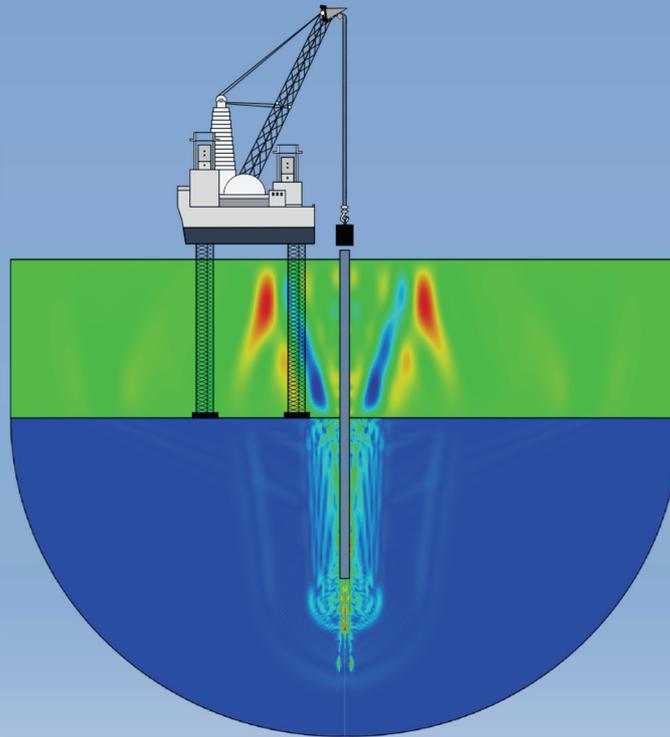


Prognose des Unterwasser-Rammschalleintrages für das Bauvorhaben ARCADIS Ost 1



Auftraggeber: Parkwind Ost GmbH
Am Sonnenplatz 1
61118 Bad Vilbel

Bearbeiter: Novicos GmbH
Veritaskai 8
21079 Hamburg
Dr. S. Lippert, H. Marckmann

Sachstandsbericht: 19-012-38-01-02-DE (Rev. 02)
Hamburg, 24. August 2019

Berichtsumfang: 53 Seiten inkl. Deckblatt und Anhang

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	2
1.1 Motivation.....	2
1.2 Aufgabenstellung	2
2. Grundlagen.....	4
3. Modellaufbau	6
4. Relevante Eingangsparameter	10
4.1 Gründungspfähle	10
4.2 Impulsramme	11
4.3 Wassersäule	12
4.4 Boden.....	13
5. Ergebnisse der Prognose für Monopfahl-Design 1	15
5.1 Einzelereignispegel L_E	15
5.2 Spitzenpegel L_{peak}	19
6. Ergebnisse der Prognose für Monopfahl-Design 2	24
6.1 Einzelereignispegel L_E	24
6.2 Spitzenpegel L_{peak}	28
7. Hinweise zur Prognosegenauigkeit	33
8. Schallminderung.....	35
8.1 Primäre Schallminderungsmaßnahmen	35
8.2 Sekundäre Schallminderungsmaßnahmen	36
9. Interpretation und Zusammenfassung	40
Literatur	49
Appendix A – Revisions-Historie	52

1. Einleitung

1.1 Motivation

Im Rahmen der Errichtung des Offshore-Windparks ARCADIS Ost 1 in der Ostsee ist die Impulsrammung von Stahlpfählen geplant. Bereits vor Baubeginn sind die während des Errichtungsprozesses zu erwartenden Hydroschallimmissionen zu berücksichtigen, welche mit den vorliegenden Untersuchungen prognostiziert werden.

1.2 Aufgabenstellung

Die Firma *Novicos GmbH* wurde von der *Parkwind Ost GmbH* beauftragt, eine Prognose bezüglich der im Rahmen der Fundamentgründungen zu erwartenden Hydroschallpegel für den Offshore-Windpark ARCADIS Ost 1 zu erstellen, welcher im Gebiet des Küstenmeeres der deutschen Ostsee innerhalb der 12-Seemeilen-Zone errichtet werden soll (Abbildung 1). Ziel dieser Untersuchungen ist es, für den Einzelereignispegel (L_E) sowie den Spitzendruckpegel (L_{peak}) jeweils eine Prognose an der StUK4-relevanten Position [1] in einer Entfernung von 750m zum Pfahl in 2m über dem Meeresgrund abzugeben.

Der Windpark umfasst 28 Offshore-Windenergieanlagen (OWEA), welche auf Monopfählen gegründet werden sollen, sowie eine Umspannplattform (USP), siehe Abbildung 2. Die in diesem Bericht enthaltenen Berechnungen erfolgen für zwei charakteristische Lokationen (Boden-Setup 1 und 2) sowie zwei verschiedene Monopfahl-Designs mittels eines numerischen Modells ([Kap. 3](#)), welches die zum Zeitpunkt der Prognose-Erstellung verfügbaren standort-/projektspezifischen Eingangsparameter berücksichtigt, die vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt wurden ([Kap. 4](#)).

Im ersten Teil der Untersuchung wird der Rammschalleintrag L_E und L_{peak} ohne Schallschutz für Monopfahl-Design 1 ([Kap. 5](#)) sowie für Monopfahl-Design 2 ([Kap. 6](#)) betrachtet. Im zweiten Teil des Berichtes werden Hinweise zur Prognosegenauigkeit ([Kap. 7](#)) sowie ein genereller Überblick möglicher Schallminderungsmaßnahmen gegeben ([Kap. 8](#)), bevor die Ergebnisse schließlich zusammengefasst werden ([Kap. 9](#)).

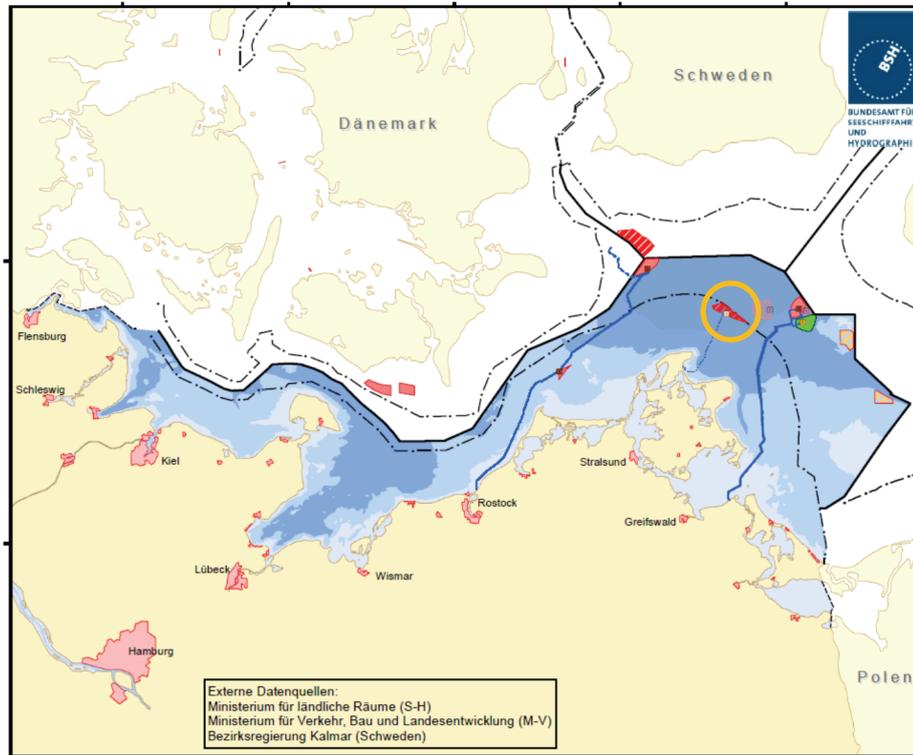


Abbildung 1: Lage des Offshore-Windparks ARCADIS Ost 1 im Gebiet des Küstenmeeres der deutschen Ostsee innerhalb der 12-Seemeilen-Zone (Quelle: BSH 2018).

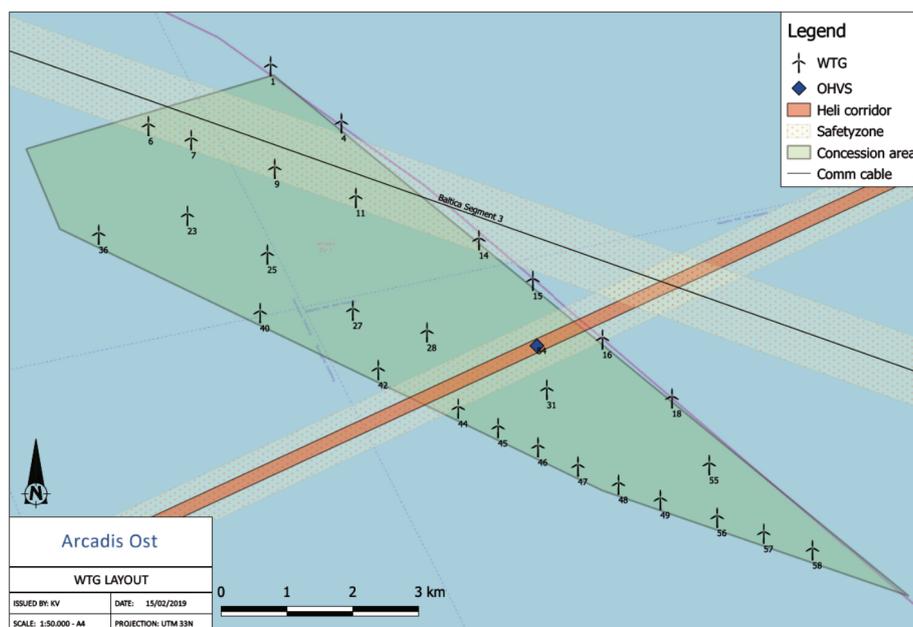


Abbildung 2: OWEA-Lokationen † und USP ◆ innerhalb des Offshore-Windparks ARCADIS Ost 1 (Quelle: Parkwind Ost).

2. Grundlagen

Sämtliche in diesem Bericht gemachten Pegelangaben in Dezibel (dB) beziehen sich auf den in der Unterwasserakustik gebräuchlichen Referenzdruck von 1µPa.

Die folgenden StUK4-relevanten Pegelgrößen und Begrifflichkeiten finden dabei entsprechend ihrer Definitionen gemäß *Müller und Zerbs* [2] Verwendung:

Spitzenpegel (L_{peak}):

Der L_{peak} ist ein Maß für die auftretenden Schalldruckspitzen.

$$L_{peak} = 20 \cdot \log \left(\frac{|p_{peak}|}{p_0} \right) \quad (1)$$

Hierbei stellt p_{peak} den maximalen positiven oder negativen Schalldruck dar, während p_0 den Referenzdruck von 1µPa angibt.

Der L_{peak} wird oftmals auch gleichbedeutend als SPL oder SPL_{peak} bezeichnet.

Einzelereignispegel (L_E):

Der L_E eines Rammschlages gibt den äquivalenten Dauerschallpegel eines kontinuierlichen Schallsignals gleicher Schallenergie von 1s Dauer wieder.

$$L_E = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{T_0} \int_{T_1}^{T_2} \frac{p(t)^2}{p_0^2} dt \right) \quad (2)$$

Hierbei stellt T_0 den Bezugszeitraum von 1s dar, während T_1 und T_2 die Anfangs- und die Endzeit der Mittelung wiedergeben. Der zeitliche Druckverlauf innerhalb des Mittelungszeitraumes wird durch $p(t)$ repräsentiert, wobei p_0 abermals für den Referenzdruck von 1µPa steht.

Der L_E wird oftmals auch gleichbedeutend als SEL bezeichnet.

Anmerkung zur Betrachtung von Perzentilpegeln:

Um die im Rahmen des Bau-Monitorings erhobenen Messdaten sinnvoll auswerten zu können, sehen die bestehenden Messvorschriften in der Regel eine Betrachtung auf Basis von Perzentilpegeln vor. So stellt beispielsweise der $L_{E,05}$ den Perzentilpegel der Einzelschlaganalyse dar, der bei 5% aller Rammschläge während der Errichtung eines Pfahles überschritten wird (d.h. bei 95% aller Rammschläge ist der gemessene L_E kleiner bzw. gleich dem $L_{E,05}$). Die entstehenden Schwankungen der Pegelgrößen werden dabei maßgeblich durch die fortschreitende Eindringung des Pfahles und die Variation der Rammenergie während der Rammung verursacht, wobei die maximalen Werte für die Rammenergie und die stärkste Bodenbindung typischerweise bei Annäherung an die Endtiefe anliegen.

Bei der Verwendung empirischer Vorhersagemodelle, die in der Regel auf einer Prognose der 50%-Perzentilpegel basieren, wird zur Ermittlung des $L_{E,05}$ oftmals eine zusätzliche Addition von 2dB auf den $L_{E,50}$ vorgenommen, um die erfahrungsgemäß auftretenden Unterschiede im laufenden Bau-Monitoring zwischen $L_{E,50}$ und $L_{E,05}$ zu berücksichtigen.

Weil es sich bei dem vorliegenden Prognoseansatz jedoch nicht um ein statistisches Verfahren handelt, sondern die Pegelgrößen gezielt für die jeweiligen Randbedingungen (Rammenergie, Pfahleindringung, etc.) berechnet und somit echte L_E für einen Einzelschlag betrachtet werden, ist eine Angabe von Perzentilpegeln nicht sinnvoll. Die in dieser Prognose durchgeführten Berechnungen berücksichtigen jeweils die größten zu erwartenden Pegel, da die Untersuchungen unter den aus schalltechnischer Sicht ungünstigsten Bedingungen hinsichtlich Rammenergie und Eindringtiefe vorgenommen werden (siehe [Kap. 4](#)). Bei dem vorhergesagten L_E handelt es sich daher im Gegensatz zu empirischen Vorhersagemodellen nicht um den $L_{E,50}$. Eine zusätzliche Addition von 2dB auf den prognostizierten Wert, wie bei empirischen Verfahren üblich, ist daher nicht notwendig und physikalisch auch nicht plausibel.

3. Modellaufbau

Zur Modellierung der Schallausbreitung infolge des Rammvorganges wird die Finite-Elemente-Methode (FEM) verwendet. Diese stellt ein mathematisches Diskretisierungsverfahren für Differentialgleichungen (DGL) dar, durch welches die DGL in ein lineares Gleichungssystem überführt werden und somit deren Lösung numerisch approximiert wird. Anwendung findet dieses Verfahren in vielen Bereichen der Physik, so auch in der Strukturmechanik und der Akustik. Eine besondere Eignung zeigt dieses numerische Verfahren speziell auch für die Berechnung von gekoppelten Problemen wie z.B. der vibro-akustischen Problemstellung, die der Schallabstrahlung während einer Offshore-Pfahlrammung zu Grunde liegt (siehe auch *von Estorff et al.* [3] und *Lippert et al.* [4]).

Für die Prognose des aus der Rammung resultierenden Schalleintrages in die Wassersäule wird die Berechnung bei dem hier verwendeten Ansatz in zwei verschiedene Schritte unterteilt, die auf unterschiedlichen Modellen basieren. Dieses Vorgehen gewährleistet eine hohe Genauigkeit bei akzeptablen Rechenzeiten.

Im ersten Schritt wird anhand eines FEM-Modells, welches den Pfahl, die Rammmasse, die Rammhaube sowie die Kontaktparameter sehr detailliert beschreibt, die von der Ramme während des Rammschlages in den Pfahl eingeleitete Schlagkraft berechnet. Hierbei wird auf den in *Heitmann et al.* [5,6] beschriebenen Ansatz zurückgegriffen. Gegenüber den herkömmlichen Näherungsverfahren, die oftmals zur Bestimmung der Schlagkraft verwendet werden (z.B. nach *Deeks und Randolph* [7]), wird dadurch eine erheblich genauere Darstellung der auf den Pfahlkopf wirkenden Kraft möglich. Unter anderem werden neben der Rammmasse auch die Geometrie und das Gewicht der Rammhaube im Modell explizit berücksichtigt. Die verwendeten Kontaktparameter, die einen maßgeblichen Einfluss auf die Höhe und den Verlauf der Schlagkraft haben, sind speziell für Offshore-Pfahlrammungen bestimmt worden. Durch diesen Modellierungsansatz können neben dem generellen Kraftverlauf auch die hochfrequenten Kraftanteile sehr genau abgebildet werden, was eine wichtige Voraussetzung für die korrekte Ermittlung des resultierenden Hydroschalleintrages ist.

Die im ersten Schritt ermittelte Schlagkraft wird dann als Eingangs-Randbedingung für ein weiteres FEM-Modell verwendet, welches aus dem Pfahl, dem Boden und dem Wasser besteht. Dieses Vorgehen erlaubt es, die Ramme und deren Anbindung an den Pfahl nicht mehr als separate Körper im Modell berücksichtigen zu müssen, sondern diese durch eine korrespondierende Schlagkraft zu ersetzen. Der grundsätzliche Aufbau dieses Modells, wie z.B. dessen 2D-Rotationssymmetrie, ist an die Arbeiten von *Reinhall und Dahl* [8] angelehnt und berücksichtigt Frequenzanteile bis zu einer maximalen Frequenz von 1kHz. Eine Beschränkung auf den Frequenzbereich bis 1kHz ist insbesondere auch durch die großen Durchmesser der Offshore-Pfähle gerechtfertigt, deren hauptsächlicher Schalleintrag in die Wassersäule äußerst tieffrequent mit einem Maximum im Bereich um 100Hz erfolgt.

Der beschriebene Ansatz wurde im verwendeten Modell in verschiedenen Bereichen erweitert und angepasst, um eine hohe Vorhersagegüte zu gewährleisten. So wird z.B. der Boden, der als sekundärer Übertragungspfad (Pfahl → Boden → Wasser) insbesondere bei der Betrachtung einer in die Wassersäule eingebrachten Schallschutzmaßnahme an Bedeutung gewinnt, nicht durch ein äquivalentes Fluid, sondern durch linear-elastische Elemente beschrieben. Hierdurch wird neben einer Ausbreitung der auftretenden Druckwellen auch die Ausbildung seismischer Scherwellen im Modell berücksichtigt. Da der linear-elastische Ansatz die Energieverluste, welche durch plastische Vorgänge bei der Pfahl-Boden-Interaktion auftreten, nicht abbilden kann, werden äquivalente Rayleigh-Dämpfungsparameter zur Berücksichtigung der Verluste verwendet. Die Parameter wurden dabei in einer separaten Rechnung nach *Heitmann et al.* [9] bestimmt, welche auf einem Wave Equation Analysis of Pile Driving (WEAP) Ansatz basiert. Hierzu wurde das konventionelle WEAP-Verfahren zusätzlich um die radialen Verschiebungen der Pfahloberfläche erweitert [9].

Die komplexe Kopplung von Pfahl und Boden erfolgt bei dem für die Prognose verwendeten Modell schließlich durch einen nicht-linearen Kontakt (siehe *Milatz et al.* [10]), wodurch eine genauere Abbildung der Energieübertragung vom Pfahl in den Boden ermöglicht wird.

An einigen Rändern des Berechnungsraumes (siehe [Kap. 4.3](#) und [4.4](#)) werden abschließend nicht-reflektierende Randbedingungen aufgebracht, um jeweils ein reflektionsfreies Auslaufen der durch den Rammschlag verursachten Wellen sowohl in der Wassersäule als auch im Boden zu gewährleisten.

Die genannten Ansätze und Verfahren, die dem Modellaufbau mit und ohne Schallschutzsystem zu Grunde liegen, sind in umfangreichen Offshore-Messkampagnen abgeglichen worden und erlauben eine zuverlässige Vorhersage des Rammschalleintrages in die Wassersäule. Der seitens Novicos verwendete Modellierungsansatz entspricht dem finalen Stand des Vorgehens, welches im Projekt BORA [11] erfolgreich entwickelt worden ist. Neben den Windparks BARD Offshore 1 (Tripiles) und Global Tech I (Tripod), welche vergleichsweise geringe Pfahldurchmesser sowie im Fall des Tripods getauchte Pfähle umfassten, erfolgte die Validierung der Modelle auch für große Monopfähle im Windpark Borkum Riffgrund 01. Die drei genannten Windparks befinden sich alle in der Deutschen Bucht und weisen Wassertiefen zwischen 20m und 40m auf. Insgesamt konnten mit den numerischen Modellen die gemessenen Pegel mit hoher Genauigkeit reproduziert werden. Die grundsätzliche Eignung des Modells wurde dabei für verschiedenste Pfahldurchmesser nachgewiesen, z.B. anhand eines Monopfahls im Windpark Borkum Riffgrund 01 (berechneter SEL in 750m: 175.0dB; gemittelter gemessener SEL aus drei Positionen auf dem 750m-Umkreis: 174.1dB), siehe auch *Heitmann et al.* [12]. Für BARD Offshore 1 konnte mit dem gleichen Modellierungsansatz eine ähnlich hohe Genauigkeit erzielt werden (berechneter SEL in 750m: 177.6dB; gemessener SEL an drei Positionen auf dem 750m-Umkreis: 177/180/179dB), siehe auch *Heitmann et al.* [13]. Auch für den speziellen Anwendungsfall getauchter Pfähle werden die Schallpegel sehr genau prognostiziert. Entsprechende Validierungsergebnisse finden sich u.a. für die Tripod-Errichtung im Windpark Global Tech I im Abschlussbericht des BORA-Projektes [11] sowie für die Jacketpfähle der BorWin3-Konverterplattform in *Lippert et al.* [14], wobei gezeigt werden konnte, dass sich der Einfluss der während der Rammung stetig abnehmenden freien Pfahlänge auf die Schallpegel exakt wiedergeben lässt. Das Modell kann daher für verschiedene Randbedingungen hinsichtlich Pfahldurchmesser und Wassertiefe als

valide angesehen werden. Detaillierte Informationen zur Modellbildung und zur Validierung können dem Abschlussbericht des BORA-Projektes [11], *Heitmann et al.* [5,6,12,13], *Lippert et al.* [14] sowie *Heitmann* [15] entnommen werden.

4. Relevante Eingangsparameter

4.1 Gründungspfähle

Das Design des Pfahls hat einen grundlegenden Einfluss auf dessen dynamisches Verhalten in Wechselwirkung mit der Impulsramme sowie den ihn umgebenden Medien und bestimmt somit maßgeblich auch dessen Schallabstrahlungs-Charakteristik.

Im Rahmen der vorliegenden Prognose wurden zwei Pfahldesigns berücksichtigt, welche als repräsentativ für die 28 OWEA-Lokationen betrachtet werden können:

- Monopfahl-Design 1: Konzeptdesign Ø 10m für die Verwendung mit einem Übergangsstück (Transition Piece) nach [16]
- Monopfahl-Design 2: Konzeptdesign Ø 10m für die Verwendung ohne Übergangsstück (Transition Piece) nach [17]

Monopfahl-Design 1 liegen dabei die folgenden Parameter zugrunde:

- Pfahltyp: Monopfahl
- Pfahllänge L [m]: 105.4
- Außendurchmesser über Länge L [m]: 6.5 ($0m < L \leq 6.0m$)
6.5 \rightarrow 10.0 ($6.0m < L \leq 42.0m$)
10.0 ($42.0m < L \leq 105.4m$)
- Wandstärke über Länge L [mm]: 82 ($0m < L \leq 6.0m$)
82 \rightarrow 62 ($6.0m < L \leq 20.0m$)
62 \rightarrow 72 ($20.0m < L \leq 42.0m$)
72 ($42.0m < L \leq 105.4m$)
- Einbindelänge [m]: 57.2 (Endtiefe)
- Stick-up über Wasseroberfläche [m]: 3.0

Monopfahl-Design 2 berücksichtigt die folgenden Dimensionen:

- Pfahltyp: Monopfahl
- Pfahllänge L [m]: 118.2
- Außendurchmesser über Länge L [m]: 6.5 ($0\text{m} < L \leq 15.0\text{m}$)
6.5 \rightarrow 10.0 ($15.0\text{m} < L \leq 51.0\text{m}$)
10.0 ($51.0\text{m} < L \leq 118.2\text{m}$)
- Wandstärke über Länge L [mm]: 80 \rightarrow 82 ($0\text{m} < L \leq 15.0\text{m}$)
82 \rightarrow 62 ($15.0\text{m} < L \leq 29.0\text{m}$)
62 \rightarrow 72 ($29.0\text{m} < L \leq 51.0\text{m}$)
72 ($51.0\text{m} < L \leq 105.4\text{m}$)
- Einbindelänge [m]: 61.0 (Endtiefe)
- Stick-up über Wasseroberfläche [m]: 12.0

Für die Pfähle wurde dabei jeweils die maximale Einbindetiefe (Pfahl auf Endtiefe) berücksichtigt, da diese aufgrund der maximalen Bodenanbindung des Pfahles und der dementsprechend hohen notwendigen Rammenergie den aus akustischer Sicht ungünstigsten Fall mit den höchsten Schallpegeln darstellt.

Zur Erstellung des FEM-Modells wurden die äußeren Abmessungen der Pfähle aus den jeweiligen Pfahldesigns übernommen. Hinsichtlich der Wandstärke erfolgte gegenüber den zahlreichen Sprüngen am realen Pfahl eine gewisse Glättung gemäß der oben gemachten Angaben, deren Einfluss auf das Berechnungsergebnis zu vernachlässigen ist (siehe auch *Heitmann* [12]).

4.2 Impulsramme

Das Design der Impulsramme hat einen grundlegenden Einfluss auf den zeitlichen Verlauf der am Pfahlkopf eingeleiteten Schlagkraft. Die Impulsdauer sowie dessen Frequenzgehalt hängen maßgeblich von der Form und Masse der eingesetzten Impulsramme und der verwendeten Rammhaube (z.B. Anvil, Follower) ab.

Für die Prognose wurde ein IHC S-4000 Hammer mit zugehörigem Anvil und Anvil Ring berücksichtigt:

- Rammmasse [t]: 200
- Anvil Masse [t]: 158
- Anvil Ring Masse [t]: 72
- Verwendete Rammenergie [kJ]: 3000
- Max. Rammenergie [kJ]: 4000

4.3 Wassersäule

Das Baugebiet weist i.d.R. gut durchmischte Brackwasserverhältnisse mit vergleichsweise geringer Salinität auf. Da somit die Ausbildung eines für die Modellierung relevanten akustischen Wellenkanals im Frequenzbereich bis 1kHz im Allgemeinen ausgeschlossen werden kann, wird auf die Annahme einer gesonderten Wasserschichtung verzichtet und die Wassersäule näherungsweise als ein homogenes Fluid mit einheitlichem Salzgehalt und einheitlicher Temperatur angenommen. Aufgrund der geringen Wassertiefen wird zudem der Einfluss des mit der Tiefe zunehmenden hydrostatischen Drucks auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit hydroakustischer Wellen als gering eingeschätzt. Daraus resultierend wird diese als konstant angenommen. Weiterhin wird die Wasseroberfläche aufgrund des hohen akustischen Impedanzkontrastes zwischen Wasser und Luft als totalreflektierend betrachtet. An der seitlichen Berechnungsraumgrenze wurde hingegen eine nicht-reflektierende Randbedingung aufgebracht, um ein reflektionsfreies Auslaufen der Schallwellen zu gewährleisten. Die folgenden Parameter wurden im Modell zur Beschreibung der Wassersäule hinterlegt:

- Dichte [kg/m^3]: 1027
- Schallgeschwindigkeit im Wasser [m/s]: 1507
- Wassertiefe [m]: 45.2

4.4 Boden

Die Ableitung eines charakteristischen Bodenmodells für das Baugebiet erfolgte aufgrund der verfügbaren Baugrund- und Gründungsgutachten von *Arcadis* [18], *Nautik Nord* [19] und *Fraunhofer IWES* [20] sowie der seitens *Parkwind* [21] erwarteten Stratigraphie und ist in Einklang mit den seitens *IHC* [22] in der Rammbarkeitsanalyse verwendeten Bodeneigenschaften. Sämtliche Dokumente wurden seitens des Auftraggebers zur Verfügung gestellt.

Aufgrund des vergleichsweise homogenen Bodenaufbaus im Baugebiet konnten zwei Bodenmodelle (Boden-Setup 1 und 2) definiert werden, welche als repräsentativ für alle 28 Monopfahl-Standorte angesehen werden können. Da keine reflexionsseismischen Daten im Hinblick auf die Ausbreitungsgeschwindigkeiten in den einzelnen Schichten vorlagen, wurden die Bodenparameter anhand von Erfahrungswerten aus anderen Windparks ermittelt.

Die für die Prognose verwendeten verallgemeinerten Bodenmodelle sind in Tabelle 1 und Tabelle 2 dargestellt, wobei Δz jeweils die Schichtdicke, v_p die Longitudinalwellengeschwindigkeit, v_s die Transversalwellengeschwindigkeit und ρ die Dichte bezeichnet. Die seitlichen Berechnungsraumgrenzen sowie die Unterkante des Halbraumes wurden mit nicht-reflektierenden Randbedingungen versehen, um ein reflektionsfreies Auslaufen der Bodenwellen sicher zu stellen. Für jedes Boden-Setup wurde in den Berechnungen jeweils ein Szenario mit geringer sowie mit hoher Bodendämpfung berücksichtigt.

Tabelle 1: Boden-Setup 1

Type	Δz [m]	v_p [m/s]	v_s [m/s]	ρ [kg/m ³]
Schlick	4.9	1525	130	1600
Weichsediment	5.6	1650	200	1750

Beckenton	11.4	1800	270	1900
Geschiebemergel	4.7	1830	450	2270
Kreide1	5.0	2100	1000	1920
Kreide2	Halbraum	2500	1500	1950

Tabelle 2: Boden-Setup 2

Type	Δz [m]	v_p [m/s]	v_s [m/s]	ρ [kg/m ³]
Schlick	7.6	1525	130	1600
Weichsediment	11.8	1650	200	1750
Beckenton	13.5	1800	270	1900
Geschiebemergel	6.6	1830	450	2270
Kreide1	5.0	2100	1000	1920
Kreide2	Halbraum	2500	1500	1950

5. Ergebnisse der Prognose für Monopfahl- Design 1

Hinweis: Sämtliche angegebene Ergebniswerte wurden gemäß StUK4 für eine Referenzhöhe von 2m über dem Meeresgrund ermittelt.

Für Monopfahl-Design 1 wurden der Einzelereignispegel L_E sowie der Spitzenpegel L_{peak} für Boden-Setup 1 und Boden-Setup 2 ohne Verwendung einer Schallminderungsmaßnahme ermittelt, wobei jeweils ein Szenario mit geringer sowie mit hoher Bodendämpfung berücksichtigt wurde. Die Untersuchungen basieren auf der in [Kap. 4](#) aufgeführten Kombination von Pfahl, Boden und Impulsramme.

5.1 Einzelereignispegel L_E

In Abbildung 3 und Abbildung 4 ist die Entwicklung des Einzelereignispegels L_E für beide Boden-Setups in einer Entfernung bis zu 1km vom Pfahl dargestellt. Eine detailliertere Darstellung des Bereiches zwischen 700m und 800m kann Abbildung 5 und Abbildung 6 entnommen werden. Die Skalierung des L_E in Abhängigkeit der verwendeten Rammenergie ist in Abbildung 7 und Abbildung 8 enthalten.

Abhängig von dem verwendeten Bodendämpfungs-Szenario (gering/hoch) ergeben sich in 750m Abstand zum Pfahl Einzelereignispegel L_E von 182.7/181.2dB (Boden-Setup 1) und von 180.2/178.4dB (Boden-Setup 2). Für das Szenario mit geringer Bodendämpfung ergeben sich dabei erwartungsgemäß jeweils die höheren Pegel.

Aufgrund der spezifischen Eigenschaften des Wellenleiters ergibt sich durch Interferenzeffekte mit zunehmender Entfernung zum Pfahl nur im Mittel ein logarithmisches Abklingverhalten der Pegel. In der Praxis lassen sich hingegen sowohl in Messungen als auch in numerischen Berechnungen starke Schwankungen um die Abklingkurve mit ausgeprägten lokalen Minima und Maxima beobachten (siehe Abbildung 3 und Abbildung 4). Diese tragen maßgeblich zu den oftmals vergleichsweise hohen Schwankungsbreiten beim Monitoring der Schallpegel bei, da unter Offshore-Bedingungen eine metergenaue Ausbringung der Hydroschall-Messsysteme in 750m nicht möglich

ist. Im vorliegenden Fall lassen sich im Bereich von $\pm 50\text{m}$ um die 750m-Position Abweichung von rund $-1.5\text{dB}/+0.5\text{dB}$ für Boden-Setup 1 sowie von rund $-0\text{dB}/+2\text{dB}$ für Boden-Setup 2 aufgrund der eingeschränkten Positionierungsgenauigkeit der Messsysteme erwarten (siehe Abbildung 5 und Abbildung 6).

Die Höhe der prognostizierten Pegel, das grundsätzliche Abklingverhalten sowie die Variation mit der Entfernung liegen insgesamt in einer plausiblen Größenordnung für einen Monopfahl der vorliegenden Dimensionen und der zugehörigen Randbedingungen.

Eine Zusammenstellung der prognostizierten Pegel ohne Schallminderung in 750m Abstand zum Pfahl 2m über dem Meeresgrund sowie die zugehörigen Schwankungen aufgrund der Positionierungsungenauigkeit der Hydrophone im Bereich von $\pm 50\text{m}$ um die 750m-Position kann Tabelle 4 in [Kap. 9](#) entnommen werden.

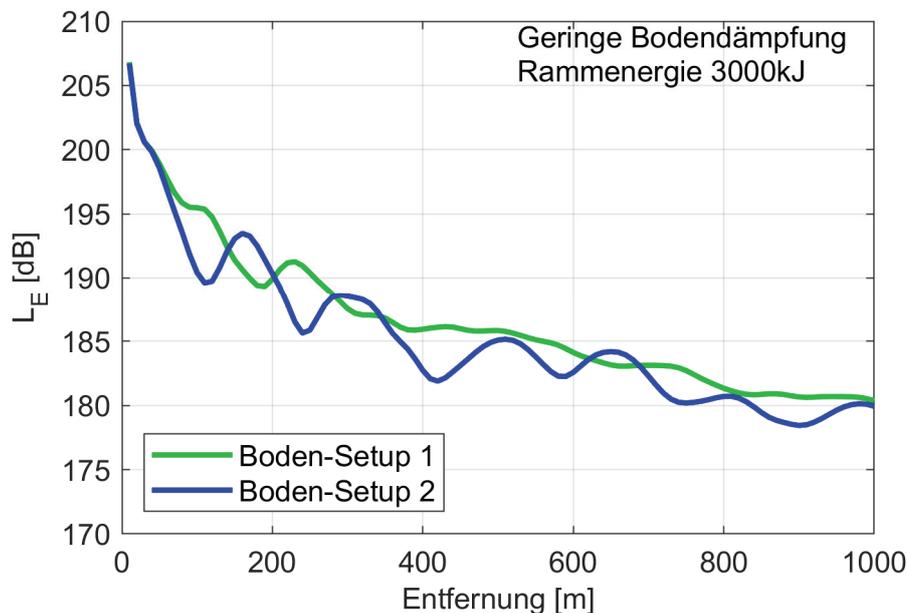


Abbildung 3: Prognostizierter L_E für Monopfahl-Design 1 ohne Schallminderung im Bereich bis 1km Entfernung zum Pfahl für zwei verschiedene Boden-Setups mit **geringer Bodendämpfung**. Pfahl auf Endtiefe, IHC S-4000, Rammenergie 3000kJ.

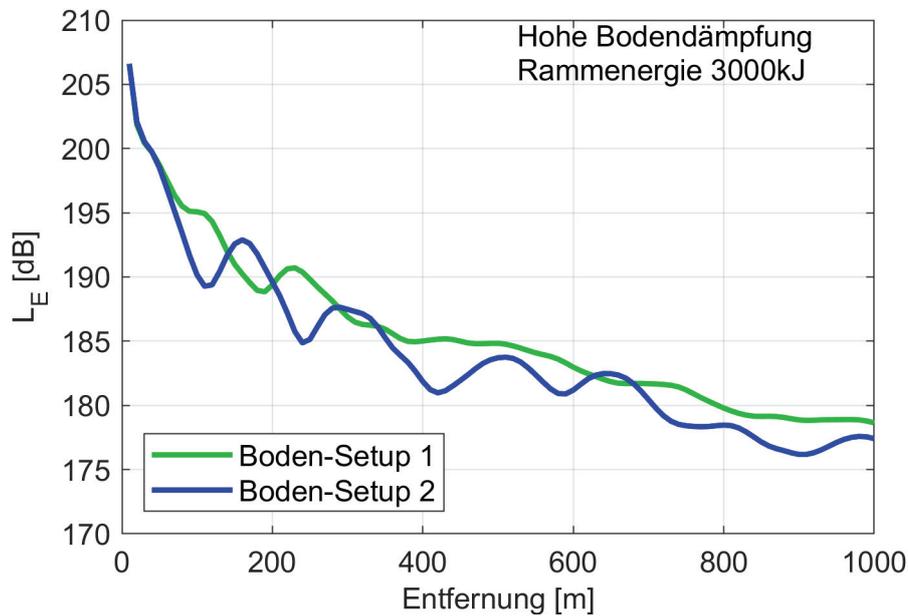


Abbildung 4: Prognostizierter L_E für **Monopfahl-Design 1** ohne Schallminderung im Bereich bis 1km Entfernung zum Pfahl für zwei verschiedene Boden-Setups mit **hoher Bodendämpfung**. Pfahl auf Endtiefe, IHC S-4000, Rammenergie 3000kJ.

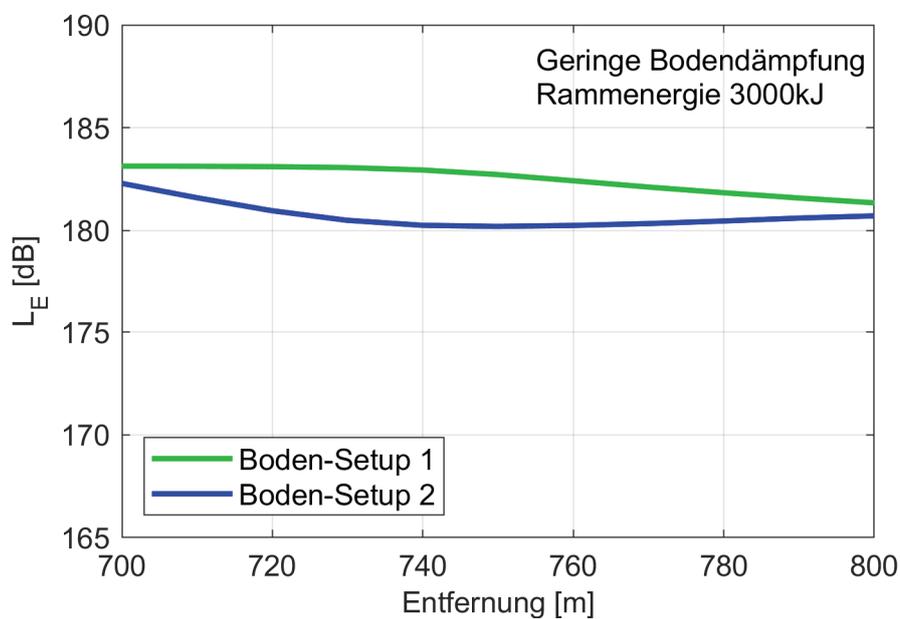


Abbildung 5: Variation des prognostizierten L_E für **Monopfahl-Design 1** ohne Schallminderung im Bereich von 700m bis 800m Entfernung zum Pfahl für zwei verschiedene Boden-Setups mit **geringer Bodendämpfung**. Pfahl auf Endtiefe, IHC S-4000, Rammenergie 3000kJ.

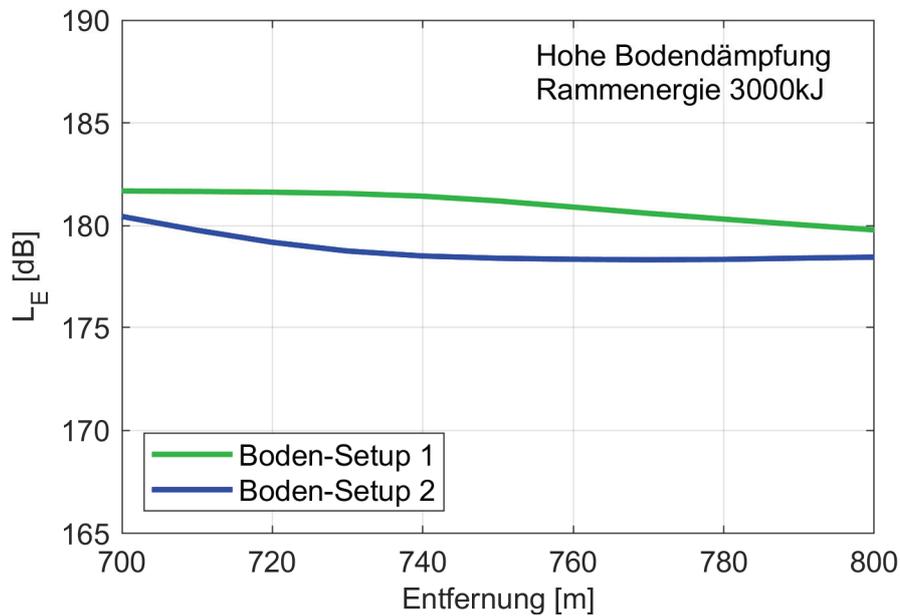


Abbildung 6: Variation des prognostizierten L_E für **Monopfahl-Design 1** ohne Schallminderung im Bereich von 700m bis 800m Entfernung zum Pfahl für zwei verschiedene Boden-Setups mit **hoher Bodendämpfung**. Pfahl auf Endtiefe, IHC S-4000, Rammenergie 3000kJ.

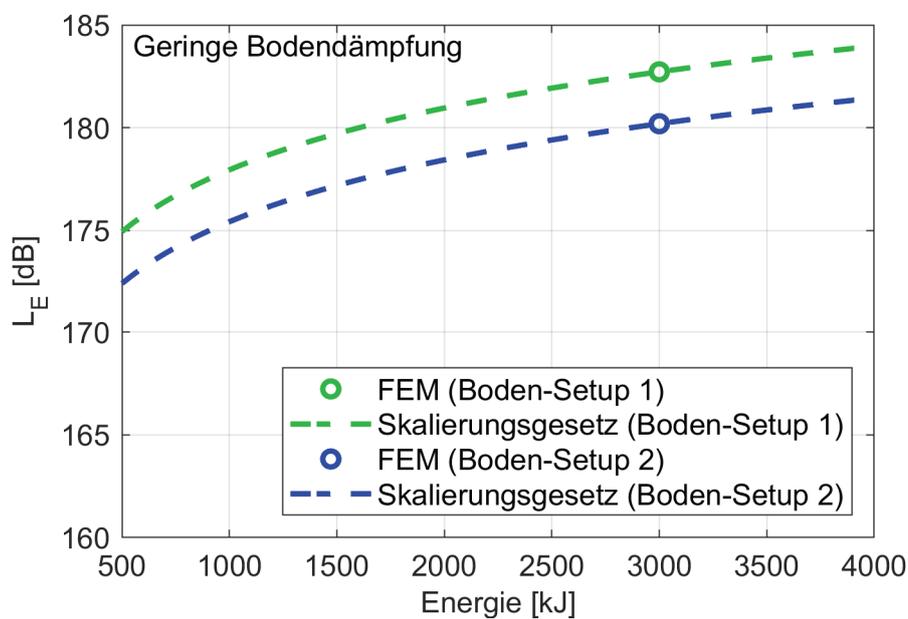


Abbildung 7: Änderung des prognostizierten L_E für **Monopfahl-Design 1** ohne Schallminderung in 750m Entfernung zum Pfahl für zwei verschiedene Boden-Setups mit **geringer Bodendämpfung**. Pfahl auf Endtiefe, IHC S-4000, Werte skaliert auf Basis der FE-Berechnungen bei 3000kJ.

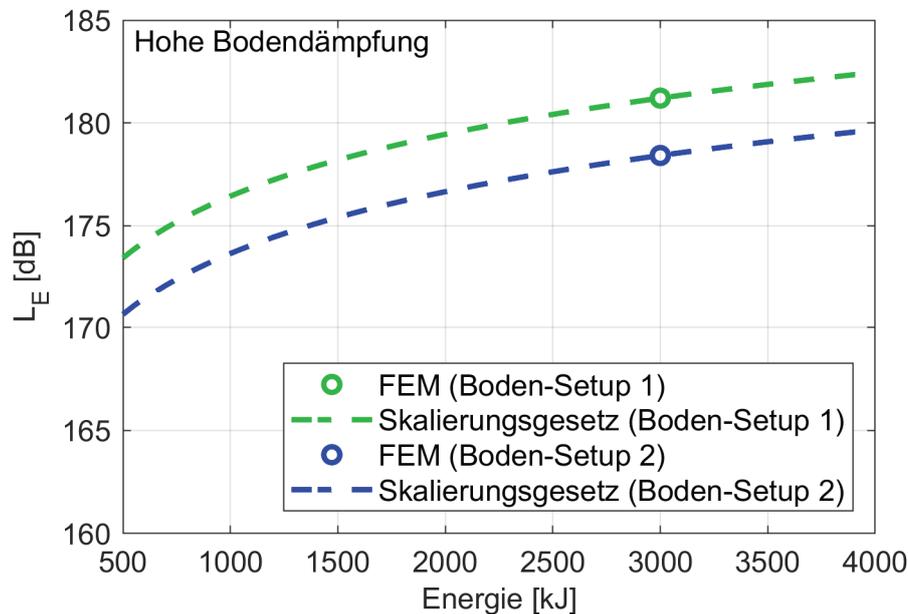


Abbildung 8: Änderung des prognostizierten L_E für **Monopfahl-Design 1** ohne Schallminderung in 750m Entfernung zum Pfahl für zwei verschiedene Boden-Setups mit **hoher Bodendämpfung**. Pfahl auf Endtiefe, IHC S-4000, Werte skaliert auf Basis der FE-Berechnungen bei 3000kJ.

5.2 Spitzenpegel L_{peak}

Für den Spitzenpegel L_{peak} ergeben sich analoge Schlussfolgerungen. Die zugehörigen Ergebnisse für Entfernungen bis 1km zum Pfahl und für den Bereich zwischen 700m und 800m sind in Abbildung 9 und Abbildung 10 sowie in Abbildung 11 und Abbildung 12 dargestellt. Die Skalierung des L_{peak} in Abhängigkeit der verwendeten Rammenergie kann Abbildung 13 und Abbildung 14 entnommen werden.

Abhängig vom Bodendämpfungs-Szenario (gering/hoch) ergeben sich in 750m Entfernung zum Pfahl L_{peak} -Werte von 198.9/197.6dB (Boden-Setup 1) und 197.3/196.1dB (Boden-Setup 2). Die höheren Pegel entstehen dabei wiederum in Verbindung mit der geringen Bodendämpfung. Die möglichen Schwankungen aufgrund der eingeschränkten Positionierungsgenauigkeit der Hydrophone betragen im Bereich von ± 50 m um die 750m-Position in 2m über dem Meeresboden rund -1dB/+0dB für Boden-Setup 1 und rund -0.5dB/+5.5dB für Boden-Setup 2.

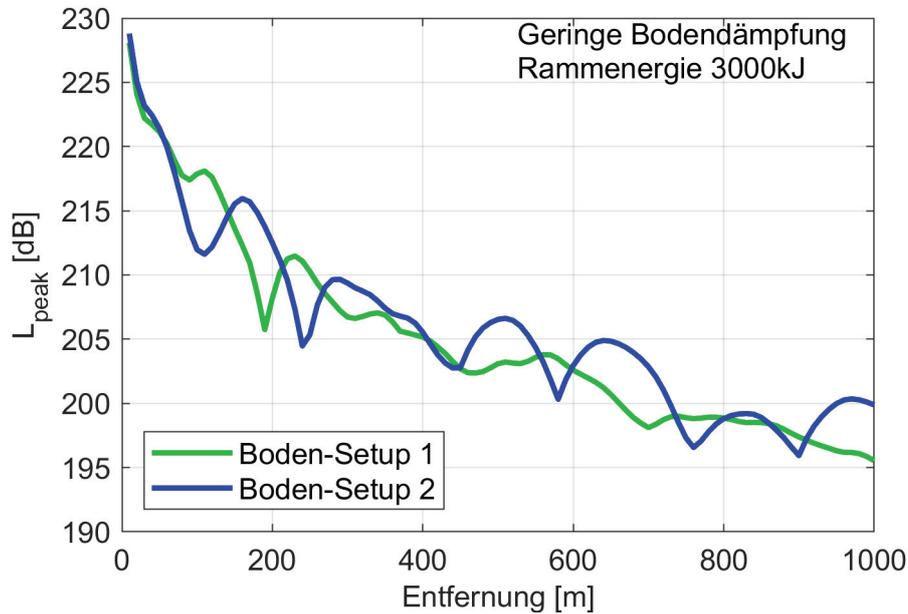


Abbildung 9: Prognostizierter L_{peak} für **Monopfahl-Design 1** ohne Schallminderung im Bereich bis 1km Entfernung zum Pfahl für zwei verschiedene Boden-Setups mit **geringer Bodendämpfung**. Pfahl auf Endtiefe, IHC S-4000, Rammenergie 3000kJ.

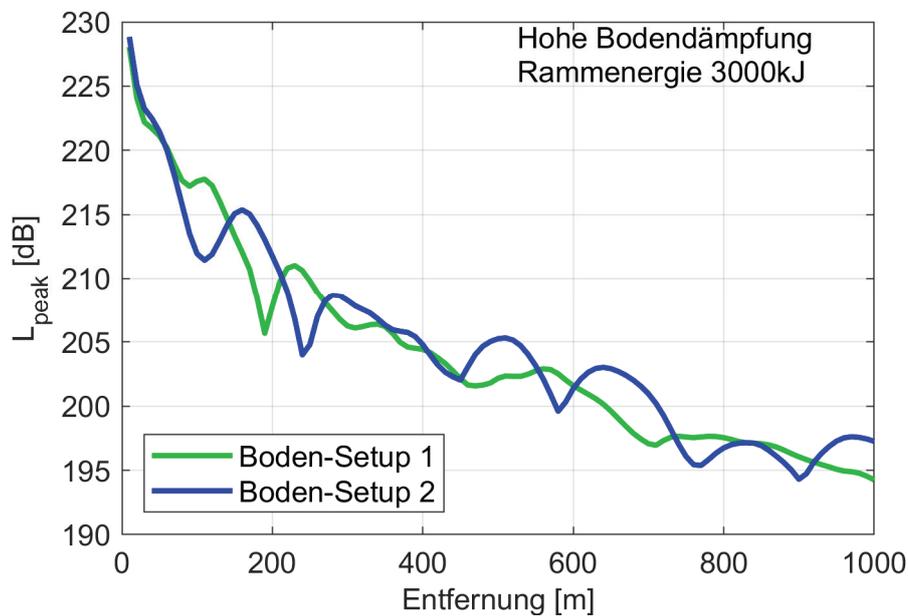


Abbildung 10: Prognostizierter L_{peak} für **Monopfahl-Design 1** ohne Schallminderung im Bereich bis 1km Entfernung zum Pfahl für zwei verschiedene Boden-Setups mit **hoher Bodendämpfung**. Pfahl auf Endtiefe, IHC S-4000, Rammenergie 3000kJ.

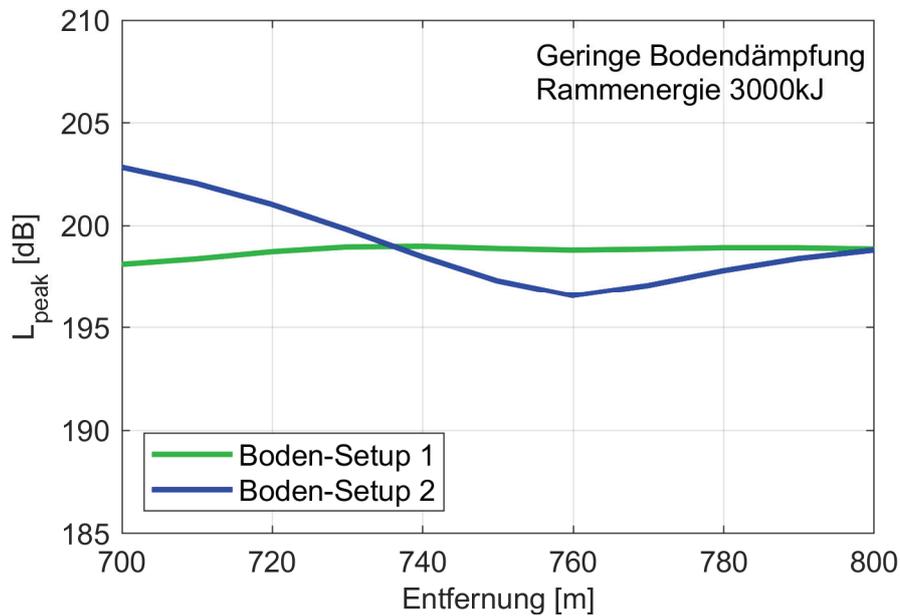


Abbildung 11: Variation des prognostizierten L_{peak} für **Monopfahl-Design 1** ohne Schallminderung im Bereich von 700m bis 800m Entfernung zum Pfahl für zwei verschiedene Boden-Setups mit **geringer Bodendämpfung**. Pfahl auf Endtiefe, IHC S-4000, Rammenergie 3000kJ.

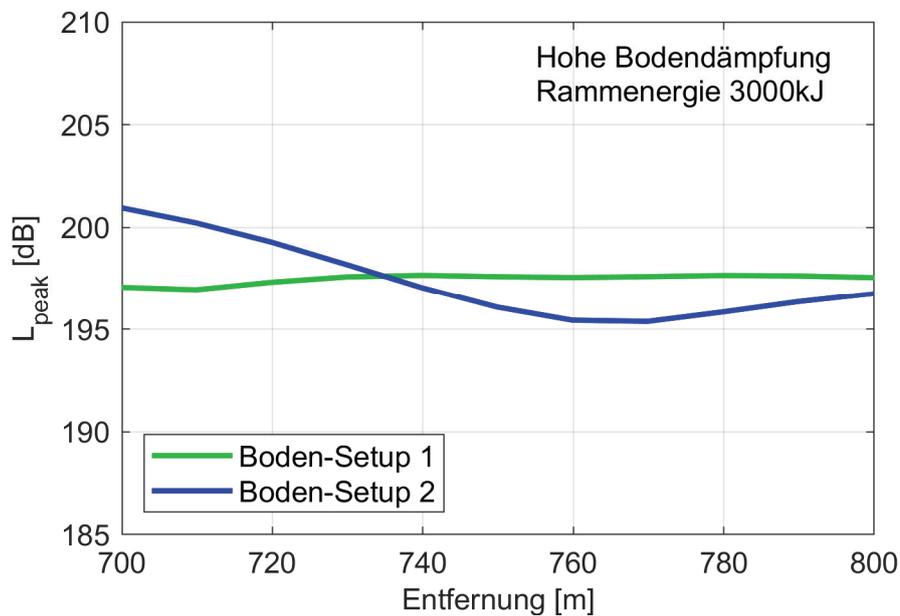


Abbildung 12: Variation des prognostizierten L_{peak} für **Monopfahl-Design 1** ohne Schallminderung im Bereich von 700m bis 800m Entfernung zum Pfahl für zwei verschiedene Boden-Setups mit **hoher Bodendämpfung**. Pfahl auf Endtiefe, IHC S-4000, Rammenergie 3000kJ.

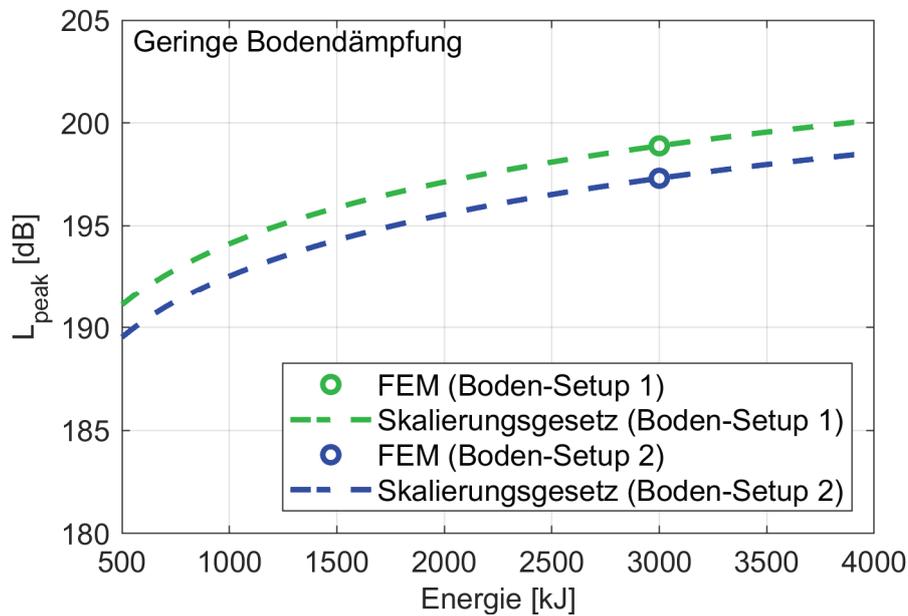


Abbildung 13: Änderung des prognostizierten L_{peak} für Monopfahl-Design 1 ohne Schallminderung in 750m Entfernung zum Pfahl für zwei verschiedene Boden-Setups mit **geringer Bodendämpfung**. Pfahl auf Endtiefe, IHC S-4000, Werte skaliert auf Basis der FE-Berechnungen bei 3000kJ.

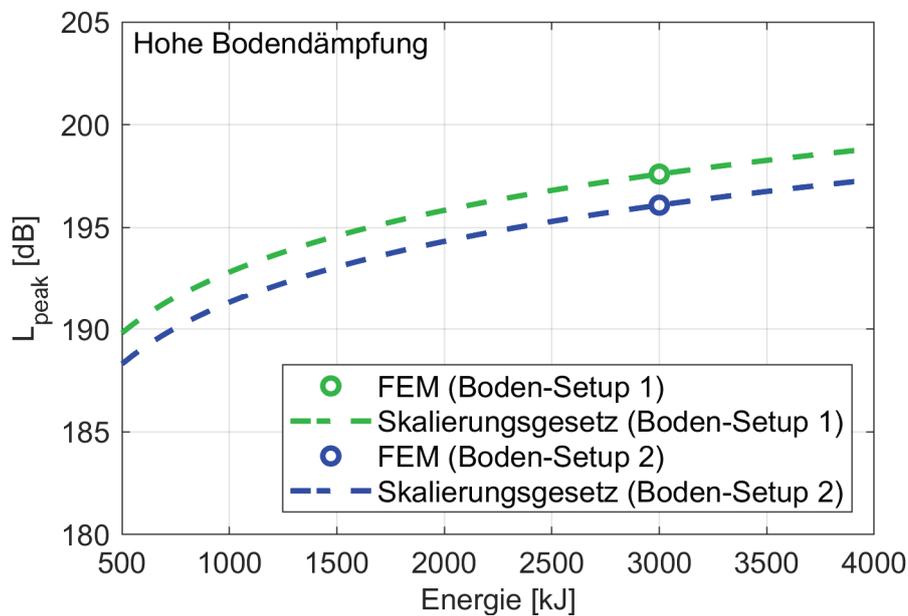


Abbildung 14: Änderung des prognostizierten L_{peak} für Monopfahl-Design 1 ohne Schallminderung in 750m Entfernung zum Pfahl für zwei verschiedene Boden-Setups mit **hoher Bodendämpfung**. Pfahl auf Endtiefe, IHC S-4000, Werte skaliert auf Basis der FE-Berechnungen bei 3000kJ.

Wie schon für den Einzelereignispegel ergeben sich auch hier Ergebnisse, die insgesamt in einer plausiblen Größenordnung für einen Monopfahl der vorliegenden Dimensionen und der zugehörigen Randbedingungen liegen.

Die prognostizierten Pegel ohne Schallminderung in 750m Abstand zum Pfahl 2m über dem Meeresgrund sowie die zugehörigen Schwankungen aufgrund der Positionierungsungenauigkeit der Hydrophone im Bereich von $\pm 50\text{m}$ um die 750m-Position sind wiederum in Tabelle 4 in [Kap. 9](#) zusammengestellt.

6. Ergebnisse der Prognose für Monopfahl- Design 2

Hinweis: Sämtliche angegebene Ergebniswerte wurden gemäß StUK4 für eine Referenzhöhe von 2m über dem Meeresgrund ermittelt.

Für Monopfahl-Design 2 wurden ebenfalls der Einzelereignispegel L_E sowie der Spitzenpegel L_{peak} ohne Verwendung einer Schallminderungsmaßnahme für die beiden Boden-Setups mit geringem sowie hohem Bodendämpfungs-Szenario ermittelt. Die Untersuchungen basieren auf der in [Kap. 4](#) aufgeführten Kombination von Pfahl, Boden und Impulsramme.

6.1 Einzelereignispegel L_E

In Abbildung 15 und Abbildung 16 ist die Entwicklung des Einzelereignispegels L_E für Boden-Setups in einer Entfernung bis zu 1km vom Pfahl dargestellt. Eine detailliertere Darstellung des Bereiches zwischen 700m und 800m kann Abbildung 17 und Abbildung 18 entnommen werden. Die Skalierung des L_E in Abhängigkeit der verwendeten Rammenergie ist in Abbildung 19 und Abbildung 20 enthalten.

Abhängig von dem verwendeten Bodendämpfungs-Szenario (gering/hoch) ergeben sich in 750m Abstand zum Pfahl Einzelereignispegel L_E von 180.2/178.8dB (Boden-Setup 1) und von 178.5/176.3dB (Boden-Setup 2). Die höheren Pegel entstehen dabei jeweils wieder für das Szenario mit geringer Bodendämpfung.

Aufgrund der spezifischen Eigenschaften des Wellenleiters ergibt sich auch für Monopfahl-Design 2 durch Interferenzeffekte mit zunehmender Entfernung zum Pfahl nur im Mittel ein logarithmisches Abklingverhalten der Pegel, so dass Schwankungen um die Abklingkurve mit ausgeprägten lokalen Minima und Maxima auftreten (siehe Abbildung 15 und Abbildung 16). Für Monopfahl-Design 2 lassen sich im Bereich von ± 50 m um die 750m-Position Abweichung von rund ± 1 dB für Boden-Setup 1 sowie von rund -0 dB/ $+1$ dB für Boden-Setup 2 aufgrund der eingeschränkten Positionierungsgenauigkeit der Messsysteme erwarten (siehe Abbildung 17 und Abbildung 18).

Die Höhe der prognostizierten Pegel, das grundsätzliche Abklingverhalten sowie die Variation mit der Entfernung liegen insgesamt in einer plausiblen Größenordnung für einen Monopfahl der vorliegenden Dimensionen und der zugehörigen Randbedingungen.

Eine Zusammenstellung der prognostizierten Pegel ohne Schallminderung in 750m Abstand zum Pfahl 2m über dem Meeresgrund sowie die zugehörigen Schwankungen aufgrund der Positionierungsungenauigkeit der Hydrophone im Bereich von $\pm 50\text{m}$ um die 750m-Position kann Tabelle 5 in [Kap. 9](#) entnommen werden.

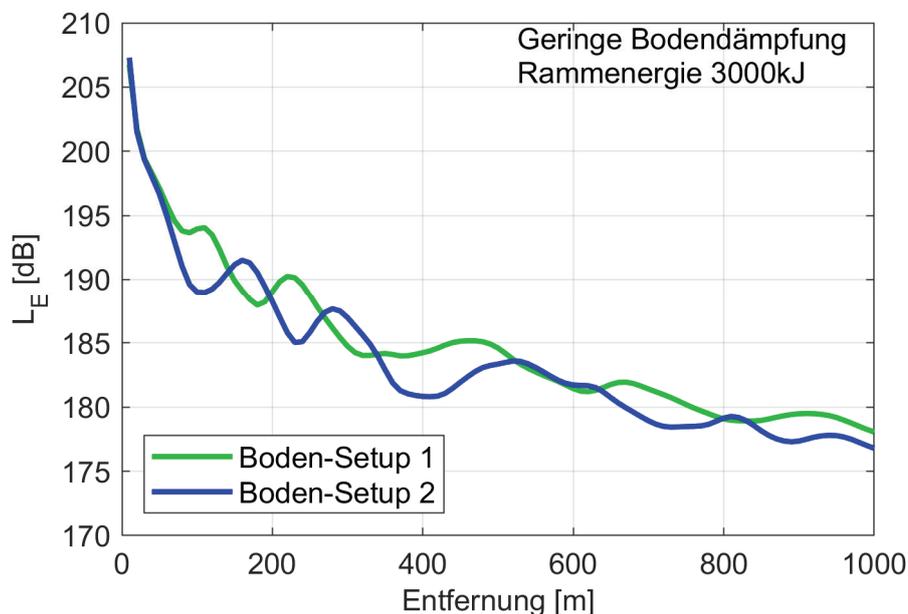


Abbildung 15: Prognostizierter L_E für Monopfahl-Design 2 ohne Schallminderung im Bereich bis 1km Entfernung zum Pfahl für zwei verschiedene Boden-Setups mit **geringer Bodendämpfung**. Pfahl auf Endtiefe, IHC S-4000, Rammenergie 3000kJ.

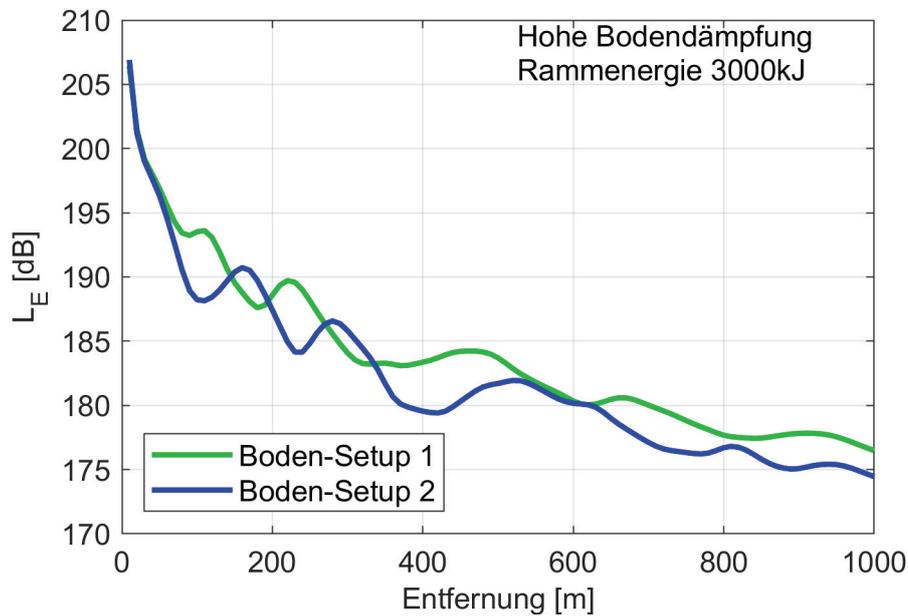


Abbildung 16: Prognostizierter L_E für **Monopfahl-Design 2** ohne Schallminderung im Bereich bis 1km Entfernung zum Pfahl für zwei verschiedene Boden-Setups mit **hoher Bodendämpfung**. Pfahl auf Endtiefe, IHC S-4000, Rammenergie 3000kJ.

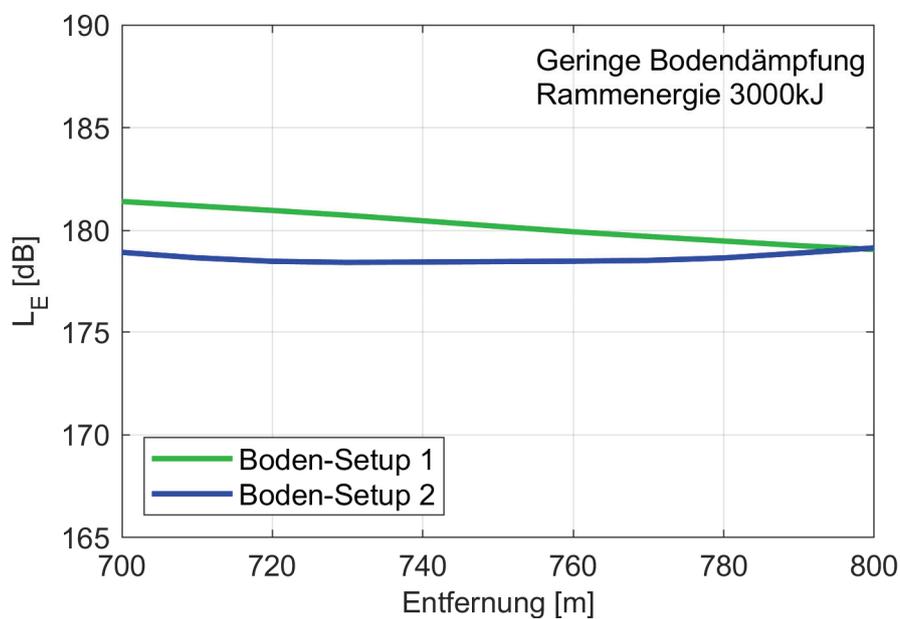


Abbildung 17: Variation des prognostizierten L_E für **Monopfahl-Design 2** ohne Schallminderung im Bereich von 700m bis 800m Entfernung zum Pfahl für zwei verschiedene Boden-Setups mit **geringer Bodendämpfung**. Pfahl auf Endtiefe, IHC S-4000, Rammenergie 3000kJ.

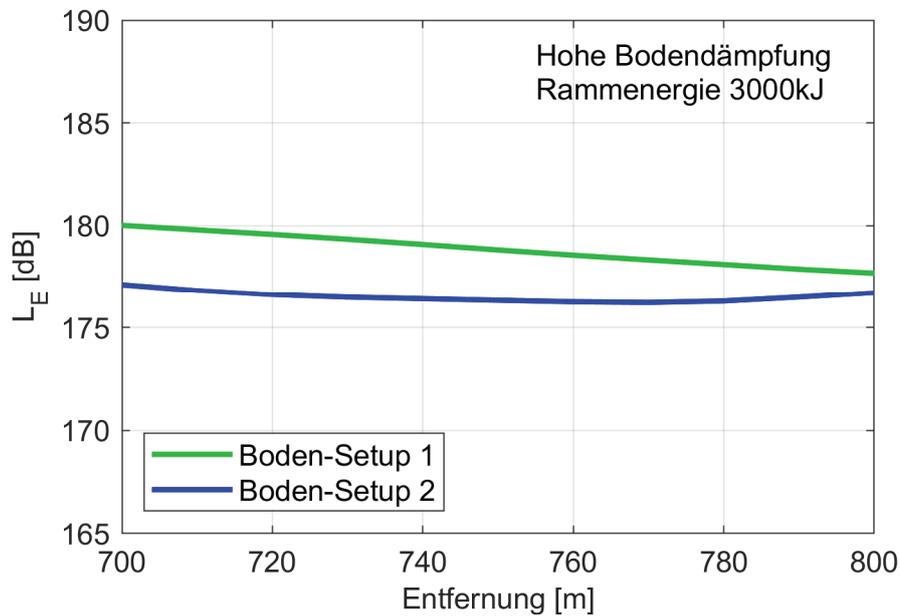


Abbildung 18: Variation des prognostizierten L_E für **Monopfahl-Design 2** ohne Schallminderung im Bereich von 700m bis 800m Entfernung zum Pfahl für zwei verschiedene Boden-Setups mit **hoher Bodendämpfung**. Pfahl auf Endtiefe, IHC S-4000, Rammenergie 3000kJ.

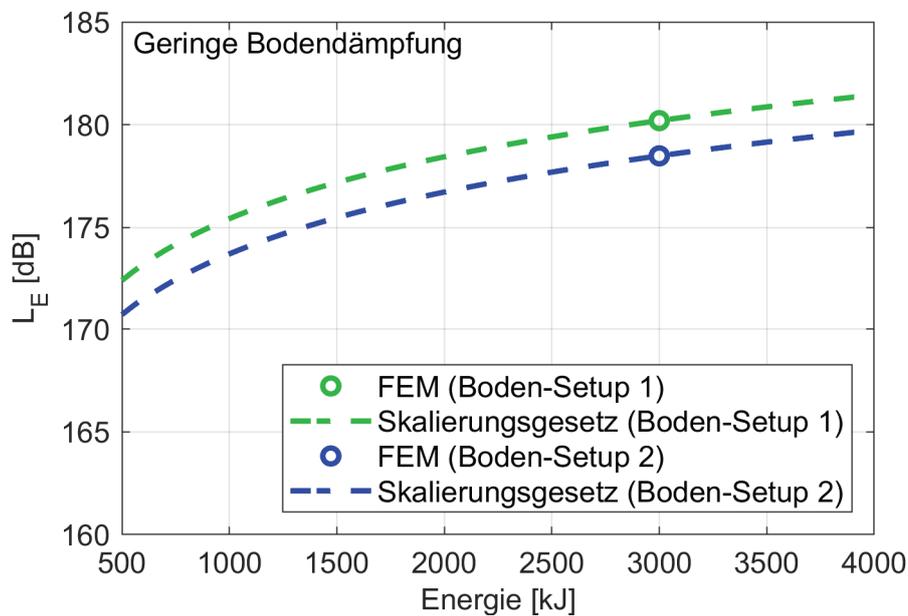


Abbildung 19: Änderung des prognostizierten L_E für **Monopfahl-Design 2** ohne Schallminderung in 750m Entfernung zum Pfahl für zwei verschiedene Boden-Setups mit **geringer Bodendämpfung**. Pfahl auf Endtiefe, IHC S-4000, Werte skaliert auf Basis der FE-Berechnungen bei 3000kJ.

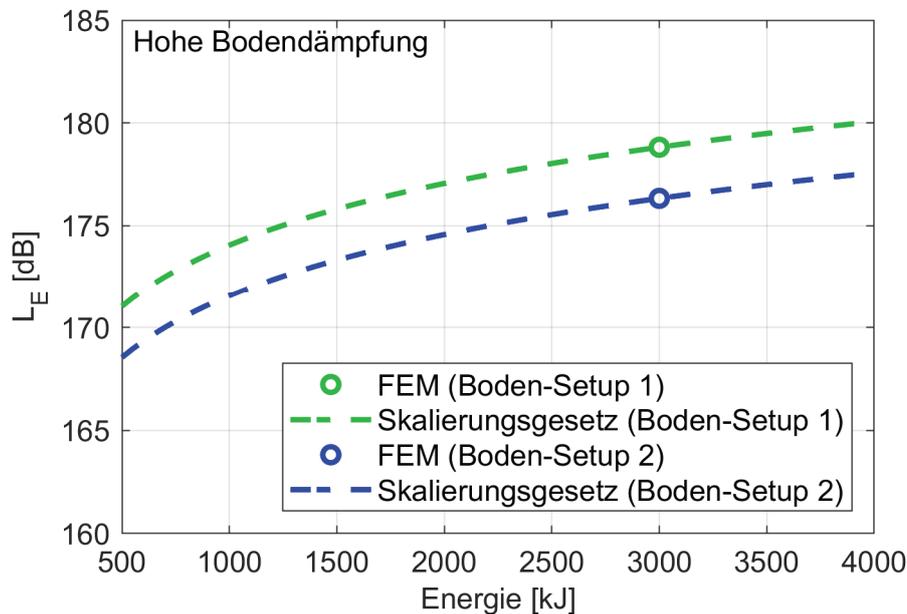


Abbildung 20: Änderung des prognostizierten L_E für **Monopfahl-Design 2** ohne Schallminderung in 750m Entfernung zum Pfahl für zwei verschiedene Boden-Setups mit **hoher Bodendämpfung**. Pfahl auf Endtiefe, IHC S-4000, Werte skaliert auf Basis der FE-Berechnungen bei 3000kJ.

6.2 Spitzenpegel L_{peak}

Für den Spitzenpegel L_{peak} ergeben sich analoge Schlussfolgerungen. Die zugehörigen Ergebnisse für Entfernungen bis 1km zum Pfahl und für den Bereich zwischen 700m und 800m sind in Abbildung 21 und Abbildung 22 sowie in Abbildung 23 und Abbildung 24 dargestellt. Die Skalierung des L_{peak} in Abhängigkeit der verwendeten Rammenergie kann Abbildung 25 und Abbildung 26 entnommen werden.

Abhängig vom Bodendämpfungs-Szenario (gering/hoch) ergeben sich in 750m Entfernung zum Pfahl L_{peak} -Werte von 200.0/198.8dB (Boden-Setup 1) und 193.7/192.4dB (Boden-Setup 2). Die höheren Pegel entstehen dabei wiederum jeweils in Verbindung mit der geringeren Bodendämpfung. Die möglichen Schwankungen aufgrund der eingeschränkten Positionierungsgenauigkeit der Hydrophone betragen im Bereich von ± 50 m um die 750m-Position in 2m über dem Meeresboden rund -1dB/+0dB für Boden-Setup 1 und rund -0.5dB/+4dB für Boden-Setup 2.

Wie schon für den Einzelereignispegel ergeben sich auch hier Ergebnisse, die insgesamt in einer plausiblen Größenordnung für einen Monopfahl der vorliegenden Dimensionen und der zugehörigen Randbedingungen liegen.

Die prognostizierten Pegel ohne Schallminderung in 750m Abstand zum Pfahl 2m über dem Meeresgrund sowie die zugehörigen Schwankungen aufgrund der Positionierungsungenauigkeit der Hydrophone im Bereich von $\pm 50\text{m}$ um die 750m-Position sind wiederum in Tabelle 5 in [Kap. 9](#) zusammengestellt.

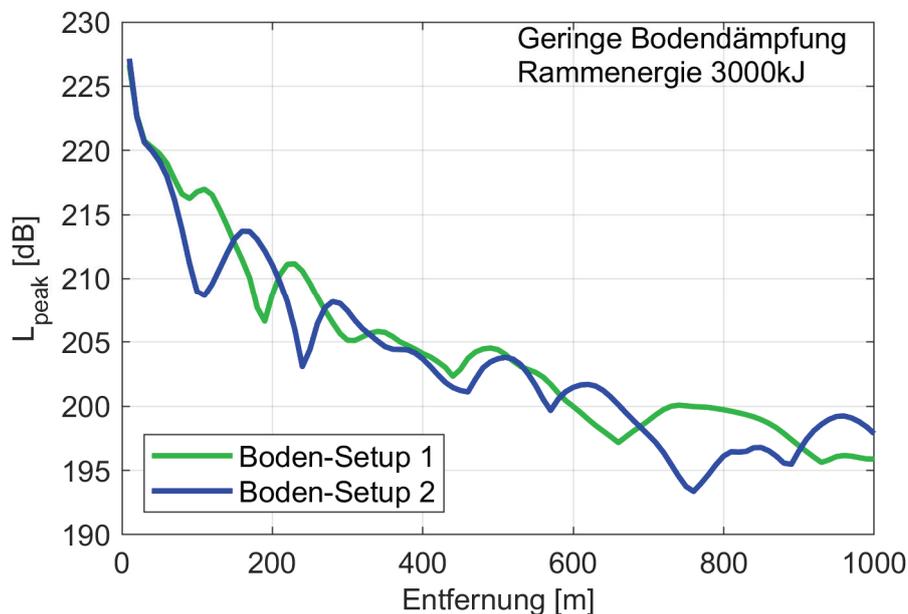


Abbildung 21: Prognostizierter L_{peak} für Monopfahl-Design 2 ohne Schallminderung im Bereich bis 1km Entfernung zum Pfahl für zwei verschiedene Boden-Setups mit **geringer Bodendämpfung**. Pfahl auf Endtiefe, IHC S-4000, Rammenergie 3000kJ.

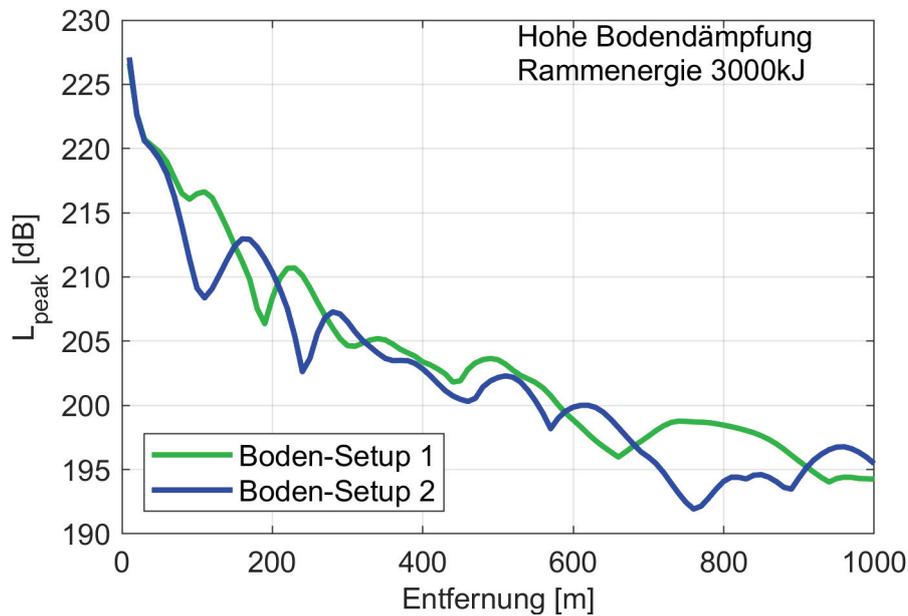


Abbildung 22: Prognostizierter L_{peak} für **Monopfahl-Design 2** ohne Schallminderung im Bereich bis 1km Entfernung zum Pfahl für zwei verschiedene Boden-Setups mit **hoher Bodendämpfung**. Pfahl auf Endtiefe, IHC S-4000, Rammenergie 3000kJ.

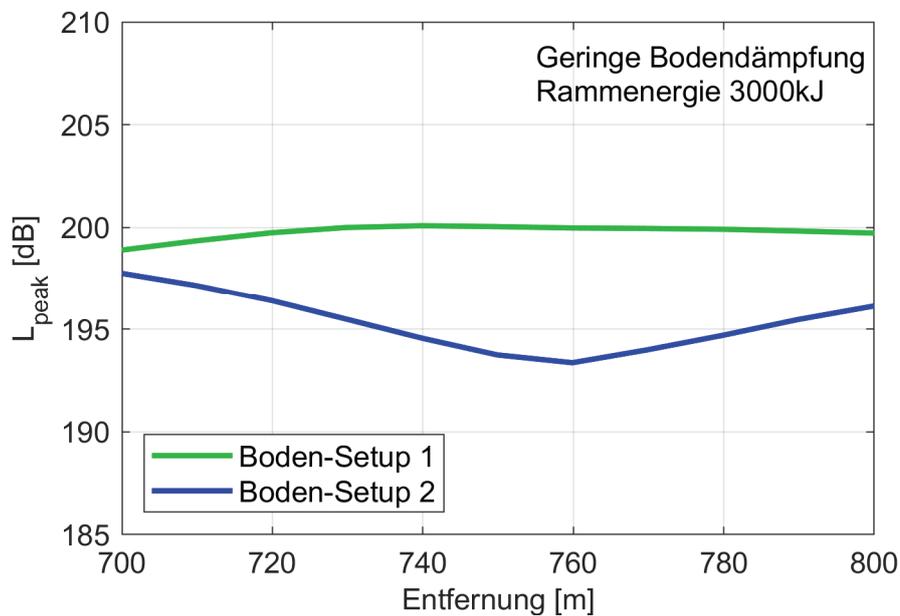


Abbildung 23: Variation des prognostizierten L_{peak} für **Monopfahl-Design 2** ohne Schallminderung im Bereich von 700m bis 800m Entfernung zum Pfahl für zwei verschiedene Boden-Setups mit **geringer Bodendämpfung**. Pfahl auf Endtiefe, IHC S-4000, Rammenergie 3000kJ.

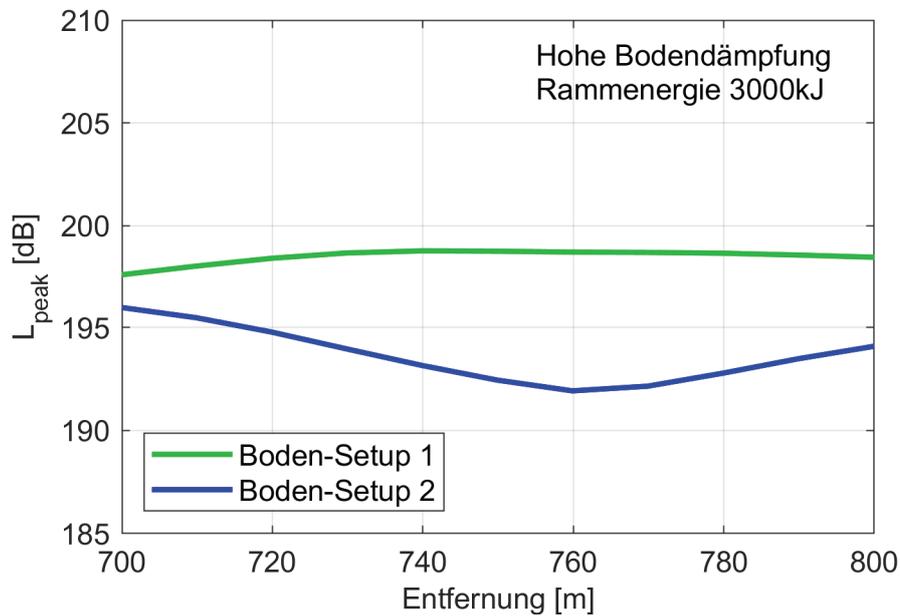


Abbildung 24: Variation des prognostizierten L_{peak} für **Monopfahl-Design 2** ohne Schallminderung im Bereich von 700m bis 800m Entfernung zum Pfahl für zwei verschiedene Boden-Setups mit **hoher Bodendämpfung**. Pfahl auf Endtiefe, IHC S-4000, Rammenergie 3000kJ.

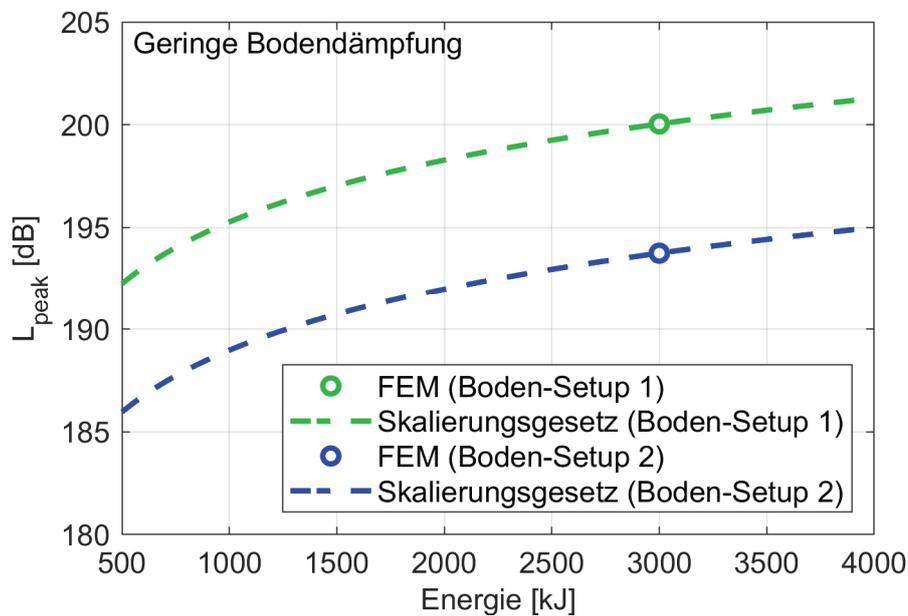


Abbildung 25: Änderung des prognostizierten L_{peak} für **Monopfahl-Design 2** ohne Schallminderung in 750m Entfernung zum Pfahl für zwei verschiedene Boden-Setups mit **geringer Bodendämpfung**. Pfahl auf Endtiefe, IHC S-4000, Werte skaliert auf Basis der FE-Berechnungen bei 3000kJ.

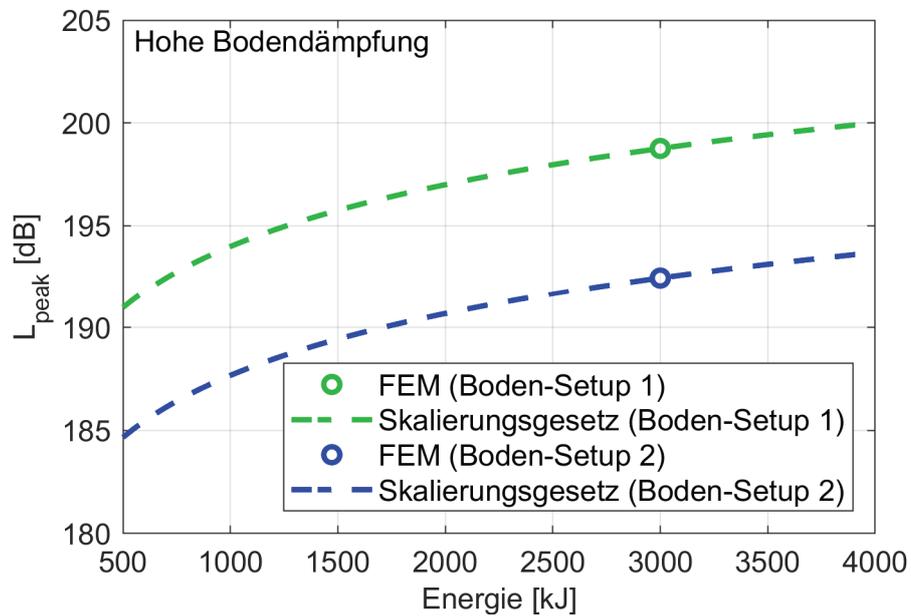


Abbildung 26: Änderung des prognostizierten L_{peak} für Monopfahl-Design 2 ohne Schallminderung in 750m Entfernung zum Pfahl für zwei verschiedene Boden-Setups mit hoher Bodendämpfung. Pfahl auf Endtiefe, IHC S-4000, Werte skaliert auf Basis der FE-Berechnungen bei 3000kJ.

7. Hinweise zur Prognosegenauigkeit

Berechnungs- und Prognosemodelle erfordern in der Regel gewisse Vereinfachungen, die in der jeweils verwendeten Methode begründet liegen und oftmals notwendig sind, um die erforderlichen Rechenzeiten auf ein vertretbares Maß zu begrenzen. Bei dem für diese Prognose verwendeten Modell kommt ein umfangreich validierter Berechnungsansatz zur Anwendung, welcher in [Kap. 3](#) beschrieben wurde und der eine detaillierte Berücksichtigung der während der Rammung ablaufenden Vorgänge gestattet. So erlauben z.B. die genaue Ermittlung der vom Hammer in den Pfahl eingebrachten Schlagkraft mittels einer separaten Vorlaufrechnung, die Berücksichtigung der Interaktion zwischen Pfahl und Boden sowie die Abbildung von Bodenschichtungen einen erheblichen Detaillierungsgrad. Dennoch können auch mit dem vorliegenden Modell nicht sämtliche Gegebenheiten berücksichtigt werden. So ist aufgrund des 2D-rotationssymmetrischen Aufbaus des Modells die Berücksichtigung einer beliebigen 3D-Topologie/Bathymetrie des Baugebietes oder eines asymmetrisch ausgelegten Schallschutzsystems nicht möglich. Weiterhin können einzelne Effekte, wie z.B. die in der Realität aufgrund von Wellen und Luftblasen an der Wasseroberfläche i.d.R. nicht ideal erfolgende Totalreflektion der Schallwellen, nicht einbezogen werden. Da sich eine nicht-ideale Totalreflektion jedoch abmindernd auf die Schallpegel auswirkt, liegt diesbezüglich ein konservativer Ansatz vor.

Unabhängig von den oben genannten Annahmen liefern die verwendeten Berechnungsansätze dennoch im Allgemeinen sehr zuverlässige Ergebnisse, da die getroffenen Vereinfachungen sorgfältig abgewogen und immer wieder mit Validierungsmessungen abgeglichen worden sind. Das dieser Prognose zugrunde liegende Modell kann als eines der aktuellsten und am weitesten ausgereiften Vorhersagemodelle angesehen werden, welche für Rammschallprognosen derzeit verfügbar sind.

Neben den oben genannten Modellvereinfachungen, deren Auswirkungen zufriedenstellend genau eingeschätzt werden können, bilden unsichere Eingangsparameter, auf deren Grundlage die Simulation durchgeführt wird, eine der wohl größten Fehlerquellen einer Prognose. Vielfach liegen notwendige Informationen nur teilweise oder nicht

in der notwendigen Güte vor. Dabei stellt insbesondere die Ausgestaltung des Bodenmodells eine große Herausforderung dar. Die Bodenverhältnisse können bereits in der näheren Umgebung einer einzelnen Lokation mehr oder weniger stark variieren. Die notwendige Definition von repräsentativen Baugrundkonfigurationen für den gesamten Windpark kann daher zu Abweichungen der zu erwartenden Schallpegel für einzelne Lokationen führen. Weitere Unsicherheiten entstehen durch die Ableitung der Ausbreitungsgeschwindigkeiten sowie der Dämpfungsparameter im Boden aus den vorhandenen geotechnischen Datensätzen. Im Rahmen der Erkundungen direkt gemessene Ausbreitungsgeschwindigkeiten könnten stattdessen zu einer Verbesserung der Vorhersagegüte führen.

Es wird daher ausdrücklich darauf hingewiesen, dass, obwohl die Berechnungen nach bestem Wissen und Gewissen durchgeführt wurden, die ermittelten Ergebnisgrößen im Vergleich zu den später im Rahmen der Errichtung real auftretenden Schallpegel abweichen können. Absolute Angaben zu einer allgemeinen Prognosegenauigkeit lassen sich für Rammschall-Berechnungsmodelle auf Basis der FEM derzeit nicht machen.

8. Schallminderung

Das Ziel der vorliegenden Untersuchungen ist die Vorhersage der Schallpegel für zwei verschiedene Monopfahl-Designs ohne Verwendung einer Schallminderungsmaßnahme. Eine Prognose mit Schallminderung wurde bisher nicht vorgenommen. Daher wird im Folgenden ein grundsätzlicher Überblick hinsichtlich der verschiedenen Möglichkeiten zur Reduzierung der Schallemission gegeben.

8.1 Primäre Schallminderungsmaßnahmen

Primäre Maßnahmen streben eine Minderung der hohen Quellpegel an, welche im vorliegenden Fall durch den Rammprozess verursacht werden. Dies kann einerseits durch Modifikationen am Pfahl-Design erfolgen, welche die Schallabstrahlung in die Wassersäule reduzieren. Die Möglichkeiten, das Design im Hinblick auf einen leisen Pfahl maßgeblich zu verändern sind jedoch in der Regel limitiert, da Anforderungen in Bezug auf Standfestigkeit und Lebensdauer oftmals dominieren und maßgebliche Änderungen der Pfahlgeometrie notwendig wären, um eine merkliche Verminderung der Schallpegel zu erzielen.

Andererseits hat auch die Interaktion von Impulsramme und Pfahl einen entscheidenden Einfluss auf die Pfahlschwingungen und damit die Unterwasserschall-Emissionen. Da das Anregungssignal der Ramme vor allem durch die Geometrien des Fallkörpers und der Verbindungskomponenten zum Pfahl, wie Anvil oder Follower, beeinflusst wird, führen verschiedene Impulsrammen zu unterschiedlichen Unterwasserschallpegeln. Eine übergreifende Aussage im Hinblick auf ein leises Hammerdesign ist aufgrund der komplexen Interaktion des Fallkörpers, der Verbindungskomponenten sowie des Pfahles ist nicht möglich. Bei ansonsten unveränderten Randbedingungen wirkt sich ein schwerer Fallkörper jedoch in der Regel positiv auf die Schallemissionen aus.

Darüber hinaus kann auch versucht werden, das Anregungssignal der Ramme gezielt im Hinblick auf einen „akustisch zuträglicheren“ Impuls mit geringeren Schallemissionen zu modifizieren, welcher weiterhin eine Pfahlrammung auf Endtiefe sicherstellt,

siehe z.B. *Klages et al.* [23]. Dieser Ansatz wird beispielsweise bei der Auslegung spezieller Lärminderungskomponenten verfolgt, welche als zusätzliches Element zwischen Fallkörper und Anvil eingefügt werden.

8.2 Sekundäre Schallminderungsmaßnahmen

Im Gegensatz zur direkten Verminderung der Quellpegel lassen sekundäre Maßnahmen Pfahl und Rammimpuls unverändert und zielen vielmehr auf eine Reduktion der Schallausbreitung in der Wassersäule. Grundsätzlich lassen sich dabei Systeme in der direkten Umgebung des Pfahles (z.B. Kofferdamm, IHC Noise Mitigation Screen NMS, MENCK Kleiner Blasenschleier SBC, Hydro Sound Damper HSD, AdBm Noise Abatement System, etc.) sowie Systeme, welche in einiger Entfernung zum Pfahl ausgebracht werden (hauptsächlich Großer Blasenschleier BBC), unterscheiden.

Wenngleich die Dämpfungsmechanismen sowie die praktischen Umsetzungen der in der direkter Umgebung zum Pfahl ausgebrachten Systeme variieren, so sorgen diese alle für eine Reduktion der direkten Schallemission vom Pfahl in das Wasser, während die Wellenausbreitung über den Bodenpfad jedoch unbeeinflusst bleibt. Systeme, welche in einiger Entfernung zum Pfahl ausgebracht werden, können hingegen auch die über den sekundären Bodenpfad übertragenen Schallemissionen reduzieren. Eine beispielhafte Wellenausbreitung, welche sich aufgrund des Rammimpulses bei Verwendung eines Doppelten Großen Blasenschleiers (DBBC) ergibt, ist in Abbildung 27 dargestellt.

Schallminderungssysteme können, auch bei optimaler Auslegung, über den Bodenpfad untertunnelt werden (siehe Abbildung 27). In welchem Ausmaß eine solche Untertunnelung erfolgt hängt maßgeblich von der obersten Bodenschicht ab. Diese Schicht weist oftmals eine dem Meerwasser sehr ähnliche Schallausbreitungscharakteristik auf und begünstigt folglich sowohl den Eintritt als auch den (Wieder-)Austritt von Druckwellen zwischen Wassersäule und Meeresboden.

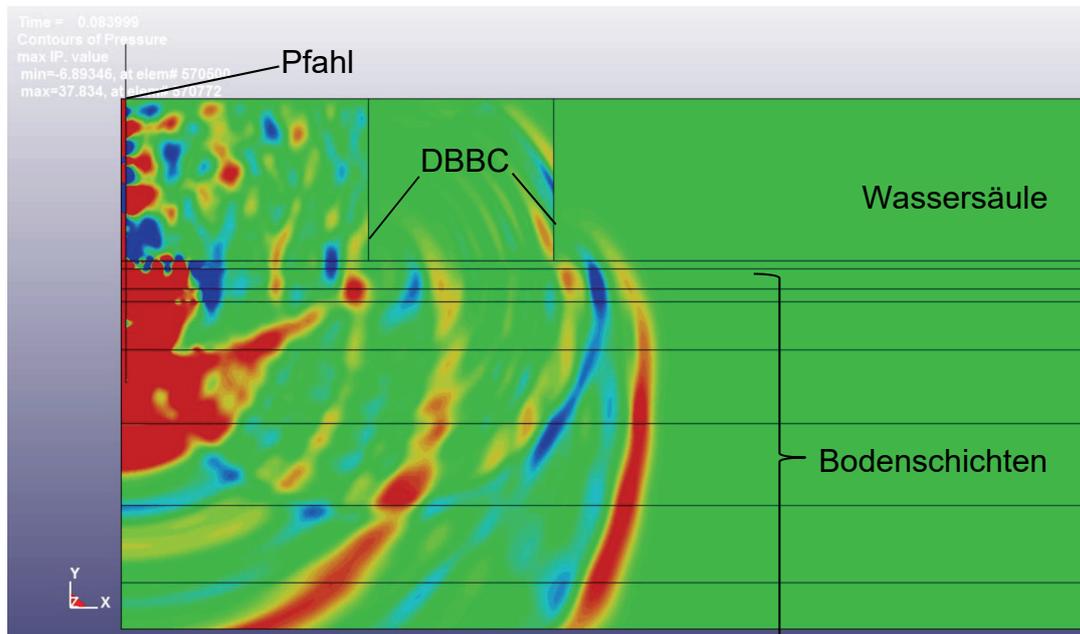


Abbildung 27: Beispielhaftes charakteristisches Wellenfeld und Ausbreitungsmuster in Wasser und Meeresboden 0.084s nach dem Rammschlag für einen Monopfahl bei Verwendung eines DBBC-Schallminderungssystems.

Neben der obersten Bodenschicht haben auch die Dicken und die Ausbreitungsgeschwindigkeiten in den folgenden Schichten einen Einfluss auf die resultierenden Schallpegel. Insbesondere können unter bestimmten Umständen ein Aufwärtsdrehen oder auch eine Refraktion von Bodenwellen zurück in die Wassersäule erfolgen. Ob und in welchem Maße dieser Effekt auftritt hängt von der Kombination der Bodenschichten ab. Bereits vergleichsweise kleine Änderungen in den Bodenparametern können kritische Refraktions-Winkel bewirken und die Ausbreitungsrichtung einer Welle damit vollkommen ändern.

Aus diesen Gründen ist die generelle Angabe eines spezifischen Minderungswertes für ein einzelnes Schallschutzsystem unter den verschiedenen Offshore-Bedingungen nicht möglich. Insbesondere bei Blasenschleiern hängt die Schallminderungswirkung weiterhin stark von der Erzeugung eines vollständig geschlossenen Vorhangs mit ausreichender Luftsättigung ab.

Ein Überblick hinsichtlich der grundsätzlich verfügbaren Schallminderungstechniken kann z.B. *Koschinski und Lüdemann* [24] und *Bellmann* [25] entnommen werden. Typische Minderungspotentiale der verschiedenen Schallschutzsysteme in optimaler Konfiguration sind z.B. in *Bellmann et al.* [26,27] enthalten, siehe Tabelle 3. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass die in Tabelle 3 enthaltenen Werte bis zum Jahr 2014/2015 in diversen Windparks ermittelt worden sind, welche im Vergleich zu den Gegebenheiten der vorliegenden Studie andere Randbedingungen hinsichtlich Pfahl-dimensionen, Bodenverhältnissen, verwendeter Impulsramme, etc. aufweisen können. Insbesondere wurden die Daten mehrheitlich in der Nordsee gemessen, wo Tideströmungen die Ausbringung von Blasenschleibern erheblich erschweren können, was in der Ostsee in diesem Maße nicht der Fall ist. Zusätzlich erfolgte eine stetige Weiterentwicklung der Schallschutzsysteme in den letzten Jahren und einige effiziente Kombinationen, wie z.B. IHC-NMS + DBBC, sind noch nicht in Tabelle 3 enthalten.

Tabelle 3: Überblick hinsichtlich des Minderungspotentials verschiedener Schallschutzsysteme in optimaler Konfiguration nach *Bellmann et al.* [26,27].

Schallminderungssystem	ΔL_E [dB]
Großer Blasenschleier – BBC (Tiefe <25m)	$10 \leq 13 \leq 15$
Großer Blasenschleier – BBC (Tiefe ~30m)	$8 \leq 11 \leq 14$
Großer Blasenschleier – BBC (Tiefe >40m)	$7 \leq 9 \leq 11$
Doppelter gr. Blasenschleier – DBBC ($>0,3\text{m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$; Ringabstand > Tiefe; Tiefe <25m)	$14 \leq 17 \leq 18$
Doppelter gr. Blasenschleier – DBBC ($>0,3\text{m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$; Ringabstand > Tiefe; Tiefe >40m)	$8 \leq 11 \leq 13$
Doppelter gr. Blasenschleier – DBBC ($>0,4\text{m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$; Ringabstand > Tiefe; Tiefe >40m)	$12 \leq 14 \leq 17$
Kleiner Blasenschleier (SBC)	$(5) \leq 10 \leq 14$
Hydro Sound Damper (HSD)	$8 \leq 10 \leq 13$

Noise Mitigation Screen (IHC-NMS)	$10 \leq 13 \leq 15$
Kofferdamm / Rohr-in-Rohr Systeme	Probleme: < 10 ; sonst: ≥ 20
Kombination von BBC-Systemen (DBBC + BBC)	$15 \leq 16 \leq 19$
Kombination von IHC-NMS + BBC	$17 \leq 19 \leq 23$
BBC (Hydrotechnik Lübeck) + HSD	$15 \leq 16 \leq 20$
DBBC (Weyres) + HSD	$14 \leq 16 \leq 22$

9. Interpretation und Zusammenfassung

Die Firma *Novicos GmbH* wurde von der *Parkwind Ost GmbH* beauftragt, eine Prognose bezüglich der während der Installation von Monopfählen für den Windpark ARCADIS Ost 1 zu erwartenden Hydroschallpegel zu erstellen. Dabei wurden sowohl der Einzelereignispegel (L_E) als auch der Spitzenpegel (L_{peak}) für die StUK4-relevante Position in 750m Entfernung zum Pfahl in 2m über dem Meeresboden ermittelt.

Hierfür wurden zwei FEM-Modelle erstellt, welche zwei unterschiedliche Baugrundbeschaffenheiten enthalten, die als repräsentativ für den Windpark angesehen werden (Boden-Setup 1 und 2). Innerhalb der Modelle wurden jeweils zwei verschiedene Monopfahl-Designs berücksichtigt. Während Monopfahl-Design 1 die Verwendung eines Übergangsstücks (Transition Piece) erfordert, handelt es sich bei Monopfahl-Design 2 um eine Variante, bei der auf ein Übergangsstück verzichtet werden kann. Für die Prognose wurde dabei jeweils die maximale Eindringtiefe des Pfahls berücksichtigt (Endtiefe), welche für einen Monopfahl aus akustischer Sicht den ungünstigsten Fall darstellt. Für beide Pfähle wurde in den Berechnungen jeweils ein Szenario mit geringer Bodendämpfung sowie eines mit hoher Bodendämpfung berücksichtigt.

Der Modellaufbau basiert auf einem detaillierten Datensatz, welcher seitens des Auftraggebers zur Verfügung gestellt wurde. Während einige Parameter, wie z.B. die Pfahlabmessungen, direkt in das Modell eingefügt werden konnten, mussten andere Größen, wie z.B. die Bodenparameter, aus den vorliegenden technischen Berichten abgeleitet werden. Die Anregungssignale der Impulsrammen wurden in einer separaten Vorlaufrechnung ermittelt. Weitere Details zum verwendeten numerischen Ansatz und zum Modellaufbau können [Kap. 4](#) entnommen werden.

Die Prognose wurde ohne Schallminderungsmaßnahmen erstellt. Um dennoch eine Einordnung der Ergebnisse in Bezug auf die einzuhaltenden Grenzwerte zu erlauben, wurde in [Kap. 8](#) ein grundsätzlicher Überblick hinsichtlich der verschiedenen Möglichkeiten zur Reduzierung der Schallemission gegeben. Dabei wurde sowohl auf primäre wie auch auf sekundäre Schallminderungsmaßnahmen eingegangen.

Die Prognose der Unterwasserschall-Emissionen für Monopfahl-Design 1 führte zu den folgenden Ergebnissen:

- In Abhängigkeit vom Bodendämpfungs-Szenario (gering/hoch) ergeben sich Einzelereignispegel L_E ohne Schallminderung in 750m Entfernung zum Pfahl 2m über dem Meeresboden von 182.7/181.2dB (Boden-Setup 1) und von 180.2/178.4dB (Boden-Setup 2). Wie zu erwarten treten die höheren Pegel in Verbindung mit der geringeren Bodendämpfung auf.
- Der prognostizierte Spitzenpegel L_{peak} in 750m Entfernung zum Pfahl 2m über dem Meeresboden erreicht Werte von 198.9/197.6dB (Boden-Setup 1) und von 197.3/196.1dB (Boden-Setup 2). Die höheren Pegel treten wiederum für die geringe Bodendämpfung auf.
- Die Höhe der prognostizierten Einzelereignis- und Spitzenpegel sowie das grundsätzliche Abklingverhalten mit der Entfernung liegen insgesamt in einer plausiblen Größenordnung für einen Monopfahl der vorliegenden Dimensionen und der zugehörigen Randbedingungen.
- Aufgrund der spezifischen Eigenschaften des Wellenleiters ergibt sich durch Interferenzeffekte mit zunehmender Entfernung zum Pfahl nur im Mittel ein logarithmisches Abklingverhalten der Pegel. In der Praxis lassen sich hingegen sowohl in Messungen als auch in numerischen Berechnungen starke Schwankungen um die Abklingkurve mit ausgeprägten lokalen Minima und Maxima beobachten. Diese tragen maßgeblich zu den oftmals vergleichsweise hohen Schwankungsbreiten beim Monitoring der Schallpegel bei, da unter Offshore-Bedingungen eine metergenaue Ausbringung der Hydroschall-Messsysteme in 750m nicht möglich ist. Für Monopfahl-Design 1 lassen sich für den Einzelereignispegel L_E im Bereich von ± 50 m um die 750m-Position Abweichung von rund -1.5dB/+0.5dB für Boden-Setup 1 sowie von rund -0dB/+2dB für Boden-Setup 2 aufgrund der eingeschränkten Positionierungsgenauigkeit der Messsysteme erwarten. Die entsprechenden Schwankungen für den Spitzenpegel L_{peak} ergeben sich zu rund -1dB/+0dB für Boden-Setup 1 und zu rund -0.5dB/+5.5dB für Boden-Setup 2.

- Die Einzelereignispegel L_E überschreiten den Grenzwert von 160dB deutlich. Die Spitzenpegel L_{peak} sind etwas weniger kritisch, liegen aber dennoch oberhalb des Grenzwertes von 190dB. Die Verwendung von Schallminderungsmaßnahmen während der Errichtung eines Pfahles nach Monopfahl-Design 1 ist daher zwingend erforderlich. Ein genereller Überblick möglicher Maßnahmen zur Reduzierung der Schallemissionen wurde in [Kap. 8](#) gegeben.
- Der Einzelereignispegel L_E sowie der Spitzenpegel L_{peak} für Monopfahl-Design 1 ohne Schallminderung und die zugehörigen Schwankungen aufgrund der eingeschränkten Positionierungsgenauigkeit der Messsysteme im Bereich von $\pm 50\text{m}$ um die 750m-Position sind in Tabelle 4 zusammengestellt. Die resultierenden Schallpegel für Rammenergien von 500kJ bis 4000kJ können Tabelle 6 entnommen werden (Werte skaliert auf Basis der FE-Berechnungen bei 3000kJ).

Die Prognose der Unterwasserschall-Emissionen für Monopfahl-Design 2 führte zu den folgenden Ergebnissen:

- In Abhängigkeit vom Bodendämpfungs-Szenario (gering/hoch) ergeben sich Einzelereignispegel L_E ohne Schallminderung in 750m Entfernung zum Pfahl 2m über dem Meeresboden von 180.2/178.8dB (Boden-Setup 1) und von 178.5/176.3dB (Boden-Setup 2). Auch hier treten die höheren Pegel in Verbindung mit der geringeren Bodendämpfung auf.
- Der prognostizierte Spitzenpegel L_{peak} in 750m Entfernung zum Pfahl 2m über dem Meeresboden erreicht Werte von 200.0/198.8dB (Boden-Setup 1) und von 193.7/192.4dB (Boden-Setup 2). Die höheren Pegel treten wiederum für die geringe Bodendämpfung auf.
- Die Höhe der prognostizierten Einzelereignis- und Spitzenpegel sowie das grundsätzliche Abklingverhalten mit der Entfernung liegen insgesamt in einer plausiblen Größenordnung für einen Monopfahl der vorliegenden Dimensionen und der zugehörigen Randbedingungen.

- Aufgrund der spezifischen Eigenschaften des Wellenleiters ergibt sich auch für Monopfahl-Design 2 nur im Mittel ein logarithmisches Abklingverhalten der Pegel, so dass starke Schwankungen um die Abklingkurve mit ausgeprägten lokalen Minima und Maxima auftreten. Für den Einzelereignispegel L_E lassen sich dabei im Bereich von $\pm 50\text{m}$ um die 750m-Position Abweichung von rund $\pm 1\text{dB}$ für Boden-Setup 1 sowie von rund $-0\text{dB}/+1\text{dB}$ für Boden-Setup 2 aufgrund der eingeschränkten Positionierungsgenauigkeit der Messsysteme erwarten. Die entsprechenden Schwankungen für den Spitzenpegel L_{peak} ergeben sich zu rund $-1\text{dB}/+0\text{dB}$ für Boden-Setup 1 und zu rund $-0.5\text{dB}/+4\text{dB}$ für Boden-Setup 2.
- Die Einzelereignispegel L_E überschreiten den Grenzwert von 160dB deutlich. Die Spitzenpegel L_{peak} sind etwas weniger kritisch, liegen aber dennoch oberhalb des Grenzwertes von 190dB. Die Verwendung von Schallminderungsmaßnahmen während der Errichtung eines Pfahles nach Monopfahl-Design 2 ist daher zwingend erforderlich. Ein genereller Überblick möglicher Maßnahmen zur Reduzierung der Schallemissionen wurde in [Kap. 8](#) gegeben.
- Der Einzelereignispegel L_E sowie der Spitzenpegel L_{peak} für Monopfahl-Design 2 ohne Schallminderung und die zugehörigen Schwankungen aufgrund der eingeschränkten Positionierungsgenauigkeit der Messsysteme im Bereich von $\pm 50\text{m}$ um die 750m-Position sind in Tabelle 5 zusammengestellt. Die resultierenden Schallpegel für Rammenergien von 500kJ bis 4000kJ können Tabelle 7 entnommen werden (Werte skaliert auf Basis der FE-Berechnungen bei 3000kJ).

Tabelle 4: Prognostizierter L_E und L_{peak} für **Monopfahl-Design 1** bei maximaler Eindringtiefe ohne Schallminderung in **750m Entfernung zum Pfahl, 2m über dem Meeresboden** für die beiden Boden-Setups und Bodendämpfungs-Szenarien. Die in Klammern angegebenen Schwankungsbreiten gelten für den Bereich von 700m bis 800m Entfernung zum Pfahl. **IHC S-4000**, Rammenergie **3000kJ**.

	Geringe Bodendämpfung		Hohe Bodendämpfung	
	L_E [dB]	L_{peak} [dB]	L_E [dB]	L_{peak} [dB]
Boden-Setup 1	182.7 (-1.4/+0.4)	198.9 (-0.8/+0.1)	181.2 (-1.4/+0.5)	197.6 (-0.6/+0.1)
Boden-Setup 2	180.2 (-0.0/+2.1)	197.3 (-0.7/+5.5)	178.4 (-0.1/+2.0)	196.1 (-0.7/+4.9)

Tabelle 5: Prognostizierter L_E und L_{peak} für **Monopfahl-Design 2** bei maximaler Eindringtiefe ohne Schallminderung in **750m Entfernung zum Pfahl, 2m über dem Meeresboden** für die beiden Boden-Setups und Bodendämpfungs-Szenarien. Die in Klammern angegebenen Schwankungsbreiten gelten für den Bereich von 700m bis 800m Entfernung zum Pfahl. **IHC S-4000**, Rammenergie **3000kJ**.

	Geringe Bodendämpfung		Hohe Bodendämpfung	
	L_E [dB]	L_{peak} [dB]	L_E [dB]	L_{peak} [dB]
Boden-Setup 1	180.2 (-1.1/+1.2)	200.0 (-1.1/+0)	178.8 (-1.1/+1.2)	198.8 (-1.2/+0)
Boden-Setup 2	178.5 (-0/+0.7)	193.7 (-0.4/+4.0)	176.3 (-0.1/+0.8)	192.4 (-0.5/+3.5)

Tabelle 6: Prognostizierter L_E und L_{peak} für **Monopfahl-Design 1** bei maximaler Eindringtiefe ohne Schallminderung für verschiedene Rammenergien in **750m Entfernung zum Pfahl, 2m über dem Meeresboden** für die beiden Boden-Setups und Bodendämpfungs-Szenarien. Werte skaliert auf Basis der FE-Berechnungen bei 3000kJ.

	Boden-Setup 1				Boden-Setup 2			
	Geringes Bodendämpf.- Szenario		Hohes Bodendämpf.- Szenario		Geringes Bodendämpf.- Szenario		Hohes Bodendämpf.- Szenario	
	L_E [dB]	L_{peak} [dB]	L_E [dB]	L_E [dB]	L_{peak} [dB]	L_{peak} [dB]	L_E [dB]	L_{peak} [dB]
500kJ	174.9	191.1	173.4	189.8	172.4	189.5	170.6	188.3
600kJ	175.7	191.9	174.2	190.6	173.2	190.3	171.4	189.1
700kJ	176.4	192.6	174.9	191.3	173.9	191.0	172.1	189.8
800kJ	177.0	193.1	175.5	191.9	174.5	191.6	172.7	190.3
900kJ	177.5	193.7	176.0	192.4	175.0	192.1	173.2	190.9
1000kJ	177.9	194.1	176.4	192.8	175.4	192.5	173.6	191.3
1100kJ	178.4	194.5	176.8	193.2	175.8	192.9	174.1	191.7
1200kJ	178.7	194.9	177.2	193.6	176.2	193.3	174.4	192.1
1300kJ	179.1	195.3	177.6	194.0	176.6	193.7	174.8	192.5
1400kJ	179.4	195.6	177.9	194.3	176.9	194.0	175.1	192.8
1500kJ	179.7	195.9	178.2	194.6	177.2	194.3	175.4	193.1
1600kJ	180.0	196.2	178.5	194.9	177.5	194.6	175.7	193.4
1700kJ	180.3	196.4	178.7	195.1	177.7	194.8	175.9	193.6
1800kJ	180.5	196.7	179.0	195.4	178.0	195.1	176.2	193.9
1900kJ	180.7	196.9	179.2	195.6	178.2	195.3	176.4	194.1
2000kJ	181.0	197.1	179.4	195.8	178.4	195.5	176.7	194.3

2100kJ	181.2	197.3	179.7	196.0	178.6	195.8	176.9	194.5
2200kJ	181.4	197.5	179.9	196.2	178.8	196.0	177.1	194.7
2300kJ	181.6	197.7	180.1	196.4	179.0	196.2	177.3	194.9
2400kJ	181.7	197.9	180.2	196.6	179.2	196.3	177.4	195.1
2500kJ	181.9	198.1	180.4	196.8	179.4	196.5	177.6	195.3
2600kJ	182.1	198.3	180.6	197.0	179.6	196.7	177.8	195.5
2700kJ	182.3	198.4	180.7	197.1	179.7	196.8	178.0	195.6
2800kJ	182.4	198.6	180.9	197.3	179.9	197.0	178.1	195.8
2900kJ	182.6	198.7	181.1	197.4	180.0	197.2	178.3	195.9
3000kJ	182.7	198.9	181.2	197.6	180.2	197.3	178.4	196.1
3100kJ	182.9	199.0	181.3	197.7	180.3	197.4	178.6	196.2
3200kJ	183.0	199.2	181.5	197.9	180.5	197.6	178.7	196.4
3300kJ	183.1	199.3	181.6	198.0	180.6	197.7	178.8	196.5
3400kJ	183.3	199.4	181.7	198.1	180.7	197.8	179.0	196.6
3500kJ	183.4	199.6	181.9	198.3	180.9	198.0	179.1	196.8
3600kJ	183.5	199.7	182.0	198.4	181.0	198.1	179.2	196.9
3700kJ	183.6	199.8	182.1	198.5	181.1	198.2	179.3	197.0
3800kJ	183.7	199.9	182.2	198.6	181.2	198.3	179.4	197.1
3900kJ	183.9	200.0	182.3	198.7	181.3	198.4	179.6	197.2
4000kJ	184.0	200.1	182.5	198.8	181.4	198.6	179.7	197.3

Tabelle 7: Prognostizierter L_E und L_{peak} für **Monopfahl-Design 2** bei maximaler Eindringtiefe ohne Schallminderung für verschiedene Rammenergien in **750m Entfernung zum Pfahl, 2m über dem Meeresboden** für die beiden Boden-Setups und Bodendämpfungs-Szenarien. Werte skaliert auf Basis der FE-Berechnungen bei 3000kJ.

	Boden-Setup 1				Boden-Setup 2			
	Geringes Bodendämpf.- Szenario		Hohes Bodendämpf.- Szenario		Geringes Bodendämpf.- Szenario		Hohes Bodendämpf.- Szenario	
	L_E [dB]	L_{peak} [dB]	L_E [dB]	L_E [dB]	L_{peak} [dB]	L_{peak} [dB]	L_E [dB]	L_{peak} [dB]
500kJ	172.4	192.3	171.0	191.0	170.7	186.0	168.5	184.7
600kJ	173.2	193.0	171.8	191.8	171.5	186.8	169.3	185.5
700kJ	173.9	193.7	172.5	192.4	172.2	187.4	170.0	186.1
800kJ	174.5	194.3	173.1	193.0	172.7	188.0	170.6	186.7
900kJ	175.0	194.8	173.6	193.5	173.3	188.5	171.1	187.2
1000kJ	175.4	195.3	174.0	194.0	173.7	189.0	171.6	187.7
1100kJ	175.8	195.7	174.5	194.4	174.1	189.4	172.0	188.1
1200kJ	176.2	196.1	174.8	194.8	174.5	189.8	172.3	188.5
1300kJ	176.6	196.4	175.2	195.1	174.8	190.1	172.7	188.8
1400kJ	176.9	196.7	175.5	195.4	175.2	190.4	173.0	189.1
1500kJ	177.2	197.0	175.8	195.7	175.5	190.7	173.3	189.4
1600kJ	177.5	197.3	176.1	196.0	175.8	191.0	173.6	189.7
1700kJ	177.7	197.6	176.3	196.3	176.0	191.3	173.9	190.0
1800kJ	178.0	197.8	176.6	196.5	176.3	191.5	174.1	190.2
1900kJ	178.2	198.1	176.8	196.8	176.5	191.8	174.3	190.5

2000kJ	178.4	198.3	177.1	197.0	176.7	192.0	174.6	190.7
2100kJ	178.6	198.5	177.3	197.2	176.9	192.2	174.8	190.9
2200kJ	178.9	198.7	177.5	197.4	177.1	192.4	175.0	191.1
2300kJ	179.0	198.9	177.7	197.6	177.3	192.6	175.2	191.3
2400kJ	179.2	199.1	177.8	197.8	177.5	192.8	175.4	191.5
2500kJ	179.4	199.2	178.0	198.0	177.7	193.0	175.5	191.7
2600kJ	179.6	199.4	178.2	198.1	177.9	193.1	175.7	191.8
2700kJ	179.7	199.6	178.4	198.3	178.0	193.3	175.9	192.0
2800kJ	179.9	199.7	178.5	198.5	178.2	193.4	176.0	192.1
2900kJ	180.0	199.9	178.7	198.6	178.3	193.6	176.2	192.3
3000kJ	180.2	200.0	178.8	198.8	178.5	193.7	176.3	192.4
3100kJ	180.3	200.2	179.0	198.9	178.6	193.9	176.5	192.6
3200kJ	180.5	200.3	179.1	199.0	178.8	194.0	176.6	192.7
3300kJ	180.6	200.5	179.2	199.2	178.9	194.2	176.7	192.9
3400kJ	180.7	200.6	179.4	199.3	179.0	194.3	176.9	193.0
3500kJ	180.9	200.7	179.5	199.4	179.2	194.4	177.0	193.1
3600kJ	181.0	200.8	179.6	199.5	179.3	194.5	177.1	193.2
3700kJ	181.1	200.9	179.7	199.7	179.4	194.7	177.2	193.4
3800kJ	181.2	201.1	179.8	199.8	179.5	194.8	177.4	193.5
3900kJ	181.3	201.2	180.0	199.9	179.6	194.9	177.5	193.6
4000kJ	181.4	201.3	180.1	200.0	179.7	195.0	177.6	193.7

Literatur

- [1] Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), *Standard Untersuchung der Auswirkung von Offshore-Windenergieanlagen auf die Meeresumwelt (StUK4)*, Oktober 2013
- [2] A. Müller, C. Zerbs, *Offshore-Windparks: Prognosen für Unterwasserschall*, Bericht im Auftrag des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), 2013
- [3] O. von Estorff, K. Heitmann, S. Lippert, T. Lippert, K. Reimann, M. Ruhnau, M. Schwarz, *Unterwasser-Rammschall: Eine Herausforderung bei der Errichtung von Offshore-Windparks und für die numerische Simulation*, *Lärmbekämpfung* **8**(2), 2013
- [4] S. Lippert, T. Lippert, K. Heitmann, O. von Estorff, *Prediction of Underwater Noise and Far Field Propagation due to Pile Driving for Offshore Wind Farms*, Tagungsband der 21st International Conference on Acoustics (ICA), Montréal, Kanada, 2013
- [5] K. Heitmann, T. Lippert, M. Ruhnau, S. Lippert, O. von Estorff, *Computational Prediction of the Underwater Sound Pressure due to Offshore Pile Driving*, Tagungsband des 21st International Congress on Sound and Vibration (ICSV), Beijing, China, 2014
- [6] K. Heitmann, T. Lippert, M. Ruhnau, S. Lippert, O. von Estorff, *Untersuchung des Einflusses der geometrischen Abmessungen eines Monopiles auf den Schalldruckpegel während einer Offshore-Pfahlrammung*, Tagungsband der 40. Jahrestagung für Akustik (DAGA), Oldenburg, 2014
- [7] A. J. Deeks, M. F. Randolph, *Analytical Modelling of Hammer Impact for Pile Driving*, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* **17**, pp. 279-302, 1993
- [8] P. Reinhall, P. Dahl, *Underwater Mach Wave Radiation from Impact Pile Driving: Theory and Observation*, *Journal of the Acoustical Society of America* **130**(3), pp. 1209-1216, 2011
- [9] K. Heitmann, S. Mallapur, T. Lippert, M. Ruhnau, S. Lippert, O. von Estorff, *Numerical Determination of Equivalent Damping Parameters for a Finite Element Model to Predict the Underwater Noise due to Offshore Pile Driving*, Tagungsband des 10th

European Congress and Exposition on Noise Control Engineering (EuroNoise 2015), Maastricht, Niederlande, 2015

[10] M. Milatz, K. Reimann, J. Grabe, *Numerical Simulations of Hydro Sound Emissions due to Offshore Pile Driving*, Tagungsband der 7th International Conference on Offshore Site Investigation and Geotechnics, London, Großbritannien, 2012

[11] Projekt BORA - Berechnung von Offshore Rammschall (FKZ 0325421), siehe <http://www.tuhh.de/bora>.

[12] K. Heitmann, T. Lippert, M. Ruhnau, S. Lippert, O. von Estorff, *Rammschallvorhersage zur dritten Offshore-Messkampagne (OMK3) des BORA-Projektes*, Schallschutzworkshop 2014 des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Hamburg, 2014

[13] K. Heitmann, M. Ruhnau, T. Lippert, S. Lippert, O. von Estorff, *Numerical Investigation of the Influence of Different Sound Mitigation System on the Underwater Sound Pressure Level due to Offshore Pile Driving*, Tagungsband des 22st International Congress on Sound and Vibration (ICSV), Florenz, Italien, 2015

[14] S. Lippert, M. Huisman, M. Ruhnau, O. von Estorff, K. van Zandwijk, *Prognosis of Underwater Pile Driving Noise for Submerged Skirt Piles of Jacket Structures*, Tagungsband der 4th International Conference and Exhibition on Underwater Acoustics (UACE 2017), Skiathos, Griechenland, 2017

[15] K. Heitmann, *Vorhersage des Unterwasserschalls bei Offshore-Rammarbeiten unter Berücksichtigung von Schallminderungsmaßnahmen*, Dissertation, Technische Universität Hamburg TUHH, Hamburg, 2016

[16] *18A539-JBO-DWMPCD-EN-4007_Arcadis Ost 1.pdf*, Technische Zeichnung zu Monopfahl-Design 1, von Parkwind an Novicos via SharePoint Transfer gesendet am 22.02.2019

[17] *190815_AO1_TP-less_MP_for_noise_prognosis.pdf*, Technische Zeichnung zu Monopfahl-Design 2, von Parkwind an Novicos per E-Mail gesendet am 15.08.2019

[18] Arcadis Deutschland GmbH, *Baugrundvoruntersuchungsbericht*, Technischer Bericht, Dokumentnummer AO1_GeolBer_032012 rev. 01, März 2012

- [19] Nautik Nord GmbH, *Geologischer Bericht*, Technischer Bericht, Dokumentnummer DE0109.533007.0129/dü-gö, November 2012
- [22] Fraunhofer IWES, *Geophysikalische Vermessungen und Einsinkversuch*, Technischer Bericht, Dokumentnummer 104426 rev. 01, März 2014
- [21] *AO1_Layout_and_Expected_Stratigraphy.xlsx*, Windpark-Layout und vermutete Stratigraphie an den Pfahllokalationen, von Parkwind an Novicos via SharePoint Transfer gesendet am 22.02.2019
- [22] IHC IQIP, *Drive Ability Arcadis Ost*, Technischer Bericht, Dokumentnummer Q08927-R002 rev. 02, Januar 2019
- [23] E. Klages, J. von Pein, S. Lippert, O. von Estorff, *Primäre Schallminderung bei Offshore-Pfahlrammungen durch Veränderung des Rammimpulses*, Tagungsband der 45. Jahrestagung für Akustik (DAGA), Rostock, 2019
- [24] S. Koschinski, K. Lüdemann, *Development of Noise Mitigation Measures in Offshore Wind Farm Construction*, Bundesamt für Naturschutz (BfN), 2013
- [25] M. A. Bellmann, *Overview of Existing Noise Mitigation Systems for Reducing Pile-Driving Noise*, Tagungsband des 43rd International Congress on Noise Control Engineering (Inter-Noise 2014), Melbourne, Australien, 2014
- [26] M. Bellmann, P. Remmers, H. Holst, S. Gündert, R. Matuschek, T. Drost, M. Müller, M. Schultz von Glahn, *Entwicklungen von Schallschutzsystemen von alpha ventus bis Butendiek*, Schallschutzworkshop 2014 des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Hamburg, 2014
- [27] M. Bellmann, H. Holst, S. Gündert, M. Müller, P. Remmers, M. Schultz-von Glahn, *Neue Erkenntnisse zur Wirkungsweise eines „Großen Blasenschleiers“ (GBS) durch Druckverteilungs- und Hydroschallmessungen*, Workshop AK Hydroschall an der Technischen Universität Hamburg, Hamburg, 2015

Appendix A – Revisions-Historie

Die folgenden Revisionen des Berichtes existieren:

- Sachstandsbericht 19-012-38-01-01-DE (Rev. 01), 05. April 2019
- Sachstandsbericht 19-012-38-01-02-DE (Rev. 02), 24. August 2019

Wesentliche Änderungen gegenüber Rev. 01:

- Berücksichtigung von zusätzlichen Ergebnissen für ein weiteres Monopfahl-Design (Monopfahl-Design 2)
- Entfall der Ergebnisse für den Jacketpfahl
- Diverse Änderungen redaktioneller Natur, u.a. durchgängige Verwendung deutschsprachiger Bezeichnungen