhelmshaven Tank Terminal bietet eine Tankfarm ein Fassungsvermögen von rund 1,3 Millionen m³ für Mineralölprodukte. Auch die Tankerumschlaganlage verfügt über einen bestehenden Ausleger.

Aktuell ist der neue LNG-FSRU-Anleger zwischen den beiden vorhandenen Anlegern geplant. Abbildung 1 zeigt den geplanten FSRU-Anleger.



Abbildung 1: Übersicht über das geplante Baufeld [20].

3.2 Kurzbeschreibung der geplanten Baustelle

3.2.1 Variante I: Monopiles

Bezüglich der geplanten Baustelle sind im Rahmen dieser Baulärmprognose für den Wasserschall zwei Hauptbereiche zu untersuchen

- Anlege-Dalben (blau),
- Verankerungs-Dalben (rot).

Die Dalben werden auf Monopiles mit einem Durchmesser von 4,5 m installiert. Die Lage der Dalben ist der Abbildung 2 zu entnehmen.

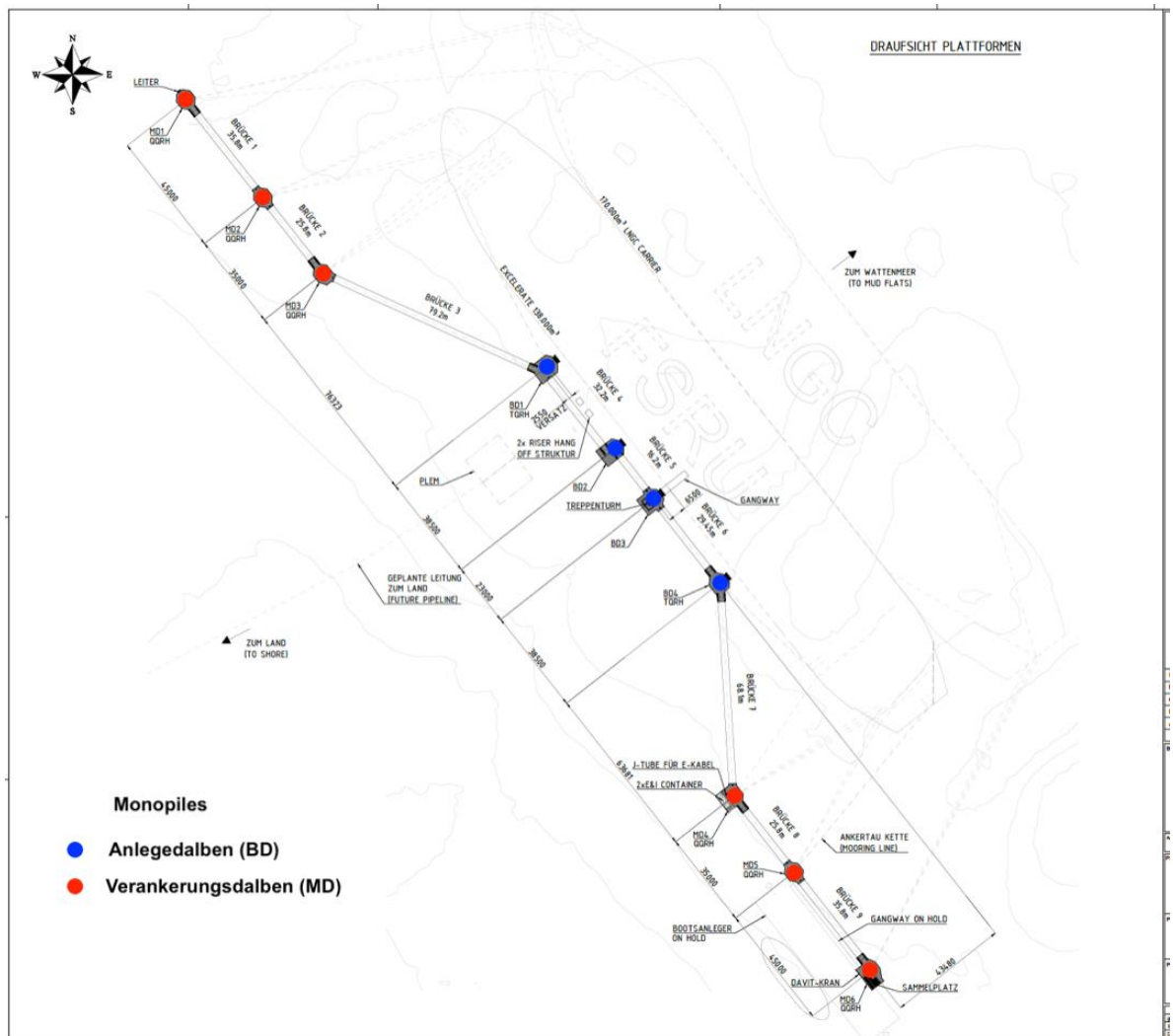


Abbildung 2. Lageplan der maßgeblichen geplanten Dalben [20]. Markiert sind die Positionen für die unterschiedlichen Dalben / Rammpfähle (Anlegedalben, Verankerungsdalben).

Hinweis:

Aufgrund der identisch geplanten Monopiles für die unterschiedlichen Dalben wird in der weiteren Prognose nur von einem Monopile-Typ ausgegangen, d. h., zwischen den unterschiedlichen Dalben-Installationen wird nicht unterschieden.

Installation:

Für die Errichtung der Dalben werden die Monopiles via Ramme ca. 45 m in den Boden getrieben. Geplant ist der Einsatz der Ramme S-1800 der Firma IHC Hydrohammer. Für die Prognose entscheidend ist die eingesetzte Rammenergie:

- Der S-1800 arbeitet mit einer minimalen Rammenergie von 180 kJ und einer maximalen Rammenergie von 1800 kJ.

Die Wassertiefe beträgt im Bereich der Bauarbeiten ca. 15 m.

Im Nachhinein werden Plattformen via Kran auf die Monopiles positioniert und montiert. Die Plattform wird sich ca. 11 m über dem Wasserspiegel befinden, abhängig von der Tide. In Abbildung 3 ist beispielhaft die Anlegeplattform dargestellt.

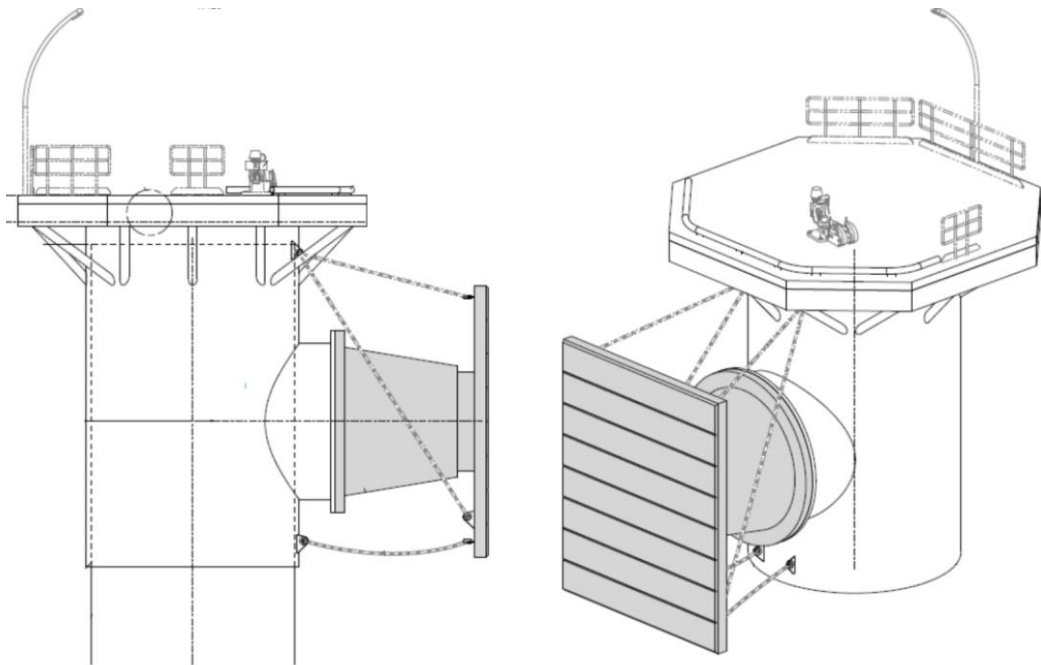


Abbildung 3. Anlegeplattform [17].

Der während der Montage der Plattformen entstehende Wasserschall ist nicht Bestandteil dieser Prognose. Lediglich die Rammarbeiten zur Installation der Monopiles werden nachfolgend betrachtet.

3.3 Zu untersuchender Lastfall Wasserschall

Die maßgeblichen Geräuschanteile beim allgemeinen Baulärm entstehen bei Rammarbeiten. Bei der Errichtung von Pfählen und/oder Spundwänden können Rüttler, Vibrationsrammen und Schlagrammen verwendet werden. Beim gesamten Installationsprozess ist die Schlagramme die maßgebliche Geräuschquelle. Die Schallentwicklung beim Prozess des Rüttelns bzw. Vibrierens ist gute 5 – 20 dB geringer, siehe beispielhaft im Dokument [9] von 2009, in dem ein spektraler Vergleich zwischen unterschiedlichen Verfahren dargestellt ist.

Im Rahmen des aktuellen Vorhabens erfolgt daher eine Beschränkung auf die impulshaften Schalleinträge der Rammung, die auch durch Empfehlungen der akustischen Metriken und Richtwerte des UBA [5] akzentuiert werden.

Nach aktuellem Stand soll nur ein Typ Monopile (Durchmesser 4,5 m) für die Errichtung der Dalben zum Einsatz kommen.

Hinsichtlich der zu erwartenden Bautätigkeiten mit relevanten Geräuschemissionen für den Unterwasserschall wird in der vorliegenden Baulärmprognose ein Hauptbauszenarium für den FSRU-Anleger betrachtet:

Lastfall: Gründung der Monopile-Dalben

Zur Gründung der Monopiles sind Stahlrohre mit einem Durchmesser von $\varnothing = 4500$ mm eingeplant. Insgesamt werden 6 Pfähle für die Verankerungs-Dalben und 4 Pfähle für die Anlege-Dalben mithilfe einer Ramme auf einem Rammgerüst in den Grund eingetragen. Die Prognose wird für eine Ramme der Firma IHC Hydrohammer S-1800 mit einer minimalen Rammenergie von 180 kJ und einer maximalen Rammenergie von 1800 kJ ausgelegt.

4 Akustische Metrik, Immissionsrichtwerte, Immissionsorte

4.1 Einleitung

Das Gesetz für die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) und das Gesetz zu Naturschutz und Landespflege (BNatSchG) geben in Deutschland den Rahmen für die Prüfung von erheblichen Auswirkungen und für die Festlegung von Maßnahmen zum Schutz von Arten und Habitaten vor. Das UVPG findet aufgrund des LNG-G hier keine Anwendung.

Das Umweltbundesamt hat im Jahr 2011 Empfehlungen für Lärmschutz-Kriterien [5] ausgesprochen, um eine auditorische Beeinträchtigung des Schweinswals im Kontext einer vorübergehenden Hörschwellenverschiebung (TTS) zu vermeiden. Für Schweinswale in Deutschland hat das BMUB ein Schallschutzkonzept veröffentlicht [6], das die Empfehlung des UBA für ein duales Lärmschutz-Kriterium übernommen hat. Streng genommen gilt dieses Konzept nur für den Schutz der Schweinswale vor Schallbelastung bei der Errichtung von Offshore-Windparks in der deutschen Nordsee, wird aber meist in Ermangelung anderer Empfehlungen herangezogen.

Für andere Spezies sind gegebenenfalls angepasste Bewertungsgrößen und -kriterien heranzuziehen.

Die deutsche Zulassungsbehörde BSH (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie) setzt seit 2008 nach dem Vorsorgeprinzip duale Lärmschutzwerte auf Aktivitätsebene für impulshaltige und lärmintensive Schalleinträge in deutschen Gewässern (AWZ) fest, die in einer Entfernung von 750 m zur Geräuschquelle eingehalten werden müssen.

Für die küstennahen Gebiete dienen die Empfehlungen des UBA als Richtwert. Die detaillierte Genehmigungsaufgabe ist zum Zeitpunkt der Berichtserstellung dem Verfasser nicht bekannt. Es dienen daher die o. g. Dokumente als Orientierung für die schalltechnische Betrachtung des Baulärms.

Im Abschnitt 4.2 sind die notwendigen akustischen Metriken zusammengefasst, im Abschnitt 4.3 die Immissionsrichtwerte und Immissionsorte.

4.2 Akustische Metriken

Für die Betrachtung des Baulärms, siehe auch die Bauvorschrift des BSH [4], gelten die nachstehend definierten Pegelgrößen:

- äquivalenter Dauerschallpegel L_{eq} für kontinuierliche Schallsignale,
- Einzelereignispegel L_E für impulshaltige Schallsignale,
- Spitzenpegel L_{peak} für impulshaltige Schallsignale.

Die verwendeten Pegelgrößen lehnen sich an die Definitionen der ISO 1996-1 an, sind aber nicht identisch mit diesen. So wird die Definition des L_{eq} ohne Frequenzbewertung vorgenommen. Nach ISO 1996-1 soll die Bestimmung des Spitzenpegels (peak sound pressure level) mit einem Detektor gemäß IEC 61 672 erfolgen, die Definition in dieser Messvorschrift basiert auf der Signalamplitude.

Derzeit sind für die Bewertung keine Frequenz- und Zeitbewertungen für stationäre und impulshaltige Signale vorgegeben.

Äquivalenter Dauerschallpegel L_{eq} (oder Mittelungspegel)

ist definiert durch:

$$L_{\text{eq}} = 10 \log_{10} \frac{1/T \int_0^T p(t)^2 dt}{p_0^2} \quad \text{dB} \quad (1)$$

wobei $p(t)$ den Schalldruck, p_0 den Bezugsschalldruck 1 μPa und T die Mittelungszeit darstellt¹.

Einzelereignispegel (auch: sound exposure level, SEL)

Zur Charakterisierung von impulshaltigen Geräuschen wird der Einzelereignispegel L_E verwendet:

$$L_E = 10 \log_{10} \frac{E}{E_0} \quad \text{dB} \quad (2)$$

mit der Schallexposition E

$$E = \int_0^T p(t)^2 dt \quad (3)$$

und der Bezugsgröße

$$E_0 = p_0^2 \cdot T_0 \quad (4)$$

wobei p_0 den Bezugsschalldruck 1 μPa , T_0 die Bezugszeitdauer 1 s und T die Mittelungszeit darstellt. Bei der Bewertung von Einzelereignissen entspricht die Mittelungszeit der Dauer T_E des Ereignisses.

-
- ¹ Laut ISO 1996-1 wird der äquivalente Dauerschallpegel auch mit dem Index T gekennzeichnet $L_{\text{eq}T}$.
 - ² Es ist auch gebräuchlich, den Einzelereignispegel L_E als SEL (sound exposure level) zu bezeichnen.

Spitzenpegel L_{peak}

Diese Größe ist ein Maß für Schalldruckspitzen ohne Zeit-, Frequenzbewertung oder Mittelwertbildung

$$L_{\text{peak}} = 20 \cdot \log_{10} \frac{p_{\text{peak}}}{p_0} \quad (5)$$

wobei p_0 den Bezugsschalldruck 1 μPa darstellt und p_{peak} den maximal festgestellten positiven oder negativen Schalldruck p_{peak}

$$p_{\text{peak}} = \max(|p(t)|). \quad (6)$$

4.3 Immissionsrichtwerte und Immissionsorte

Die Immissionsrichtwerte und Immissionsorte sind nachstehend benannt:

Es gibt ein duales Kriterium in einem fixen Messabstand in 750 m von der Baustelle entfernt. Als Richtwert verwenden wir in diesem Projekt die Vorgaben für die deutsche AWZ:

- Frequenz-ungewichteter, breitbandiger Einzelereignispegel:
(SEL respektive L_E) ≤ 160 dB (re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$),
- Spitzenpegel:
(L_{peak}) ≤ 190 dB (re 1 μPa).

Diese Schallwerte werden in der messtechnischen Überprüfung und signalanalytischen Auswertung als 5 %-Perzentil bewertet.

Weiterhin wurde für den Tatbestand der Störung der Schweinswale durch wissenschaftliche Studien ein SEL von 135 bis 145 dB als sinnvoller Grenzbereich gesehen und regulativ 140 dB als Richtwert vorgeschlagen, siehe u. a. [6], den wir bei der Betrachtung der Wirkradien in diesem Dokument darstellen.

4.4 Terzsummenschalldruckpegel

Der Gesamtpegel (oder Terzsummenschalldruckpegel) ergibt sich aus den einzelnen Terzpegeln eines Terzspektrums gemäß folgender Formel durch energetische Addition:

$$L_{\Sigma} = 10 \cdot \log_{10} \left(\sum 10^{\frac{L_i}{10}} \right) \text{dB} \quad (7)$$

mit

L_i = Terzpegel.

5 Berechnungsschritte der Schallemission und Schallimmission

5.1 Bathymetrie

Der LNG-FSRU-Anleger soll an der Fahrrinne zwischen dem Jadebusen und der Nordsee errichtet werden. Die Fahrrinne ist im Bereich des geplanten Terminals ca. 300 m breit und ca. 15 m tief (Mittlere Tiefe). Sie liegt in dem 4 km breiten und 15 m tiefen Zu- und Abwasserstrom des Jadebusens. Mellum liegt ca. 8 km in nord-östlicher Richtung und die Fahrrinne nach Bremerhaven ist östlich ca. 12 km entfernt. Abbildung 4 zeigt ein Satellitenbild von dem vorhandenen Ausleger und einen Teil des Prognosegebietes.



Abbildung 4: Satellitenbild vom Baufeld und dem Prognosebereich [13].

Zwischen den beiden Fahrinnen ist das Wattgebiet, hier ist die Wassertiefe sehr gering, d. h. stark abhängig von der Tide. Dieses Flachwasser hat einen großen Einfluss auf die Schallausbreitung, näheres siehe Abschnitt 5.2.

In Abbildung 5 ist die für die Prognose berücksichtigte Bathymetrie dargestellt. Sie zeigt die Tiefenwerte (LAT – Lowest Astronomical Tide) bei einer mittleren Wassertiefe im Untersuchungsgebiet.



Abbildung 5: Verwendete Bathymetrie für die Prognose [14].

Die Abbildung zeigt deutlich die beiden Fahrrinnen sowie das flache Wattenmeer zwischen Mellum und dem südlichen Festland.

5.2 Einfluss der Wassertiefe

Die Wassertiefe hat einen Einfluss auf die Ausbreitung des Wasserschalls. Abhängig von der Wassertiefe ist unterhalb einer Grenzfrequenz („Cut-off-Frequenz“) keine kontinuierliche Schallausbreitung möglich. Je flacher das Gewässer, desto höher ist die Grenzfrequenz. Abbildung 6 zeigt diese Abhängigkeit für harten und weichen Boden.

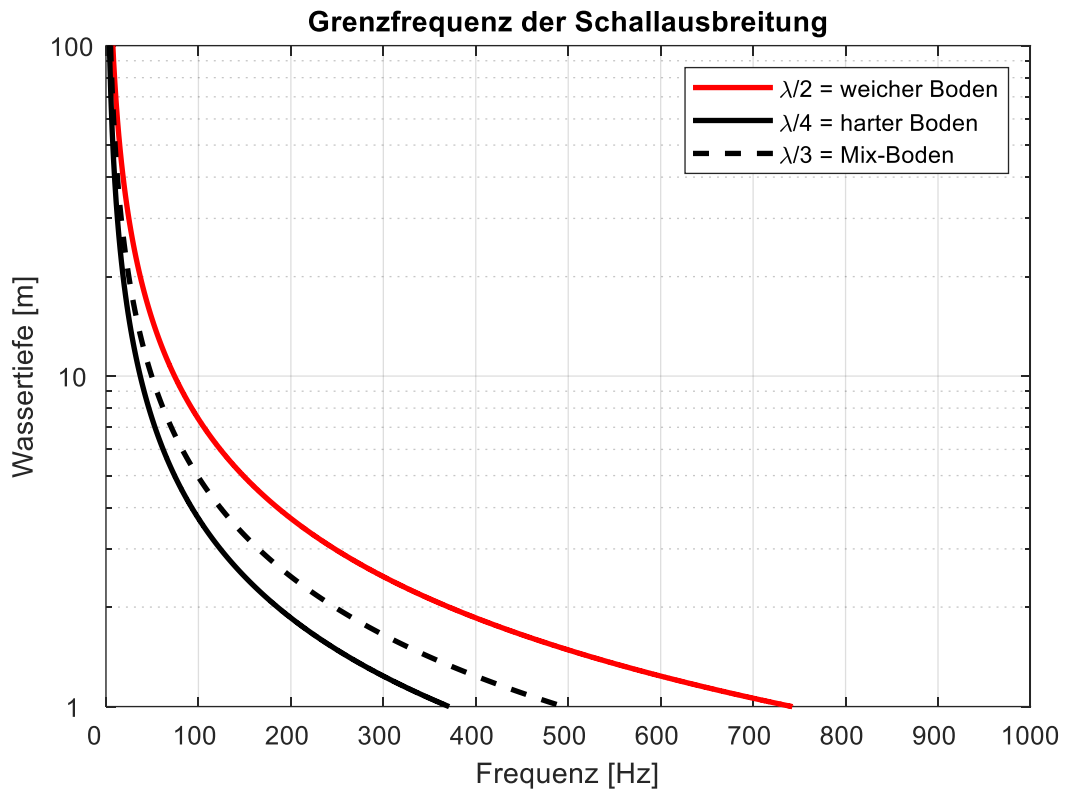


Abbildung 6: Grenzfrequenz für Sandböden in Abhängigkeit der Wassertiefe.

Die Grenzfrequenz ist eine Funktion der Wassertiefe: Für harte Böden sind die Schallwellen nicht ausbreitungsfähig, wenn ein Viertel der Wellenlänge größer als die Wassertiefe ist. Für weiche Böden gilt dies, wenn die halbe Wellenlänge größer als die Wassertiefe ist. Näherungsweise wird in dieser Prognose mit einem Drittel der Wellenlänge größer als die Wassertiefe als Ansatz für die Wellenlänge nicht ausbreitungsfähiger Wellen gearbeitet (gestrichelte Kurve in Abbildung 6).

In Abschnitt 5.1 wird aufgezeigt, dass im Prognosegebiet unterschiedliche Wassertiefen vorliegen und folglich die Ausbreitung des Wasserschalls beeinträchtigen.

Die angenäherten Grenzfrequenzen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1. Verwendete Grenzfrequenzen je Wassertiefe.

Wassertiefe	Grenzfrequenz
> -1.00 m	500 Hz
-1,00 m bis -1,25 m	400 Hz
-1,25 m bis -1,59 m	315 Hz
-1,59 m bis -2,00 m	250 Hz
-2,00 m bis -2,50 m	200 Hz
-2,50 m bis -3,13 m	160 Hz
-3,13 m bis -4,00 m	125 Hz
-4,00 m bis -5,00 m	100 Hz
-5,00 m bis -6,25 m	80 Hz
-6,25 m bis -7,94 m	63 Hz
-7,94 m bis -10,00 m	50 Hz
-10,00 m bis -12,50 m	40 Hz
-12,50 m bis -15,87 m	31,5 Hz
-15,87 m bis -20,00 m	25 Hz
ab -20,00 m	-

Für die verschiedenen Wassertiefen wird der Summenpegel nur oberhalb der entsprechenden Grenzfrequenz aus den einzelnen Terzpegeln gebildet und in den Farbkarten dargestellt. Die Bathymetrie-Daten stammen aus Quelle [14].

5.3 Schallausbreitung

Die Schallausbreitung im Wasser hängt vor allem von zwei Faktoren ab: dem Abstand von einer Schallquelle und der Wassertiefe (siehe vorangehenden Abschnitt 5.2).

Zur Beschreibung der ausbreitungsabhängigen Abnahme der Schallintensität oder des Schalldrucks wird die Ausbreitungsdämpfung (oder der Ausbreitungsverlust) verwendet. Dieser ist ein Spezialfall des sogenannten Übertragungsverlusts (TL , transmission loss). In der Unterwasserakustik ist dies die Abnahme der Schallintensität oder des Schalldrucks zwischen zwei Messpunkten, angegeben in Dezibel. Im vorliegenden Fall ist das die Schalldruck-Pegeldifferenz zwischen zwei Messpunkten im Schallfeld.

Für einfache Abschätzungen kann zur Beschreibung die folgende Formel verwendet werden:

$$TL = k \cdot \log_{10} \left(\frac{r_1}{r_2} \right) \quad (8)$$

dabei ist

TL	Ausbreitungsdämpfung (engl. Transmission Loss) in dB,
r_1 und r_2	Entfernung zur Schallquelle vergrößert sich von r_1 auf r_2 , angegeben in m oder km,
k	Konstante (für die Nordsee gilt $k \approx 15$).

Anmerkung:

Die Gleichung (8) ist ein Potenzgesetz, ausgedrückt in Pegeln. Die Beschreibung berücksichtigt keine Frequenzabhängigkeit. Die Ausbreitungsfähigkeit von Schallwellen abhängig von der Wassertiefe wurde im vorangehenden Abschnitt beschrieben. Daneben macht sich bei großen Abständen von einer Schallquelle die Absorption von Schallenergie bemerkbar. Weitere Einflüsse sind der durch Wind verursachte Seegang (Oberflächenrauigkeit) und der damit verbundene Eintrag von Luft in die obere Meeresschicht.

Eine Näherungsformel zur Berechnung der Schallausbreitung für verschiedene Gebiete der Nordsee ist [7]

$$TL = (16,07 + 0,185 \cdot F) \cdot (\log_{10}(R) + 3) + (0,174 + 0,046 \cdot F + 0,005 \cdot F^2) \cdot R \quad (9)$$

Dabei sind:

TL	Ausbreitungsdämpfung (engl. Transmission Loss) in dB,
F	$F = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{f}{1 \text{ kHz}} \right)$,
R	Entfernung zur Schallquelle in km,
f	Frequenz in Hz.

Anmerkung:

Strenggenommen gilt diese Gleichung nur für winterliche Bedingungen mit guter Durchmischung des Wassers ohne ausgeprägtes Schallgeschwindigkeitsprofil in der Nordsee. Die Erfahrung hat gezeigt, dass Formel (9) immer noch ein genauerer Schätzer ist als Formel (8), auch wenn keine winterlichen Bedingungen vorliegen. Die Berechnung der Ausbreitungsdämpfung (Schalldruckpegel in den Schallkarten) wurde nach Formel (9) durchgeführt.

5.4 Wasserschallprognose

5.4.1 Vorgehensweise

Nachfolgend wird beschrieben, wie die Prognose durchgeführt worden ist.

5.4.2 Berechnung des SEL in 750 m Entfernung mittels empirischer Formel

Müller-BBM hat im Rahmen eines Forschungsprojektes eine empirische Formel für die Berechnung des SEL in 750 m Entfernung entwickelt. In diese Formel gehen folgende Parameter ein:

- Rammenergie in kJ,
- Pfahldurchmesser in m,
- Wassertiefe³ in m.

Die empirische Formel schätzt den SEL in 750 m Entfernung vom Rammpfahl. Pegel in abweichenden Entfernungen können über die in Abschnitt 5.3 dokumentierte Ausbreitungsdämpfung (9) berechnet werden.

5.4.3 SEL und Idealisieretes Frequenzspektrum

Für die Prognose wird nachstehende Frequenzzusammensetzung des Rammgeräusches betrachtet. Abbildung 7 zeigt das für diese Prognose eingesetzte idealisierte Frequenzspektrum.

³ Der Einfluss der Bathymetrie aus Abschnitt 5.2 wird hier vernachlässigt.

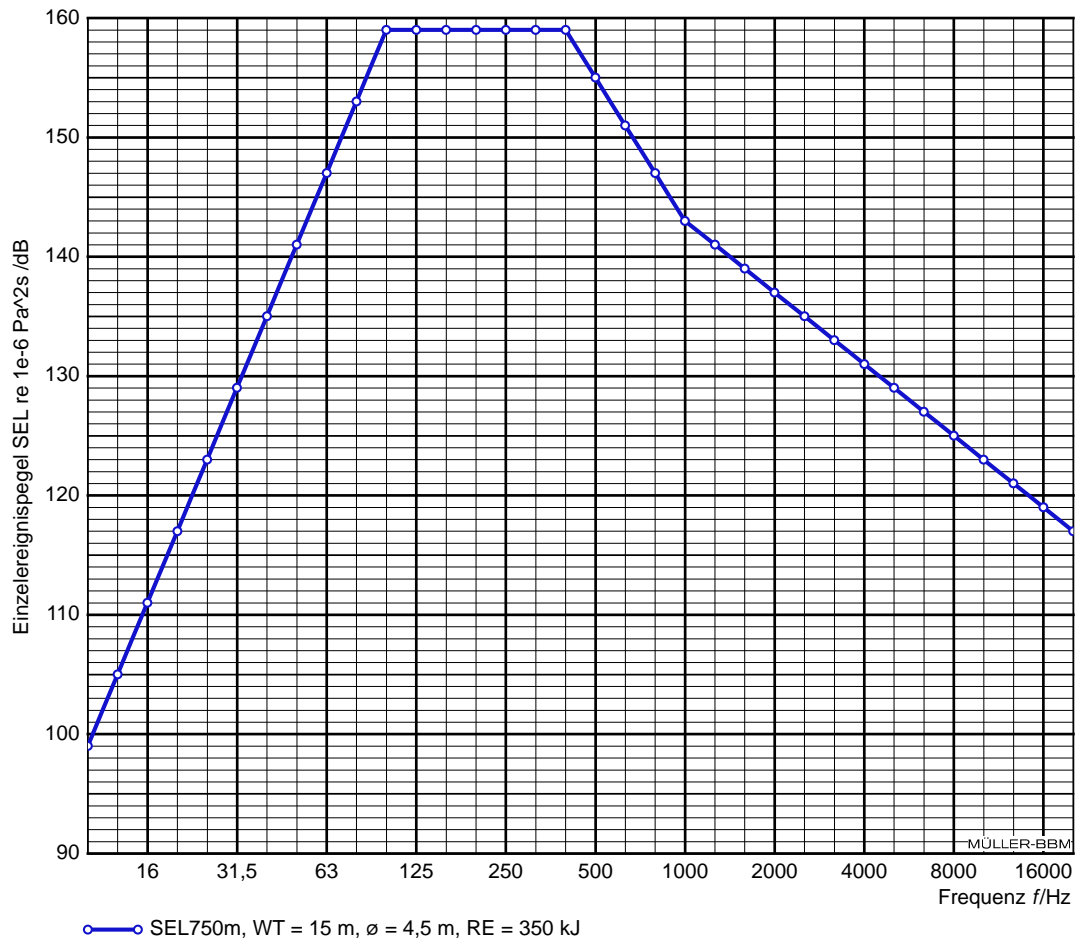


Abbildung 7: Frequenzverteilung für den Einzelereignispegel in 750 m Entfernung verursacht durch Rammimpulse (beispielhaft für die genannten Parameter Wassertiefe, Pfahldurchmesser und Rammenergie).

Das dargestellte idealisierte Frequenzspektrum als Prototyp wird mit dem berechneten (und validierten) SEL so kombiniert, dass der Summenpegel des idealisierten Frequenzspektrums dem SEL entspricht.

Eine idealisierte Frequenzverteilung des Einzelereignispegels SEL in 750 m Entfernung nach [11]:

- 10 bis 100 Hz Pegelerhöhung mit 18 dB pro Oktave,
- 100 Hz bis 400 Hz konstanter Pegel,
- 400 Hz bis 1 kHz Pegelreduktion um 12 dB pro Oktave,
- 1 kHz bis 20 kHz Pegelreduktion um 6 dB pro Oktave.

Das dargestellte Frequenzspektrum entspricht dem prognostizierten SEL in 750 m Entfernung für die Plattformgründung, d. h., angenommen wurden ein Pfahldurchmesser von $\varnothing = 4,5$ m, eine Rammenergie von 350 kJ bei einer Wassertiefe von 15 m. Für die in Abbildung 7 dargestellte Frequenzverteilung bedeutet dies, dass der Summenschalldruckpegel aller dargestellten Terzpegel 168,1 dB entspricht, berechnet nach Formel (7).

Anmerkung:

Bei größeren und längeren Pfählen kann sich das Plateau der höchsten Pegel zu tieferen Frequenzen hin verschieben, die maximale Verschiebung beträgt eine Terz, dies muss bei der Definition von schalltechnischen Maßnahmen berücksichtigt werden.

5.4.4 Berechnung Ausbreitungsdämpfung unter Berücksichtigung der Bathymetrie

Für die im Abschnitt 6.2 dargestellte Schallausbreitungskarte wird die Ausbreitungsdämpfung nach Formel 8 aus Abschnitt 5.3 berechnet, unter Beachtung der in Abschnitt 5.1 dargestellten Bathymetrie und Berücksichtigung der in Tabelle 1 aus Abschnitt 5.2 dargestellten Grenzfrequenz der Schallausbreitung.

D. h., in den Schallausbreitungskarten wird der Summenpegel des Terzspektrums an jedem Ort dargestellt. Die einzelnen Terzpegel an jedem Ort berechnen sich aus den Terzpegeln des Quellspektrums abzüglich der Ausbreitungsdämpfung in Abhängigkeit von der Distanz zwischen Quelle und dem Ort. Weiterhin wird das Terzspektrum in Abhängigkeit von der Bodenbeschaffenheit und Bathymetrie an dem Ort und in Abhängigkeit vom Verlauf zwischen Quelle und Ort unterhalb der jeweiligen Grenzfrequenz korrigiert.

5.4.5 Zusammenhang zwischen SEL und L_{peak}

Bei der Bewertung der Schallpegel in 750 m muss neben dem Einzelereignispegel (SEL) auch der Spitzenpegel L_{peak} betrachtet werden. In Abbildung 8 ist eine statistische Auswertung dieser Differenz dargestellt.

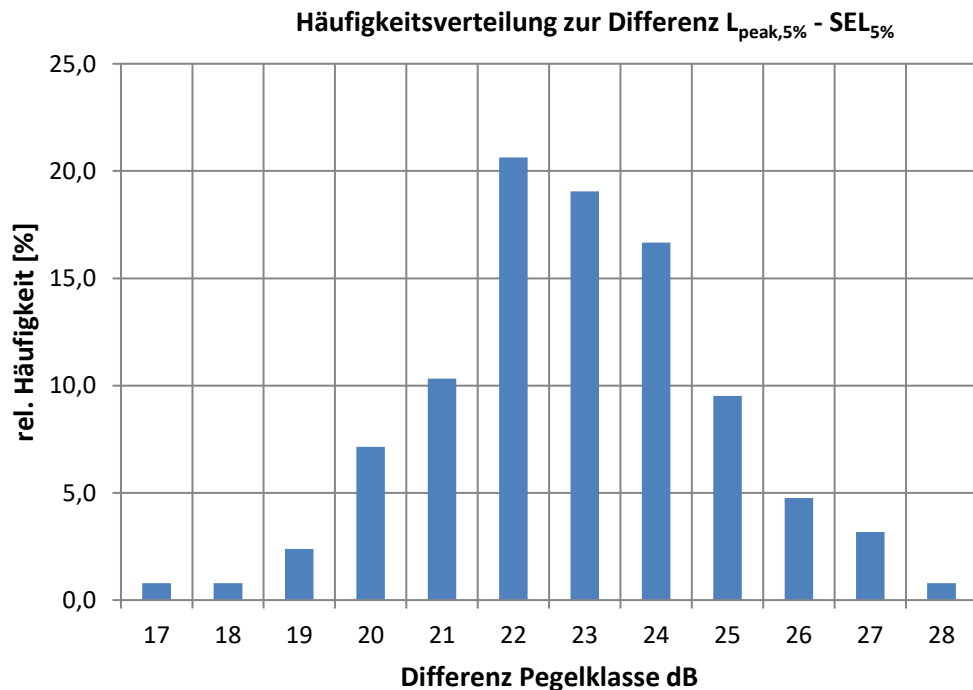


Abbildung 8: Vergleich der Differenz $L_{\text{peak},5\%} - \text{SEL}_{5\%}$ von 126 unterschiedlichen Messungen an Pfählen.

Diese statistische Auswertung beruht auf 126 unterschiedlichen Messungen und Auswertungen an Pfählen, die in den Windparks wie z. B. Borkum West, DoWin Alpha, Baltic II und Dan Tysk ermittelt wurden. Es wird für diesen Bericht eine Pegeldifferenz von $L_{\text{peak}} = \text{SEL} + 24 \text{ dB}$ angenommen, die für über 80 % der untersuchten Fälle eine obere Grenze darstellt.

6 Schallemission und Schallimmission

6.1 Einzelereignispegel und Spitzenpegel in 750 m

Für die Prognose des Unterwasserschalls wurden die Rammarbeiten an den Dalben betrachtet. Die Dalben werden maximal 364 m voneinander entfernt installiert, siehe Abbildung 9.

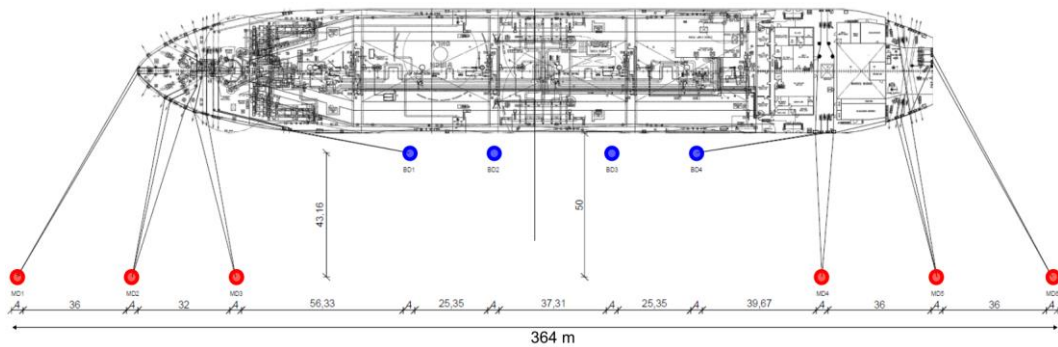


Abbildung 9. Geo-Positionen der geplanten Dalben [19]. Markiert sind die Positionen für die unterschiedlichen Dalben / Rammpfähle (Anlege-Dalben, Verankerungs-Dalben).

Für die Prognose wird aufgrund der Nähe der Dalben zueinander lediglich eine Position verwendet, die des mittleren Pfahles BD2 (zweiter Anlege-Dalben von links).

Dieser wird an den folgenden Geo-Koordinaten im Dezimalgrad (WGS84) installiert:

Lat: 53.630558° (N), Lon: 8.127265° (E).

Parameter für die Dalbeninstallation und die Prognose:

- Wassertiefe Pfahl 15 m,
- Pfahldurchmesser $\varnothing = 4,5$ m,
- Ramme: IHC Hydrohammer S-1800
- Rammenergie: 1800 kJ.

Unter Berücksichtigung der oben genannten Parameter wurde der folgende Einzelereignispegel berechnet.

Tabelle 2. Prognose Wasserschall in 750 m Entfernung in dB für die Dalben-Gründung in Abhängigkeit von der Rammenergie.

	Rammenergie in kJ		
	180	1000	1800
SEL _{750m}	165	173	175
L _{peak,750m}	189	197	199

Aufgrund der prognostizierten Einzelereignispegel aus Tabelle 2 im Vergleich zu den Immissionsrichtwerten aus Kapitel 4.3 müssen Schallschutzmaßnahmen eingeplant werden. Laut Angabe des Betreibers soll eine Kombination von Schallminderungsmaßnahmen angewendet werden. Der Einsatz von Blasenschleiern und weiteren Minderungsmaßnahmen ist geplant. Zum Zeitpunkt der Erstellung des Gutachtens waren jedoch noch keine Ausführungsdetails bekannt. Für die weitere Darstellung der Immissionsprognose (Isophone) wird eine Minderung von 16 dB angenommen, dieses entspricht der minimal benötigten Schallreduzierung bei 1800 kJ.

Hinweise zu den Prognosen:

Die Werte aus Tabelle 2 gelten nur für den Fall, dass die Pfähle nur einzeln/separat gerammt werden. Sollten mehrere Pfähle zeitgleich gerammt werden, erhöhen sich die prognostizierten Werte.

6.2 Immissionsprognose, Isophone

In Abbildung 10 ist die Immissionsprognose für eine Dalben-Gründung dargestellt. Die Abbildung zeigt ein Gebiet von ca. $62 \text{ km} \cdot 44 \text{ km} = 2728 \text{ km}^2$.

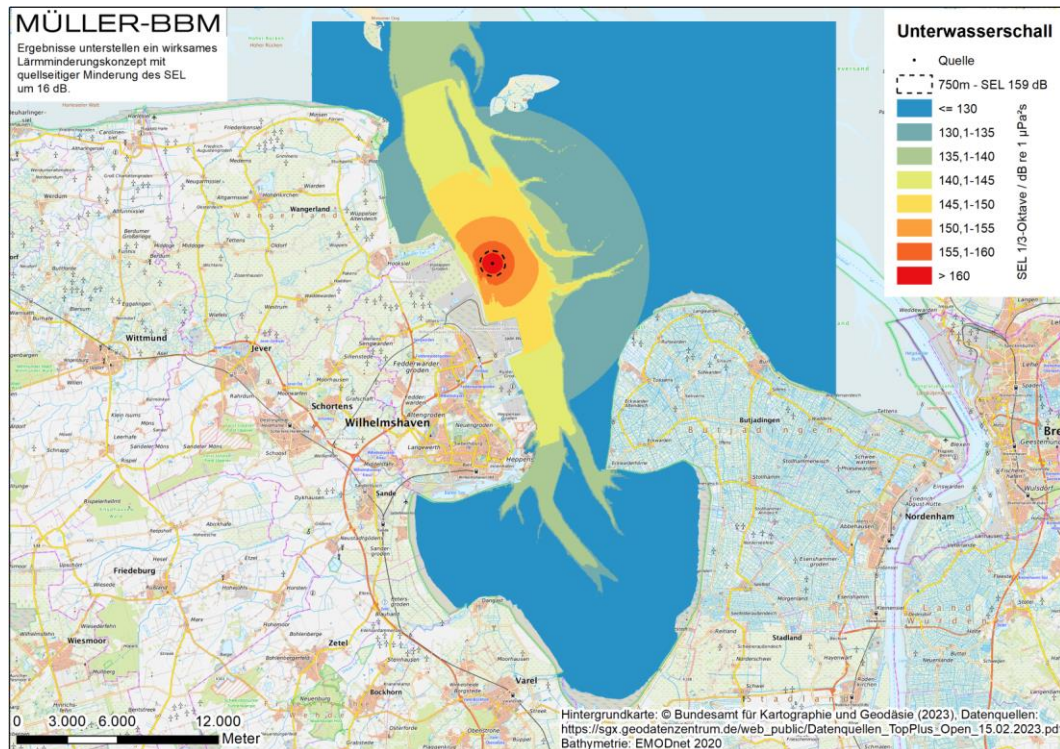


Abbildung 10: Immissionsprognose für eine Dalben-Gründung mit einem Pfahldurchmesser von $\varnothing = 4,5 \text{ m}$ und einer Rammenergie von 1800 kJ. Minderung des SEL um 16 dB bedingt durch ein angenommenes Schallminderungskonzept.

Die Berechnungen beschränken sich auf das farblich hervorgehobene Seegebiet. Dargestellt sind die Isophone von SEL = 130 dB bis >160 dB mit einer $\Delta\text{SEL} = 5 \text{ dB}$ Schrittweite.

Im Anhang ist die Immissionsprognose als größere Abbildung dargestellt.

Hinweis:

In Abschnitt 5 sind die Berechnungsschritte der Berechnung der Schallimmissionen dokumentiert. Die Immissionsprognose wurde unter anderem unter Berücksichtigung der Bathymetrie gerechnet. Dies zeigt sich in Abbildung 10 deutlich, in den Fahrinnen und Prielen werden höhere Schalldruckpegel prognostiziert als im flachen Wattenmeer. Die Schalldruckpegel in den kleinen östlich des Baugebietes vorhandenen Prielen sind vermutlich überschätzt. Dies gilt auch für die folgenden dargestellten Immissionsprognosen.

Für die Kartendarstellung in Abbildung 10 wurde ein wirksames Lärminderungskonzept angenommen, welches sicherstellt, dass der Grenzwert von 160 dB in 750 m Entfernung eingehalten/unterschritten wird. Über den Frequenzgang der Schallminderungsmaßnahme liegen der Müller-BBM Industry Solutions GmbH keine Informationen vor, somit wurde die Prognose breitbandig im Summschallpegel korrigiert. Die hierfür angesetzte Minderung des SEL beträgt 16 dB.

6.3 Prognosegenauigkeit

Das Müller-BBM-Prognosemodell für den 750 m-Pegel wurde mit zahlreichen Messdaten und numerischen Berechnungen aus Forschungsprojekten validiert. Es ist von einer Prognosegenauigkeit von +/- 3 dB auszugehen, die sich u. a. aus der Wahl der Rammwerkzeuge, Eigenschaften des Bodens und auch Messungenauigkeit bei den Messungen in 750 m Entfernung, die zur Validierung herangezogen wurden, ergeben.

7 Abschließende Bemerkung

Im vorliegenden Bericht wurde der Einfluss der Bautätigkeiten auf den Unterwasserschall betrachtet. Es wurden die maßgeblichen Quellen betrachtet, die bezogen auf die akustische Metrik für den Unterwasserschall die Verursacher der impulshaften Geräuschanteile der Rammarbeiten (Schlagrammen) sind. Alle anderen Arbeiten sind insbesondere im Kontext paralleler Bautätigkeiten als untergeordnet einzustufen.

Es wurde für die Installation der Dalben ein Monopile mit einem Durchmesser von $\varnothing = 4,5$ m angenommen.



Dipl.-Ing. (FH) Matthias Wildemann



Dr. rer. nat. Carsten Zerbs

Anhang

Abbildungen

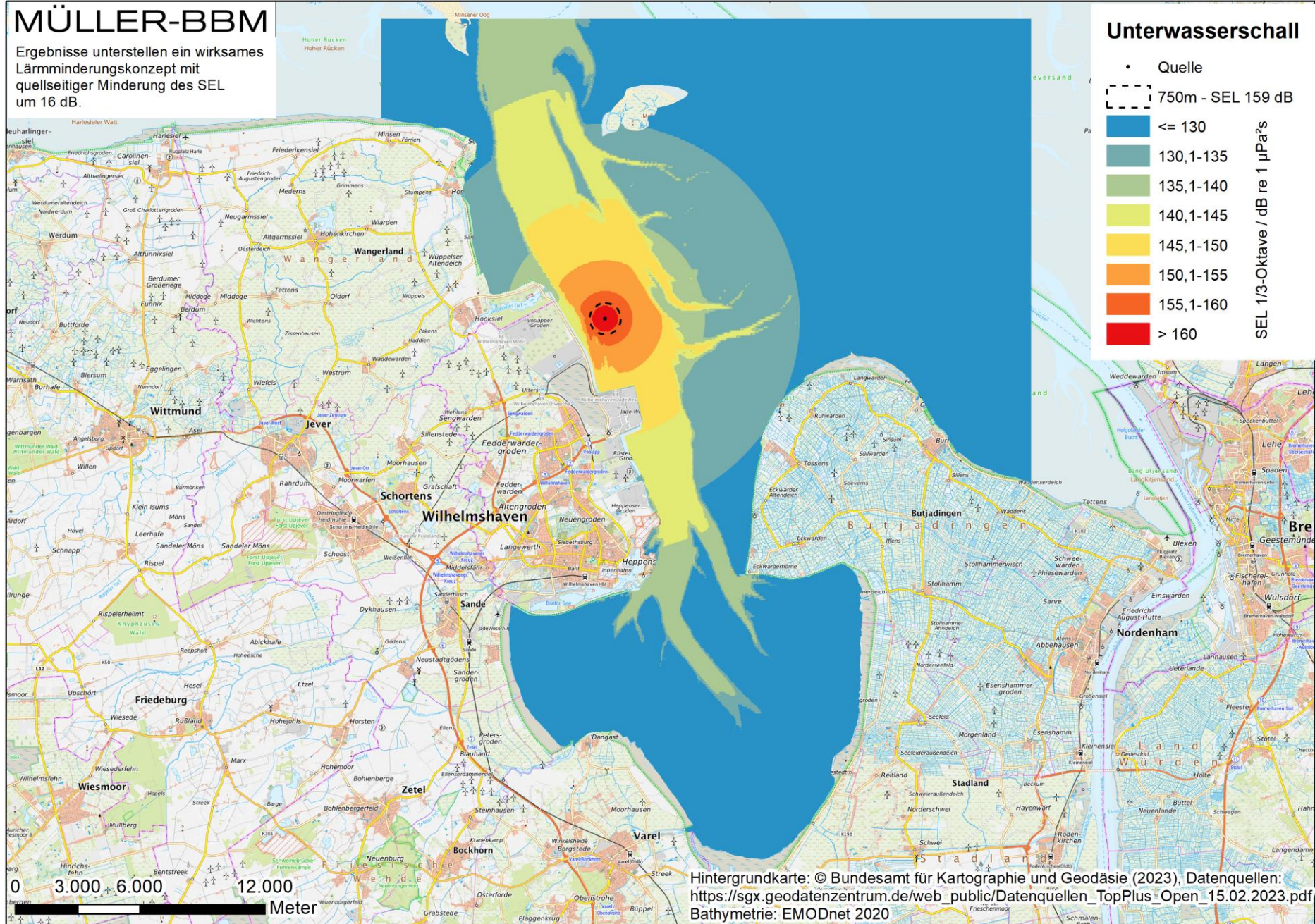
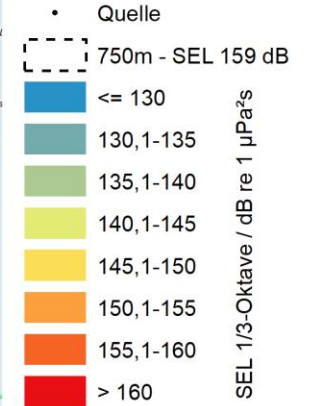
Tabelle 3. Abbildungsverzeichnis Anhang

Hintergrundkarte	
1	Immissionsprognose für eine Plattform-Gründung mit einem Pfahldurchmesser von $\varnothing = 4,5$ m und einer Rammenergie von 1800 kJ

MÜLLER-BBM

Ergebnisse unterstellen ein wirksames Lärmreduzierungskonzept mit quellseitiger Minderung des SEL um 16 dB.

Unterwasserschall



\\S-ham-fs01\allefirmen\IM\Proj\172\MI172921\MI172921_06_Ber_4D.DOCX: 14.09.2023