



Bericht 3/1348-1

Dokumentation von Minendetonationen

Fehmarnbelt - August 2019

Kunde:



**Bundesamt für Naturschutz
Außenstelle Insel Vilm
18581 Putbus**

Angefertigt durch:

DW-ShipConsult GmbH

Lise-Meitner-Str. 9

24223 Schwentinental | Germany

Dokumentkontrollblatt

Kunde	BfN – Bundesamt für Naturschutz – Außenstelle Insel Vilm
Projekt	Schallmessung Ostsee – Dokumentation Minensprengungen
Projekt Nr.	3/1348
Bericht Nr..	3/1348 - 1
Berichtstitel	Dokumentation von Minendetonationen - Fehmarnbelt - August 2019

Rev. Nr.	Datum	Ausgabeanlass	Angefertigt	Kontrolliert	Genehmigt
0	13.03.2020	Überarbeiteter Entwurf	MS, FH	TB	DW
1	09.07.2020	Anm. BfN berücksichtigt	FH	MS	TB

Zusammenfassung:

Es wurden Messdaten aus Dauerschallmessungen in der Ostsee mit Hinblick auf Schallbelastung während eines Manövers zur Munitionsräumung ausgewertet. Die Sondierung der Messdaten von 4 Rekorder-Positionen zu 18 Zeitpunkten, in denen Minen gesprengt wurden, hat ergeben, dass die Messdaten in den kurzen Distanzen von ca. 3 bis 19 km bei allen 18 gemessenen Sprengungen oberhalb des linearen Messbereichs des verwendeten Systems (der bis 165 dB re 1µPa SPL reicht) lagen. Bei zwei Messungen übertraf der empfangene Schalldruck den linearen Messbereich nur geringfügig und wurde leicht verzerrt, wodurch nur ein Pegelbereich für den empfangenen Schalldruck angegeben werden kann. Bei allen übrigen Messungen übertraf der empfangene Schalldruck den linearen Messbereich so deutlich, dass lediglich Mindestwerte für den erreichten Schalldruck (SPL) und die erreichte Schallenergie (SEL) angegeben werden können. An der Messposition in größerer Entfernung (ca. 70 bis 85 km), an der es durch starken Schiffsverkehr relativ laut ist, sind die Detonationen nicht zu erkennen.

Die empfangenen Signale zeigen große Unterschiede bei der Dauer der Übersteuerungen. Das deutet darauf hin, dass auch die Spitzenpegel und die daraus folgenden Einzelereignisse der empfangenen Signale sehr unterschiedlich sind.

Mittels empirischer Modellierung wurden Entfernungen berechnet, innerhalb derer die Impulsschallenergie Grenzwerte für Hörschäden beim Schweinswal (Grenzwerte für Hörschäden aus (von Benda-Beckmann, et al., 2015)) überschritt. Für eine Sprengstoffmasse von 263 kg TNT ergeben sich folgende Entfernungen: für TTS (temporäre Hörschwellenverschiebung): ca. 10 bis 50 km, für PTS (permanente Hörschwellenverschiebung) ca. 3 bis 11 km und für das „Ohrtrauma“ ca. 0,8 bis 4 km. Der Lärmschutzgrenzwert von 160 dB re 1 µPa²s aus dem Schallschutzkonzept (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2013) wird bis in eine Entfernung von ca. 20 bis 90 km vom Sprengort überschritten.

Die Berechnung der Entfernungen, innerhalb derer die biologisch relevanten Grenzwerte überschritten werden, basiert auf Messungen ähnlicher Detonationen an anderen Orten sowie empirischen Formeln zur Bestimmung des Quellpegels und des Ausbreitungsverlustes. Die lokalen Umweltbedingungen (Wassertiefe und grobe Angaben zur Sedimentstruktur) können berücksichtigt werden, ihre Veränderung mit zunehmender Entfernung von der Schallquelle hingegen nicht. Die in der Region Fehmarnbelt vorherrschenden Weltkriegs-Grundminen gehören zu den britischen Typen MK 1 - 7 und haben Explosivstoffmassen zwischen ca. 220 und 390 kg TNT-Äquivalent (Uwe Wichert, persönliche Information). Die aus den vorliegenden Messdaten aus dem Fehmarnbelt ermittelten Mindest-SEL-Werte deuten auf eine gute Abschätzungsmöglichkeit der durch Minen-Detonationen entstehenden Schalldrücke in Entfernungen von ca. 3 km bis ca. 20 km hin.

Für das weitere Vorgehen empfiehlt sich einerseits eine numerische Modellierung der Schallausbreitung, durch die entfernungsabhängige Eigenschaften der Umwelt berücksichtigt werden können. Mit Ausblick auf zukünftige Schallmessungen von Sprengungen ist ein Messaufbau mit unempfindlichen Hydrophonen empfehlenswert, durch die die erwarteten Spitzendrücke ab ungefähr 5 km aufgezeichnet werden können.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	4
2	Kriterien für die Bewertung der Detonationen	5
3	Verwendetes Messsystem.....	6
4	Dokumentation gemessener impulshafter Geräusche	8
5	Berechnung einer unteren Grenze für SEL und Spitzenpegel	11
6	Berechnung der Schallbelastung anhand empirischer Formeln	11
6.1	Allgemeines zu impulshaften Geräuschen hoher Intensität	12
6.2	Berechnung des Spitzendrucks.....	14
6.3	Berechnung der Ausbreitung der Schallenergie.....	15
6.4	Zusammenhang Spitzenpegel und Schallenergie.....	18
6.5	Abschätzung der Schallbelastung in der Umgebung.....	19
6.6	Ausbreitungsverlust nach Thiele	21
6.7	Ausbreitungsverlust mit <i>mode stripping</i> nach Urick	21
6.8	Darstellung der empfangenen und berechneten Pegel	22
6.9	Vergleich mit gemessenen Pegeln	26
7	Literaturrecherche JASA Journal	27
8	Diskussion.....	27
9	Fazit	28
10	Literaturverzeichnis.....	30

1 Einführung

Ende August 2019 wurden im Seegebiet Fehmarnbelt während einer NATO-Übung Kampfmittel aus dem Zweiten Weltkrieg beseitigt. Bei der Beseitigung kommt in den meisten Fällen eine Sprengung vor Ort zum Einsatz, bei der die Ladung des Kampfmittels durch eine kleinere Menge zusätzlich angelegten Sprengstoffes zur Explosion gebracht wird. Bei diesem Verfahren breitet sich eine Schockwelle mit sehr großem Überdruck, gefolgt von einer Schallwelle, im Wasserkörper aus, die marine Lebewesen schädigen kann (Koschinski, 2011).

Im Zeitraum während des Übungsmanövers fand im Auftrag des BfN die erste Ausfahrt zur Ausbringung akustischer Messgeräte statt. Durch die Messgeräte sollen kontinuierliche Schallmessungen in der Ostsee durchgeführt werden; eine Übersicht der Messpositionen ist in Abbildung 1 dargestellt. Das Messsystem wurde für die Erfassung von Schiffslärm entworfen. In diesem Bericht soll ermittelt werden, in welcher Qualität das Messsystem auch die Sprengungen aufzeichnen konnte.

Ein Teil der Detonationen¹ während des Manövers fanden in einem Zeitraum statt, in dem die Messgeräte Schall aufgezeichnet haben. Im vorliegenden Projekt soll der akustische Datensatz nach Signaturen der Sprengungen durchsucht werden. Die enthaltenen Signale der Detonationen sollen, sofern sie innerhalb des Messbereichs liegen, ausgewertet werden.

Darüber hinaus werden empirische Formeln angewandt, um Entfernungen abzuschätzen innerhalb derer bestimmte Grenzwerte wahrscheinlich überschritten wurden.

Zu den beseitigten Kampfmitteln liegt bisher nur eine auf historischen Daten basierende Dokumentation der Minentypen im Seegebiet vor. Eine eindeutige Zuordnung des Minentyps zu einzelnen Sprengungen ist bisher nicht verfügbar.

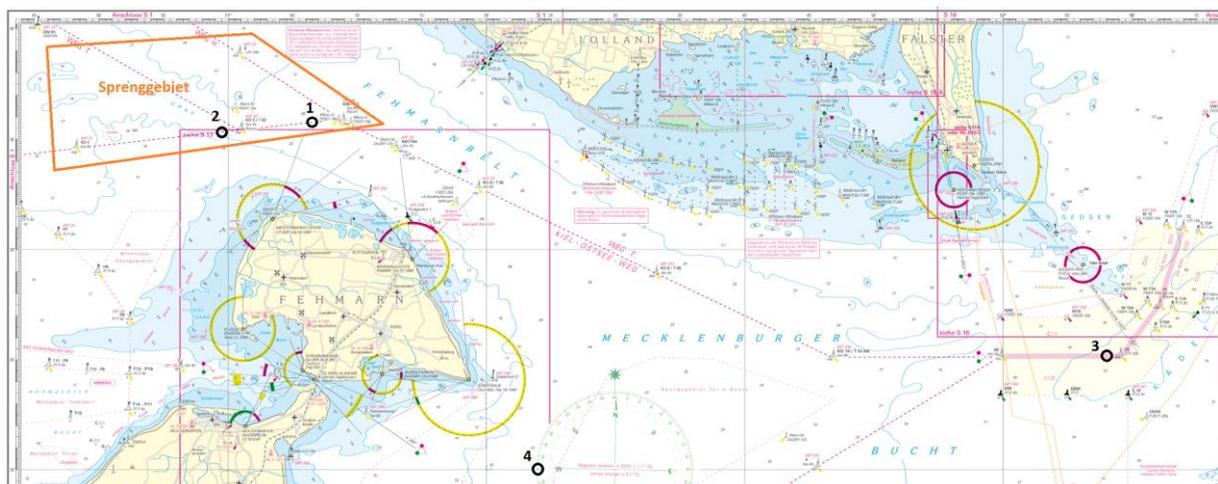


Abbildung 1 Seekartenausschnitt mit den Messpositionen und Sprenggebiet in der Ostsee

¹ Es wird zunächst angenommen, dass die Beseitigung jedes Kampfmittels durch Detonation erfolgte. Es ist nicht gänzlich auszuschließen, dass es vereinzelt auch Deflagrationen gab.

2 Kriterien für die Bewertung der Detonationen

Für die Beschreibung der Auswirkungen impulshafter Geräusche auf marine Organismen stehen zwei unterschiedliche Pegelgrößen zur Verfügung, die in Abbildung 2 erläutert werden:

- Die Schallenergie des Ereignisses, auch als „Einzelereignispegel“ oder „sound exposure level (SEL)“ bezeichnet.
- Der Spitzenpegel
 - o Der maximale positive Überdruck zero-to-peak
 - o Die Differenz zwischen den beiden Maxima peak-to-peak

In Anlehnung an (Erbe, 2011) werden die hier ausgewerteten impulshaften Ereignisse zusätzlich durch die Signallänge T90 charakterisiert, in der 90% der akustischen Energie des Signals enthalten sind.

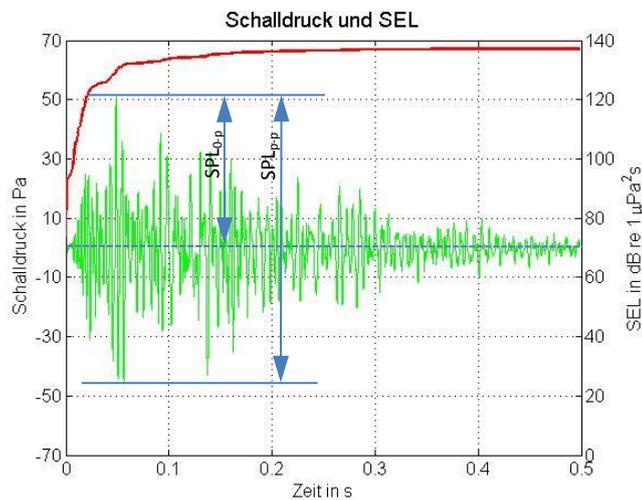


Abbildung 2: Pegelgrößen für die Beschreibung impulshafter Geräusche. Druck: grün, SEL: rot.

Durch das Schallschutzkonzept (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2013) wird ein duales Kriterium für die Bewertung der Umweltverträglichkeit der Errichtung von Offshore-Windparks definiert. Darin dürfen in einer Entfernung von 750 m zur Gründung weder ein Einzelereignispegel SEL von 160 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$, noch ein Spitzenpegel von 190 dB re 1 μPa überschritten werden.

In diesem Bericht werden für die Bewertung der Auswirkungen der Detonationen zusätzlich Kriterien herangezogen, die ausschließlich die Schallenergie berücksichtigen (Abbildung 3, entnommen aus (von Benda-Beckmann, et al., 2015)). Um die empfangenen Signale der Detonationen nach allen vorgestellten Bewertungskriterien einordnen zu können, werden in der folgenden Auswertung sowohl die empfangene Schallenergie SEL, als auch der empfangene Spitzenpegel SPL ermittelt.

SEL (unweighted) (dB re 1 μ Pa ² s)	Noise- induced TTS	Noise- induced PTS	Blast wave- induced ear trauma	Permanent hearing loss
> 203	Very likely	Very likely*	Very likely	Very likely
190-203			Increasingly likely	
179-190		Increasingly likely	Unlikely	Increasingly likely
164-179	Unlikely	Unlikely		Unlikely
< 164				

Abbildung 3: Grenzen für unterschiedliche Verletzungen am Gehör des Schweinswals (entnommen aus (von Benda-Beckmann, et al., 2015))

3 Verwendetes Messsystem

An allen Messpositionen kam eine identische Auslage zum Einsatz, die aus Messgerät, Verankerung und Oberflächenmarkierung besteht (Abbildung 6). Das Messsystem wurde für die kontinuierliche Aufzeichnung niedriger Schalldruckpegel konfiguriert, um passierende Schiffe und Umweltgeräusche bis in einen Frequenzreich von ca. 50 kHz abbilden zu können. Details sind der nachstehenden Tabelle zu entnehmen. Die Empfindlichkeit der Messkette wurde zu Beginn und Ende der Messungen durch eine geeichte Referenzschallquelle überprüft.

Tabelle 1: Eigenschaften des Messsystems

Typ Rekorder	Jasco AMAR G3R3
HydrophonTyp	Geospectrum M36-V35-100
Empfindlichkeit Hydrophon	-165 dB re 1 V/ μ Pa
Samplingrate Rekorder	96 kS/sec
Dynamikgrenze des Messsystems	165 dB re 1 μ Pa zero-to-peak
Position Hydrophon	1,8 m über Meeresboden

Mit Hinblick auf die Auswertung der Sprengungen ist insbesondere die obere Grenze des darstellbaren Schalldrucks am Hydrophon relevant, siehe auch Abbildung 4: Oberhalb eines Spitzendrucks von 180 Pa entspricht 165 dB re 1 μ Pa) wird das Signal durch Übersteuerung („soft clipping“) verzerrt. Die Grenze für Übersteuerung („hard clipping“) des Hydrophons ist unsymmetrisch. In der Auswertung werden alle Signale, die 180 Pa überschreiten als übersteuert eingestuft. Die Schallenergie des Ereignisses wird aus dem Zeitsignal berechnet, so wie es in den Rohdaten enthalten ist. Der „wahre“ Energiegehalt wird dadurch unterschätzt, sodass der angegebene Zahlenwert nur eine untere Schranke darstellt.

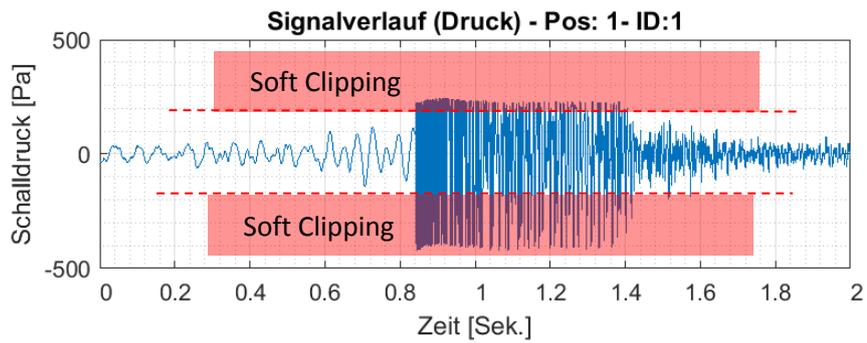


Abbildung 4: Dynamikgrenze des Messsystems bei 165 dB re 1 μ Pa zero to peak (180 Pa), hier dargestellt durch rote Linie

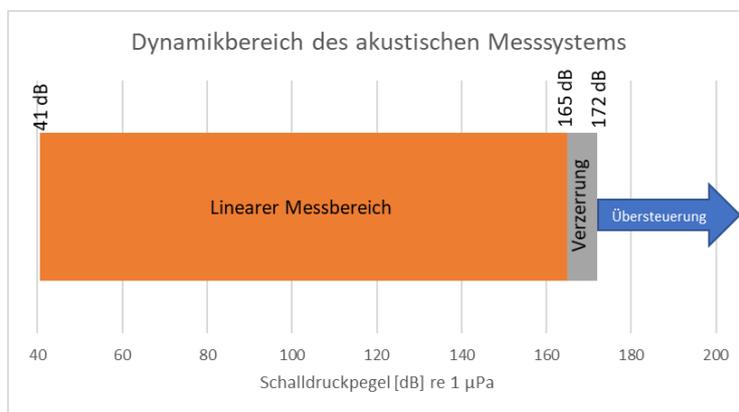


Abbildung 5: Dynamikbereich des Messsystems

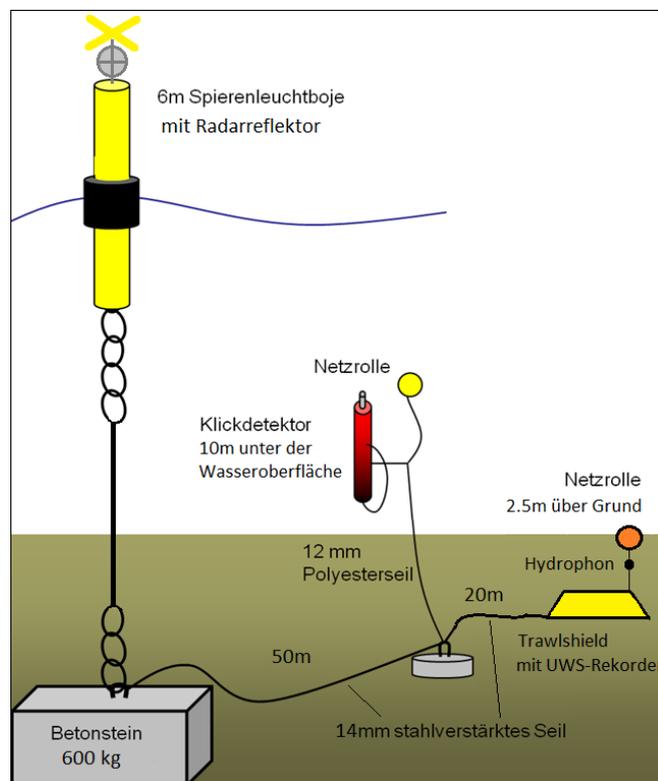


Abbildung 6: Verankerung der akustischen Messgeräte

4 Dokumentation gemessener impulshafter Geräusche

Die folgende Tabelle zeigt die Wassertiefe an den Orten der Sprengung und die Entfernung zu den 4 Messstellen. Die Entfernungen zwischen Messposition und Detonation sowie die Wassertiefen an den Orten der Detonationen wurden durch das BfN zur Verfügung gestellt. Aus der grafischen Darstellung in Abbildung 7 wird deutlich, dass die Detonationen in drei unterschiedlichen Entfernungsbereichen aufgezeichnet wurden:

1. Im Nahbereich mit weniger als 20 km Entfernung an Position 1 und Position 2
2. Im Schallschatten der Insel Fehmarn an Position 4
3. In sehr großer Entfernung zwischen 70 und 90 km an Position 3

Alle Detonationen haben in ähnlichen Wassertiefen zwischen 16 und 24 m stattgefunden.

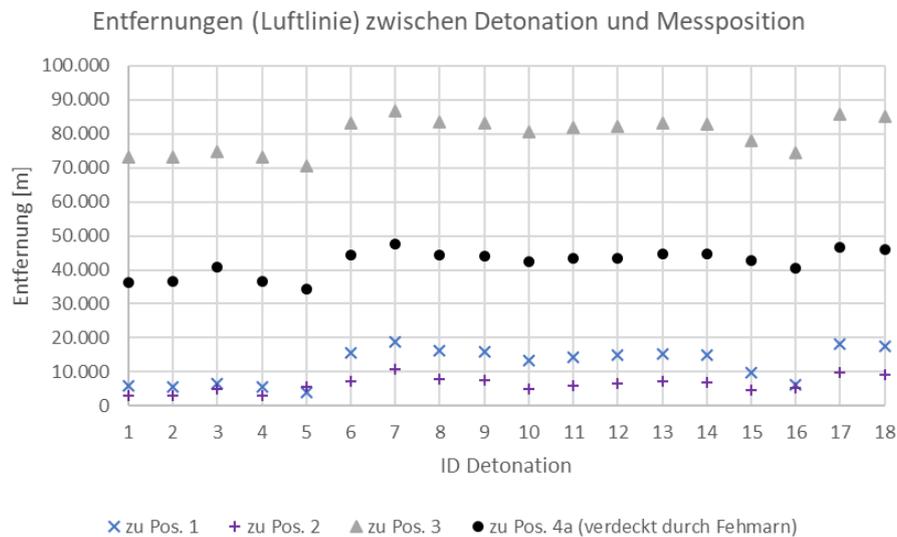


Abbildung 7: Entfernungen zwischen Messpositionen und Detonationen

Tabelle 2 Wassertiefe an den Orten der Sprengung und die Entfernung zu den 4 Messstellen

ID	Datum	Zeit (UTC)	Wassertiefe [m]	Entfernung zwischen Detonation und Messposition [m]			
				Pos. 1	Pos. 2	Pos. 3	Pos. 4
1	29.08.	09:51	16,7	6039,8	3047,1	73096,5	36286,6
2	29.08.	10:51	23,5	5632,6	3081,4	72982,9	36525,7
3	29.08.	11:32	22,9	6611,5	5086,0	74598,6	40690,0
4	29.08.	12:21	23,5	5731,9	2969,7	73095,0	36613,8
5	29.08.	14:26	21,4	3946,1	5657,4	70423,4	34265,3
6	29.08.	15:05	18,6	15489,1	7121,1	82998,4	44342,1
7	30.08.	13:28	20,6	18999,3	10694,1	86648,5	47675,6
8	30.08.	16:41	18,2	16183,7	7796,4	83460,2	44354,2
9	30.08.	17:40	17,3	15857,0	7470,0	83121,1	44056,8
10	31.08.	06:02	16,4	13215,8	4830,2	80681,5	42384,4
11	31.08.	06:41	17,3	14292,7	5915,3	81788,1	43326,3
12	31.08.	07:46	16,7	14987,0	6599,8	82303,2	43464,9
13	31.08.	08:21	20,6	15406,5	7096,6	83097,1	44756,5

14	31.08.	09:19	20,8	14968,0	6733,8	82787,6	44772,8
15	31.08.	10:46	20,9	9673,4	4526,2	77833,7	42895,4
16	31.08.	11:40	22,7	6348,5	5379,9	74268,0	40547,5
17	31.08.	13:16	20,4	18303,2	9943,6	85777,1	46607,7
18	31.08.	16:11	20,1	17501,9	9153,5	85043,8	46107,0

Tabelle 3 zeigt Merkmale des aufgezeichneten Schalldrucks zur Zeit der Detonationen.

Tabelle 3 Merkmale des empfangenen Signals an den 4 Messstellen. „ü“ steht für übersteuert, „-“ bedeutet, dass das Messsystem noch nicht ausgebracht war, „n.e.“ steht für „nicht erkennbar“ und „n.d.e.“ steht für nicht deutlich erkennbar. Letzteres bedeutet, dass im Spektrogramm nur ein „Schatten“ zwischen 0 und 50 Hz erkennbar ist.

ID	Datum	Zeit (UTC)	Mess-Pos.						
			1	Mindest-SEL [dB]	2	Mindest-SEL [dB]	3	4 (a)	Mindest-SEL [dB]
1	29.08.	09:51	ü	165	ü	166	-	n.e.	-
2	29.08.	10:51	ü	171	ü	171	-	n.e.	-
3	29.08.	11:32	ü	166	ü	168	-	n.e.	-
4	29.08.	12:21	ü	166	ü	161	-	n.d.e.	130
5	29.08.	14:26	ü	162	ü	164	n.e.	n.d.e.	-
6	29.08.	15:05	ü	165	ü	165	n.e.	n.d.e.	-
7	30.08.	13:28	ü	163	ü	166	n.e.	o.k.	126
8	30.08.	16:41	soft clip	149	ü	155	n.e.	n.e.	-
9	30.08.	17:40	ü	156	ü	161	n.e.	n.d.e.	129
10	31.08.	06:02	ü	157	ü	163	n.e.	n.e.	-
11	31.08.	06:41	ü	149	ü	158	n.e.	n.e.	-
12	31.08.	07:46	ü	165	ü	170	n.e.	o.k.	129
13	31.08.	08:21	ü	164	ü	169	n.e.	n.d.e.	-
14	31.08.	09:19	soft clip	153	ü	163	n.e.	n.e.	-
15	31.08.	10:46	ü	164	ü	167	n.e.	o.k.	126
16	31.08.	11:40	ü	164	ü	167	n.e.	o.k.	126
17	31.08.	13:16	ü	159	ü	163	n.e.	n.e.	-
18	31.08.	16:11	ü	164	ü	167	n.e.	o.k.	125

Wie in Tabelle 3 erkennbar, sind nur zwei Aufnahmen (ID 8 und 14) an den Positionen 1 und 2 unter der Einschränkung der Verzerrung des Hydrophons insofern aussagekräftig auswertbar, als dass hier eine Abschätzung für Spitzenpegel und SEL möglich ist (vergleiche Abbildung 5). Durch die Verzerrung erscheint das ausgewertete Ergebnis zwischen 0 dB und 5 dB niedriger als der tatsächliche Wert. Eine präzise Bestimmung der Toleranz durch Verzerrung ist nicht möglich. Für die voll übersteuerten Signale, bei denen der Bereich der Verzerrung überschritten wird, können ebenfalls Zahlenwerte angegeben werden. Diese lassen sich nur dahingehend interpretieren, dass der tatsächliche Schallpegel im Wasser höher war als der ausgewertete Pegel. Daher die Bezeichnung als „Mindest-SEL“. Eine Abschätzung der Größenordnung der Überschreitung ist bei voll übersteuerten Signalen

nicht möglich. Position 4 ist nur sehr eingeschränkt aussagekräftig, da die Landmasse von Fehmarn zwischen den Detonationen und den Messpositionen liegt (siehe und Abbildung 1)

Die folgenden Abbildungen zeigen den Schalldruckverlauf sowie den daraus berechneten SEL der Ereignisse ID8 und ID 14 (den beiden einzigen Ereignissen, bei denen die Rekorder an Pos. 1 und 2 im NSG Fehmarnbelt nicht voll übersteuerten).

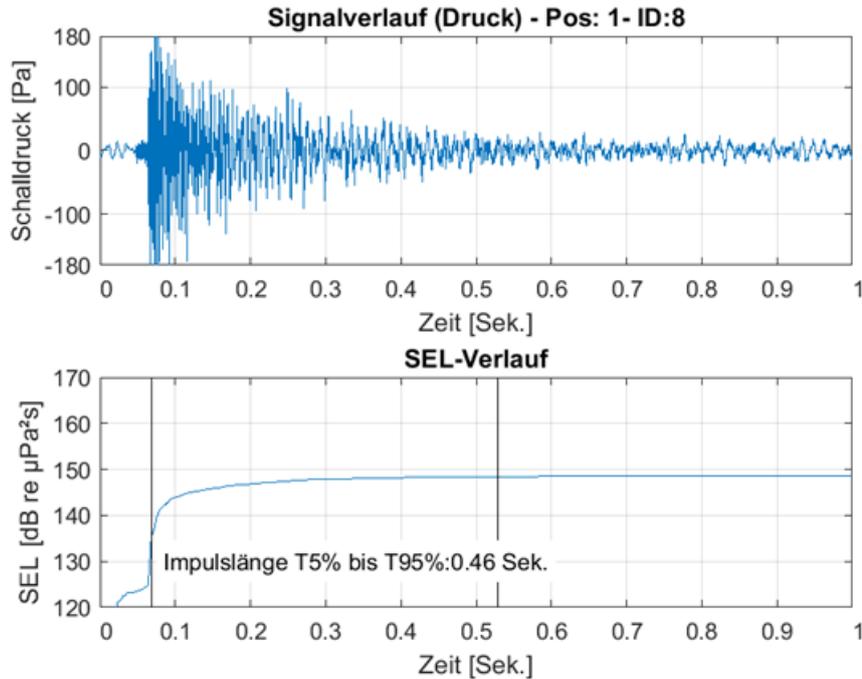


Abbildung 8 Druckverlauf und SEL-Verlauf der Detonation 8 an Pos. 1

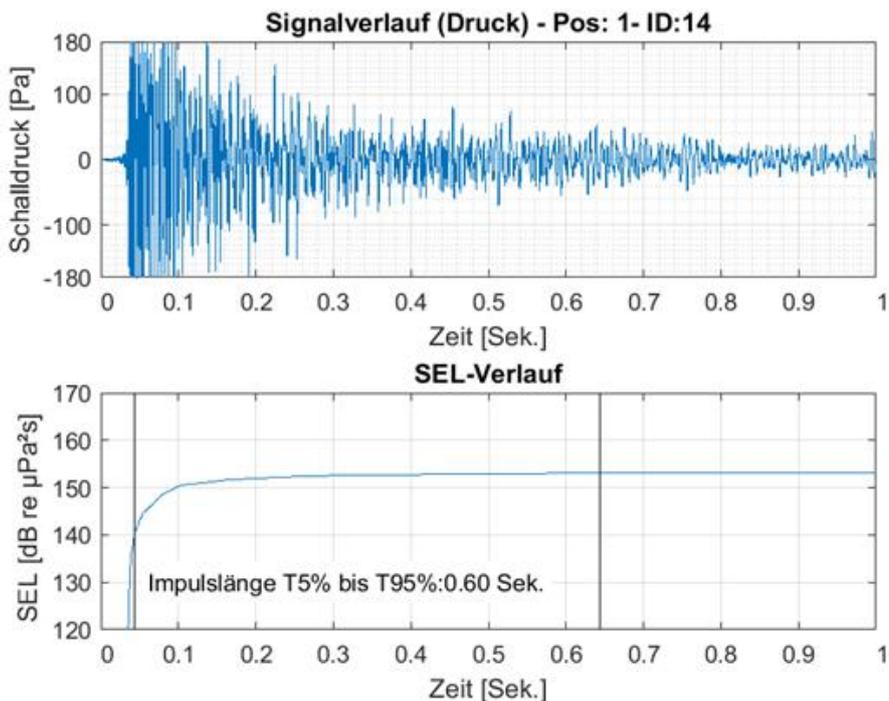


Abbildung 9 Druckverlauf und SEL-Verlauf der Detonation 14 an Pos. 1

5 Berechnung einer unteren Grenze für SEL und Spitzenpegel

Durch das Übersteuern des Messsignals lässt sich der tatsächliche Schalldruckverlauf an den Messpositionen beim Eintreffen der Schockwelle nicht abbilden (mit „ü“ in Tabelle 3 gekennzeichnet). Aus den vorliegenden, übersteuerten Daten kann nur abgeleitet werden, welcher Schalldruck mindestens aufgetreten ist, um das Übersteuern hervorzurufen. Der darstellbare Spitzenpegel liegt immer bei der Dynamikgrenze des Messsystems von ca. 172 dB (siehe Abbildung 5) und stellt selbst nur eine untere Grenze für den tatsächlichen Wert dar. Um eine untere Grenze für den SEL zu berechnen, wird das empfangene Signal der Detonationen inklusive der übersteuerten Zeitabschnitte ausgewertet. Der SEL wird durch Integration über die Zeit berechnet. Je länger das Messsignal übersteuert (also den maximal möglichen Wert annimmt), desto größer ist der berechnete Wert. Da die Signalstreckung eines impulshaften Geräuschs über die Entfernung zunimmt, kann die Auswertung des gleichen Ereignisses in kürzerer Entfernung eine kleinere untere Grenze ergeben als in größerer Entfernung. Die untere Schranke des SEL unterschätzt den tatsächlichen SEL um ein unbekanntes Maß.

6 Berechnung der Schallbelastung anhand empirischer Formeln

Für die Abschätzung der Schallbelastung im Umkreis der Detonationen wurde wie in Abbildung 10 dargestellt vorgegangen:

Es wird das in Benda-Beckmann et al. (2015) gezeigte Spektrum der Messung einer Detonation eines Sprengkörpers mit 263 kg Explosivmasse als Annahme für den Frequenzgehalt verwendet. Die in der Region Fehmarnbelt vorliegenden Grundminen gehören zu den Typen MK 1 - 7 und haben Explosivstoffmassen zwischen ca. 220 und 390 kg TNT-Äquivalent (Uwe Wichert, persönliche Information), somit entspricht die in der Berechnung angenommene Sprengstoffmasse einer Untergrenze der im Fehmarnbelt vorhandenen Kampfmittel, und stellt daher keine Überschätzung dar. Das gezeigte Spektrum wird durch eine Gerade interpoliert (s. Abbildung 16). Dann wird mit Hilfe der Thiele Formel (Elmer, Betke, & Neumann, 2007) (s. Abschnitt 6.6) das Quellpegelspektrum in 10 m Entfernung berechnet, das mithilfe der Regression aus Abbildung 15 in einen Spitzenpegel umgewandelt wird. Für den Spitzenpegel folgt schließlich ein Vergleich mit der Prognose des Spitzendruck gemäß BV0430 (Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, 1985). Nähere Erläuterungen dazu sind in Kapitel 6.5 Abschätzung der Schallbelastung in der Umgebung zu finden.

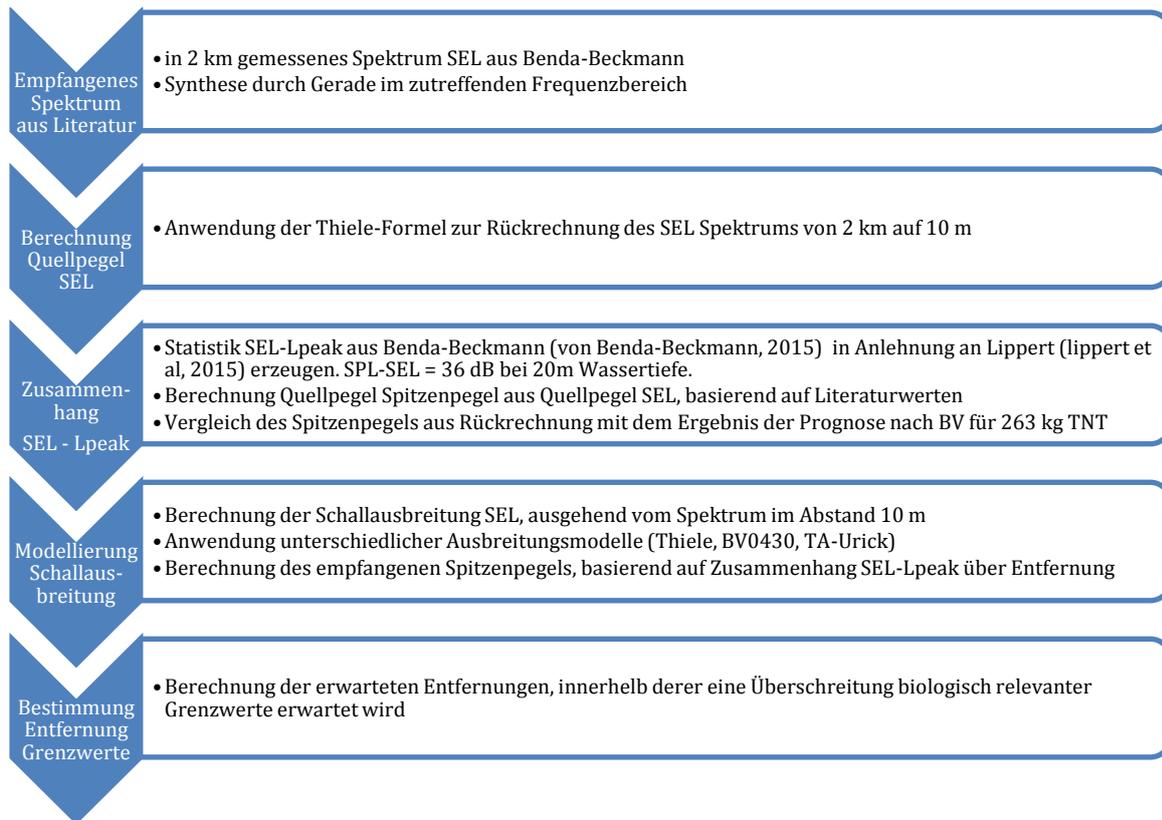


Abbildung 10: Methode für die frequenzabhängige Prognose der Schallemissionen einer Detonation

6.1 Allgemeines zu impulshaften Geräuschen hoher Intensität

6.1.1 Grundlagen

Durch Detonationen entstehen impulshafte Geräusche, die in der Nähe der Quelle durch einen schnellen Anstieg des Schalldrucks gekennzeichnet sind. Dieser Überdruck breitet sich im Wasserkörper aus und wird an Grenzflächen reflektiert. Die wichtigsten Reflexionen entstehen dabei an der Wasseroberfläche und am Meeresboden, wobei an der Wasseroberfläche eine Invertierung des Schalldrucks auftritt. Der ausgeprägte Überdruck wird dadurch in einen Unterdruck verwandelt. In großen Entfernungen setzt sich das empfangene Signal aus der Überlagerung mehrfach reflektierter Signale zusammen. So kann eine lange Abfolge positiver und negativer Anteile entstehen, die sich bei großen Übertragungsdistanzen über mehr als eine Sekunde erstrecken können. Das ursprünglich sehr scharfe, impulshafte Signal wird dadurch deutlich gestreckt. Mit steigender Entfernung nimmt die Anzahl der Reflexionen zu, sodass infolge unterschiedlicher Laufzeiten eine Signalstreckung einsetzt. Der ursprünglich scharfe Impuls kann dadurch zu einem mehrere Sekunden langen Donner verzerrt werden (Dietrich Wittekind, 2016), (Siebert, et al., 2013).

Für die Bewertung der biologischen Relevanz ist dabei zu beachten, dass die Schallenergie des Ereignisses und der Spitzendruck unterschiedlichen Ausbreitungsgesetzen unterliegen: Der Spitzendruck wird sowohl durch den akustischen Ausbreitungsverlust, als auch durch die Laufzeitunterschiede beeinflusst. Infolge der Signalstreckung wird die akustische Energie mit zunehmender Entfernung auf einen breiteren Zeitbereich verteilt. Dadurch verändert sich das Verhältnis von Spitzendruck zu SEL über die Entfernung: Bei kurzen Entfernungen ist der Unterschied

groß, er sinkt mit zunehmender Entfernung. Die Schallenergie SEL unterliegt nur dem (frequenzabhängigen) akustischen Ausbreitungsverlust.

6.1.2 Ähnlichkeiten zu anderen impulshaften Schallquellen

In der Literatur finden sich zahlreiche Untersuchungen zu impulshaften Geräuschen unter Wasser. Vor allem beziehen diese Arbeiten sich auf Airguns als seismische Schallquellen, auf Rammschall während der Installation großer Fundamente und auf Detonationen kleiner Sprengladungen mit weniger als 1 kg Explosivmasse. Literatur zu Detonationen mit mehr als 100 kg Explosivmasse ist in einem deutlich geringeren Umfang vorhanden. Daher werden die Forschungsergebnisse zu Pegelabnahme und Signalstreckung anderer impulshafter Geräusche auf die vorliegende Untersuchung der Sprengungen übertragen. Der Quellpegel der hier untersuchten Detonationen wird durch Formeln und Messdaten, die ausdrücklich für große Sprengladungen zutreffen, abgebildet. In dieser Untersuchung wird auf den Zusammenhang von SEL zu SPL (Lippert et al., 2015) aus Messungen mit Airguns zurückgegriffen und dieser auf Minendetonationen übertragen. Die für die Berechnung des Ausbreitungsverlustes verwendete Thiele-Formel beruht auf Messungen mit kleinen Sprengladungen (<1kg).

Durch (von Benda-Beckmann, et al., 2015) wird erwartet, dass sich die Erkenntnisse aus Untersuchungen seismischer Schallquellen gut auf die Beschreibung von Sprengungen übertragen lassen. Das erscheint plausibel, denn die Mechanismen der Schallentstehung sind ähnlich: In beiden Fällen wird der Schalldruck durch die schlagartige Expansion einer Gasblase erzeugt. Airguns und Sprengungen unterscheiden sich in zwei Aspekten: Airguns werden eher oberflächennah ausgelöst, während Sprengungen in der Regel auf dem Meeresboden stattfinden. Außerdem ist das Niveau des Schalldrucks beider Ereignisse deutlich unterschiedlich: Für typische industrielle Airgunarrays beträgt der (scheinbare) Spitzenpegel in 1 m Entfernung ca. 260 dB, siehe Abbildung 11. Zum Vergleich mit einer Sprengung wird der Pegel von 1 m zu 10 m Entfernung umgerechnet. Das bedeutet infolge sphärischer Ausbreitung im Nahbereich 20 dB weniger, also 240 dB beziehungsweise 1 MPa. Als Vergleich mit Sprengstoffen wird anhand der Prognoseformel der BV0430 eine äquivalente Masse TNT abgeschätzt, die einen Schalldruck in einer ähnlichen Größenordnung erzeugt. Die Formel erzeugt für 130 g und 10 m Entfernung einen Spitzendruck von 1 MPa. Als typische Größen gesprengter Kampfmittel wird die gleiche Formel für 300 kg Sprengstoff angewendet, was zu 30 MPa führt. Der Spitzendruck einer Sprengung ist demnach grob geschätzt um Faktor 30 größer als der (scheinbare) Spitzendruck eines großen industriellen Airgunclusters. Dabei ist zu beachten, dass der Quellpegel eines Airgunarrays durch viele räumlich verteilte Punktquellen erzeugt wird. Der Zahlenwert „scheinbarer Quellpegel“ beschreibt die Wirkung im Fernfeld. Bei der Sprengung hingegen wird der gesamte Druck an einem Punkt erzeugt, sodass örtlich in der Umgebung der Detonation erheblich höhere Drücke auftreten als bei einem Airgunarray. Daraus ergeben sich Unterschiede für die Schallbelastung der Umgebung: Das Signal der Airguns ist durch Oberflächennähe und Steuerung der Zündzeitpunkte stärker in Richtung Boden fokussiert während die Stoßwelle der Detonation sich stärker zur Seite ausbreitet. Durch den höheren Spitzendruck in der Nähe der Quelle entstehen bei der Detonation nichtlineare Effekte, wie z.B. Überschreitung der Zugfestigkeit des Wassers (Kavitation).

Rammschall erscheint für den Vergleich weniger geeignet, denn der Schall entsteht durch eine über die Wassersäule verteilte Quelle. Signifikante Anteile werden direkt in den Boden eingetragen. Außerdem ist die Signallänge an der Quelle deutlich größer als bei Airguns und Detonationen.

Zur Plausibilitätsprüfung der weiteren Betrachtungen wird daher in Einzelfällen ein Vergleich zu Airguns hergestellt. Rammschall wird nicht in den Vergleich einbezogen.

Aus den Messungen von Airguns wird der Zusammenhang von Spitzenpegel und SEL in großen Entfernungen für die Prognose des empfangenen Spitzenpegels aus dem empfangenen SEL des Sprengungsereignisses übernommen (Abbildung 15).

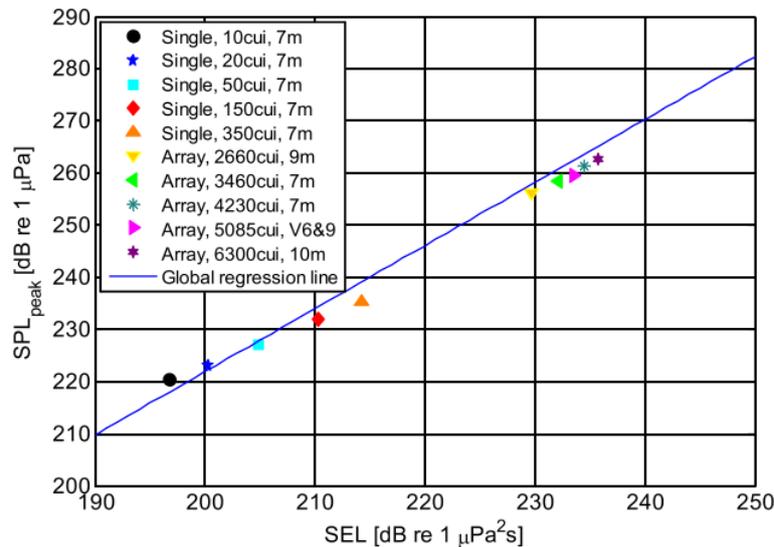


Abbildung 11: Spitzenpegel unterschiedlicher Airgun-Arrays, entnommen aus (Lippert et al., 2015)

6.2 Berechnung des Spitzendrucks

In *principles of underwater sound*, Urick, 3rd edition, 1983 und in der *Bauvorschrift für Schiffe der Bundeswehr 0430* (kurz: BV0430) (Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, 1985) sind Formeln genannt, mit denen sich der Druck, der von einer Sprengstoffladung in Abhängigkeit der Sprengstoffmasse und der Entfernung zur Detonation, überschlägig berechnen lässt, genannt.

Die Formel in Urick basiert auf Messungen von Arons und Yennie im Jahr 1948 mit Sprengstoffmassen von etwa 0,22 bis 25kg und ist daher für die Betrachtung von Minensprengungen mit einem Gewicht von etwa 300 kg nur bedingt geeignet.

Die Formel aus der BV0430 führt in einer Beispielrechnung eine Sprengstoffmasse von 1000 kg auf und ist „branchenbedingt“ besser für die Betrachtung von Seeminen geeignet.

Der Aufbau der Formeln ist ähnlich, es wird lediglich in anderen Einheiten und mit anderen Faktoren gerechnet.

Die BV0430-Formel lautet wie folgt:

$$P_{max} = 524 * \left(\frac{W^{0,33}}{R} \right)^{1,33} \text{ in bar}$$

R = Abstand Ladung – Betrachtungspunkt

W = Sprengstoffmasse TNT

P_{max} = maximaler Druck

Der Einfluss der Sprengstoffmasse auf den Spitzendruck nach BV0430 stellt sich wie in Abbildung 12 dar:

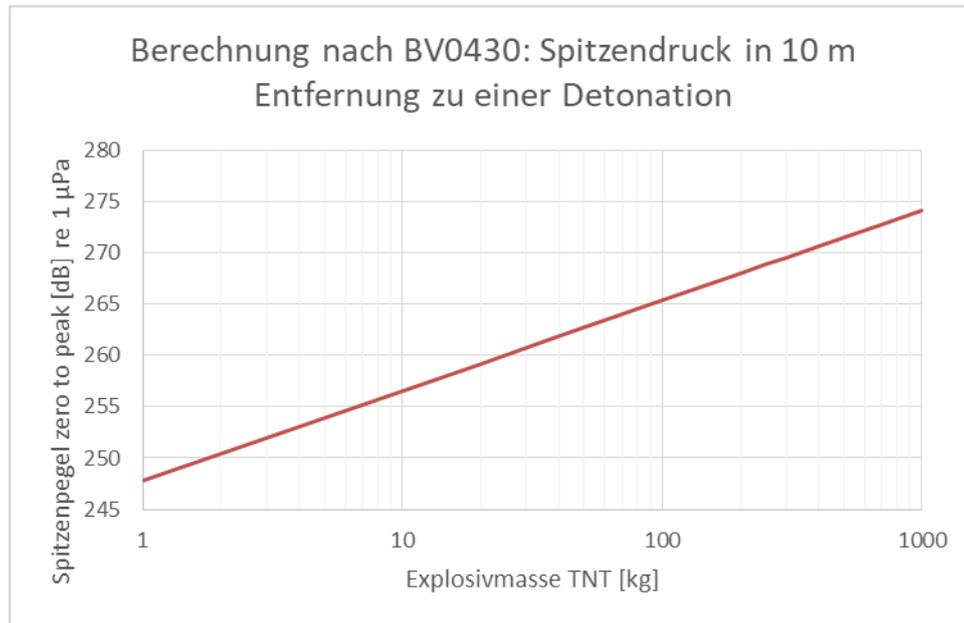


Abbildung 12: Einfluss der Sprengstoffmasse auf den Quellpegel einer Mine (10m Entfernung)

6.3 Berechnung der Ausbreitung der Schallenergie

Die Schallausbreitung in flachem Wasser wird maßgeblich durch die Beschaffenheit des Meeresbodens beeinflusst, vergleiche (Urick, Principles of Underwater Sound (3rd edition), 1983). Mit steigender Entfernung zur Schallquelle wird das empfangene Signal zunehmend von der Sedimentstruktur auf dem Ausbreitungsweg bestimmt, dabei spielen vor allem Schallgeschwindigkeit und Dichte des Bodens eine Rolle. In erster Näherung wird die Schallausbreitung über harten Sedimenten begünstigt, während weiche Sedimente mehr Schall absorbieren (Urban, 2002). Gemäß Abbildung 13 ist die Bodenbeschaffenheit für das Seegebiet Fehmarnbelt, in dem die Detonationen stattgefunden haben, inhomogen und weist viele Areale mit unterschiedlichen Sedimenteigenschaften auf. Somit unterscheidet sich das Seegebiet Fehmarnbelt von anderen, hydroakustisch gut erforschten Seegebieten wie zum Beispiel der Nordsee, in der vor allem sandiger Boden auftritt (siehe Abbildung 14).

Für die Bewertung der Schallmissionen während der Sprengungen ergibt sich daraus die Herausforderung, eine hinreichend zuverlässige Prognosemethode für die Schallausbreitung im weiteren Umfeld der Detonationen zu finden. Für die Berechnung der Schallausbreitung stehen drei Methoden zur Verfügung:

1. Annahme geometrischer Schallausbreitung
2. Empirische Abschätzung durch die „Thiele-Formel“ (Karl-Heiz Elmer, 2007) oder durch „transmission anomaly“ (Urick, Sound Propagation In The Sea, 1982), die mithilfe von statistischer Auswertung von Messdaten ermittelt wurde
3. Numerische Modellierung unter Berücksichtigung der entfernungsabhängigen Eigenschaften der Wassertiefe und Sedimentverteilung

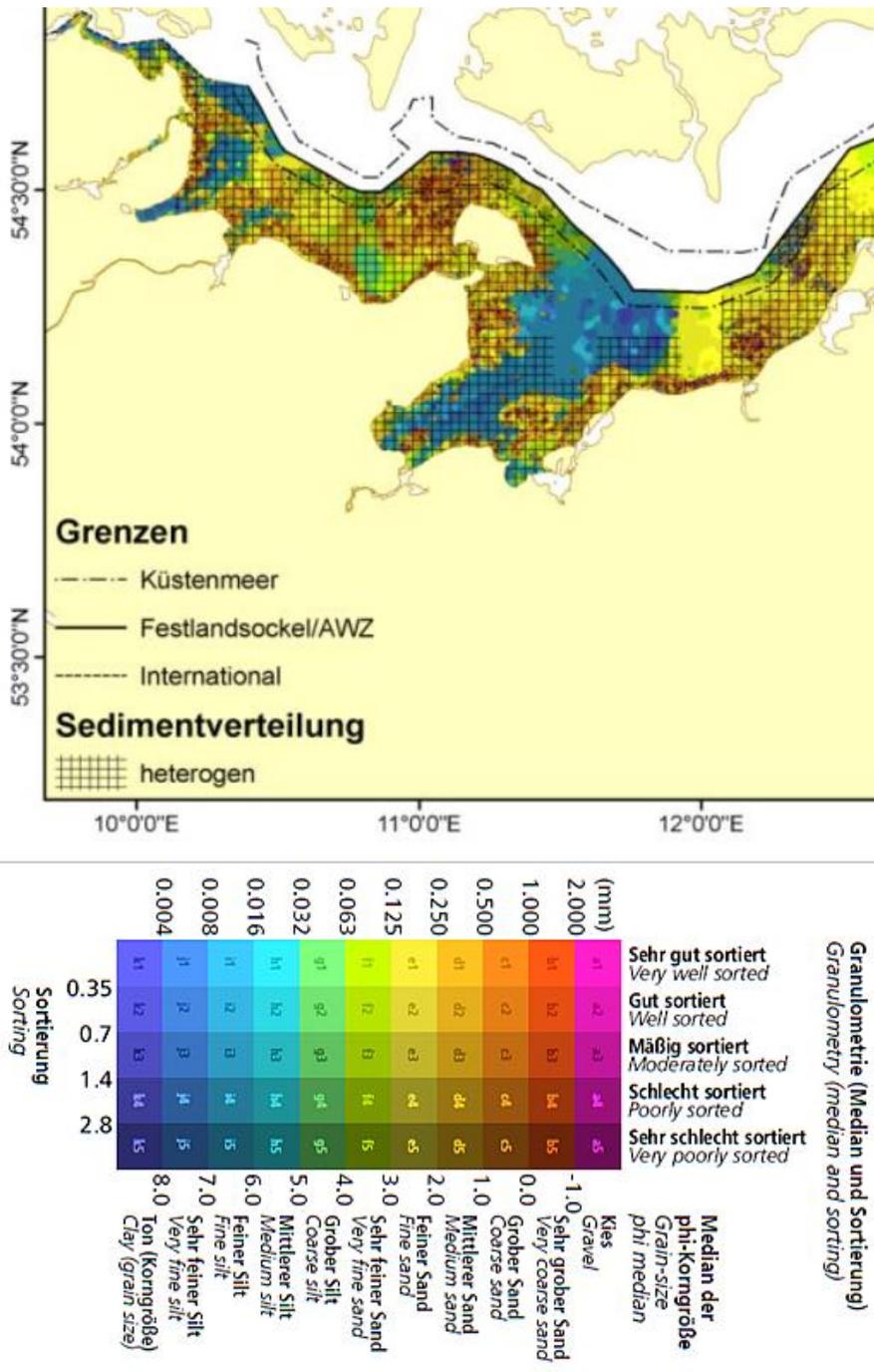


Abbildung 13: Verteilung der Oberflächensedimente in der Ostsee,

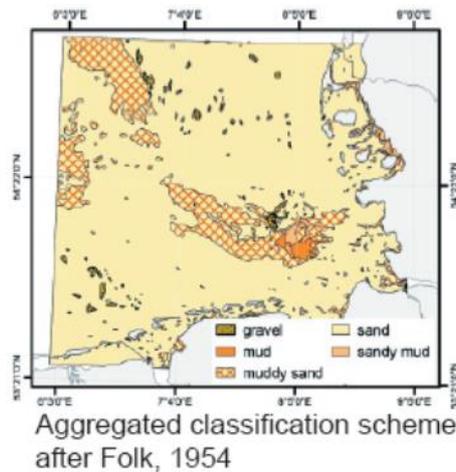


Abbildung 14: Verteilung der Oberflächensedimente in der Nordsee.

6.4 Zusammenhang Spitzenpegel und Schallenergie

Die Ergebnisse der Pegelberechnung durch die BV-Formel (s. 6.2) und die Eingangsdaten für die Berechnung der Schallausbreitung liegen in unterschiedlichen Pegelgrößen vor: Während der Quellpegel durch das Verfahren nach BV als Spitzendruck berechnet wird, kann die Schallausbreitung mit den in Kapitel 6 beschriebenen Verfahren nur durch Verteilung der Energie im Frequenzbereich beschrieben werden. Für die Umrechnung der Pegelgrößen wird aus (von Benda-Beckmann, et al., 2015) ein statistischer Zusammenhang zwischen Spitzendruck und Schallenergie im Nahbereich bis 2 km abgeleitet (Abbildung 15). Darin ist zu beobachten, dass der Unterschied zwischen den beiden Werten in der Nähe der Quelle besonders groß ist. Mit zunehmender Entfernung gleichen die Werte sich einander an. Dieser Effekt wird durch die Signalstreckung hervorgerufen: In großen Entfernungen ist das Signal weniger scharf, sodass sich die Energie über einen größeren Zeitraum verteilt (siehe auch 6.1.1). Die Signalstreckung und damit das Verhältnis zwischen Spitzenpegel und Energie ist vor allem von den für die Schallausbreitung relevanten Umweltparametern und vom Frequenzgehalt der Quelle abhängig. In dieser Abschätzung wird angenommen, dass die Bedingungen der Untersuchung durch Benda-Beckmann auf den vorliegenden Fall hinreichend genau übertragbar sind. Abbildung 15 zeigt diesen Zusammenhang für Detonationen in Entfernungen bis ca. 2 km (von Benda-Beckmann, et al., 2015) und in Entfernungen bis ca. 100 km für Airguns (Lippert et al., 2015), indem die Differenz zwischen SEL und SPL über die Entfernung dargestellt wird. Außerdem wird die Differenz von SEL und SPL der im Fehmarnbelt gemessenen Minensprengungen, die im Bereich des Soft-Clippings (s. Abbildung 5) liegen, dargestellt.

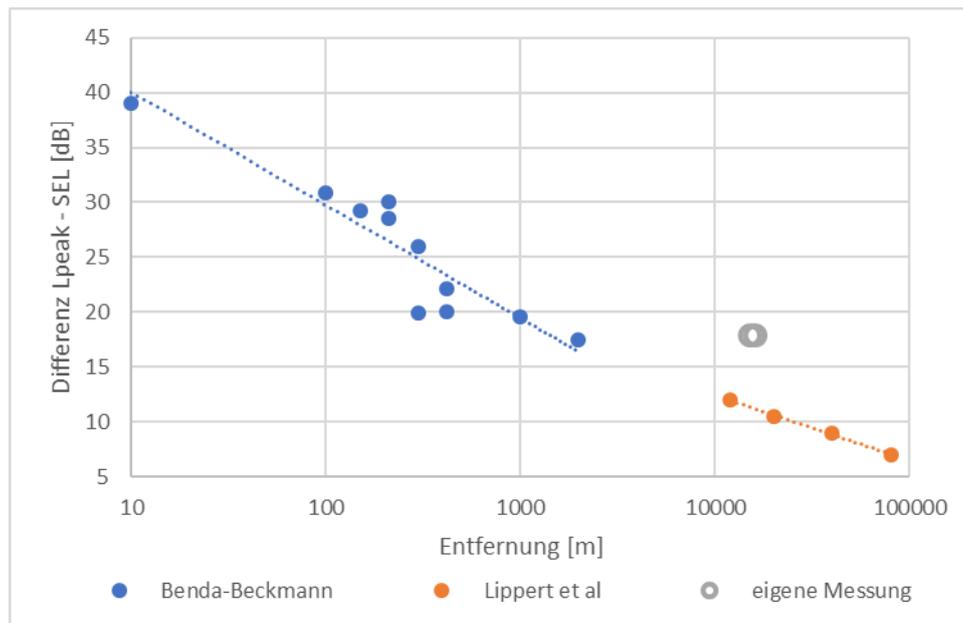


Abbildung 15: Statistischer Zusammenhang zwischen Spitzenpegel und Schallenergie SEL bei Unterwasserdetonationen (blau, von Benda-Beckmann et al. 2015) und Airgun-Impulsschall (rot, Lippert et al. 2015)

6.5 Abschätzung der Schallbelastung in der Umgebung

Auf Grundlage des Konzepts am Anfang dieses Kapitels wurde ein Quellpegelspektrum der Schallenergie und eine Umrechnungsmethode von Spitzendruck in Schallenergie entwickelt, siehe Abbildung 16. Das Spektrum wird dabei so skaliert, dass der Energiegehalt dem breitbandigen Pegel entspricht. Auf Grundlage dieses Spektrums wird die frequenzabhängige Schallausbreitung mit der Thiele-Formel und nach (Urick, Sound Propagation In The Sea, 1982) berechnet: Im ersten Schritt wird der in 2 km empfangene Pegel einer 263 kg Ladung, deren akustische Signatur der Detonation durch (von Benda-Beckmann, et al., 2015) für unterschiedlichen Entfernungen dokumentiert wurde, auf einen Abstand von 10 m zurückgerechnet. Durch den in Abbildung 15 gezeigten Zusammenhang von SEL zu SPL wird der Spitzendruck berechnet und mit dem Ergebnis der BV-Formel verglichen. Die Rückrechnung ergibt 268 dB re 1 μ Pa Spitzendruck, die Berechnung durch die BV-Formel ergibt 269 dB re 1 μ Pa zero to peak. Die BV-Formel scheint für die Größe der vorliegenden Munition zuverlässige Ergebnisse zu liefern.

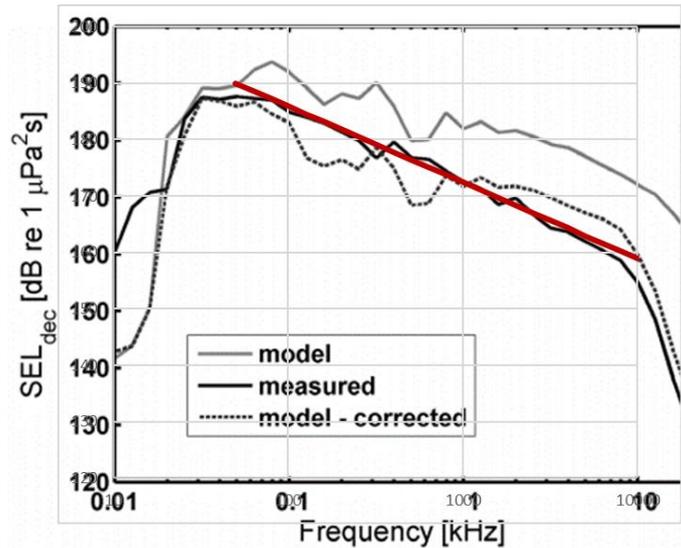


Abbildung 16: Synthese (rote Linie) des empfangenen Spektrums einer 263 kg Mine zur Berechnung des Quellpegels auf Grundlage von (von Benda-Beckmann, et al., 2015)

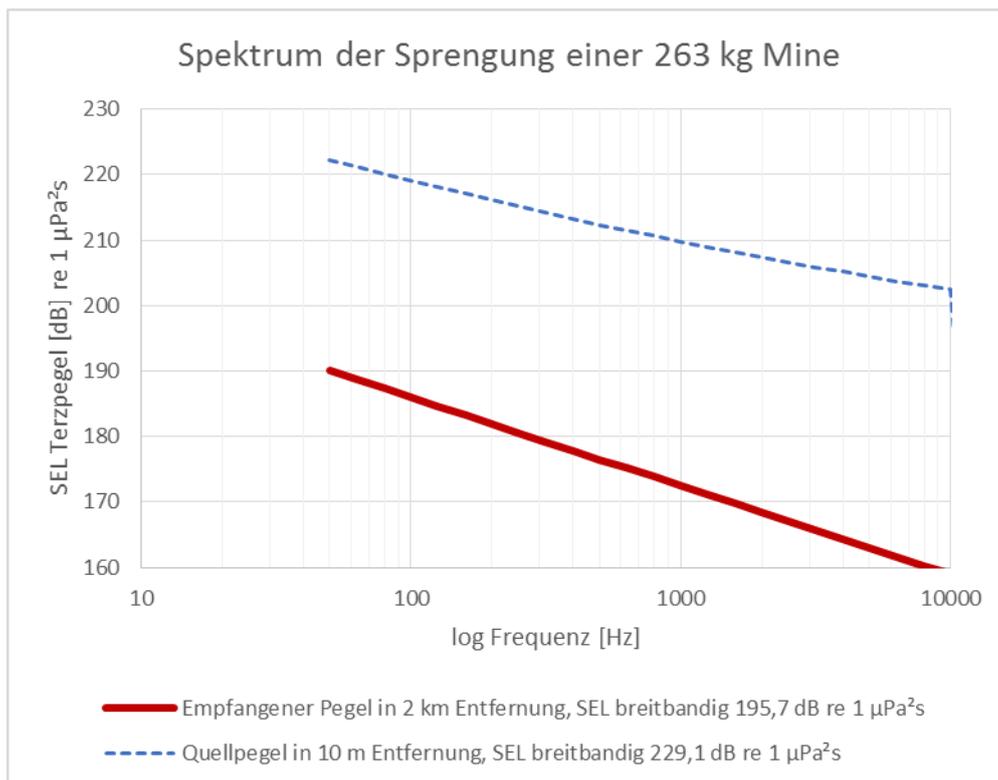


Abbildung 17: Empfangenes Spektrum in 2 km Entfernung und Quellpegelspektrum in 10 m Entfernung

Abweichend von anderen Betrachtungen, bei denen üblicherweise der Quellpegel in 1m Entfernung berechnet wird, wird der Quellpegel wegen des Gültigkeitsbereichs der BV-Formel für einen Radius von 10 m berechnet. Von diesem Abstand ausgehend wird die Schallausbreitung mit der Thiele-Formel und unter Berücksichtigung von *mode stripping* nach (Urlick, Sound Propagation In The Sea, 1982) berechnet.

6.6 Ausbreitungsverlust nach Thiele

Die Thieleformel zur frequenzabhängigen Berechnung von Ausbreitungsverlusten (TL) lautet wie folgt:

$$TL = (16,07 + 0,185 FL) (\log(r) + 3) + (0,174 + 0,046 FL + 0,005 FL^2) r$$

TL („transmission loss“) gibt die Abnahme des Pegels gegenüber einer (fiktiven) Entfernung von der Quelle von 1 m an. Weiter ist $FL = 10 \log_{10}(f / \text{kHz})$ und r die Entfernung in km.

Die Gleichung basiert auf Messungen der Forschungsanstalt der Bundeswehr für Wasserschall und Geophysik. Als Gültigkeitsbereich werden Sandboden (Nordsee), Entfernungen zwischen 1 m und 80 km, Wassertiefen bis 100m und Frequenzen zwischen 100 Hz und 10 kHz angegeben.

Quelle: (Karl-Heiz Elmer, 2007)

6.7 Ausbreitungsverlust mit *mode stripping* nach Urick

In flachen Gewässern wie der Ostsee tritt bei der Schallausbreitung über größere Entfernungen sogenanntes *mode stripping* auf. Diese Besonderheit wird von Urick als TA (Transmission Anomaly) beschrieben und ist, wie in Abbildung 18 gezeigt, abhängig von Frequenz, Wassertiefe und Entfernung (Urick, Sound Propagation In The Sea, 1982).

Wie in Abbildung 16 dargestellt, liegt der größte Teil (98%) der Energie der Detonationen im Frequenzbereich 100 bis 2000 Hz. Die Berechnung der TA wurde daher für die Oktavmittenfrequenzen 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz und 2000 Hz bestimmt und zum sphärischen Ausbreitungsverlust addiert.

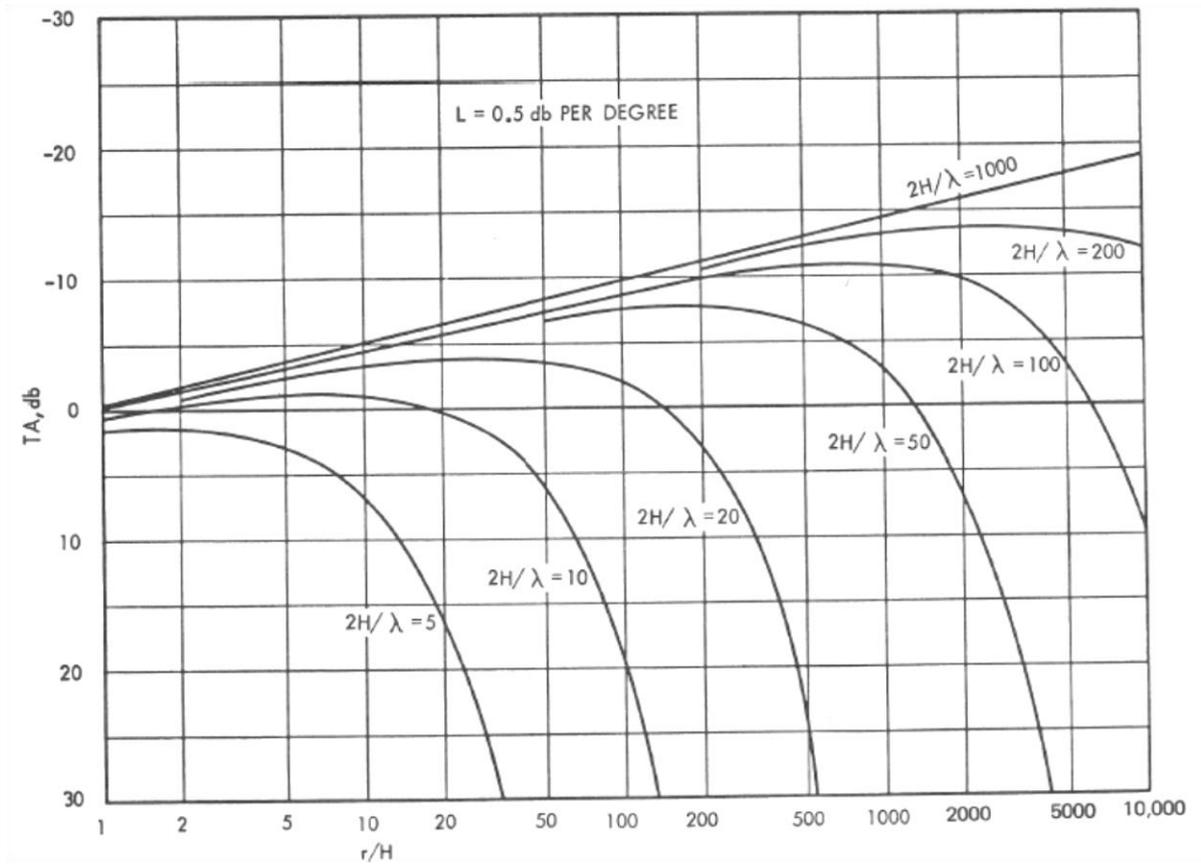


Abbildung 18 *Transmission Anomaly* (TA) in Abhängigkeit von Wassertiefe (H), Entfernung (r) und Frequenz (λ).

6.8 Darstellung der empfangenen und berechneten Pegel

Ergebnisse aus der Berechnung der Quellpegel (s. 6.2) und den Berechnungen der Schallausbreitungsmodelle nach der Thiele-Formel (s. 6.6) und unter Berücksichtigung des mode-stripping nach Urick (s. 6.7) sind in den nachfolgenden Grafiken zusammengefasst. Zudem werden empfangene Pegel, die sich nach BV0430 (s. 6.2) anhand der Sprengstoffmasse und der Entfernung berechnen lassen, dargestellt. Außerdem werden Mindest-SEL aus den Messungen im Fehmarnbelt (siehe Kapitel 1) und Messdaten ähnlicher Ladungen aus der Literatur (von Benda-Beckmann, et al., 2015), (Schmidtke, 2012)) gezeigt. Die hier gezeigten Messungen von (von Benda-Beckmann, et al., 2015) fanden 2010 in der Nordsee vor der niederländischen Küste mit Sandboden in Wassertiefen von 6 m bis 30 m statt. Diese Umgebung findet sich in der Ostsee in ähnlicher Art im unmittelbaren Umkreis der Detonationen im Fehmarnbelt. Weiter östlich in Richtung Kadetrinne verändert sich das Sediment deutlich zu Schlick (vergleiche Kapitel 3, Abbildung 13). Die Messung der Sprengung einer 300 kg Mine von (Schmidtke, 2012) weist deutlich niedrigere empfangene Pegel als erwartet auf (siehe Abb. 20). Das hängt, wie der Autor vermutet, damit zusammen, dass die gemessene Detonation innerhalb eines Sprengkraters, in dem zuvor einige andere Sprengungen stattgefunden haben, ausgelöst wurde. Durch die Sprengung im Krater findet eine Abschirmung zwischen Detonation und Messsystem statt.

Der in Abb. 20 dargestellte Mindest-SEL der Messungen an Pos1 und Pos2 im Fehmarnbelt unterschätzt den tatsächlichen SEL um ein unbekanntes Maß und wird daher als nach oben offener Wertebereich dargestellt.

Zur Einschätzung möglicher Auswirkung auf Schweinswale werden vier SEL-Grenzwerte benutzt:

- 160 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$; Lärmschutzwert aus dem Schallschutzkonzept (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2013)
- 164 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ als Grenzwert für TTS (Temporäry Treshold Shift, temporäre Hörschwellenverschiebung), (von Benda-Beckmann, et al., 2015), s. Kapitel 2
- 179 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ als Grenzwert für PTS (Permanent Treshold Shift, permanente Hörschwellenverschiebung), (von Benda-Beckmann, et al., 2015), s. Kapitel 2
- 190 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ als Grenzwert für „ear trauma“ (Ohrentrauma), (von Benda-Beckmann, et al., 2015), s. Kapitel 2

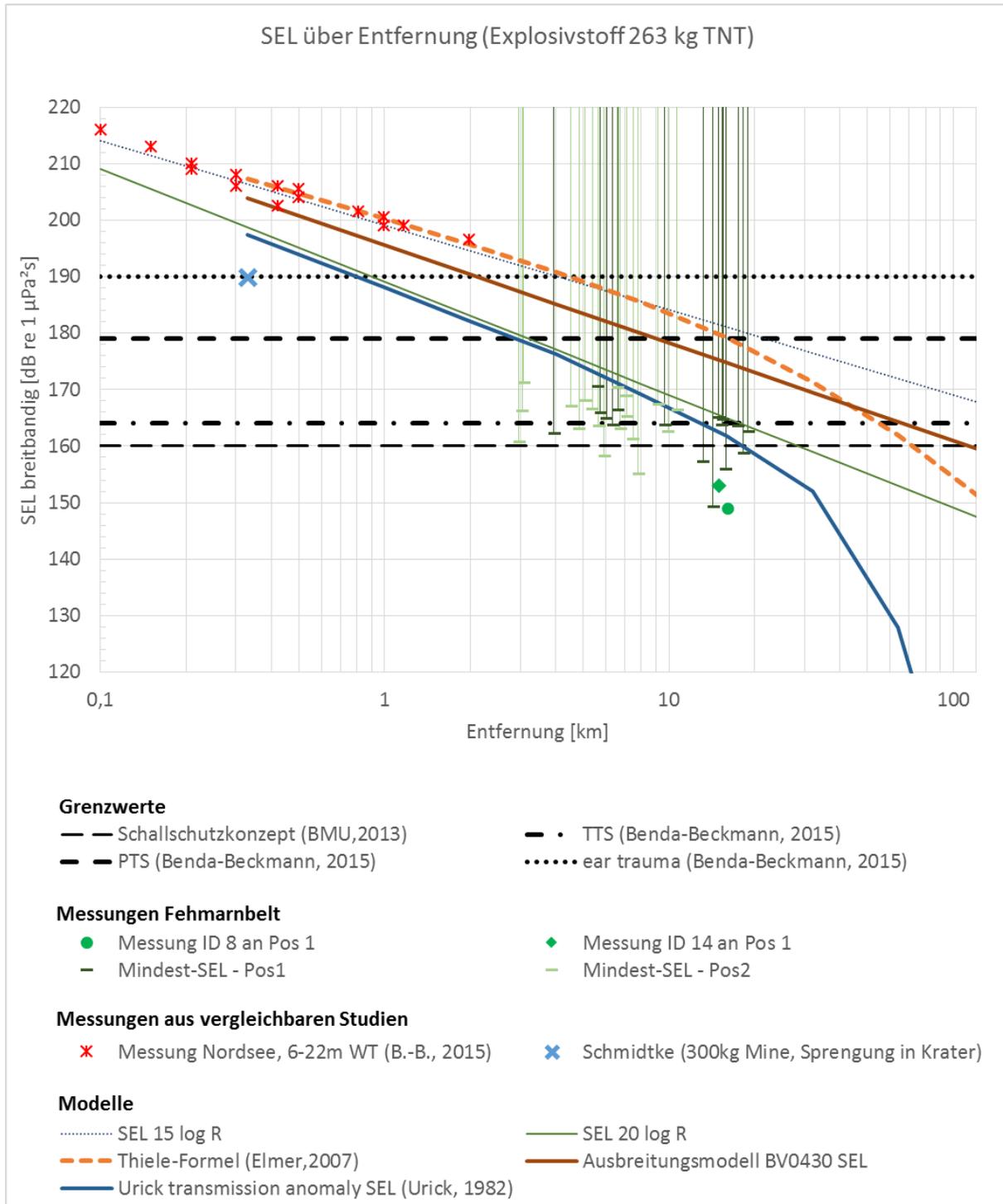


Abbildung 19: Abschätzung der Schallenergie SEL über die Entfernung im Vergleich zu Grenzwerten aus Benda-Beckmann. Alle Berechnungen ausgehend vom Quellpegel in 10 m Entfernung

Die folgende Grafik zeigt die Spitzenpegel, die nach den gleichen Ausbreitungsmodellen wie für Abbildung 19 bestimmt wurden sowie den Grenzwert des Messsystems.

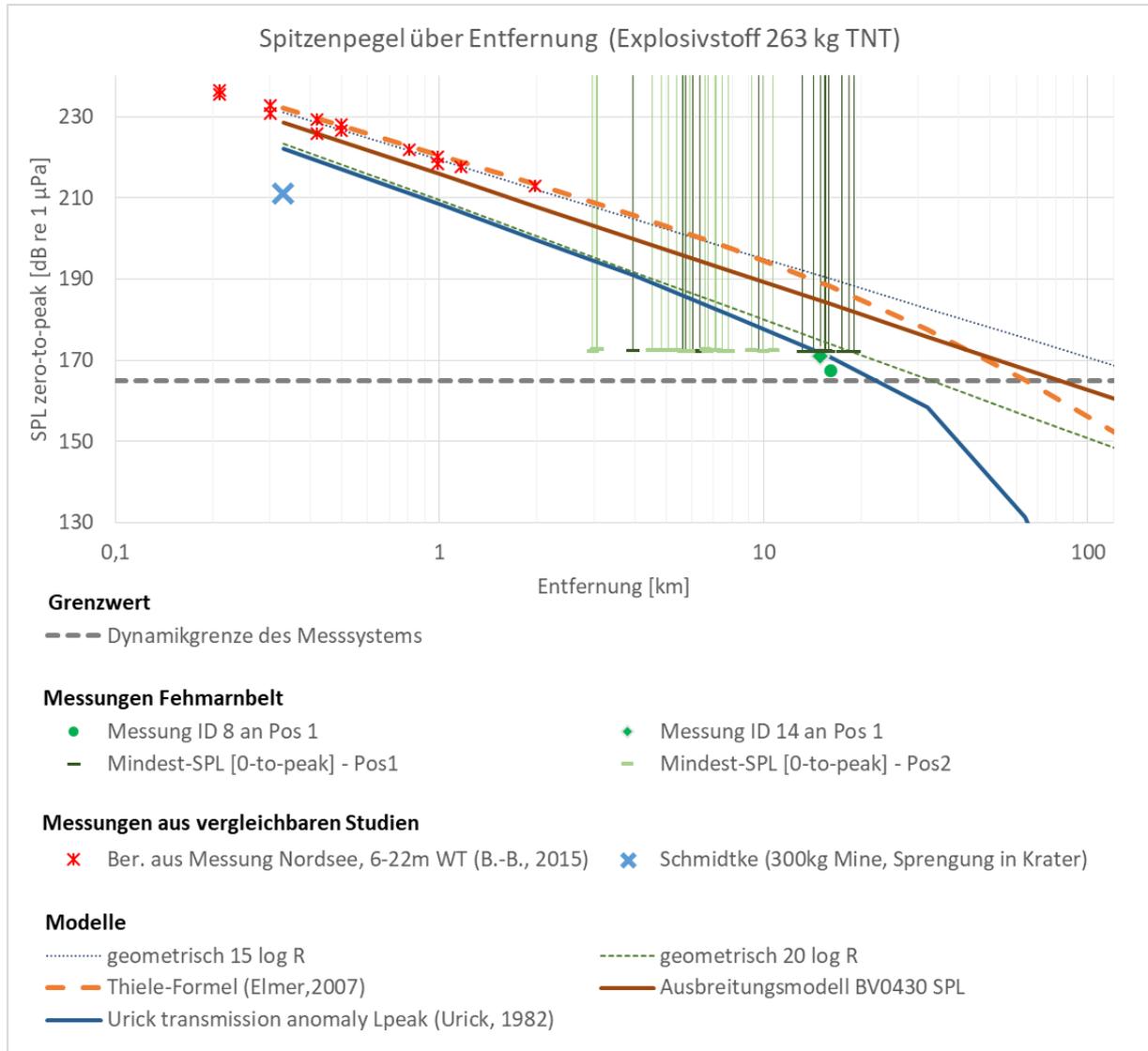


Abbildung 20: Abschätzung des Spitzenpegels über die Entfernung. Alle Berechnungen ausgehend von einem Quellpegel in 10 m Entfernung

6.9 Vergleich mit gemessenen Pegeln

Nur zwei Detonationen (ID8 und ID14), die an Pos. 1 aufgezeichnet wurden, haben das Messsignal nicht voll übersteuern lassen, sondern sind im Bereich des sogenannten *soft-clippings*. Soft-clipping bedeutet, dass der empfangene Druck zwar oberhalb des linearen Messbereichs bis 180 Pa lag, aber eine Abschätzung des empfangenen Drucks dennoch (aufgrund der recht geringfügigen Überschreitung) noch möglich ist. An Pos 4, die vom Detonationsort aus gesehen im Schallschatten der Insel Fehmarn liegt und daher kein direkter Ausbreitungsweg durchs Wasser besteht, sind 7 Detonationen auswertbar. Die Beträge dieser Ereignisse sind ausschließlich tieffrequent unter 50 Hz, der Ausbreitungsweg verläuft über den Boden unter der Insel hindurch. Allerdings lässt sich aus diesen Messwerten keine belastbare Aussage zur Beurteilung der Wirkung der Druckwelle im Wasserkörper ableiten.

Tabelle 4 Ausgewertete Detonationen an Pos 1 und 4 (grau) mit gemessenen Pegeln (SEL und L zero-to peak) sowie nach BV0340 anhand der vorliegenden Distanz und einer Sprengstoffmasse von ca. 300 kg berechnete Pegel.

ID	Pos.	Entfernung	Gemessen SEL	Gemessen 0-to-peak	BV0340 0-to-peak	Differenz 0-to-peak
-	-	[m]	[dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{S}$]	[dB re 1 μPa]	[dB re 1 μPa]	[dB]
4	4	36613	130	132	175	43
7	4	47676	126	127	172	45
8	1	16183	149	167	184	17
9	4	44057	129	133	173	39
12	4	43465	129	131	173	42
14	1	14968	153	171	185	14
15	4	42895	126	127	173	46
16	4	40548	126	129	174	45
18	4	46107	125	126	172	46

Aus dem Vergleich der empfangenen Pegeln von Detonationen 8 und 14 mit den empfangenen Pegeln der anderen Detonationen geht hervor, dass die beiden genannten Ereignisse mit einer ungewöhnlich niedrigen Intensität aufgetreten sind (Abbildung 21). Dies ist auch an der Dauer der Übersteuerung erkennbar: Während die übrigen Detonationen in ähnlichen Entfernungen zu mindestens einer halben Sekunde Übersteuerung führen, erreichen die genannten Ereignisse nur kurzzeitig die Grenze des Dynamikbereichs (siehe Grafiken im Anhang).

Mögliche Ursachen für den niedrigen Pegel sind

- Unvollständige Umsetzung des Sprengstoffs
- Verzögerte Umsetzung (Deflagration) des Sprengstoffs, beschreiben in (Koschinski, 2011)
- Erheblich kleinere Explosivstoff- oder Ladungsmenge

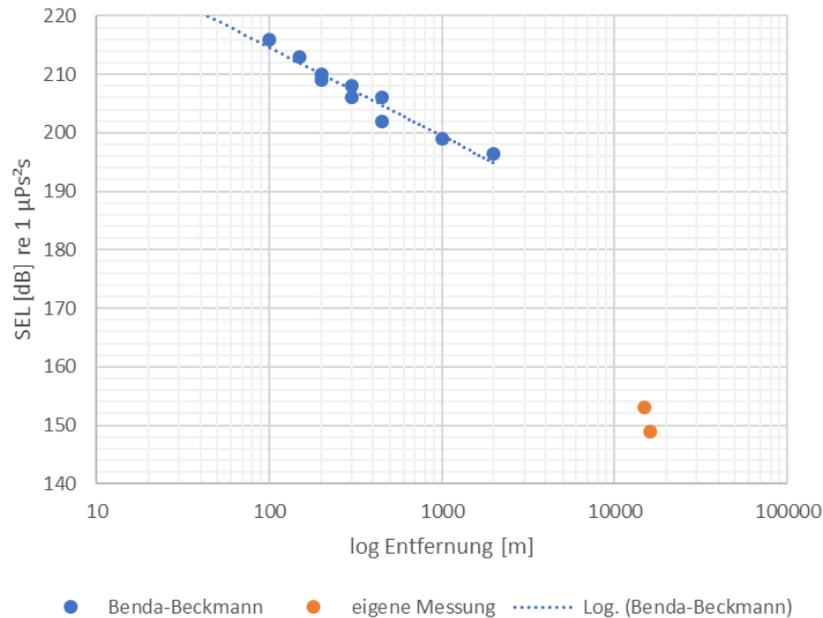


Abbildung 21: Vergleich der beiden nicht voll übersteuerten Ereignisse mit Daten aus der Literatur (Benda-Beckmann)

Die maximale Distanz einer Aufzeichnung mit Übersteuerung beträgt 19km (s. Tabelle 2, Seite 8: ID7). Der mindest-Schalldruck, der zu einem derartigen Übersteuern führt, beträgt 176dB (0-to-peak). Der nach BV0340 berechnete Schalldruck (0-to-peak) in 19 km Entfernung für ca. 300 kg TNT beträgt 182 dB. Die Übersteuerung in diesem Fall würde auch durch den berechneten Schalldruck auftreten.

7 Literaturrecherche JASA Journal

Die brauchbaren Ergebnisse der Literaturrecherche sind in die Betrachtung der vorhergehenden Kapitel eingeflossen. Weitere, unberücksichtigte Quellen diskutieren:

- Quellpegel sehr kleiner Ladungen (Weston, 1960), (Hunter & Geers, 2004), (Krieger & Chahine, 2005), (Soloway & Dahl, 2014)
- Schallausbreitung in tiefem und flachem Wasser (Sertlek & Ainslie, 2014)
- Abhängigkeit des Quellpegels von der Tiefe der Zündung

8 Diskussion

Auf der Grundlage von Messdaten wurden die Schallimmissionen im Seegebiet „Fehmarnbelt“ untersucht. Es wurden insgesamt 18 Detonationen ausgewertet, von denen 16 den Messbereich der Messgeräte deutlich überschritten haben. Zwei Ereignisse lagen im Bereich der Verzerrung, sodass hierfür eine obere und untere Schranke des Schalldrucks angegeben werden kann. Eine präzise Angabe zum empfangenen Pegel ist für keins der ausgewerteten Ereignisse möglich. Um die Auswirkungen der Detonationen auf die Meeresumwelt abschätzen zu können, kommt einer Modellierung erhöhte Bedeutung zu. In diesem Bericht wird die Modellierung anhand empirischer Formeln durchgeführt, die durch Literaturdaten verifiziert wurden.

Die Bestimmung des mittleren Quellpegels einer Detonation unter Wasser kann durch die Methode der BV0430 mit geringen Toleranzen berechnet werden, sofern der Sprengstoff vollständig detoniert.

Bei gealtertem Explosivstoff kommt es teilweise zu unvollständiger Umsetzung, wodurch niedrigere Spitzendrücke als bei vollständiger Umsetzung entstehen können.

Die Ausbreitung der Druckwelle im Wasserkörper ist neben der Entfernung zur Quelle von weiteren Parametern abhängig, die nur in numerischen Ausbreitungsmodellen berücksichtigt werden können. Im Umfang des vorliegenden Projekts war nur eine überschlägige Modellierung anhand empirischer Modelle möglich, sodass örtliche Variationen der Wassertiefe, der Sedimentstruktur und des Schallgeschwindigkeitsprofils keine Berücksichtigung finden. Für die erwarteten Abstände, in denen vorgegebene Grenzwerte überschritten werden, kann daher nur ein Erwartungsbereich angegeben werden. Eine präzise Aussage würde die Berücksichtigung aller relevanten Einflussgrößen in einer numerischen Modellierung erfordern.

Festzustellen ist, dass in großen Entfernungen von 70 km und mehr die Detonationen durch das Hintergrundgeräusch überdeckt werden, sodass sie in den Signale nicht zu erkennen sind. Das lässt sich durch sogenanntes *mode stripping* erklären.

Die zwei Detonationen, die nicht zum Übersteuern des Messsignals geführt haben, sind deutlich leiser als die übrigen aufgezeichneten Detonationen (siehe Zeitsignale im Anhang). Die gemessenen Schalldrücke liegen bei den beiden Ereignissen auch unterhalb der Erwartungswerte nach BV0430. Daher wird erwartet, dass sich hier entweder die Explosivmasse oder die Art der Umsetzung erheblich von den übrigen Detonationen unterschieden hat.

Um bei zukünftigen Kampfmittelsprengungen zuverlässige Messdaten erheben zu können, empfiehlt sich ein Messaufbau mit unempfindlichen Hydrophonen. Dadurch wird der Messbereich um ca. 35 dB zu höheren Pegeln verschoben, wodurch die erwarteten Spitzendrücke ab 5 km Entfernung erfasst werden können.

9 Fazit

Es wurden Messdaten aus Dauerschallmessungen in der Ostsee mit Hinblick auf Schallbelastung während eines Manövers zur Munitionsräumung ausgewertet. Die Sondierung der Messdaten von 4 Rekorder-Positionen zu 18 Zeitpunkten, in denen Minen gesprengt wurden, hat ergeben, dass die Messdaten in den kurzen Distanzen von ca. 3 bis 19 km größtenteils übersteuern. An der Messposition in größerer Entfernung (ca. 70 bis 85 km), an der es durch starken Schiffsverkehr relativ laut ist, sind die Detonationen nicht zu erkennen.

Lediglich zwei Detonationen waren so leise, dass es nur zu sogenanntem *soft clipping* kam und sich der empfangene Schalldruck auswerten lässt.

Die Berechnung von Entfernungen, innerhalb derer bestimmte biologisch relevante Grenzwerte überschritten werden, basiert daher auf Messungen ähnlicher Detonationen an anderen Orten sowie empirischen Formeln zur Bestimmung des Quellpegels und des Ausbreitungsverlustes. Die Variation von Umweltbedingungen (Wassertiefe und Sedimentstruktur) mit der Entfernung von der Schallquelle kann dabei nicht berücksichtigt werden. Bisher liegen aus der Auswertung historischer Dokumente Angaben zu den Minentypen im Seegebiet und zu deren Sprengstoffmasse und -typ vor. Eine präzise Zuordnung zu den Zeitpunkten der geräumten Objekte sowie zu deren Zustand ist nicht verfügbar, sodass die bisherigen Berechnungen auf der Annahme eines durchschnittlich vergleichbaren Kampfmittels basieren.

Die empfangenen Signale zeigen große Unterschiede bei der Dauer der Übersteuerungen. Das deutet darauf hin, dass auch die Spitzenpegel und die daraus folgenden Einzelereignisse der empfangenen

Signale sehr unterschiedlich sind. Eine Zuordnung der Ursache ist anhand der vorliegenden Daten nicht möglich.

Die durch empirische Modellierung berechneten Entfernungen, innerhalb derer vorgegebene Grenzwerte (gemäß Benda-Beckmann (2015) und (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2013)) überschritten werden, liegen für typische Sprengstoffmassen von 263 kg in folgenden Bereichen:

- für TTS: ca. 10 bis 50 km,
- für PTS bei ca. 3 bis 11 km
- für das „Ohrtrauma“ bei ca. 0,8 bis 4 km.
- Für den Lärmschutzgrenzwert 160 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ bei ca. 18 bis 70 km

Für das weitere Vorgehen empfiehlt sich einerseits eine numerische Modellierung der Schallausbreitung, durch die entfernungsabhängige Eigenschaften der Umwelt berücksichtigt werden können. Mit Ausblick auf zukünftige Schallmessungen ist ein Messaufbau mit unempfindlichen Hydrophonen empfehlenswert, durch die die erwarteten Spitzendrücke ab ungefähr 5 km aufgezeichnet werden können.

10 Literaturverzeichnis

- Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung. (1985). Bauvorschrift für Schiffe der Bundeswehr 0430. Koblenz.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. (2013). Konzept für den Schutz der Schweinswale vor Schallbelastungen bei der Errichtung von Offshore-Windparks in der deutschen Nordsee (Schallschutzkonzept).
- Dietrich Wittekind, J. T.-B. (2016). *Development of a Model to Assess Masking Potential for Marine Mammals by the Use of Air Guns in Antarctic Waters*. New York: Springer.
- Elmer, K.-H., Betke, K., & Neumann, T. (2007). *Standardverfahren zur Ermittlung und Bewertung der Belastung der Meeresumwelt durch die Schallimmission von Offshore-Windenergieanlagen SCHALL 2 - BMU-Forschungsvorhaben 0329947*. Hannover: Institut für Statik und Dynamik (ISD), Leibniz Universität Hannover.
- Erbe, C. (2011). *Underwater Acoustics: Noise and the Effect on Marine Mammals, 3rd Edition*. Victoria, British Columbia, Canada: Jasco Applied Sciences.
- Hunter, K. S., & Geers, T. L. (2004). Pressure and velocity fields produced by an underwater explosion. *The Journal of the Acoustical Society of America* 115, 1483-1496.
- Karl-Heiz Elmer, K. B. (2007). *Standardverfahren zur Ermittlung und Bewertung der Belastung der Meeresumwelt durch die Schall-immission von Offshore-Windenergieanlagen - SCHALL 2*.
- Koschinski, S. (2011). Underwater Noise Pollution From Munitions Clearance and Disposal, Possible Effects on Marine Vertebrates, and Its Mitigation. *Marine Technology Society Journal*, 80-88.
- Krieger, J. R., & Chahine, G. L. (2005). Acoustic signals of underwater explosions near surfaces. *The Journal of the Acoustical Society of America* 118, 2961-2974.
- Lippert et al. (2015). Empirical prediction of peak pressure levels in anthropogenic impulsive noise - Part I Airgun arrays signals.
- Schmidtke, E. (2012). Schockwellendämpfung mit einem Luftblasenschleier im Flachwasser. *DAGA 2012 - Darmstadt*.
- Sertlek, H. Ö., & Ainslie, M. A. (2014). A depth-dependent formula for shallow water propagation. *The Journal of the Acoustical Society of America* 136.
- Siebert, U., Dähne, M., Danehl, S., Meyer-Klaeden, O., van Neer, A., Wittekind, D., . . . Ainslie, M. A. (2013). *Assessment of potential for masking in marine mammals of the Antarctic exposed to underwater sound from airguns*. Umweltbundesamt, FKZ 3711 19 121.
- Soloway, A. G., & Dahl, P. H. (2014). Peak sound pressure and sound exposure level from underwater explosions in shallow water. *The Journal of the Acoustical Society of America* 136.
- Urban, H. G. (2002). *Handbuch der Wasserschalltechnik*. Bremen: STN ATLAS Elektronik GmbH.
- Urlick, R. J. (1982). *Sound Propagation In The Sea*.
- Urlick, R. J. (1983). *Principles of Underwater Sound (3rd edition)*.
- von Benda-Beckmann, A. M., Aarts, G., Sertlek, Ö. H., Lucke, K., Verboom, W. C., Kastelein, R. A., . . . Ainslie, M. A. (2015). Assessing the Impact of Underwater Clearance of Unexploded Ordnance on Harbour Porpoises (*Phocoena phocoena*) in the Southern North Sea. *Aquatic Mammals*.
- Weston, D. (1960). Underwater Explosions as Acoustic Sources. *Proceedings of the Physical Society* 76 233, 233-249.