Untersuchung zur Approximation der Bathymetrie bei der Berechnung der Rammschallausbreitung in 3D

Jonas von Pein, Elin Klages, Stephan Lippert und Otto von Estorff
Technische Universität Hamburg, Institut für Modellierung und Berechnung, 21073 Hamburg, Deutschland, Email: mub@tuhh.de

Einleitung

In den Meeresboden gerammte Pfähle sind der Stand der Technik für die Gründung von Offshore-Bauwerken, wie beispielsweise Offshore-Windenergieanlagen. Die dazu benötigten Schlagrammungen führen zu hohen Schallpegeln im Wasser. Zum Schutz der marinen Fauna sind Grenzwerte für den Einzelereignispegel (SEL) und den Spitzenschallpegel (SPL) in der Nord- und Ostsee und in vielen Ländern einzuhalten. Für die Vorhersage der Notwendigkeit von Schallschutzmaßnahmen und deren Verbesserung sind numerische Modelle von großer Wichtigkeit. Diese Modelle berücksichtigen u.a. die Hammer- und Pfahlgeometrien sowie die Wassertiefe und den Aufbau des Bodens. Während des BORA-Projektes wurden solche Modelle entwickelt und validiert [1]. Für einen Überblick weiterer existierender Modelle sei auf die Veröffentlichungen der Rammschall-Benchmark-Szenarien COMPILE I und II verwiesen [2, 3]. Die verschiedenen darin beschriebenen Modelle basieren auf der Annahme, dass die Bathymetrie rotationssymmetrisch angenähert werden kann. Bei komplexen Meeresbodenverhältnissen spielen 3D-Effekte jedoch eine wichtige Rolle. Um diese abbilden zu können, wird ein hybrider Modellierungsansatz verwendet. Dieser nutzt die Finite-Elemente-Methode (FEM) für das geometrische Nahfeld und ein 3D-Parabolic-Equation-Modell (PE) für das Fernfeld. Für eine detaillierte Beschreibung des Modells sei auf [4] verwiesen. Bei Vernachlässigung der Diffraktion in der horizontalen Ebene werden in allen (Anzahl N) betrachteten Ausbreitungsrichtungen 2D-Ergebnisse erzielt. Diese sind auch als Nx2D-Ergebnisse bekannt und werden im Folgenden als 2D-Ergebnisse bezeichnet.

Für die Berechnung von bathymetrie-induzierten 3D-Effekten werden Daten der Bathymetrie benötigt. Da deren Güte unterschiedlich sein kann oder teilweise nur wenig Daten vorhanden sind, wird in diesem Beitrag der Einfluss unterschiedlicher Approximationen der Wassertiefe auf die Schallpegel und die 3D-Effekte untersucht. Dazu werden exemplarisch zwei Pfahlrammungsszenarien mit stark variierender Bathymetrie betrachtet.

Pfahlrammungsszenarien

Die zwei betrachteten Szenarien unterscheiden sich in der Bathymetrie der Standorte. Die jeweiligen Messdaten der Wassertiefe sind in Abbildung 1 dargestellt. Das in Abbildung 1a gezeigte Wassertiefenprofil hat, großskalig betrachtet, eine Canyon-förmige Struktur. Hinzu kommt ein durch Sanddünen horizontal gerripptes Profil. Direkt am Pfahl beträgt die Wassertiefe 38 m. Dieses Pfahlrammungsszenario wird im Folgenden als Canyon-Szenario bezeichnet. Der zweite betrachtete Fall ist in Abbildung 1b dargestellt. Dieser gleicht einer schiefen Ebene und wird im Folgenden als Hang-Szenario bezeichnet. Direkt am Pfahl beträgt die Wassertiefe 27 m. Die Sanddünen verlaufen schräg mit einem Winkel von $\varphi \approx 45°$. Direkt am Pfahl verläuft eine große Sanddüne mit einem Winkel von ca. 55°. Diese Dünen führen zu erheblichen lokalen Unterschieden in der Wassertiefe.

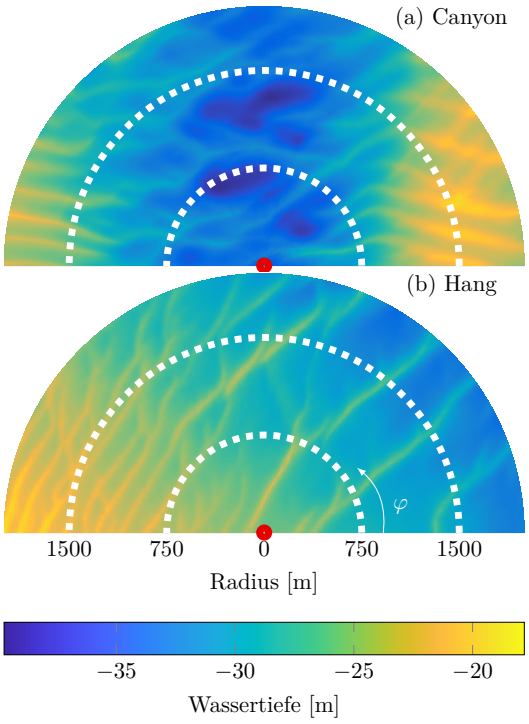

Abbildung 1: Gemessene Bathymetrie des Canyon- und des Hang-Szenarios.

In beiden Szenarien wird ein konischer Pfahl mit einem Durchmesser von 8,7 m, einer gemittelten Wandstärke von 81 mm und einer Rammenergie von 2000 kJ betrachtet. Die Pfahllänge ist aufgrund der unterschiedlichen Wassertiefen verschieden. Sie beträgt für das Hang-Szenario 56 m und für das Canyon-Szenario 69 m. Der Meeresboden ist geschichtet mit verschiedenen Sanden und wird in beiden Szenarien als gleich angenommen.

Da die Grenzwerte gegenwärtig nur mit Schallschutzmaßnahmen eingehalten werden können, werden die Szenarien auch mit einer Schallschutzmaßnahme betrachtet. Diese wurde dafür in einem Abstand von 10 m zur Symmetrieachse des Pfahls gesetzt und als voll absorbierend angenommen.

Einfluss der Approximationen

Zur Untersuchung des Einflusses der Bathymetrieapproximation auf die Schallpegel werden drei verschiedene Approximationen eingeführt:

- real
- semi-real
- approximiert

Eine reale Approximation entspricht einer linearen Interpolation der Bathymetriedaten aus Abbildung 1 in die jeweilige Ausbreitungsrichtung. Die semi-reale Approximation hat bis 300 m die reale Bathymetrie und geht dann in eine approximierte über.

Als approximierte Bathymetrie für das Canyon-Szenario wird ein Sech-Canyon [5] mit einer maximalen Wassertiefe von $H_{90°} = 37$ m genutzt. Die semi-reale Bathymetrie geht, um einen Sprung in der Wassertiefe zu vermeiden, in einen Sech-Canyon mit $H_{90°} = 35$ m über.

Die approximierte Bathymetrie des Hang-Szenarios entspricht einer schiefen Ebene mit einer Neigung von 0,23°.

Um die Auswirkungen der unterschiedlichen Approximationen auf die Schallpegel einschätzen zu können, sind in Abbildung 2 die 3D-Ergebnisse des SEL über die Entfernung zum Pfahl dargestellt. Hierbei wurden die Berechnungen jeweils ohne (reference) und mit Schallschutz (mitigated) mit den verschiedenen Approximationen der Bathymetrie durchgeführt. Alle hier dargestellten Ergebnisse weisen den typischen logarithmisch abfallenden Verlauf mit, durch Interferenzen ausgelösten, Oszillationen auf.

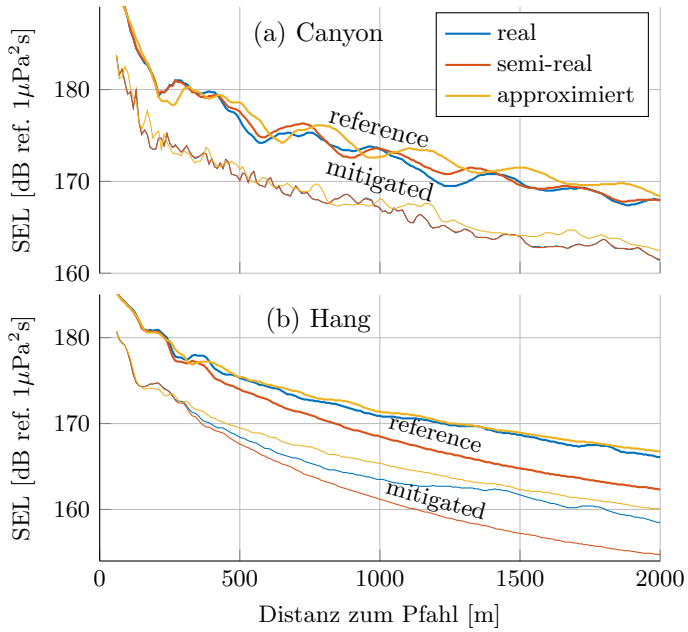

Abbildung 2: Mit verschiedenen Approximationen berechnete 3D-Ergebnisse des SEL für das Canyon-Szenario und das Hang-Szenario mit (mitigated) und ohne (reference) Schallschutz, ausgewertet in 30 m und 23 m Tiefe bei $\varphi = 90°$.

Bei der Referenzkonfiguration des Canyon-Szenarios oszillieren die Ergebnisse der verschiedenen Approximationen qualitativ sehr ähnlich. Zwischen den Ergebnissen der semi-realen und der realen Bathymetrie sind nur sehr geringe Abweichungen. Die Differenzen der Ergebnisse der als Sech-Canyon approximierten und realen Bathymetrie sind etwas größer und die Oszillationen sind leicht versetzt. Dies ist auf die im Mittel größere Wassertiefe $H_{90°}$ beim Sech-Canyon der approximierten Bathymetrie zurückzuführen.

Grundsätzlich sind beim Hang-Szenario die Oszillationen bei den Ergebnissen der beiden Konfiguration deutlich geringer. In diesem Fall sind die Ergebnisse, die mit der realen und approximierten Bathymetrie berechnet wurden, sehr ähnlich, wohingegen die Ergebnisse der semi-realen Bathymetrie deutlich abweichen. Diese Abweichungen werden durch die direkt am Pfahl beginnende Sanddüne ausgelöst, da diese nur zum Teil von der semi-realen Bathymetrie erfasst wird.

Für beide Szenarien gilt, dass die Unterschiede in den Ergebnissen der verschiedenen Approximationen der Bathymetrien bei dem Szenario mit Schallschutz qualitativ ähnlich zu den Referenzergebnissen sind, die Differenzen jedoch deutlich zunehmen.

Die zum Teil großen Unterschiede zwischen den Ergebnissen der verschiedenen Approximationen verdeutlichen, dass eine gute und genaue Abbildung der Bathymetrie notwendig ist. Für die ausgewertete Ausbreitungsrichtung sind die Ergebnisse des SEL der approximierten Bathymetrie in allen betrachteten Fällen am höchsten. Dadurch stellt sich die Frage, ob die Approximation als Sech-Canyon oder Hang in allen Ausbreitungsrichtungen eine konservative Abschätzung der Schallpegel darstellt. Dies wird u.a. im nächsten Abschnitt untersucht.

Einfluss von 3D-Effekten

Da die Unterschiede in Abbildung 2 beim Hang-Szenario größer waren, werden im folgenden Abschnitt die 3D-Effekte anhand des Hang-Szenarios aufgezeigt und die Unterschiede zum nicht dargestellten Canyon-Szenario beschrieben.

Beim Vergleich der 2D- und 3D-Ergebnisse in der Ausbreitungsrichtung $\varphi = 90°$ der realen Bathymetrie des Hang-Szenarios (nicht dargestellt) wird deutlich, dass die Oszillationen der 3D-Ergebnisse von den 2D-Ergebnissen dominiert werden. Des Weiteren sind die Schallpegel der 3D-Simulation etwas geringer, wobei der Unterschied < 1 dB ist und bei SEL und SPL qualitativ gleich ist.

Um 3D-Effekte besser quantifizieren zu können, folgt ein Vergleich der 2D- und 3D-Ergebnisse in der horizontalen Ebene. Zur Abschätzung der Unterschiede zwischen den 2D- und 3D-Ergebnissen sind in Abbildung 3 der mit dem 2D- und 3D-Modell berechnete SEL 1 m unter der Wasseroberfläche für das Hang-Szenario mit Schallschutz dargestellt. Für eine bessere Orientierung sind außerdem die Konturen der gemessenen Bathymetrie, wie in Abbildung 1b, abgebildet. Die Auswertung direkt unter der

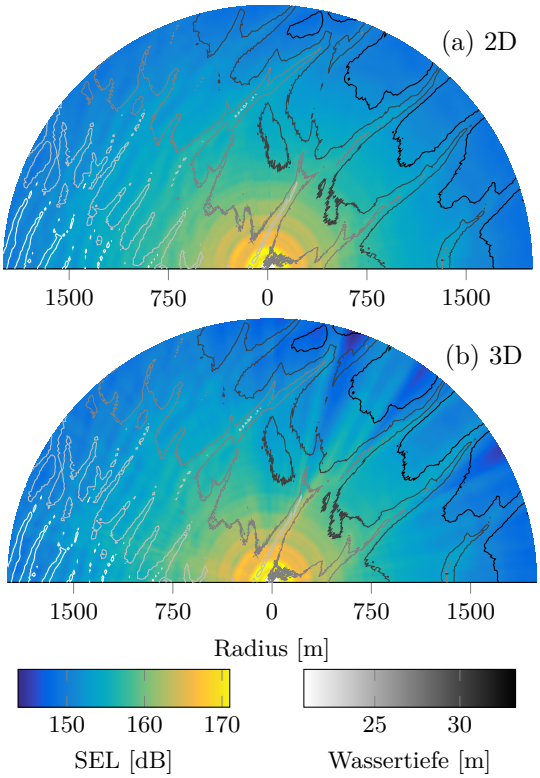

Abbildung 3: Vergleich der 2D- und 3D-Ergebnisse des SEL in 1 m Tiefe mit Schallschutz für das Hang-Szenario.

Wasseroberfläche ist besonders im Hinblick auf Messungen direkt an der Wasseroberfläche von Interesse. Bei der Betrachtung der 2D-Ergebnisse ist das Bodenprofil sehr gut in den Ergebnissen zu erkennen. Bei Ausbreitungsrichtungen, die entlang einer Erhebung laufen, ist der SEL vergleichsweise höher. Die Ergebnisse der 3D-Berechnungen weisen lokal große Unterschiede auf. Diese Unterschiede lassen sich sehr gut auf die Bathymetrie zurückführen. So ist der Einfluss der radial orientierten Sanddünen deutlich zu erkennen. Insbesondere der Einfluss der direkt am Pfahl beginnenden Sanddüne ist in den 3D-Ergebnissen identifizierbar.

Da eine genaue Auswertung der Differenzen zwischen 2D- und 3D-Ergebnissen aus Abbildung 3 schwierig ist, ist diese in Abbildung 4 dargestellt. Die dargestellte Differenz zwischen den Ergebnissen ist als $\Delta\mathrm{SEL} = \mathrm{SEL}_{3D} - \mathrm{SEL}_{2D}$ definiert. Auch hier ist der große Einfluss der in kurzer Distanz vom Pfahl beginnenden Sanddüne deutlich zu sehen. Im Bereich $\varphi > 90°$ sind nur kleine Differenzen zu erkennen, da dort die Schallwellen fast orthogonal auf die Sanddünen treffen. Der Differenzplot ohne Schallschutz (nicht dargestellt) ist dem dargestellten qualitativ sehr ähnlich, weist jedoch etwas geringere Werte auf.

Zur Unterscheidung, ob die auftretenden 3D-Effekte von lokalen Bathymetrieänderungen, wie z.B. Sanddünen, oder globalen Änderungen, wie der allgemeinen schiefen Ebene, hervorgerufen werden, ist in Abbildung 5 der Differenzplot der 2D- und 3D-Ergebnisse mit der approximierten Bathymetrie dargestellt. Dieser zeigt Maximalwerte von ±0,3 dB und damit eindeutig, dass die 3D-Effekte von lokalen Bathymetrieänderungen dominiert werden. Die Dominanz der durch lokale Bathymetrieänderungen induzierten 3D-Effekte verdeutlicht, dass eine reale Bathymetrie für eine hohe Prognosegüte notwendig ist.

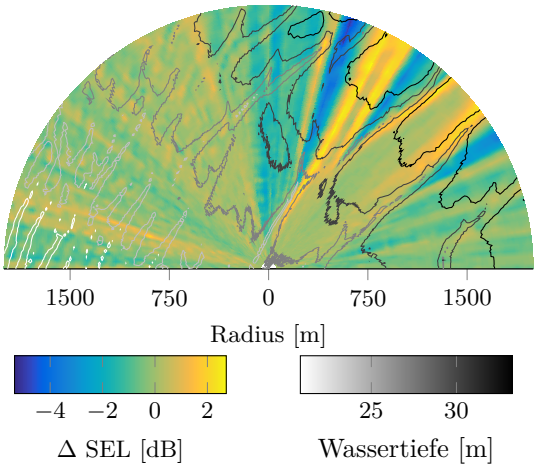

Abbildung 4: Vergleich der Differenzen des SEL der 2D- und 3D-Ergebnisse in 1 m Tiefe mit Schallschutz für das Hang-Szenario mit der realen Bathymetrie.

Die Ergebnisse des Canyon-Szenarios (nicht dargestellt) weichen folgendermaßen von den in den Abbildungen 4 und 5 dargestellten Ergebnissen ab: Die Maximalwerte der Differenz liegen hier zwischen 7,6 dB und −8,9 dB. Beim Canyon-Szenario treten die lokalen 3D-Effekte vor allem bei $\varphi < 45°$ und $\varphi > 135°$ auf, da die Bathymetrie dort Sanddünen aufweist (vgl. Abbildung 1a), die in Ausbreitungsrichtung orientiert sind. Der Differenzenplot für die approximierte Bathymetrie weist Werte von 1,7 dB bis −2,6 dB auf. Diese treten jedoch vor allem zwischen 80° und 100° auf und dominieren dort die 3D-Effekte. Insgesamt sind auch beim Canyon-Szenario die lokalen Unterschiede der Bathymetrie dominierend bei der Verursachung von 3D-Effekten.

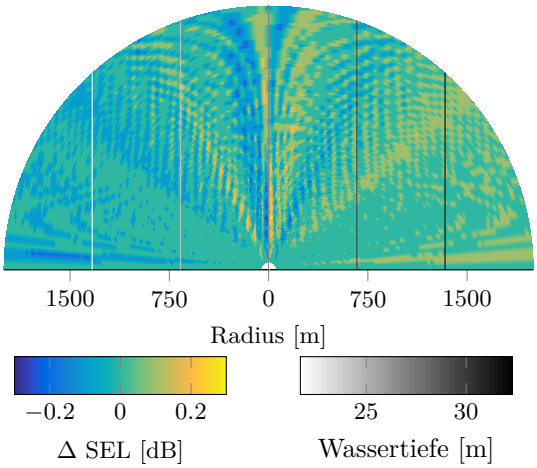

Abbildung 5: Vergleich der Differenzen des SEL der 2D- und 3D-Ergebnisse in 1 m Tiefe mit Schallschutz für das Hang-Szenario mit der approximierten Bathymetrie.

Mit dem numerischen Nachweis von lokal induzierten 3D-Effekten stellt sich die Frage, ob diese auch zu den Maximalwerten der Schallpegel beitragen. Um dies zu beurteilen sind in Abbildung 6 verschiedene Ergebnisse des SEL für das Hang-Szenario mit Schallschutz für vier unterschiedliche Entfernungen über den Azimuthwinkel φ aufgetragen. Verglichen werden hierbei die mit der realen Bathymetrie berechneten 2D-Ergebnisse des SEL mit den 3D-Ergebnissen der realen und approximierten Bathymetrie.

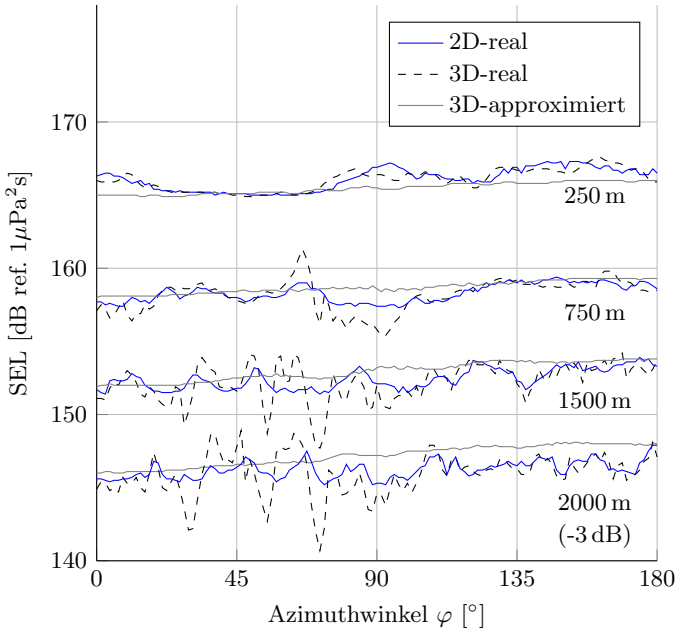

Abbildung 6: Vergleich der Differenzen des SEL der 2D- und 3D-Ergebnisse in 1 m Tiefe mit Schallschutz für das Hang-Szenario. (Achtung: zur besseren Lesbarkeit wurden den Werten bei 2000 m 3 dB abgezogen.)

Beim Vergleich der Ergebnisse der realen Bathymetrie mit denen der approximierten wird deutlich, dass diese bei 250 m fast überall niedrigere Werte aufweisen, jedoch ab 750 m mit kleinen lokalen Ausnahmen allgemein über den berechneten Werten der realen Bathymetrie liegen. Dies kann damit begründet werden, dass bei der realen Bathymetrie das System mehr gedämpft wird. Generell werden die Unterschiede zwischen 2D- und 3D-Ergebnissen mit steigendem Abstand größer. Auffällig ist, dass der Ort der Maximalwerte des SEL durch die 3D-Effekte bei $\varphi_{\max} \approx 60°$ statt $\varphi_{\max} > 150°$ liegt. Ab 750 m erscheinen die 3D-Ergebnisse der approximierten Bathymetrie als eine gute Abschätzung der Schallpegel. Die Ergebnisse aus Abbildung 6 zeigen, dass die auftretenden 3D-Effekte in diesem Szenario zu höheren Schallpegeln führen.

Die Ergebnisse des Canyon-Szenarios (nicht dargestellt) zeigen im Vergleich deutlich größere Abweichungen. Dort ist die Differenz zwischen 2D- und 3D-Ergebnissen bei 1500 m größer als 5 dB. Außerdem weisen die 3D-Ergebnisse der approximierten Bathymetrie in diesem Fall deutliche Unterschiede zu den 3D-Ergebnissen der realen Bathymetrie auf und können nicht als konservative Abschätzung der Schallpegel gelten.

Zusammenfassung und Ausblick

Anhand zweier Pfahlrammungsszenarien wurde gezeigt, dass 3D-Effekte lokal zu höheren Schallpegeln führen. Durch den Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Approximationen wurde deutlich, dass eine gute, möglichst auf Messdaten basierende Approximation der Bathymetrie notwendig ist, um die auftretenden 3D-Effekte berechnen zu können. Weiterhin wurde bestätigt, dass die 3D-Effekte von lokalen Bathymetrieänderungen, wie z.B. Sanddünen, dominiert werden. Abschließend ist festzuhalten, dass die auftretenden 3D-Effekte unabhängig davon sind, ob ein Schallschutzsystem genutzt wird oder nicht.

Auf diesen Beitrag aufbauend wird eine Validierung des Berechnungsansatzes für ein Pfahlrammungsszenario mit stark variierender Bathymetrie angestrebt. Außerdem sind die Auswirkungen von unsicheren Bodenparametern auf die 3D-Effekte zu untersuchen. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Betrachtung von nicht rotationssymmetrischen Schallquellen, wie z. B. schräg gerammten Pfählen.

Danksagung

Die Autoren danken dem Unternehmen Ørsted Wind Power A/S für die gute Zusammenarbeit und Unterstützung.

Literatur

[1] von Estorff, O., Lippert, S., Grabe, J., Chmelnizkij, A., Heins, E., Heitmann, K., Lippert, T., Ruhnau M., Siegl, K., Bohne, T., Grießmann, T., Rolfes, R., Rustemeier, J., Podolski, C., Rabbel, W., Wilken, W.: Schlussbericht des Verbundprojektes BORA: Entwicklung eines Berechnungsmodells zur Vorhersage des Unterwasserschalls bei Rammarbeiten zur Gründung von OWEA (FKZ 0325421A/B/C), Technische Universität Hamburg-Harburg, (2016).

[2] Lippert, S., Nijhof, M., Lippert, T., Wilkes, D. Gavrilov, A., Heitmann, K., Ruhnau, M., von Estorff, O., Schäfke, A., Schäfer, I. Ehrlich, J., MacGillivray, A., Park, J., Seong, W., Ainslie, M. A., de Jong, C., Wood, M., Wang, L., Theobald, P.: COMPILE - A Generic Benchmark Case for Predictions of Marine Pile-Driving Noise, IEEE Journal of Oceanic Engineering (2016), Vol. 41, pp. 1061–1071.

[3] Lippert, S., Nijhof, M., Lippert, T., von Estorff, O.: COMPILE II - A Benchmark of Pile Driving Noise Models against Offshore Measurements, *Proceedings of INTERNOISE 2018*, (2018).

[4] von Pein, J., Lippert, S., von Estorff, O.: Berechnung der Rammschallausbreitung unter Berücksichtigung von bathymetrie-induzierten 3D-Effekten, *Tagungsband zur DAGA 2018*, (2018).

[5] Petrov, P., Petrova, T.: Asymptotic solution for the problem of sound propagation in a sea with an underwater canyon, J. Acoust. Soc. Am. (2014), Vol 136, pp. EL 281-EL 287.