Numerische Modellierung von Rammschall mit gekoppeltem Finite Elemente und Parabolic Equation Verfahren

Jan Ehrlich, Alexandra Schäfke, Ingo Schäfer

Wehrtechnische Dienststelle für Schiffe, Marinewaffen, Maritime Technologie und Forschung, 24340 Eckernförde, E-Mail:JanEhrlich@bundeswehr.org

Einleitung

In den letzten Jahren wurden in größerer Zahl Offshore Windenergieanlagen in der deutschen Nordsee installiert. Da in Deutschland noch eine größere Anzahl von Windparks geplant sind, wird die Zahl der Installationen in den nächsten Jahren noch weiter wachsen. Die Gründung dieser Anlagen erfolgt üblicherweise mit hydraulisch betriebenen Pfahlrammen. Der Rammvorgang ist mit sehr hohen Lärmpegeln im Wasser verbunden. Zum Schutz der Meeresfauna wurden vom Umweltbundesamt Grenzwerte für den maximalen Schallpegel festgelegt. Um die auftretenden Werte vor Beginn der Arbeiten abschätzen zu können, gibt es ein Interesse an einer möglichst realistischen numerischen Modellierung der auftretenden Phänomene.

Modell eines Pfahls

Um den verschiedenen Arbeitsgruppen, die an einer Modellierung von Rammschall arbeiten, eine Vergleichsmöglichkeit ihrer Arbeit mit anderen zu bieten, entstand die Idee zu einem Workshop, bei dem jeder Teilnehmer vorher definierte Pfahlramm-Szenarien rechnet und die Ergebnisse verglichen werden. Dieses Projekt mit dem Namen COMPILE wurde von dem Institut für Modellierung und Berechnung der TU Hamburg-Harburg und dem niederländischen TNO organisiert [1]. Im Januar 2014 wurde ein erster Testfall definiert. Dabei handelt es sich um einen relativ einfach gehaltenen Testfall „Generischer Pfahl“, der eine starke Abstraktion konkreter Pfahlrammen darstellt.

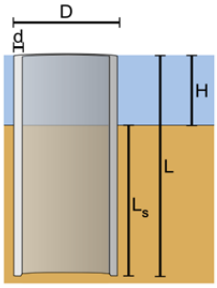

Abbildung 1: Geometrie des Pfahls und der Sektionen in Wasser und Sediment.

Der Pfahl wurde als Stahlrohr definiert, das sich teilweise im Sediment und teilweise im Wasser befindet. Die jeweiligen Teile sind mit Wasser, bzw. mit Sediment, gefüllt. Der Pfahl hat eine Gesamtlänge L von 25 m, von denen sich 15 m im Sediment befinden. Die Wassertiefe H beträgt 10 m, der Pfahl schließt somit oben mit der Wasseroberfläche ab. Der Durchmesser D des Pfahls beträgt 2 m und er hat eine Wandstärke d von 5 cm.

Bei Pfahlrammungen wird der Pfahl üblicherweise durch eine hydraulisch betriebene Ramme in den Meeresboden geschlagen. Dabei liegt ein Rammkopf oben auf dem Pfahl. Dieser wird durch einen Schlag der Ramme deformiert. Der Schlag setzt sich in den Pfahl fort und führt zu einer Welle, die sich in dem Pfahl nach unten fortsetzt. Am Ende des Pfahls wird ein Teil der Energie in den Boden geleitet und ein Teil reflektiert. In dieser Modellierung wird die Anregung stark abstrahiert behandelt. Der Rammkopf selbst wurde nicht modelliert, sondern lediglich eine Kraft definiert, die die Ramme auf das obere Ende des Pfahls aufbringt. Die Kraft F ist als Sprungfunktion mit einem Peak von F_p = 20 MN und einer Anstiegszeit von t_r = 0,2 ms sowie einem darauf folgenden exponentiellen Abklingen gegeben. Die Abfallzeit t_d beträgt 1,6 ms. Gleichung 1 beschreibt die Anregungsfunktion mathematisch.

$$F = \begin{cases} F_p \frac{t}{t_r} & \text{für } t \leq t_r \\ F_p e^{-\frac{t-t_r}{t_d}} & \text{für } t > t_r \end{cases} \tag{1}$$

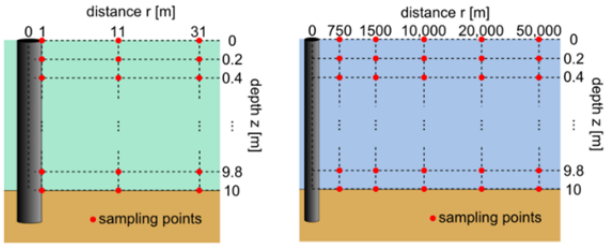

Abbildung 2: Gitter der Feldpunkte, für die bei dem Testfall 1 des COMPILE Workshops im Nahfeld (links) und im Fernfeld (rechts) Lösungen berechnet werden sollen.

Lösungsstrategie

Für die Modellierung des Rammschalls bietet es sich an, das Problem in zwei Teilprobleme zu zerlegen. Im Nahfeld müssen die komplexen Vorgänge der Körperschallausbreitung im Pfahl und der Energieabstrahlung in das Wasser und in den Boden gerechnet werden. Um diese Vorgänge exakt genug zu beschreiben, ist eine sehr feine Auflösung in der Diskretisierung sowohl des Raumes als auch der Zeit erforderlich. Üblicherweise werden solche gekoppelten Probleme aus Körperschall und Wasserschall mit Finite-Elemente-Programmen (FE) gerechnet. Dieser Ansatz hat genau bei diesen Anforderungen seine Stärken.

Für die Ausbreitung vom Nahfeld ins Fernfeld sind die Vorgänge am Pfahl nicht mehr entscheidend. Hier bestimmt die Wellenlänge des Schalls im Wasser und im Boden die Ausbreitung. Deswegen ist keine so hohe Auflösung wie im

Nahfeld erforderlich. Es bietet sich an, traditionelle Methoden der Schallausbreitungssimulation zu verwenden.

Aus diesen Gründen wurde entschieden, das Problem Rammschall in die Teilprobleme Nahfeld und Fernfeld aufzuteilen und zwei unterschiedliche Simulationen zu koppeln. Für das Nahfeld wurde das kommerzielle Finite-Elemente Programm COMSOL verwendet und für das Fernfeld das an der WTD 71 entwickelte Programm PESSim, das auf einer Parabolic-Equation Näherung beruht.

Mit beiden Programmen wurde nicht direkt im Zeit-, sondern im Frequenzbereich gerechnet. Das heißt, in äquidistanten Frequenzabständen werden eine große Zahl von Simulationsrechnungen durchgeführt, die danach über eine inverse Fouriertransformation in den Zeitbereich umgerechnet werden.

$$p(t) = \int_0^{f_{max}} \tilde{P}(f) e^{+i2\pi f t} df \qquad (2)$$

Bei einer insgesamt berechneten Zeit von einer Sekunde und einer Zeitauflösung von 0,2 ms ist ein Frequenzabstand von 1 Hz und eine maximale Frequenz von 2,5 kHz erforderlich. Somit müssen 2500 einzelne Rechnungen mit beiden Programmen durchgeführt werden.

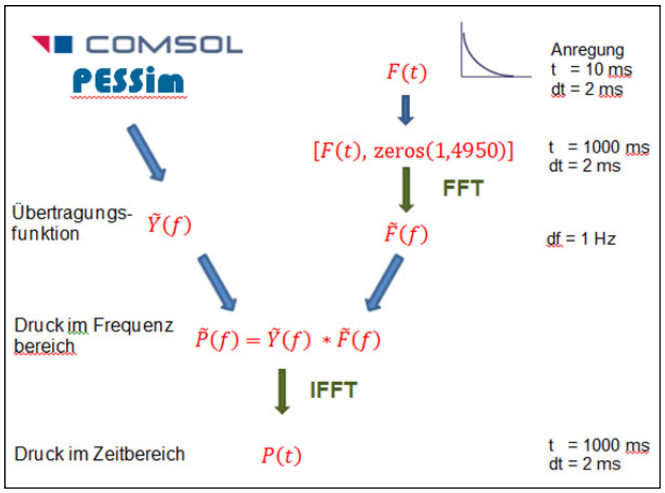

Abbildung 3: Lösungskonzept für die Modellierung des Rammschalls im Frequenzbereich mit anschließender inverser Fouriertransformation.

Modellierung im Nahfeld

Die Rechnung im Nahfeld wurde mit dem kommerziellen Finite-Elemente-Programm COMSOL durchgeführt, das sich gut für die Kopplung mechanischer und akustischer Schwingungen eignet. Wegen der hohen Speicher- und Rechenzeitanforderungen wurde nur das Nahfeld bis zu einer radialen Entfernung von 31 m vom Ursprung mit COMSOL berechnet. Der Ursprung befindet sich am Meeresboden in der Mitte des hohlen Pfahls. Da das Problem axialsymmetrisch ist, die Lösung also nur von der Tiefe und der radialen Entfernung von der Tiefenachse abhängt, muss die Rechnung nur die beiden Variablen Tiefe z und Range r berücksichtigen.

Deswegen reicht es aus, nur die r-z Ebene mit Elementen zu diskretisieren und nicht den dreidimensionalen Raum. Dabei werden Schwingungen vernachlässigt, die nicht axialsymmetrisch sind. Da jedoch die Anregung durch den Hammerschlag näherungsweise axialsymmetrisch ist, werden auch im Wesentlichen nur axialsymmetrische Moden angeregt und eine Vernachlässigung der anderen Moden erscheint gerechtfertigt.

Abbildung 4 zeigt den Realteil des Drucks bei der Frequenz 1100 Hz. Im Inneren des Pfahls handelt es sich um eine stehende, im Außenbereich um eine sich ausbreitende Welle.

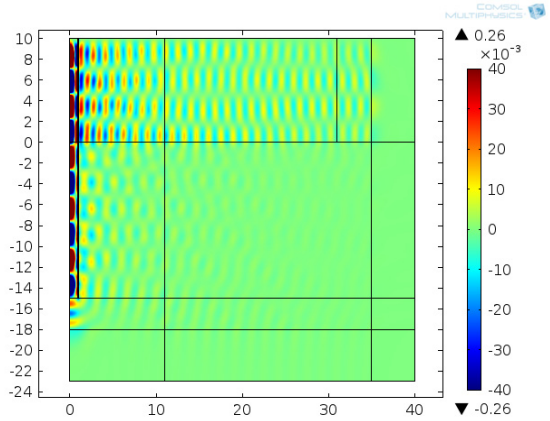

Abbildung 4: Realteil des Drucks bei der Frequenz 1100 Hz..

Abbildung 5 zeigt den Druckverlauf im Zeitbereich direkt am Pfahl ($r = 1$ m), berechnet durch inverse Fouriertransformation. In dieser Abbildung ist die Wasseroberfläche bei der Tiefe 0 m und die Wasser-Sedimentgrenze somit bei 10 m Tiefe.

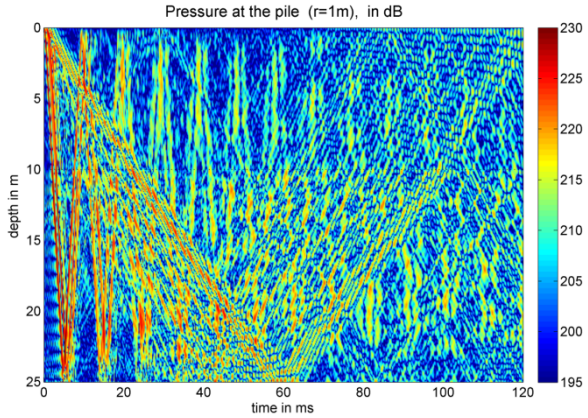

Abbildung 5: Schalldruckpegel direkt an der Außenseite des Pfahls.

In dem Diagramm sind im Wesentlichen zwei Wellentypen zu erkennen. Zum Zeitpunkt Null trifft der Hammer auf das obere Rohrende. Von dort läuft eine Ringdehnwelle durch das Rohr und trifft nach etwa 5 Sekunden auf das untere Rohrende. Dort wird sie teilweise reflektiert und läuft wieder nach oben und wird dort ebenfalls reflektiert. Jedes Mal nimmt die Intensität dieser Welle ab, aber die Spuren sind über den gesamten dargestellten Zeitbereich bis 120 ms erkennbar. Aus der Steigung der Spuren im Diagramm ergibt sich eine Ausbreitungsgeschwindigkeit von etwa 5150 m/s. Wie erwartet liegt diese ein wenig unterhalb der Longitudinalwellengeschwindigkeit im freien Festkörper Stahl von 6000 m/s. In dem Diagramm ist noch eine zweite Welle zu erkennen, eine Biegewelle, die sich ebenfalls nach unten

ausbreitet und dort nach etwa 60 ms reflektiert wird. Diese hat eine geringere Steigung, die einer Ausbreitungsgeschwindigkeit von ungefähr 420 m/s entspricht.

Modellierung im Fernfeld

Zur Modellierung der Schallausbreitung im Fernfeld wurde das an der WTD 71 entwickelte Modell PESSim (Parabolic Equation Sound Simulation) verwendet. Dabei handelt es sich um ein Rechenprogramm zur Simulation der Schallausbreitung in geschichteten, flüssigen oder festen Medien nach der Parabolic Equation (PE) Näherung. Dabei wird nicht direkt die Helmholtzgleichung, die Wellengleichung im Frequenzbereich, gelöst sondern eine Näherung, die eine Einwege-Wellenausbreitung beschreibt als

$$\left(\frac{\partial}{\partial r} - ik_0(Q-1)\right)\psi(r,z) = 0 \ , \quad Q = \frac{1}{k_0}\sqrt{\frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2} \qquad (3)$$

mit dem Pseudodifferentialoperator Q und der Funktion ψ, die über den Lösungsansatz

$$p(r,z) = \psi(r,z) \cdot H_0^1(k_0 r) \qquad (4)$$

definiert ist. $H_0^1(k_0 r)$ ist die Hankelfunktion erster Art und nullter Ordnung mit dem Produkt aus einer Referenzwellenzahl k_0 und dem radialen Abstand r als Argument. Die Lösung von Gleichung 3 lässt sich schreiben als

$$\psi(r+\Delta r, z) = e^{ik_0\Delta r(Q-1)}\ \psi(r,z) \ , \qquad (5)$$

Und wird numerisch durch eine Padé-Entwicklung des Exponentialoperators gelöst. Näheres zu der parabolischen Näherung ist in [2] und zu dem Programm PESSim in [3,4] zu finden.

Die Helmholtzgleichung ist eine elliptische partielle Differentialgleichung. Dieser Differentialgleichungstyp entspricht einem Randwertproblem, d.h. um die Lösung auf einem vorgegebenen Gebiet zu berechnen, muss die Lösung auf dem Rand dieses Gebiets bekannt sein. Das macht die Berechnung auf einem großen Gebiet aufwendig. Bei der Näherung in Gleichung 3 handelt es sich dagegen um eine parabolische partielle Differentialgleichung. Diese entspricht einem Anfangswertproblem, d.h. die Lösung für eine Anfangsentfernung muss bekannt sein. Daraus lässt sich dann Schritt für Schritt die Lösung für weitere Entfernungen berechnen. Für eine Schallausbreitungsrechnung mit offener Grenze in Radialrichtung ist das eine sehr praktikable Vorgehensweise.

Neben der Möglichkeit des schrittweisen Vorgehens in der Entfernung gibt es noch einen weiteren Vorteil des PE-Ansatzes gegenüber anderen möglichen Verfahren wie Wellenzahlintegration und Normal Mode Verfahren. Für diese Verfahren ist es erforderlich, dass die Symmetrieachse bei $z = 0$ die Begrenzung des Rechengebietes ist. Bei einem PE-Verfahren wie PESSim kann eine beliebige komplexe Druckverteilung an einer Anfangsentfernung, hier die Ergebnisse der COMSOL Rechnung, zur Initialisierung verwendet werden.

Die Ankopplung der beiden Programme durch die Nutzung der COMSOL Ergebnisse als PESSim Initialisierung erfolgte bei 11 m. Die nächste Entfernung, für die Ergebnisse berechnet wurden beträgt 31 m. Für diese Entfernung liegen Ergebnisse mit beiden Programmen vor. Somit können die beiden Rechenverfahren verglichen und insbesondere die Funktionsfähigkeit des Ankopplungsmechanismus bewertet werden. In Abbildung 6 ist der spektrale Schalldruckpegel in dB in 31 m Entfernung von der Achse über der Frequenz und der Tiefe für die beiden Rechnungen mit COMSOL und mit PESSim aufgetragen. Die Grafiken zeigen die sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse. Über die gesamte Wassersäule gemittelt beträgt der Unterschied im Schalldruckpegel lediglich 0,55 dB. Das zeigt, dass die Ankopplung von COMSOL und PESSim gut funktioniert und die dabei gemachten Annahmen bezüglich Interpolation des Drucks vernünftig sind.

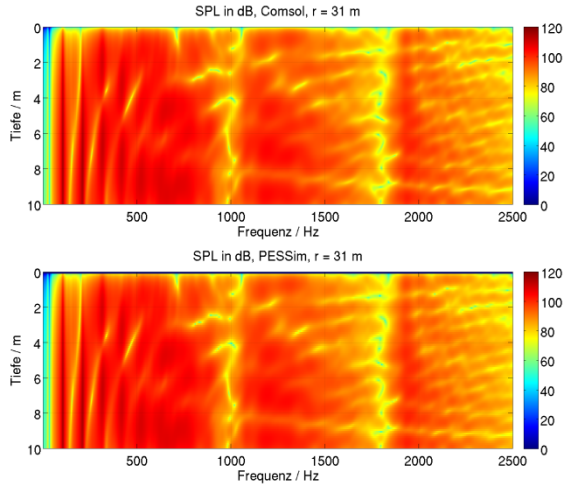

Abbildung 6: Spektraler Schalldruckkpegel im Wasser über der Frequenz und der Tiefe bei r = 31 m in dB, berechnet mit COMSOL (oben) und mit PESSim (unten in dB bezogen) in dB re µPa²/Hz.

Abbildung 7 zeigt für die zwei Entfernungen im Nahfeld und vier Entfernungen im Fernfeld die signifikanten Bereiche des simulierten Zeitverlaufs des Druckpegels in der Wassersäule in Dezibel bezogen auf 1 µPa farblich dargestellt.

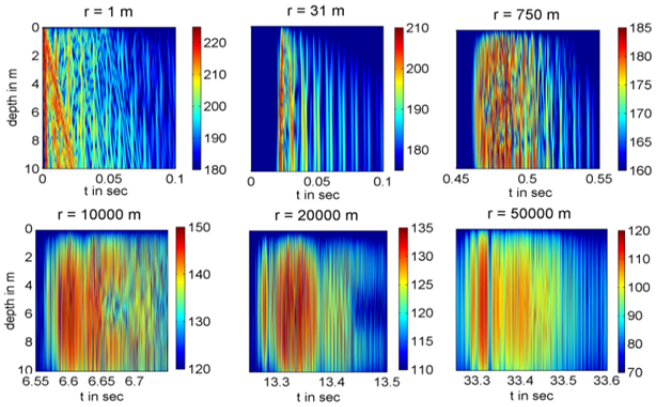

Abbildung 7: Schalldruckpegel farblich kodiert bei verschiedenen Entfernungen.

Da der Druck bei wachsender Entfernung vom Pfahl sinkt, hat jedes der Bilder eine andere Farbskala mit sinkenden Werten in den Druckpegeln bei steigender Entfernung. Zudem werden für die Ergebnisse im Fernfeld Offsets verwendet, da die Druckpulse zunächst die betrachteten

Entfernungen erreichen müssen. Wegen der Aufweitung der Pulse mit zunehmender Laufstrecke ändert sich die Skalierung der *x*-Achse in der unteren Reihe von Abbildung 7. Man sieht das Auseinanderlaufen des Pulses, der als klare Abfolge von abgestrahlten Wellen am Pfahl startet und sich bei großen Entfernungen in einem breiten Puls verwandelt.

In Abbildung 8 sind die Zeitsignale für einen Empfänger in 5 m Wassertiefe bei den gleichen Entfernungen aufgetragen und in Abbildung 9 der Druck spektral aufgelöst an den gleichen Positionen. Man erkennt, dass mit zunehmender Entfernung die tiefen Frequenzen verschwinden, da die entsprechenden Moden tiefer in den Boden reichen und somit eine höhere Dämpfung erfahren. Somit verschwinden auch klar dominierende, scharfe Frequenzspitzen, die im Nahfeld noch zu finden sind.

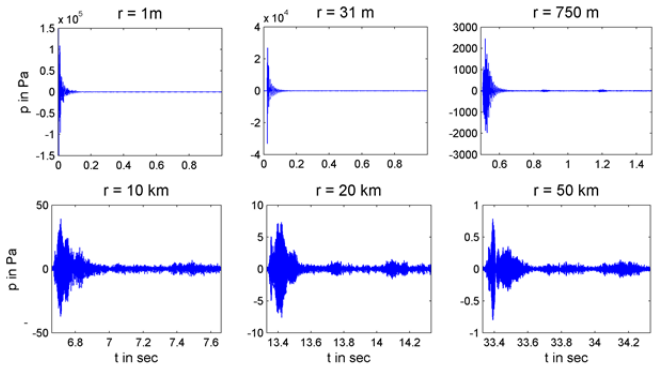

Abbildung 8: Druckverlauf in 5 m Wassertiefe bei verschiedenen Entfernungen.

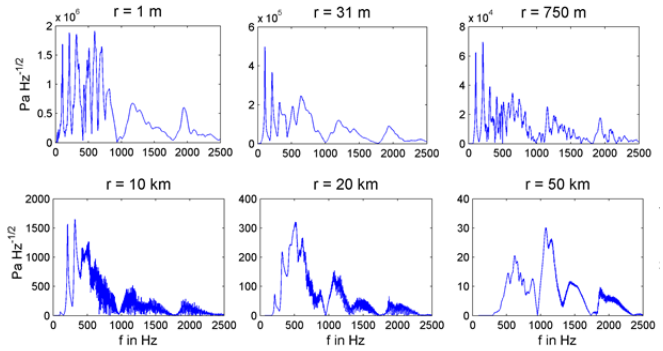

Abbildung 9: Spektrum des Drucks im Wasser in 5 m Tiefe in Pa/$\sqrt{Hz}$ bei verschiedenen Entfernungen.

Vergleich mit anderen Ergebnissen

Die Teilnehmer des COMPILE Workshops verwendeten unterschiedliche Lösungsstrategien zur Simulation des Testfalls. Allerdings wurde im Nahfeld meistens mit einem Finite-Elemente-Verfahren gerechnet. Deswegen ähneln sich die Ergebnisse auch stark. In Abbildung 10 sind die simulierten Druckverläufe in 5 m Tiefe und 31 m Entfernung der Teilnehmer ohne Namensnennung dargestellt. Die Lösung der WTD 71 stimmt gut mit den meisten anderen Ergebnissen überein. Für die Fernfeldrechnungen liegen keine simulierten Zeitsignale anderer Teilnehmer vor.

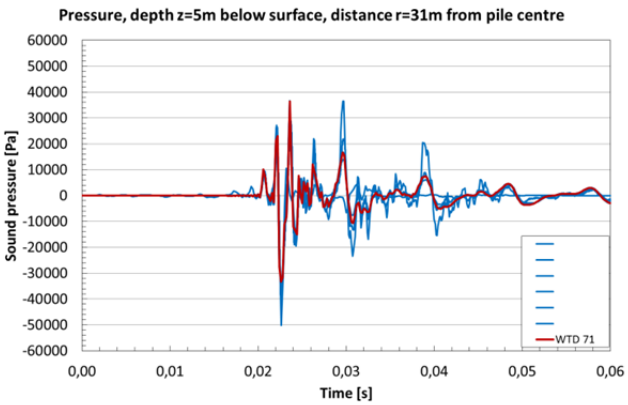

Abbildung 10: Druckverlauf in 5 m Wassertiefe und 31 m Entfernung, Vergleich der Lösung mit anderen Teilnehmern des COMPILE Workshops.

Fazit und Ausblick

Es wurde ein Simulationsverfahren zur numerischen Modellierung von Rammschall vorgestellt, das auf einer Kopplung des kommerziellen Finite-Elemente Programms COMSOL mit dem selbst entwickelten Parabolic-Equation Simulationsprogramm PESSim basiert. Für den stark abstrahierten Testfall „Generischer Pfahl“ des COMPILE Benchmark Programms wurden simulierte Druckverläufe präsentiert. Der gewählte Lösungsansatz ist jedoch auch in der Lage, komplexere und realistischere Szenarien zu simulieren. Mögliche Verfeinerungen sind:

- Sediment als Festkörper mit Scherwellen,
- Berücksichtigung eines Schallgeschwindigkeitsprofils im Wasser und im Boden,
- Entfernungsabhängigkeit in Wasser und Boden, einschließlich nicht-ebenem Boden,
- Realistischere Hammerschlaganregung.

Literatur

[1] COMPILE Benchmark Projekt
URL: `http://www.bora.mub.tuhh.de/compile/`

[2] Jensen, F. et. al.: Computational Ocean Acoustics, 2. ed., AIP Press, New York, 2011

[3] Schäfke, A.: Grundlagen für ein Parabolic Equation Modell zur Simulation der Schallausbreitung in flüssigen und festen Medien, WTD 71-0158/2011 FB, WTD 71, Eckernförde, 2011

[4] Schäfke, A.: Validierung des Parabolic Equation Modells PESSim, WTD 71-0115/2012 FB, WTD 71, Eckernförde, 2012