

Vorhersage der Ausbreitung von Rammschall anhand von Modenzerlegung der Helmholtz-Gleichung mit dem KRAKEN Algorithmus

Uwe Stöber, Friedrich Wilts, Thomas Neumann

DEWI, UL Internatinal GmbH, 26382 Wilhelmshaven, E-Mail:u.stoerber@dewi.de

Einleitung

Rammarbeiten beim Bau von Offshore-Windparks sind mit sehr hohen Schallemissionen verbunden. Zur Einhaltung behördlicher Auflagen [1][2] bedarf es qualitativ hochwertiger Ausbreitungsprognosen in der Planungsphase. Bei küstennahen Windparks, die im flachen Wasser gebaut werden, kann eine komplexe Bathymetrie die Schallausbreitung stark beeinflussen, was die Vorhersage der Lärmpegel unter Umständen deutlich erschwert.

Im Rahmen einer Fallstudie wurde die Eignung des KRAKEN Algorithmus von [3] als Vorhersageinstrument für die Schallausbreitung im flachen Wasser mit ausgeprägter Bathymetrie getestet, indem der modellierte Ausbreitungsverlust mit beobachteten Rammschallimmissionen im Bereich des Jade Weser Ports [4] verglichen wurde. Der KRAKEN Algorithmus löst die Helmholtz-Gleichung für einzelne feste Frequenzen durch Modenzerlegung und berücksichtigt sowohl die Variabilität der Wassertiefe als auch die Schallausbreitung im Sediment. Die Berechnung des 3D-Feldes ermöglicht detaillierte Analysen aller relevanten akustischen Parameter.

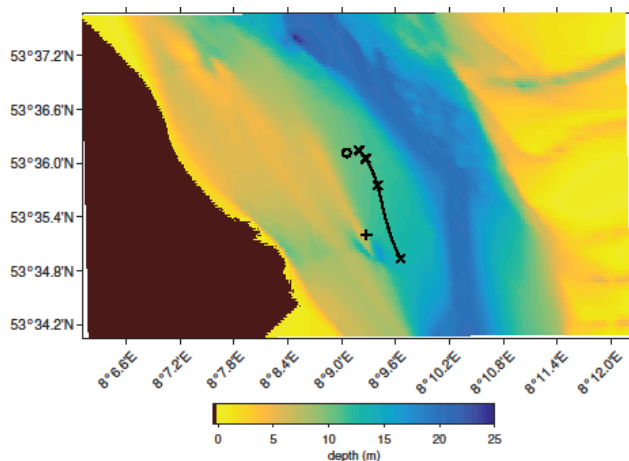


Abbildung 1: Position der akustischen Quelle (o) und der Messungen (x) mit Bathymetrie [5] unterlegt und relativ zur Niedersachsenbrücke (+). Die durchgezogene Linie markiert die Position des driftenden Schiffes, das als Plattform für die Hydrophonmessungen genutzt wurde.

Messdaten

Vor Errichtung des Jade Weser Ports wurden im Jahr 2005 Testrammungen durchgeführt, bei denen sowohl ein entfernungsabhängiger Gesamtpegelverlauf als auch Terzspektren in vier ausgewählten Entfernungen (Abbildung 1) aufgenommen wurden. Alle Messungen erfolgten vom driftenden Schiff in einer Wassertiefe von etwa 5 m.

Die vier Spektren (Abbildung 2) wurden in 170 m, 260 m, 770 m und 2290 m Entfernung von der akustischen Quelle aufgezeichnet. Das erste Spektrum bei 170 m wurde bei Rammungen mit verminderter Hammerenergie gemessen, und das letzte Spektrum bei 2290 m zeigt eine untypischen Abfall der spektralen Energie zwischen 125 Hz und 500 Hz, der nicht erklärt werden konnte. Zur Validierung der spektralen Modellergebnisse werden daher ausschließlich die gemessenen Spektren in 260 m und 770 m Entfernung von der akustischen Quelle benutzt.

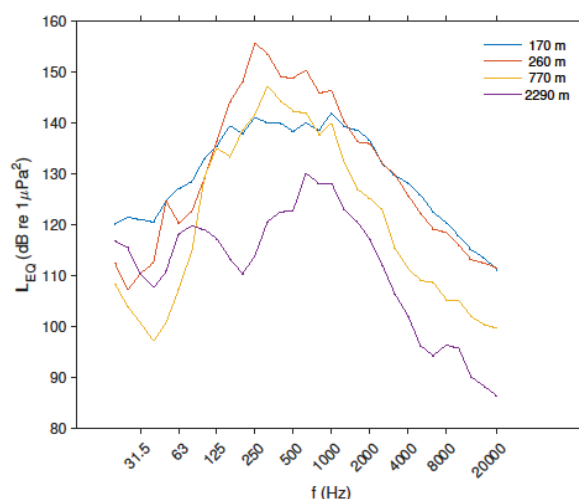


Abbildung 2: Terzspektren aus dem Zeitraum 17-23.08.2005, bei 5 m Wassertiefe nahe der Niedersachsenbrücke aufgenommen (Abbildung 1). Die Farbe zeigt die Entfernung zur akustischen Quelle (Rammschall) an.

Das KRAKEN-Modell

Die Ausbreitung von Schall im Ozean wird durch die Wellengleichung beschrieben, die aus den Bewegungsgleichungen, der Massenerhaltung und der Zustandsgleichung hergeleitet werden kann. Da typische Schallquellen im Ozean hochgradig frequenzabhängig sind, wird die Wellengleichung einer Fourier Transformation unterzogen, um die Frequenzabhängigkeit einzuführen und eine Ausbreitungsgleichung zu erhalten, die die Frequenzcharakteristiken vorhersagt: die Helmholtz-Gleichung.

Das KRAKEN-Modell löst die Helmholtz-Gleichung durch Modenzerlegung und bestimmt zunächst die vertikalen Moden, die durch ein klassisches Sturm-Liouville Eigenwertproblem beschrieben werden.

Die vertikale Modennummer der Eigenfunktionen und Eigenwerte gibt die Anzahl der Nulldurchgänge im Wassertiefenintervall $[0, D]$ an. Unter Ausnutzung der vertikalen Modengleichung und einer allgemeinen Modenlösung für die Druckamplitude wird aus der

Helmholtz-Gleichung eine horizontale Modengleichung bestimmt, die eine vollständige Kopplung aller Moden beinhaltet. In der adiabatischen Näherung werden die Kopplungsmatrizen vernachlässigt, so dass ein Satz entkoppelter Gleichungen zurückbleibt, die vom Modell gelöst werden.

Das KRAKEN-Modell berechnet die Eigenwerte und Eigenfunktionen in diskreten Abständen und interpoliert dann linear auf alle gewünschten Entfernungen. Eine detaillierte Herleitung befindet sich in Lehrbüchern wie dem von Jensen et al. [6], eine kurze Zusammenfassung mit den relevanten Gleichungen ist in [7] zu finden.

Frequenzabtastung

Während gemessene Spektren und empirisch bestimmte Quellspektren typischerweise als Terzspektren vorliegen, müssen Spektren des Ausbreitungsverlustes (Transmission Loss, TL), die der KRAKEN-Algorithmus vorhersagt, zunächst in Terzspektren umgewandelt werden, bevor sie auf eine Quelle angewendet werden können. KRAKEN berechnet den TL für individuelle Frequenzen und erlaubt in der 3D Variante keine inkohärente Aufsummierung der Moden, so dass der TL hochgradig von konstruktiver und destruktiver Überlagerung betroffen ist. Innerhalb einer einzelnen Terz kann der TL um mehrere 10 dB variieren (Abbildung 3) und erfordert somit eine angepasste Strategie für die Abtastintervalle, die einen Kompromiss aus hoher Auflösung und Rechenlast bildet. Die Abtaststrategie muss den minimalen Ausbreitungsverlust berücksichtigen, da dieses Minimum den höchsten Lärmpegel bei einer Frequenz innerhalb der Terz bestimmt, und der höchste Lärmpegel innerhalb der Terz beherrscht die Gesamtlärmpegel der Terz.

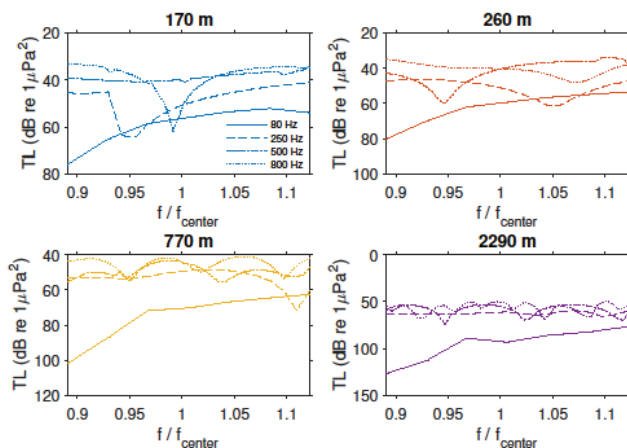


Abbildung 3: Variabilität innerhalb von vier verschiedenen Terzspektren mit den Mittenfrequenzen 80 Hz (durchgezogen), 250 Hz (gestrichelt), 500 Hz (Punktstrich), 800 Hz (gepunktet) an vier verschiedenen Entfernungen zur Quelle: 170 m (oben links), 260 m (oben rechts), 770 m (unten links), 2290 m (unten rechts). Frequenzen sind in Einheiten der Mittenfrequenz angegeben, um verschiedene Mittenfrequenzen in einer Abbildung zu vergleichen. Das Frequenz-Abtastintervall beträgt 10 Hz. Die Ordinatenachsen (TL) sind unterschiedlich skaliert.

Sowohl lineare als auch logarithmische Abtastintervalle mit 79 bzw. 81 Schritten im Frequenzbereich zwischen 20 Hz und 800 Hz wurden getestet. Der Frequenzbereich deckt alle

wichtigen Merkmale der beobachteten Spektren (Abbildung 2) ab. Für die energiereichste Terz mit einer Mittenfrequenz von 250 Hz wurden die Mittelwerte von zwei Testabtastungen mit dem TL an der Mittenfrequenz und einem Mittelwert bei hoher Auflösung (1 Hz Abtastintervall) verglichen, wobei der Mittelwert bei hoher Auflösung als Referenzwert diente. In allen Testfällen lag die Einzelfrequenzabschätzung bei der Mittenfrequenz am weitesten von der Referenz entfernt, der maximale Unterschied erreichte 5 dB. Die linearen und logarithmischen Mittelwerte wichen weniger als 1 dB von der Referenz ab, abgesehen von einem aus vier logarithmischen Mittelwerten. Alle folgenden Analysen basieren daher auf linearen Frequenzspektren mit einem Abtastintervall von 10 Hz.

Spektren

Der TL von einem ersten 3D-KRAKEN-Lauf wurde zunächst auf die beobachteten Spektren angewendet, um den Verlust zwischen den Beobachtungen in 260 m und 770 m Entfernung (Abbildung 4) vorherzusagen. Das Spektrum in 260 m Entfernung wurde als Test-Quellspektrum definiert und das Spektrum bei 770 m Entfernung war die Test-Beobachtung. Der Modell-TL zwischen Test-Quelle und Test-Beobachtung wurde als Unterschied zwischen den Modell-TL an den Positionen der Test-Quelle und der Test-Beobachtung definiert. Der TL wurde mit hoher vertikaler Auflösung, die einem Abtastintervall von 10 cm entspricht, und geringer vertikaler Auflösung, die einem Abtastintervall von 20 cm entspricht, berechnet.

Für Frequenzen über 250 Hz stimmen die Spektren sowohl bei hoher als auch bei niedriger Auflösung gut mit dem gemessenen Spektrum überein (Abbildung 4, oben). Das Maximum der spektralen Energie bei 250 Hz ist im Modell deutlich höher als in der Beobachtung. Die Gründe für diesen Abfall des modellierten TL bei 250 Hz bleiben unklar, aber unrealistische destruktive Überlagerungsmuster aufgrund mangelhafter Kenntnis der Meeresbodeneigenschaften sowie unzureichende Genauigkeit der Wassertiefe gehören zu den möglichen Erklärungen. Solche Überlagerungsmuster sind auch der wahrscheinlichste Grund für die extrem hohe Variabilität des mit hoher vertikaler Auflösung modellierten TL bei niedrigen Frequenzen, die eine Spannweite von 40 dB hat. Der TL mit niedriger vertikaler Auflösung zeigt den mit abfallender Frequenz erwarteten Abfall aufgrund der geringen Wassertiefe, die die niederfrequenten Wellen an der freien Ausbreitung hindert. Trotz der Unterschiede bleibt die Übereinstimmung zwischen modellierten und beobachteten Spektren insgesamt gut.

Aufgrund der geringen Güte der Modellläufe mit hoher vertikaler Auflösung bei niedrigen Frequenzen (vergl. Abbildung 4, oben) und der verbundenen größeren Rechenzeit wurde für Frequenzen unterhalb von 222,7 Hz die niedrige vertikale Auflösung gewählt und nur für Frequenzen über 222,7 Hz erhöht. Eine Zusammenfassung aller Parameter des KRAKEN Algorithmus befindet sich in [7].

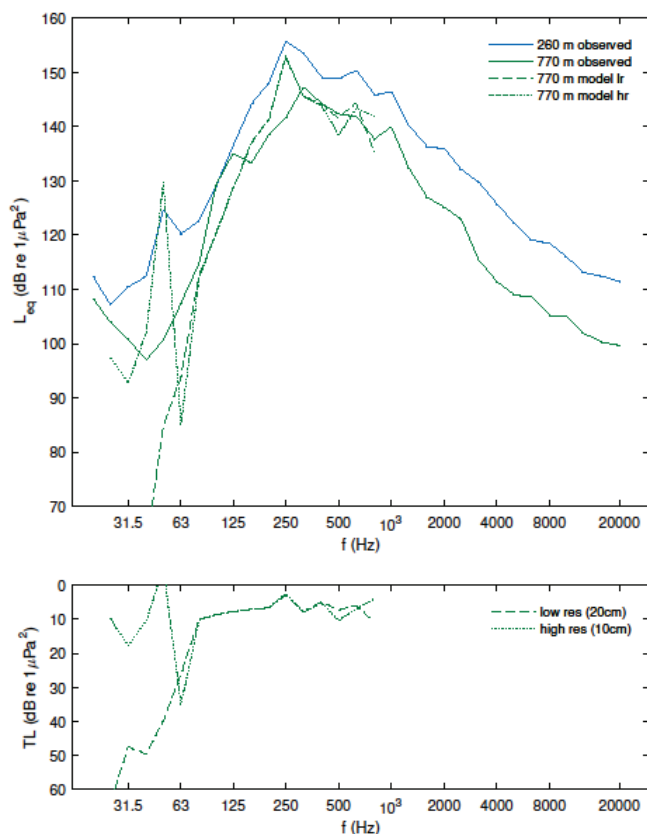


Abbildung 4: Modellierte Spektren in 770 m Entfernung von der Ramschallsposition mit dem Spektrum bei 260 m als Quelle. Die obere Abbildung zeigt das Testquellspektrum (blau) und die modellierten Spektren zusammen mit dem beobachteten Spektrum (grün, oben). Der modellierte TL ist in der unteren Abbildung dargestellt. Hohe und niedrige Auflösung entsprechen vertikalen Abtastintervallen von 10 cm (gepunktet) und 20 cm (gestrichelt). Der TL stammt aus einem 3-D KRAKEN-Lauf mit Quelle am Ort der Ramschallsposition.

Karten von akustischen Parametern

Der KRAKEN-Algorithmus sagt den TL auf einem vordefinierten Gitter in Zylinder-Koordinaten voraus, das es erlaubt, TL-Muster in beliebiger Tiefe und für jede beliebige Frequenz zu analysieren. Interpolation zwischen den Tiefen liefert Terrain-folgende Karten des TL.

Der TL muss allerdings auf ein Quellspektrum angewendet werden, um den Abfall der energiereichsten Emissionen zu analysieren und den lokalen äquivalenten Dauerschallpegel (L_{eq}), der ein zeitliches Mittel des gemessenen Pegels ist, vorherzusagen. Der berechnete TL wurde daher auf ein empirisch ermitteltes Ramschall-Quellspektrum angewendet, und der resultierende spektrale L_{eq} wurde dann integriert, um den L_{eq} zu erhalten.

Der modellierte L_{eq} bei 5 m Wassertiefe (Abbildung 5) reflektiert die generellen Strukturen der zugrundeliegenden Einzelfrequenz-Abschätzungen, die jedoch aufgrund der Integration über alle Frequenzen stark geglättet sind.

Die Hauptausbreitungswege liegen quer über und entlang des Kanals. Der starke TL auf den flachen Flanken ist mit einer reduzierten Anzahl von vertikalen Moden verbunden, die für den Energietransport zur Verfügung stehen und den

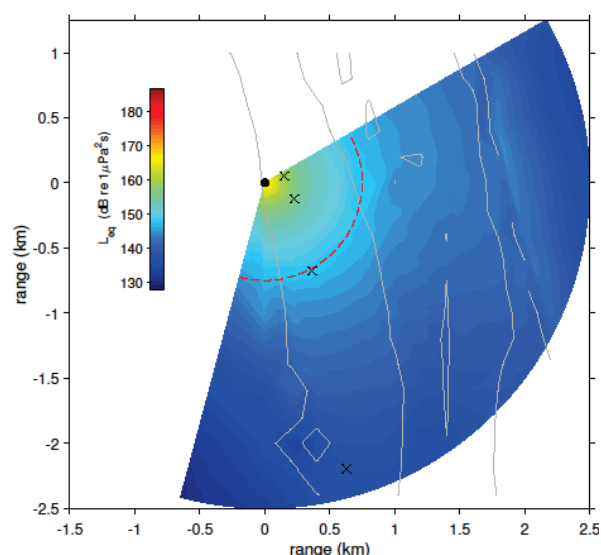


Abbildung 5: L_{eq} in 5 m Wassertiefe basierend auf einem empirischen Ramschallspektrum mit einem L_{eq} von 200 dB. Der L_{eq} wurde aus Terzspektren mit Mittenfrequenzen von 31.5 Hz bis einschließlich 630 Hz bestimmt. Die Quelle wird durch einen Punkt im Ursprung markiert, Kreuze repräsentieren die Positionen der gemessenen Spektren, und eine rote Linie zeigt eine Entfernung von 750 m von der Quelle an.

Anstieg der Grenzfrequenz reflektieren: Niederfrequente Wellen können den Kanal nicht verlassen und sich nicht im flachen Wasser ausbreiten. Auf der östlichen flachen Flanke ist der Gradient des L_{eq} sogar an der Bathymetrie ausgerichtet, so dass Linien konstanten L_{eq} parallel zu den Linien konstanter Tiefe sind.

Die Bathymetrie verzerrt das akustische Feld im Kanal und erlaubt Ausbreitung quer zum Kanal in größere Entfernungen als entlang des Kanals, was zu kleineren Gradienten quer zum Kanal führt als entlang der westlichen Flanke des Kanals (0.5-1.0 km Ost).

Vergleich mit Messdaten

Der modellierte Gradient des L_{eq} bei 5 m Wassertiefe ähnelt sehr dem gemessenen L_{eq} bei ungefähr gleicher Wassertiefe (Abbildung 6). Im Modell wird ein Quell- L_{eq} von 200 dB angenommen, um mit den Messungen übereinzustimmen, so dass die Steigung der Kurven das eigentliche Testkriterium ist. Der modellierte TL ist etwas kleiner als der beobachtete, was zu einem modellierten L_{eq} führt, der am Anfang der Messung kleiner und am Ende der Messung größer als der gemessene L_{eq} ist. Beide Abschätzungen stimmen jedoch innerhalb eines Unsicherheitsbereiches von ± 3 dB überein.

Gründe für die Abweichungen zwischen Messung und Modell lassen sich im Modellsetup finden. Wie jeder andere Vorhersagealgorithmus hat die KRAKEN-Lösung den großen Nachteil einer hohen Sensitivität bezüglich der Meeresbodenparameter Dichte, Schallgeschwindigkeit und Dämpfung jeweils für P- und S-Wellen. Eine einfache Veränderung der P-Wellen-Dämpfung von $0.7 \text{ dB } \lambda^{-1}$ auf $0.4 \text{ dB } \lambda^{-1}$ führt zu einer signifikanten Änderung der Steigung, und modellierter und gemessener L_{eq} stimmen nicht mehr überein. Die Meeresbodenparameter sind typischerweise unbekannt, und da sie sehr stark variieren, könnte auch eine

auf Tatsachen und Erfahrung beruhende Annahme unzureichend genau sein und zu ungenauen Vorhersagen des akustischen Feldes führen.

Trotz dieser Einschränkungen hat der KRAKEN-Algorithmus in dieser Studie die gemessenen TL mit guter Genauigkeit vorhergesagt. Weitere Fallstudien wären hilfreich, um den KRAKEN-Algorithmus in ebener Bathymetrie weiter als genaues Vorhersagemodell zu qualifizieren und die gewählten Meeresbodenparameter zu bestätigen.

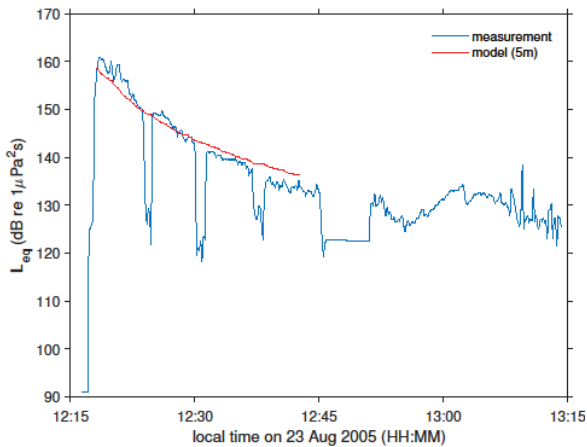


Abbildung 6: Gemessener (blau) und modellierter (rot) L_{eq} . Die Messungen wurden von einem driftenden Schiff südlich der Quelle bei annähernd konstanter Wassertiefe aufgenommen (siehe Fahrweg des Schiffes in Abbildung 1). Die Vorhersage des KRAKEN Algorithmus basiert auf der Form eines empirisch bestimmten Spektrums und einer Quellstärke von 200 dB, um mit den Messungen übereinzustimmen. Die Dämpfung im Sediment betrug $0.7 \text{ dB } \lambda^{-1}$. Beide Kurven sind gegen die Verdriftungszeit des Schiffes aufgetragen.

Fazit

Der KRAKEN-Algorithmus zur Modenzerlegung der Helmholtz-Gleichung wurde erfolgreich auf Anwendbarkeit in einer Flachwasserumgebung getestet. Er sagte Ausbreitungsverluste in Bereich des Jade Weser Ports voraus, die innerhalb typischer Unsicherheiten mit den Messungen übereinstimmen. Die Vorhersage war jedoch sehr sensitiv gegenüber der Meeresbodenparameter, so dass es zu einer Aufhebung dieser Übereinstimmung kommen kann.

Das Beispiel am Jade Weser Port illustriert das Potential eines akustischen 3D Feldes für die detaillierte Analyse: Karten auf beliebigen Tiefenebenen, vertikale Profile und spektrale Analyse an beliebigen Orten für Ausbreitungsverluste, äquivalente Dauerschallpegel oder andere akustische Größen wie dem Einzelereignis-Schalldruckpegel.

Ein Vergleich verschiedener Frequenz-Abtastungsintervalle zeigte, dass die ideale Abtastung linear und so hoch wie möglich sein sollte, um die Variabilität innerhalb der Terzspektren zu erfassen. Es ist nicht ausreichend, die Ausbreitungsverluste für die Mittenfrequenzen zu berechnen.

Der KRAKEN-Algorithmus hat sich insgesamt als gutes Werkzeug zur Analyse von Schallausbreitung im Flachwasser erwiesen, sofern Informationen über die Meeresbodeneigenschaften oder Referenzmessungen verfügbar sind. Die detaillierte Vorhersage des 3-dimensionalen akustischen Feldes liefert eine gute Basis für Schallpegelprognosen in komplexer Bathymetrie und zur Unterstützung bei der Planung von Schallminderungsmaßnahmen. Vorhergesagte Schallpegel können sowohl Firmen als auch Behörden bei der Festlegung idealer Positionen für Überwachungsmessungen unterstützen. Eine detaillierte Analyse der Tiefenstruktur des akustischen Feldes könnte ferner einen europäischen Ansatz zur Vereinheitlichung der Standards für die akustische Überwachung von Rammarbeiten und anderem Unterwasserlärm unterstützen.

Literatur

- [1] BSH: Messvorschrift für Unterwasserschallmessungen, Aktuelle Vorgehensweise mit Anmerkungen Anwendungshinweise, Oktober 2011
URL: <http://www.bsh.de/de/Produkte/Buecher/Standard/Messvorschrift.pdf>
- [2] TNO: Standard for measurement and monitoring of underwater noise, Part II: procedures for measuring underwater noise in connection with offshore wind farm licensing, TNO-DV 2011 C251, TNO report, September 2011
URL: http://www.informatiehuismarien.nl/images/Standard%20for%20measurement%20and%20monitoring%20of%20underwater%20noise%20Part%20II_2037.pdf
- [3] Porter M.B. (2001), The KRAKEN Normal Mode Program, SACLANT Undersea Research Centre, 17.05.2001
URL: <http://oalib.hlsresearch.com/Modes/kraken.pdf>
- [4] ISD, itap & DEWI: Standardverfahren zur Ermittlung und Bewertung der Belastung der Meeresumwelt durch Schallimmission von Offshore-Windenergieanlagen, Abschlussbericht zum BMU-Forschungsvorhaben 0329947, März 2007
- [5] BSH, Valerius, J.: Dokumentation sedimentologischer Produkte des Funktionalen Bodenmodells des Projekts AufMod, Dateiformat: Textfiles (CSV, XYZ), 30.06.2013
- [6] Jensen F.B., Kuperman W.A., Porter M.B., Schmidt H. Computational Ocean Acoustics, Springer, 2011
- [7] Stöber, U., Wilts, F., Neumann, T.: Predicting Underwater Piling Noise Propagation Based on the Helmholtz Equation Using the KRAKEN Normal Mode Algorithm, DEWI Magazin 47 (2015), ISSN 0946-1787