
Entwicklung und Erprobung des Großen Blasenschleiers zur Minderung der Hydroschallemissionen bei Offshore-Rammarbeiten Projektkurztitel: HYDROSCHALL-OFF BW II

Förderkennzeichen 0325309A/B/C

Schlussbericht



Quelle: Trianel GmbH/Lang

Ansgar Diederichs, Hendrik Pehlke, Georg Nehls, Michael Bellmann,
Patrick Gerke, Jens Oldeland, Cay Grunau, Sophia Witte, Armin Rose

Husum, März 2014

OWP Borkum West II: Baumonitoring und Forschungsprojekt HYDROSCHALL-OFF BW II

Forschungsprojekt gefördert mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Förderkennzeichen 0325309A/B/C

BioConsult SH GmbH & Co. KG
Schobüller Str. 36
D-25813 Husum
Tel. 04841 / 66 3 29 - 10
Fax 04841 / 66 3 29 - 19
info@bioconsult-sh.de
www.bioconsult-sh.de

HYDROTECHNIK Lübeck GmbH
Grootkoppel 33
D-23566 Lübeck
Tel. 0451 651 75
Fax (0) 451 623 744
info@hydrotechnik-luebeck.de
www.hydrotechnik-luebeck.de

itap GmbH
Marie-Curie-Straße 8
D-26129 Oldenburg
Tel. 0441 / 570 61-0
Fax 0441 / 570 61-10
info@itap.de
www.itap.de

Förderer:

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben HYDROSCHALL-OFF BW II wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) unter dem Förderkennzeichen 0325309 A/B/C gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Entwicklung und Erprobung des Großen Blasenschleiers zur Minderung der Hydroschallemissionen bei Offshore-Rammarbeiten Projektkurztitel: HYDROSCHALL-OFF BW II	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Pehlke, Hendrik; Nehls, Georg; Bellmann, Michael; Gerke, Patrick; Diederichs, Ansgar; Oldeland, Jens; Grunau, Cay; Witte, Sophia & Rose, Armin	5. Abschlussdatum des Vorhabens Juni 2013
	6. Veröffentlichungsdatum geplant
	7. Form der Publikation -
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) BioConsult SH GmbH & Co. KG, Schobüller Str. 36, D-25813 Husum HYDROTECHNIK Lübeck GmbH, Grootkoppel 33, D-23566 Lübeck itap GmbH, Marie-Curie-Straße 8, D-26129 Oldenburg	9. Ber. Nr. Durchführende Institution -
	10. Förderkennzeichen *) FKZ: 0325309A/B/C
	11. Seitenzahl 247
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) Alexanderstraße 3 10178 Berlin	13. Literaturangaben 119
	14. Tabellen 56
	15. Abbildungen 103
16. Zusätzliche Angaben -	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) -	
18. Kurzfassung Unterwasser-Rammarbeiten zur Installation der Stahlfundamente von Offshore-Windenergieanlagen bewirken starke Schallemissionen, die zu Störungen oder Schädigungen von Meeressäugetieren führen können. Daher wird die Entwicklung von Schallminderungsmaßnahmen in Deutschland vorangetrieben. Im Projekt HYDROSCHALL-OFF BW II wurde das Schallschutzsystem Großer Blasenschleier bei der Errichtung des Offshore-Windparks Borkum West II unter realen Bedingungen im Hinblick auf eine spätere Serienreife erprobt und weiterentwickelt. Die Wirksamkeit im Hinblick auf eine verminderte Störwirkung auf Schweinswale wurde durch ein akustisches Monitoring von Schweinswalen mittels C-PODs überprüft. Die Verwendung von auftrommelbaren Düsensschläuchen hat sich bei der Ausbringung des Großen Blasenschleiers bewährt. Ein Einsatzschema verhinderte Verzögerungen im Bauablauf. Bei Verwendung des Schallschutzsystems BBC 2 mit der besten Kombination aus Praktikabilität und erzielter Schallreduktion lag der 5% Perzentilpegel des SEL bei 73% aller Rammungen unterhalb des in 750 m Entfernung vom BMU/BSH geforderten Schallschutzgrenzwertes für den Einzelereignispegel (SEL5) von 160 dB _{SEL} und in keinem Fall über 163 dB _{SEL} . Sowohl mit dem BBC 1 als dem BBC 2 unterschritt der Spitzenpegel immer die geforderten 190 dB _{LPeak} . Mit dem BBC 2 unterschritt der Spitzenpegel (Lpeak) sogar in neun von zwölf Fällen 184 dB _{LPeak} . Die erzielte Schallminderung betrug hier 9 dB _{SEL} - 13 dB _{SEL} beim Einzelereignispegel (SEL50) sowie 10 dB _{LPeak} - 17 dB _{LPeak} beim Spitzenpegel. Die Nachweisgrenze für eine Störwirkung des impulsartigen Rammschalls auf Schweinswale lag in dieser Studie beim Einzelereignispegel (SEL50) bei 144 dB _{SEL} , entsprechend 15 km bei Rammungen ohne und 4,8 km bei Rammungen mit Einsatz des Großen Blasenschleiers. Durch die Reduzierung der Schallstärke durch den Großen Blasenschleier reduzierte sich damit auch die gestörte Fläche um 90%. Das Vorhaben ist damit das weltweit erste, bei dem in großem Maßstab unter Offshore-Bedingungen ein Schallminderungssystem erfolgreich eingesetzt wurde. Dabei erwies sich der Große Blasenschleier als geeignetes System. Die Erfahrungen aus dem Projekt bilden eine wichtige Grundlage für die zukünftige Anwendung von Schallminderungsmaßnahmen beim Ausbau der Offshore-Windenergie in Deutschland. Allerdings sind die Ergebnisse des Projektes nur bedingt auf andere Standorte übertragbar. Neben einer technischen Weiterentwicklung von Blasenschleiern sollte zukünftig die Wirkungsweise unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen untersucht werden, um die wesentlichen Einflussfaktoren der schallmindernden Wirkung zu bestimmen sowie die Reaktion von Schweinswalen auf unterschiedliche Frequenzspektren zu erforschen.	
19. Schlagwörter Offshore-Windparks, Rammarbeiten, Unterwasserschall, Großer Blasenschleier, Schallminderung, Schweinswal, <i>Phocoena phocoena</i> , Borkum West II	
20. Verlag -	21. Preis -

INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	III
TABELLENVERZEICHNIS	XII
ZUSAMMENFASSUNG	18
SUMMARY	22
A PROJEKTVORSTELLUNG	25
A.1 Einleitung.....	25
A.2 Das Projektgebiet Borkum West II.....	27
A.3 Zielsetzung des Projekts.....	31
A.4 Bezug zu förderpolitischen Zielen.....	31
A.5 Stand von Wissenschaft und Technik	32
B DER GROSSE BLASENSCHLEIER (BBC)	35
B.1 Konzept des Großen Blasenschleiers.....	35
B.2 Bereits vorliegende Erfahrungen mit dem Blasenschleier unter Offshore-Bedingungen	37
B.3 Allgemeine Beschreibung des eingesetzten Großen Blasenschleiers	38
B.4 Einsätze des Großen Blasenschleiers im OWP-Bauvorhaben Borkum West II.....	44
B.5 Erfahrungen im Umgang mit dem eingesetzten Blasenschleiersystem.....	52
B.6 Kosten des Großen Blasenschleiers	53
B.7 Diskussion	55
B.8 Technisches Fazit	56
C MESSKONZEPT UND DURCHFÜHRUNG	58
D HYDROSCHALLMESSUNGEN UND EVALUATION DER SCHALLMINDERUNG EINES GROSSEN BLASENSCHLEIERS	66
D.1 Schalltechnische Grundlagen	66

D.2	Auswertungs- und Darstellungskonzept	71
D.3	Ergebnisse der Hydroschallmessungen.....	78
D.4	Direkte Einflussfaktoren auf die schallmindernde Wirkung des Großen Blasenschleiers.....	88
D.5	Beurteilung der Wirksamkeit der getesteten BBC-Konfigurationen.....	95
D.6	Mögliche indirekte Einflussfaktoren auf die Schallabstrahlung und Schallausbreitung	96
D.7	Akustische Parameter für weitergehende Analysen bezüglich des Verhaltens von Schweinswalen 114	
D.8	Diskussion	114
D.9	Zusammenfassung	135
E UNTERSUCHUNG DER ZEITLICHEN UND RÄUMLICHEN REAKTION VON SCHWEINSWALEN		139
E.1	Schweinswale im Bereich von Borkum West II	139
E.2	Aufgabenstellung	141
E.3	Methodik	142
E.4	Ergebnisse	162
E.5	Diskussion	187
AUSBLICK UND WEITERER FORSCHUNGSBEDARF		194
LITERATUR.....		195
ANHANG.....		203
	Anhang zum Großen Blasenschleier.....	203
	Anhang zur Hydroschallmessung und -auswertung	211
	Anhang zum Schweinswalmonitoring	226

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1-1:	Offshore Windparks in der Nordsee. Das Gebiet Borkum West II liegt in der Teilfläche II des am 19.12.2005 gemäß § 3a Abs. 1 der SeeAnIV festgelegten besonderen Eignungsgebietes für Windenergieanlagen „Nördlich Borkum“. Quelle BSH, verändert (www.bsh.de/de/Meeresnutzung/Wirtschaft/CONTIS-Informationssystem/index.jsp).	26
Abb. 1-2:	Lage des OWP Borkum West II in der Teilfläche II des am 19.12.2005 gemäß § 3a Abs. 1 der SeeAnIV festgelegten besonderen Eignungsgebietes für Windenergieanlagen „Nördlich Borkum“	27
Abb. 1-3:	Lage des OWP Borkum West II zu den benachbarten OWPs.....	28
Abb. 1-4:	Fläche der Bauphase I im Gebiet des OWP Borkum West II. Dargestellt ist auch die Lage der 40 Fundamente sowie der Umspannplattform.	29
Abb. 1-5:	Ein Kranschiff platziert einen Tripod auf die zuvor gerammten Pfähle im OWP Borkum West II. Quelle: windpoweroffshore.com/2013/02/21/borkum_west_2_due_for_completion_by_autumn/#.UWQRmTdK7CA).	30
Abb. 1-6:	Frequenzabhängige Schallminderung durch den Einsatz von Blasenschleiern bei Rammarbeiten für die Forschungsplattform FINO 3 und den Offshore-Windpark alpha ventus. Bei Rammgeräuschen, deren spektrales Maximum üblicherweise bei 80 bis 200 Hz liegt, ergibt sich daraus ein Einzahl-Wert der Schallminderung von rund 10 dB (Nehls & Betke 2011).	33
Abb. 1-7:	Skizze des Prinzips des Großen Blasenschleiers (Quelle: ISD 2010, verändert).....	35
Abb. 1-8:	Der Große Blasenschleier in Betrieb bei Rammarbeiten im Windpark Borkum West II.....	36
Abb. 1-9:	Das Blasenschleier-Versorgungsschiff Noortruck.	39
Abb. 1-10:	Das Deck bietet noch ausreichend Platz, um kleinere Reparaturen durchführen zu können. Beim Verlegen des Blasenschleiers läuft der Düsen Schlauch kontrolliert über das Heck in die See.	39
Abb. 1-11:	Decksplan der Noortruck.	40
Abb. 1-12:	Eingesetzter Kompressor zur Generierung der notwendigen Luftmenge für den Blasenschleier.	41
Abb. 1-13:	Rechts neben dem Seemann im blauen Arbeitsanzug ist ein Luftversorgungsschlauch (1) zu sehen. Das Ende des Luftversorgungsschlauches ist mit einer Markierungsboje versehen. Auch der Düsen Schlauch ist auf dem Bild erkennbar (2).	42
Abb. 1-14:	Düsen Schlauch ummantelt mit Stahlmanschette und Kette auf einer Winde an Bord der Noortruck.....	42
Abb. 1-15:	Düsen Schlauch auf dem Meeresgrund, Blasenschleier in Betrieb.....	43
Abb. 1-16:	Skizze des Großen Blasenschleiers um die Rammplattform. Erkennbar ist der Schlauchring, der von dem Düsen Schlauch gebildet wird, sowie die Luftversorgungsschläuche, die den Ring mit der Noortruck verbinden, und die großen Anker trossen, die die Goliath auf Position halten (alle Rechte bei HYDROTECHNIK Lübeck GmbH).	45
Abb. 1-17:	Rammplattform Goliath (Quelle: http://www.geosea.be/EN/Equipment_post.html?postId=36).	45

Abb. 1-18: Positionsmessung eines ringförmig am Meeresboden verlegten Blasenschleierschlauches (Düsenschlauch) am Beispiel des Fundamentstandortes BW15. Die grünen Dreiecke zeigen die eingemessenen Lagepunkte des Düsenschlauchs am Meeresboden.	47
Abb. 1-19: Halboffener (linearer) Blasenschleier inklusive der Schallmessgeometrie beim Fundamentstandort BW01 während der Forschungsphase 1.	48
Abb. 1-20: Positionsmessung des am Meeresboden verlegten doppelten Blasenschleiers (ein Düsenschlauch elliptisch auf einer Seite der Rammbaustelle ausgelegt) beim Fundamentstandort BW24.	49
Abb. 1-21: Positionsmessung eines verlegten doppelten Blasenschleiers (zwei getrennte Düsenschläuche mit je 280 m Länge) mit einem Abstand von ca. 10 m bis 20 m beim Fundamentstandort BW33.	50
Abb. 1-22: Kostenanteile der verschiedenen Posten für den Einsatz des Großen Blasenschleiers beim OWP Borkum West II.	54
Abb. 1-23: Anteile der Schiffskosten und der Kosten für das Blasenschleiersystem im direkten Vergleich. Die Kosten für den Blasenschleier setzen sich aus Herstellungskosten, Miete für die Kompressoren und Personalkosten zusammen (vgl. Abb. 1.22). Die Treibstoffkosten werden dagegen komplett den Schiffskosten zugeordnet, auch wenn der Treibstoff zusätzlich zum Antreiben der Kompressoren des BBC genutzt wurde.	54
Abb. 1-24: Links: Autonomes Hydroschallmessgerät inkl. eigener Verankerung. Von links nach rechts: Auftriebskörper für Hydrophon, Hydrophon mit Schutzkorb, Gehäuse mit Messelektronik (liegt beim Einsatz am Meeresboden), zusätzlicher Anker, Markierungsboje. Rechts: Verankerung der C-PODs und der Hydroschallmessgeräte. Beim Einsatz an C-POD-Stationen entfällt die eigene Verankerung an den Hydroschallmessgeräten.	59
Abb. 1-25: Darstellung der festen Messpositionen der Schweinswalklickdetektoren (C-PODs) und Hydroschallmesssysteme für das Forschungsvorhaben HYDROSCHALL OFF BW II und das Baumonitoring (Effizienzkontrolle) zum Bau des OWPs Borkum West II. Die Bezeichnungen und Koordinaten der Messpositionen sowie deren Belegung mit C-PODs und Hydrophonen können Tab. 1.4 entnommen werden.	61
Abb. 1-26: Typisches gemessenes Zeitsignal des Unterwasserschalls bei einem Rammschlag in einigen 100 Metern Entfernung.	69
Abb. 1-27: Terzspektren des Einzelereignispegels der (gemittelten) Referenz (ohne Schallminderungssystem; schwarze Linie) im Vergleich zu einer ausgewählten BBC-Konfiguration (BBC 2 mit maximaler Luftmenge, blaue Linie) in einem Abstand von 750 m zum Rammort. Die Messungen erfolgten in Abständen zwischen 685 m und 850 m und wurden mittels geometrischer Ausbreitungsdämpfung auf einen exakten Abstand von 750 m normiert.	76
Abb. 1-28: Differenzspektrum zu Abb. 1-27 (Differenz zwischen Terzspektrum mit und ohne Blasenschleier).	77
Abb. 1-29: Zeitlicher Verlauf des Einzelereignispegels (SEL, breitbandig) bei den Rammarbeiten zum Fundamentstandort BW35 an unterschiedlichen Messpositionen in unterschiedlichen Entfernungen (mob a: 1,5 km; bwf1: 2,9 km; bwf4: 18,4 km).	78

- Abb. 1-30: Verteilung des Einzelereignispegels in ca. 750 m Entfernung während der Rammarbeiten mit einem Großen Blasenschleier mit max. Luftzufuhr von $0,32 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$. Oben: BBC 1 am Fundamentstandort BW42 in 1.504 m Entfernung; unten: BBC 2 am Fundamentstandort BW34 in 1.465 m Entfernung. 86
- Abb. 1-31: Verteilung des Einzelereignispegels in ca. 1.500 m Entfernung während der Rammarbeiten ohne den Einsatz eines Schallschutzsystems. Oben: am Fundamentstandort BW35 in 1.477 m Entfernung und einem Pfahldurchmesser von 50 mm; unten: am Fundamentstandort BW31 in 1.483 m Entfernung und einem Pfahldurchmesser von 70 mm. 87
- Abb. 1-32: Zeitlicher Verlauf des Einzelereignispegels (SEL) am westlichen Messpunkt (750 m Entfernung, POD mob 1, ohne dazwischen liegenden Blasenschleier – BBC 2) und am östlichen Messpunkt (Entfernung etwa 800 m bis 1.000 m, Messpunkt 1, mit dazwischen liegendem Blasenschleier) bei kurzzeitiger Abschaltung (grau) des Blasenschleiers am Fundament BW01. 89
- Abb. 1-33: Zeitlicher Verlauf des Einzelereignispegels (SEL) am westlichen Messpunkt (750 m Entfernung, POD mob 1, ohne dazwischen liegenden Blasenschleier – BBC 2) und am östlichen Messpunkt (Entfernung etwa 800 bis 1000 m, Messpunkt 1, mit dazwischen liegendem Blasenschleier) bei kurzzeitiger Abschaltung (grau) des Blasenschleiers am Fundament BW01. 89
- Abb. 1-34: 1/3-Oktav-Spektren (Terzspektren) des Einzelereignispegels (SEL_{50}) zu verschiedenen Zeitpunkten mit und ohne Blasenschleier an der Messposition „hinter“ dem Blasenschleier in einer Entfernung von ca. 800 m bei BW 01. Das 1/3 Oktavspektrum stellt die mittlere Schallleistung eines Rammschlages in Abhängigkeit von der Frequenz dar. 90
- Abb. 1-35: Zeitlicher Verlauf des Einzelereignispegels (SEL) in einer Entfernung von 741 m bei Rammungen mit einem Großen Blasenschleier (BBC 2 am Fundamentstandort BW54). Zwischenzeitlich wurde die zugeführte (Druck-) Luftmenge variiert (z. T. durch technischen Ausfall von Kompressoren) und der Blasenschleier wurde zum Ende der Rammungen abgeschaltet (geplante Referenzmessung). 91
- Abb. 1-36: Gemittelte Differenzspektren (Einfügungsdämpfung) des Einzelereignispegels (SEL_{50}) für die Konfiguration BBC 2 (kleiner Lochabstand, kleine Löcher) mit unterschiedlichen Luftmengen pro Minute und Meter BBC-Düsenschlauch. 92
- Abb. 1-37: Gemittelte Differenzspektren (Einfügungsdämpfung) des Einzelereignispegels (SEL_{50}) für beide verwendeten BBC-Düsenschlauchkonfigurationen mit maximaler Luftmenge ($0,32 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$). 93
- Abb. 1-38: Gemittelte Differenzspektren (Einfügungsdämpfung) des Einzelereignispegels (SEL_{50}) normiert auf eine Entfernung von 750 m für beide getesteten halboffenen (linearen) doppelten Blasenschleier-Konfigurationen im Vergleich zu einem einfachen Blasenschleier (BBC 2) mit vergleichbarer Luftmenge ($0,32 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$). 94
- Abb. 1-39: Gemessene Zunahme des Einzelereignispegels (SEL_{50}) bei Erhöhung der Rammenergie beim Offshore Windpark Horns Rev 2 (Brandt et al. 2011). Die gestrichelte Näherungskurve hat die Gleichung $\text{SEL} = 7 \log(E) + 155$ 97
- Abb. 1-40: Gemessene Zunahme des Einzelereignispegels (SEL_{50}) bei Erhöhung der Schlagenergie (Nehls & Betke 2011). Die Näherungskurve hat die Gleichung $\text{SEL} = 10 \log(E) + 146$ 97
- Abb. 1-41: 1/3-Oktav-Spektren (Terzspektren) des Einzelereignispegels (SEL_{50}) in verschiedenen Entfernungen zur Rammstelle am Fundamentstandort BW32 (mobil 2: 1,5 km, bwf_1: 5,0 km und bwf_6: 20,7 km). (Referenzmessung ohne Schallminderungssystem). 99

- Abb. 1-42: 1/3-Oktav-Spektren (Terzspektren) des Einzelereignispegels (SEL₅₀) an der Messposition bwf_6 (Entfernung ca. 20 km) mit (BW23) und ohne (BW32) Schallschutzsystem (BBC 2). Das Terzspektrum zum Fundament BW23 wurde mithilfe der Ausbreitungsdämpfung (nach Thiele & Schellstede 1980) auf denselben Abstand wie für das Fundament BW32 (20,7 km) skaliert. ... 100
- Abb. 1-43: Terzspektren des gemittelten Einzelereignispegels (SEL₅₀) mit und ohne Schallminderungsmaßnahme (BBC 2 mit maximaler Luftmenge) mit dem Summenpegel von SEL₅₀ = 150 dB. Die beiden Terzspektren wurden in unterschiedlichen Entfernungen gemessen (Referenz in ca. 16,9 km; BBC 2 mit maximaler Luftmenge in ca. 2,5 km). 101
- Abb. 1-44: Gemessener Einzelereignispegel (SEL₅₀) bei unterschiedlichen Entfernungen (Kreuze) für den Fundamentstandort BW31 ohne Verwendung eines Schallminderungssystems (Referenz). Zusätzlich sind die prognostizierten Einzelereignispegel (SEL₅₀) als Funktion des Abstandes mit unterschiedlichen Ausbreitungsfunktionen dargestellt..... 103
- Abb. 1-45: Gemessener Einzelereignispegel (SEL₅₀) bei unterschiedlichen Entfernungen (Kreuze) für den Fundamentstandort BW26 mit Verwendung eines Schallminderungssystems (BBC 1). Zusätzlich sind die errechneten Einzelereignispegel als Funktion des Abstandes mit unterschiedlichen Ausbreitungsfunktionen dargestellt. 104
- Abb. 1-46: Gemessener Einzelereignispegel (SEL₅₀) bei unterschiedlichen Entfernungen (Kreuze) für den Fundamentstandort BW02 mit Verwendung eines Schallminderungssystems (BBC 2). Zusätzlich sind die errechneten Einzelereignispegel als Funktion des Abstandes mit unterschiedlichen Ausbreitungsfunktionen dargestellt. 105
- Abb. 1-47: Prognostizierte Einzelereignispegel (SEL₅₀) auf der Basis einer empirischen Näherungsformel der itap GmbH (farbige gestrichelte Linien) und reale Messdaten (Kreise) von Fundamentstandorten, an denen Rammarbeiten ohne Schallminderungssystem (Referenz) durchgeführt wurden. Zur Veranschaulichung der (Mess-) Varianz sind über alle dargestellten (Mess- und Prognose-) Daten an allen Fundamenten die gemittelten 90%, 50% und 5% Perzentil-Werte des Einzelereignispegels (SEL₅₀) über die Entfernung dargestellt (schwarze Linien). 106
- Abb. 1-48: Prognostizierte Einzelereignispegel (SEL₅₀) auf der Basis einer empirischen Näherungsformel der itap GmbH (farbige gestrichelte Linien) und reale Messdaten (Kreise) von Fundamentstandorten, an denen Rammarbeiten unter Anwendung eines Blasenschleiers (BBC 1 mit maximaler Luftmenge) durchgeführt wurden. Zur Veranschaulichung der (Mess-) Varianz sind über alle dargestellten (Mess- und Prognose-) Daten an allen Fundamenten die gemittelten 90%, 50% und 5% Perzentil-Werte des Einzelereignispegels (SEL₅₀) über die Entfernung dargestellt (schwarze Linien). 107
- Abb. 1-49: Prognostizierte Einzelereignispegel (SEL₅₀) auf der Basis einer empirischen Näherungsformel der itap GmbH (farbige gestrichelte Linien) und reale Messdaten (Kreise) von Fundamentstandorten, an denen Rammarbeiten unter Anwendung eines Blasenschleiers (BBC 2 mit maximaler Luftmenge) durchgeführt wurden. Zur Veranschaulichung der (Mess-) Varianz sind über alle dargestellten (Mess- und Prognose-) Daten an allen Fundamenten die gemittelten 90%, 50% und 5% Perzentil-Werte des Einzelereignispegels (SEL₅₀) über die Entfernung dargestellt (schwarze Linien). 108

Abb. 1-50: Oben: Anzahl der (software-) detektierten Rammschläge bei der Rammung am Fundamentstandort BW65 an unterschiedlichen Messpositionen innerhalb und außerhalb des Baufeldes (Entfernung POD mob 1: 0,5 km, POD mob 2: 0,8 km, POD bwf_1: 5,7 km, POD bwf_6: 22,4 km). Mit schwarzen Linien sind die Zeitabschnitte der Rammarbeiten bei BW II am Standort BW65 gekennzeichnet. Unten: dazugehöriger Zeitverlauf des energieäquivalenten Dauerschallpegels L_{eq}	110
Abb. 1-51: Anzahl der detektierten Rammschläge am Fundamentstandort BW65 an unterschiedlichen Messpositionen im Baufeld und im FFH-Gebiet (Entfernung POD mob 1: 1.477 m POD bwf_1: 2,9 km, POD bwf_4: 18,4 km).	111
Abb. 1-52: Zeitsignal gemessen im FFH-Gebiet in ca. 22,4 km Entfernung vom Fundamentstandort BW65 (POD bwf_6) bei zeitgleichen Rammungen in den OWPs BW II und BO 1. Der Abstand zur Baustelle BARD Offshore 1 (BO 1) war größer als 50 km. Zur Verdeutlichung ist die maximale gemessene Amplitude auf einen Wert von 1 (Vollaussteuerung) normiert dargestellt.	112
Abb. 1-53: Ein Rammimpuls gemessen in unterschiedlichen Entfernungen zu einem Rammort ohne den Einsatz eines Schallminderungssystems.	113
Abb. 1-54: Dargestellt sind die gemessenen Perzentilwerte des Einzelereignispegels ($SEL_{5,50,90}$) normiert auf eine Entfernung von 750 m zum Rammort getrennt nach der Wandstärke (50 mm oder 70 mm) und der eingesetzten Schallschutz-Systemkonfiguration (Ref: ohne Blasenschleier; BBC 1 und BBC 2: mit Blasenschleier und max. Luftzufuhr von $0,32 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$).....	116
Abb. 1-55: Dargestellt sind die gemessenen Spitzenpegel (L_{peak}) normiert auf eine Entfernung von 750 m zum Rammort getrennt nach der Wandstärke (50 mm oder 70 mm) und der eingesetzten Schallschutz-Systemkonfiguration (Ref – ohne Blasenschleier; BBC 1 und BBC 2 mit max. Luftzufuhr von $0,32 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$).....	117
Abb. 1-56: Strömungsgeschwindigkeit (gemessen an der Forschungsplattform FINO 1) aufgetragen gegen den Einzelereignispegel (SEL_{50}) bei Rammungen mit und ohne Schallminderungsmaßnahme im OWP BW II.....	125
Abb. 1-57: Invertierte Hörschwelle von Schweinswalen nach Kastelein et al. (2010) als spektrale Gewichtungsfunktion, S-Gewichtung genannt, für den Versuch einer Berechnung eines hörgerechten akustischen Parameters hinsichtlich Störwirkung.	132
Abb. 1-58: Terzspektren des Einzelereignispegels (SEL) gemessen in zwei unterschiedlichen Entfernungen zur Rammbaustelle im OWP Borkum West II. Im Vergleich sind die Terzspektren mit einer schweinswalhörgerechten spektralen Gewichtung (S-Gewichtung, rot) und ohne spektrale Gewichtung (schwarz) dargestellt.	133
Abb. 1-59: Differenz zwischen dem frequenzgewichteten und ungewichteten Einzelereignispegels (SEL gegen S-SEL) als Funktion des Einzelereignispegels SEL.	134
Abb. 1-60: Zusammenhang zwischen Schweinswalereignissen (Encounter) und Wartezeit (Waiting time).	142
Abb. 1-61: Foto eines C-PODs (http://www.chelonia.co.uk/index.html).....	145
Abb. 1-62: Lage der POD-Messpositionen, deren Daten in die Auswertung einfließen.	146
Abb. 1-63: Häufigkeitsverteilung der zeitlichen Dauer der einzelnen Rammphasen sowie der Nettorammezeit je Rammphase.....	148

- Abb. 1-64: C-POD-Datenlage im Rahmen des Forschungsprojektes. Grau = auswertbare Daten; weiß = kein Gerät im Wasser, rot = Geräteverlust; gelb = Daten nicht auswertbar. Die senkrechten roten Linien zeigen Tage mit Rammaktivität und schwarze Linien einen Geräte-Wechsel an..... 152
- Abb. 1-65: Anzahl der Datensätze pro PPM/h-Werteklasse (0 bis maximal 59 Minuten). 153
- Abb. 1-66: Korrelation zwischen den Schallgrößen SEL und Leq..... 153
- Abb. 1-67: Beispielhafte Darstellung zweier Tage, an denen gerammt wurde. Als „Rammtag“ würde hier nur der zweite Tag (untere Abbildung) definiert, da sich dort ein möglicher Einfluss der Rammarbeiten auf die Variable PP10M/day offensichtlich stärker abbilden sollte, als dieses bei dem ersten Tag (obere Abbildung) der Fall wäre. Der untere Tag würde gemäß der Definition im Text als „Rammtag“ eingestuft, der obere Tag hingegen ganz aus den Analysen heraus fallen, da er weder als „Rammtag“ noch als „Tag vor der Rammung“ eingestuft werden könnte. 155
- Abb. 1-68: Oben: Bei diesem Beispiel wären die Kalendertage 3 und 8 „Rammtage“, die Tage 1 und 6 würden als „Tag vor der Rammung“ eingestuft. Die Tage 4 und 5 wären „Tag 1 nach Rammung“ und „Tag 2 nach Rammung“. Mitte: Hier würde Tag 3 als „Rammtag“ eingestuft, Tag 5 aber nicht. Tag 1 würde hier als „Tag vor der Rammung“ eingestuft, Tag 4 wäre „Tag 1 nach Rammung“. Unten: Hier würden Tag 2 und Tag 8 als „Rammtag“ eingestuft, Tag 3 nicht. In der Folge würde Tag 6 als „Tag vor der Rammung“ definiert. Dadurch, dass an Tag 3 Rammarbeiten stattfanden, wären Tage nach einer Rammung hier nicht definiert..... 155
- Abb. 1-69: PPM/h-Werte (oben) sowie die daraus errechneten δ PPM/h-Werte (unten) der POD-Messpositionen T1, T2, T4, T5, T8 und T12 bei der Rammbaustelle BW04. Die POD-Messpositionen lagen in einer Entfernung von 10 bis 14 km zum Rammort. Die rote Linie (untere Abbildung) entspricht der „Stunde 0“, welche den gesamten Zeitraum der Rammphase umfasst (oft länger als eine Stunde). Die PPM.s-Werte sind der PPM-Mittelwert des in der oberen Abbildung grau unterlegten Zeitfensters und werden in der unteren Abbildung auf der Y-Achse durch die δ PPM/h-Nulllinie (schwarze horizontale Linie in der unteren Grafik) dargestellt. 158
- Abb. 1-70: PP10M/day (in Prozent des Tagesmaximums; rote Punkte) der POD Station BWF_1 sowie der gleitende Mittelwert über 10 Tage (blaue Linie). Die jeweilige Bautätigkeit an den einzelnen Tagen ist über vertikale Linien dargestellt. Dabei wurde unterschieden zwischen Blasenschleier aus, Blasenschleier kontinuierlich an und Blasenschleier teilweise an. Im Mittel lag die Station 3,5 km vom jeweiligen Rammort entfernt, die minimale Distanz betrug 0,9 km, die maximale 6,6 km. 163
- Abb. 1-71: PP10M/day (in Prozent des Tagesmaximums; rote Punkte) der POD Station 21_ITAW sowie der gleitende Mittelwert über 10 Tage (blaue Linie). Die jeweilige Bautätigkeit an den einzelnen Tagen ist über vertikale Linien dargestellt. Dabei wurde unterschieden zwischen Blasenschleier aus, Blasenschleier kontinuierlich an und Blasenschleier teilweise an. Im Mittel lag die Station 34,3 km vom jeweiligen Rammort entfernt, die minimale Distanz betrug 32,2 km, die maximale 37,2 km. 164
- Abb. 1-72: Gleitendes Mittel in PP10M/day über 10 Tage von allen 26 POD-Messpositionen, deren Daten in die Auswertung dieser Studie einfließen. Die jeweilige Bautätigkeit an den einzelnen Tagen ist über vertikale Linien dargestellt. Dabei wurde unterschieden zwischen Blasenschleier aus, Blasenschleier kontinuierlich an und Blasenschleier teilweise an. 165

Abb. 1-73: Boxplots der PP10M/day-Werte der POD-Messpositionen innerhalb einer Distanz von 5 km zum jeweiligen Rammort für Rammbaustellen ohne Schallschutzmaßnahme in vier definierten Tages-Klassen.	166
Abb. 1-74: Boxplots der PP10M/day-Werte der POD-Messpositionen innerhalb einer Distanz von 5 km zu Baustellen mit Blasenschleier mit konstant maximaler Luftmenge in vier definierten Tages-Klassen.	167
Abb. 1-75: Schallabhängigkeit der Detektionsrate während Rammungen (δ PPM/h) im Vergleich zur Detektionsrate vor Beginn von Rammungen. in 5 dB-Klassen. Dargestellt sind die δ PPM/h-Werte und Standardfehler gegen die mittlere Detektionsrate des Vergleichszeitraums (rote gestrichelte Null-Linie) und deren Standardfehler (graue gestrichelte Linien).	168
Abb. 1-76: Schallabhängigkeit der Detektionsrate während Rammungen (δ PPM/h) im Vergleich zur Detektionsrate vor Beginn von Rammungen in 2 dB-Klassen. Dargestellt sind die δ PPM/h-Werte inklusive Standardfehler gegen den mittlere Detektionsrate des Vergleichszeitraums (rote gestrichelte Null-Linie) und deren Standardfehler (graue gestrichelte Linien).	170
Abb. 1-77: Darstellung der δ PPM/h-Werte (inklusive Standardfehler) in den Stunden nach Rammende in den einzelnen Schallklassen (alle Datensätze). Zusätzlich aufgetragen ist der δ PPM-Mittelwert aus dem Vergleichszeitraum (rote Null-Linie) und dessen Standardfehler (gestrichelte graue Linien).	171
Abb. 1-78: Schallabhängigkeit der Detektionsrate während Rammungen (δ PPM/h) im Vergleich zur Detektionsrate vor Beginn von Rammungen in 5 dB-Klassen. Dargestellt sind die δ PPM/h-Werte inklusive Standardfehler gegen die mittlere Detektionsrate des Vergleichszeitraums (rote gestrichelte Linie) und deren Standardfehler (graue gestrichelte Linien).	174
Abb. 1-79: Schallabhängigkeit der Detektionsrate während Rammungen (δ PPM/h) im Vergleich zur Detektionsrate vor Beginn von Rammungen in 5 dB-Klassen. Dargestellt sind die δ PPM/h-Werte inklusive Standardfehler gegen die mittlere Detektionsrate des Vergleichszeitraums (rote gestrichelte Null-Linie) und deren Standardfehler (graue gestrichelte Linien).	175
Abb. 1-80: Darstellung der δ PPM/h-Werte (inklusive Standardfehler) in den Stunden nach Rammende in verschiedenen Schallklassen bei Baustellen ohne Blasenschleier. Zusätzlich aufgetragen ist der δ PPM-Mittelwert aus dem Vergleichszeitraum (rote Null-Linie) und dessen Standardfehler (gestrichelte graue Linien).	176
Abb. 1-81: Darstellung der δ PPM/h-Werte (inklusive Standardfehler) in den Stunden nach Rammende in verschiedenen Schallklassen bei Baustellen mit Blasenschleier vom Typ BBC 2. Zusätzlich aufgetragen ist der δ PPM-Mittelwert aus dem Vergleichszeitraum (rote Null-Linie) und dessen Standardfehler (gestrichelte graue Linien). Für die Schallklassen 155-160 dB und >160 dB waren bei Baustellen mit BBC 2 aufgrund der Schalldämmung nicht ausreichend viele bzw. keine Daten vorhanden.	179
Abb. 1-82: Alle Wartezeiten, welche an der POD-Position bwf_1 (der Rammungen nächstgelegenen Position) registriert wurden, aufgetragen gegen das Anfangsdatum der Wartezeit. 1. Wartezeiten nach einer Rammung sind als rote Punkte, alle übrigen Wartezeiten als blaue Kreise gekennzeichnet. Die schwarze horizontale Linie stellt den Median über den genannten Zeitraum dar.	183

Abb. 1-83: Alle Wartezeiten, welche an der POD-Position Pos21 ITAW (der von Rammungen am weitesten entfernten Position) registriert wurden, aufgetragen gegen das Anfangsdatum der Wartezeit. 1. Wartezeiten nach einer Rammung sind als rote Punkte, alle übrigen Wartezeiten als blaue Kreise gekennzeichnet. Die hier teils verdeckte, schwarze horizontale Linie stellt den Median über den genannten Zeitraum dar.....	184
Anhang Abb: 1: Rammplattform Goliath (Quelle: www.geosea.be/EN/Equipment_post.html?postId=36). 203	
Anhang Abb: 2: Die Noortruck.....	204
Anhang Abb: 3: Zeitlicher Verlauf des Einzelereignispegels (SEL, breitbandig) bei den Rammarbeiten zur Anlage BW35 an unterschiedlichen Messpositionen in unterschiedlichen Entfernungen (mobil 1: 1,5 km; bwf_1: 2,9 km; bwf_4: 18,4 km).	211
Anhang Abb: 4: Zeitlicher Verlauf des Spitzenpegels (L_{Peak} , breitbandig) bei den Rammarbeiten zur Anlage BW35 an unterschiedlichen Messpositionen in unterschiedlichen Entfernungen (mobil 1: 1,5 km; bwf_1: 2,9 km; bwf_4: 18,4 km).	212
Anhang Abb: 5: Einzelereignispegel (SEL) am westlichen Messpunkt (750 m Entfernung, POD mob 1) und am östlichen Messpunkt (Entfernung etwa 800 m bis 1000 m, Messpunkt 1), bei Rammung BW 01, Projekt Borkum West II, Phase I. Wegen einer technischen Störung der Stromversorgung ist in den Daten an der östlichen Messposition gegen 21:05 UTC eine Lücke von 15 Minuten. Um 22:00 Uhr und 01:45 Uhr und nach 06:00 Uhr UTC war der Blasenschleier kurzzeitig nicht in Betrieb.	212
Anhang Abb: 6: Zeitlicher Verlauf des Spitzenpegels (L_{Peak}) am westlichen Messpunkt (750 m Entfernung, POD mob 1, ohne dazwischenliegendem Blasenschleier) und am östlichen Messpunkt (Entfernung etwa 800 m bis 1000 m, Messpunkt 1, mit dazwischenliegendem Blasenschleier) bei kurzzeitiger Abschaltung des Blasenschleiers am Fundament BW01.....	213
Anhang Abb: 7: Zeitlicher Verlauf des Einzelereignispegels (SEL, breitbandig) bei den Rammarbeiten zur Anlage 12 an unterschiedlichen Messpositionen in unterschiedlichen Entfernungen (mobil 1: 1,6 km; bwf_1: 4,0 km; bwf_4: 18,4 km).	213
Anhang Abb: 8: Zeitlicher Verlauf des Spitzenpegels (L_{Peak} , breitbandig) bei den Rammarbeiten zur Anlage BW12 an unterschiedlichen Messpositionen in unterschiedlichen Entfernungen (mobil 1: 1,6 km; bwf_1: 4,0 km; bwf_4: 18,4 km).	214
Anhang Abb: 9: Zeitlicher Verlauf des Einzelereignispegels (SEL, breitbandig) bei den Rammarbeiten zur Anlage 34 an unterschiedlichen Messpositionen in unterschiedlichen Entfernungen (mobil 1: 0,75 km; bwf_1: 3,9 km; bwf_4: 19,2 km).	214
Anhang Abb: 10: Zeitlicher Verlauf des Spitzenpegels (L_{Peak} , breitbandig) bei den Rammarbeiten zur Anlage 34 an unterschiedlichen Messpositionen in unterschiedlichen Entfernungen (mobil 1: 0,74 km; bwf_1: 3,9 km; bwf_4: 19,2 km).	215
Anhang Abb: 11: Länge der Zeitintervalle zwischen zwei aufeinanderfolgenden Rammphasen in Stunden. Dargestellt ist der Zeitraum von der Beendigung der Rammarbeiten an einer Rammbaustelle (z.B. BW01) bis zum Beginn der Arbeiten an der Folgebaustelle (z.B. BW03) in Stunden (zwischen BW01 und BW03: 127 Stunden).	226

Anhang Abb: 12: Darstellung der Anzahl von POD-Stationen in Abhängigkeit von der Entfernung zu den Rambaustellen (BW)	228
Anhang Abb: 13: PP10M-Mittelwert (in Prozent des Tagesmaximums) der POD Stationen Pos04_ITAW. In der Abbildung erkennbar sind auch die Zeitpunkte der Arbeitsaufnahme an den verschiedenen Baustellen (vertikale Linien).Im Mittel lag die Station 3,9 km vom jeweiligen Rammort entfernt, die minimale Distanz betrug 0,8 km, die maximale 6,8 km.	229
Anhang Abb: 14: PP10M-Mittelwert (in Prozent des Tagesmaximums) der POD Stationen BW2. In der Abbildung erkennbar sind auch die Zeitpunkte der Arbeitsaufnahme an den verschiedenen Baustellen (vertikale Linien). Im Mittel lag die Station 5,4 km vom jeweiligen Rammort entfernt, die minimale Distanz betrug 1,2 km, die maximale 9,6 km.	230
Anhang Abb: 15: PP10M-Mittelwert (in Prozent des Tagesmaximums) der POD Stationen BWF_2. In der Abbildung erkennbar sind auch die Zeitpunkte der Arbeitsaufnahme an den verschiedenen Baustellen (vertikale Linien).Im Mittel lag die Station 5,4 km vom jeweiligen Rammort entfernt, die minimale Distanz betrug 1,2 km, die maximale 9,6 km.	231
Anhang Abb: 16: PP10M-Mittelwert (in Prozent des Tagesmaximums) der POD Stationen BWF_4. In der Abbildung erkennbar sind auch die Zeitpunkte der Arbeitsaufnahme an den verschiedenen Baustellen (vertikale Linien).Im Mittel lag die Station 15,6 km vom jeweiligen Rammort entfernt, die minimale Distanz betrug 11,3 km, die maximale 19,3 km.....	232
Anhang Abb: 17: PP10M-Mittelwert (in Prozent des Tagesmaximums) der POD Stationen T11. In der Abbildung erkennbar sind auch die Zeitpunkte der Arbeitsaufnahme an den verschiedenen Baustellen (vertikale Linien).Im Mittel lag die Station 18,7 km vom jeweiligen Rammort entfernt, die minimale Distanz betrug 13,4 km, die maximale 23,9 km.....	233
Anhang Abb: 18: PP10M-Mittelwert (in Prozent des Tagesmaximums) der POD Stationen BWF_5. In der Abbildung erkennbar sind auch die Zeitpunkte der Arbeitsaufnahme an den verschiedenen Baustellen (vertikale Linien).Im Mittel lag die Station 19,9 km vom jeweiligen Rammort entfernt, die minimale Distanz betrug 15,3 km, die maximale 23,8 km.....	234
Anhang Abb: 19: PP10M-Mittelwert (in Prozent des Tagesmaximums) der POD Stationen BWF_6. In der Abbildung erkennbar sind auch die Zeitpunkte der Arbeitsaufnahme an den verschiedenen Baustellen (vertikale Linien).Im Mittel lag die Station 24,7 km vom jeweiligen Rammort entfernt, die minimale Distanz betrug 20,1 km, die maximale 28,7 km.....	235
Anhang Abb: 20: Ausbringungsdauer der C-PODs an den fixen POD-Stationen.....	236

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1.1:	Verwendete (Gesamt-) Luftmengen für den Betrieb des Großen Blasenschleiers bei unterschiedlicher Anzahl von Kompressoren.	41
Tab. 1.2:	Wellenbedingte Grenzen des Einsatzes der Arbeitsplattform und des Versorgungsschiffes zur Zulieferung der notwendigen Pfähle.	46
Tab. 1.3:	Auslegungsart und Konfiguration des Blasenschleiers bei den verschiedenen Fundamentstandorten.	51
Tab. 1.4:	Verwendete Messpositionen der Schweinswalddetektoren (C-PODs) und Hydroschallmesssysteme innerhalb des Forschungsvorhabens und der Effizienzkontrolle.	60
Tab. 1.5:	Auflistung der für die Hydroschallmessungen eingesetzten Geräte.	61
Tab. 1.6:	Übersicht über sämtliche vorhandenen hydroakustischen Messungen und Ausfälle beim OWP Borkum West II.	63
Tab. 1.7:	Tatsächliche Abstände der Messpositionen zum Rammort.	65
Tab. 1.8:	Liste der zur Auswertung herangezogenen Messdaten.	73
Tab. 1.9:	Einzelereignispegel (SEL) und Spitzenpegel (L_{Peak}) normiert auf eine Entfernung von 750 m.	80
Tab. 1.10:	Zusammenfassung der gemittelten Einzelereignispegel (SEL) und des maximalen Spitzenpegels (L_{Peak}) in 750 m Entfernung für unterschiedliche Schallminderungskonfigurationen bzw. Referenzmessungen (genauere Aufschlüsselung: s. Anhang Tab. 7 & Tab. 8).	82
Tab. 1.11:	Anzahl der Fundamentstandorte mit Messungen pro Schallminderungskonfiguration (Gesamtanzahl: 38; da zwei Fundamente ohne Messungen).	83
Tab. 1.12:	Anteil der Fundamentstandorte, an denen bestimmte Pegelwerte bei Verwendung des Blasenschleiers BBC 2 mit voller Luftmenge ($0,32 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$) unterschritten wurden (Gesamtanzahl 11: neunmal Rammungen am gesamten Fundamentstandort, zweimal nur zwischenzeitliche Rammungen mit BBC 2 und maximaler Luftmenge).	83
Tab. 1.13:	Anteil der Fundamentstandorte, an denen bestimmte Pegelwerte bei Verwendung des Blasenschleiers BBC 1 mit voller Luftmenge ($0,32 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$) unterschritten wurden (Gesamtanzahl 8: sechsmal Rammungen am gesamten Fundamentstandort, zweimal zwischenzeitliche Rammungen mit BBC 1 und maximaler Luftmenge).	84
Tab. 1.14:	Anteil der Fundamentstandorte (Gesamtzahl: 38), an denen bestimmte Pegelwerte unterschritten wurden. (In 29% aller Fälle ist aufgrund von Referenzmessungen eine Überschreitung von 166 dB_{SEL} und $190 \text{ dB}_{L_{Peak}}$ zu erwarten gewesen.)	85
Tab. 1.15:	Einfluss der verwendeten Luftmenge auf die mittlere Einfügungsdämpfung der beiden getesteten Schlauchkonfigurationen. Es wurden alle Messungen mit Wandstärken von 50 mm und 70 mm verwendet.	92
Tab. 1.16:	Zusammenfassung der erzielten Einfügungsdämpfungen für unterschiedliche Schallminderungskonditionen und -konfigurationen. Dargestellt sind die minimal, im Mittel (arithm. Mittelwert) und maximal erreichte Schallminderung (Definition Kapitel D.2.5, S. 75, Eingangsdaten siehe Tab. 1.10 und Anhang Tab. 1 und 2).	95

Tab. 1.17:	Differenzen zwischen verschiedenen gemessenen akustischen Kenngrößen (Pegeln). Die Differenzen wurden über sämtliche auswertbaren Rammschläge aller Messpositionen innerhalb des Baufeldes ohne Anwendung eines Schallschutzsystems ermittelt.	115
Tab. 1.18:	Zusammenfassung der erzielten Einfügungsdämpfungen für unterschiedliche Schallminderungskonditionen und -konfigurationen basierend auf unterschiedlichen Perzentilwerten für den Einzeleignispegel ($SEL_{5,50,90}$) (vgl. Tab. 1.16).	118
Tab. 1.19:	Auflistung der Rammaktivitäten im OWP BW II und der für diese Zeitpunkte verfügbaren ozeanographischen Parameter der Forschungsplattform FINO1 (www.FINO1.de).	123
Tab. 1.20:	Korrelationskoeffizienten (Pearson) zwischen dem Einzelereignispegel (SEL_{50}) bei unterschiedlichen Blasenschleierkonfigurationen sowie Referenzmessungen und ozeanographischen bzw. meteorologischen Daten.	124
Tab. 1.21:	Einzelereignispegel (SEL_{50}) und energieäquivalenter Dauerschallpegel (L_{eq}) mit und ohne spektraler S-Gewichtung für jeweils eine Rammung mit und ohne Blasenschleier (BBC; Fundamentstandorte BW35 und BW04), gemessen in einer Entfernung von 750 m.	133
Tab. 1.22:	Rammphasen und Rambaustellen. Dargestellt sind die Vergrämungs-, Ramm- und Unterbrechungszeiten der verschiedenen Rammphasen, sowie die Konfiguration des BBC. Die Konfiguration „Luftmengenversuche“ benennt die Rammphasen, bei denen der BBC mit wechselnder Kompressorenanzahl betrieben wurde. Grau unterlegt sind Fundamentstandorte, an denen die Rammarbeiten in mehreren Rammphasen stattfanden.	147
Tab. 1.23:	Anzahl der PPM/h-Datensätze in vier Unterdatensätzen unterschiedlicher Schallschutz-Konfiguration (mit WEA-Fundamentnummern), unterteilt nach 5dB-Schallklassen und Zeitklassen (Zeitklasse „-10--2“ diente der Kontrolle, wo bei für Fragestellungen 2b und 2d Kontrolldatensatz „n.R.“ (= Zeitklassen nach Rammungen), für Fragestellungen 2a und 2c Kontrolldatensatz „R.“ (= Zeitklasse „0“) verwendet wurde' (Gesamtsummen über das jeweils höhere N der beiden Kontrolldatensätze); Zeitklasse „0“ umfasste Stunden, in denen Rammarbeiten stattfanden [Fragestellungen 2a und 2c]; übrige Zeitklassen für Fragestellungen 2b, 2d und 2e).	159
Tab. 1.24:	Anzahl der PPM/h-Datensätze in den für Fragestellung 2a verwendeten 2dB-Schallklassen; hierfür wurden alle verfügbaren Daten über verschiedene Schallschutz-Konfigurationen gepoolt; Zeitklasse „-10--2“ diente der Kontrolle; Zeitklasse „0“ umfasste Stunden, in denen Rammarbeiten stattfanden.	160
Tab. 1.25:	In den LME-Modellen berücksichtigte Parameter.	160
Tab. 1.26:	δ PPM/h-Werte während der Rammstunden in verschiedenen Schallklassen. Angegeben sind Anzahl der Datensätze (N), Standardfehler (Std.Fehler), Freiheitsgrade (DF), die Werte eines t-Tests (t-Wert) und die dazu gehörigen Wahrscheinlichkeiten eines signifikanten Unterschiedes (p-Werte). Es sind alle Daten, d.h. Baustellen ohne und mit Blasenschleier (BBC 1, BBC 2 und Other) berücksichtigt. Einstufung der Signifikanzen: - = nicht signifikant, * = signifikant, ** = hoch signifikant und *** = höchst signifikant.	168
Tab. 1.27:	δ PPM/h-Werte während der Rammstunden in verschiedenen Schallklassen (2 dB _{SEL} -Schritte). Angegeben sind u.a. Anzahl der Datensätze (N), Standardfehler sowie die p-Werte. Hier sind alle Daten, d.h. Baustellen ohne und mit Blasenschleier (BBC 1, BBC 2 und Other) berücksichtigt. Einstufung der Signifikanzen: - = nicht signifikant, * = signifikant, ** = hoch signifikant und *** = höchst signifikant.	169

Tab. 1.28:	Vergleich der δ PPM/h-Werte aus den einzelnen Schallklassen und Zeitklassen nach Rammende mit dem Wert des Vergleichszeitraums. Hierfür wurden alle Datensätze verwendet (Baustellen mit und ohne Blasenschleier). Teststatistik ist der z-Wert; angegeben ist hierfür die Wahrscheinlichkeit, dass die Nullhypothese beibehalten werden kann ($\Pr(> z)$). Einstufung der Signifikanzen: - = nicht signifikant, * = signifikant, ** = hoch signifikant und *** = höchst signifikant.....	172
Tab. 1.29:	δ PPM/h-Werte während der Rammstunden in verschiedenen Schallklassen. Angegeben sind u.a. Anzahl der Datensätze (N), Standardfehler sowie die p-Werte. Hier sind die Daten der Baustellen ohne Blasenschleier dargestellt. Einstufung der Signifikanzen: - = nicht signifikant, * = signifikant, ** = hoch signifikant und *** = höchst signifikant.....	173
Tab. 1.30:	δ PPM/h-Werte während der Rammstunden in verschiedenen Schallklassen. Angegeben sind u.a. Anzahl der Datensätze (N), Standardfehler sowie die p-Werte. Hier sind die Daten der Baustellen mit Blasenschleier (BBC 2) dargestellt. Einstufung der Signifikanzen: - = nicht signifikant, * = signifikant, ** = hoch signifikant und *** = höchst signifikant.	174
Tab. 1.31:	Vergleich der δ PPM/h-Werte aus den einzelnen Schallklassen und Zeitklassen nach Rammende mit dem Wert des Vergleichszeitraums. Ausgewertet wurden hier nur Baustellen ohne Blasenschleier. Beschriftung s. Tab. 1.28.....	177
Tab. 1.32:	Vergleich der δ PPM/h-Werte aus den einzelnen Schallklassen und Zeitklassen nach Rammende mit dem Wert des Vergleichszeitraums. Herangezogen wurde hier nur der BBC 2-Datensatz. Für die Schallklassen 155-160 dB und >160 dB waren bei Baustellen mit BBC 2 aufgrund der Schalldämmung zu wenige bzw. keine Daten vorhande. Beschriftung s. Tab. 1.28.	180
Tab. 1.33:	Ergebnisse der Wilcoxon-Mann-Whitney-Rangsummentests (zweiseitig, $\alpha = 5\%$) zum Vergleich der δ PPM-Werte aus Tab. 1.29 und Tab. 1.30 (Fragestellung 2c). Für die Schallklasse >160 dB waren bei Baustellen mit BBC 2 aufgrund der Schalldämmung keine Daten vorhanden; diese fehlte somit auch für einen Vergleich; p-value: Wahrscheinlichkeit aufgrund des Wertes der Prüfgröße w , dass die Nullhypothese beibehalten werden kann. Einstufung der Signifikanzen: - = nicht signifikant, * = signifikant, ** = hoch signifikant und *** = höchst signifikant.....	181
Tab. 1.34:	Ergebnisse der Wilcoxon-Mann-Whitney-Rangsummentests (zweiseitig, $\alpha = 5\%$) zum Vergleich der δ PPM-Werte aus Tab. 1.31 und Tab. 1.32 (Fragestellung 2d). Für die Schallklassen 155-160 dB und >160 dB waren bei Baustellen mit BBC 2 aufgrund der Schalldämmung nicht genug bzw. keine Daten vorhanden; diese fehlten somit auch für einen Vergleich. Beschriftung s. Tab. 1.33.....	182
Tab. 1.35:	Wilcoxon-Mann-Whitney-Rangsummentest (zweiseitig, $\alpha = 5\%$, durch Bonferroni-Korrektur war Signifikanzniveau der Einzeltests auf $\alpha = 0,625\%$ gesenkt) der Ausprägung der 1. Wartezeit im Vergleich mit zufällig ausgewählten Wartezeiten außerhalb der Rammphasen bei unterschiedlichen Distanzen zu den Baustellen.	185
Tab. 1.36:	Wilcoxon-Mann-Whitney-Rangsummentest (zweiseitig, $\alpha = 5\%$, durch Bonferroni-Korrektur war Signifikanzniveau der Einzeltests auf $\alpha = 0,29\%$ gesenkt) der Ausprägung der 1. Wartezeit innerhalb von 2dB-Schallklassen (SEL50) im Vergleich mit zufällig ausgewählten Wartezeiten außerhalb der Rammphasen.....	186

Anhang Tab. 1:	Dargestellt sind die Perzentilwerte des Einzelereignispegels (SEL) und der maximale Spitzenpegel (L_{Peak}) für die Messposition POD mobil 1. In rot sind die Werte gekennzeichnet, die mithilfe der Gleichung 8 aus der am nächsten gelegenen Messposition berechnet wurden. ...	215
Anhang Tab. 2:	Dargestellt sind die Perzentilwerte des Einzelereignispegels (SEL) und der maximale Spitzenpegel (L_{Peak}) für die Messposition POD mobil 2. Mit rot sind die Werte gekennzeichnet, die mithilfe der Gleichung 8 aus der am nächsten gelegenen Messposition berechnet wurden.	217
Anhang Tab. 3:	Dargestellt sind die Perzentilwerte des Einzelereignispegels (SEL) und der maximale Spitzenpegel (L_{Peak}) für die Messposition bwf_1. Mit rot sind die Werte gekennzeichnet, die mithilfe der Gleichung 8 aus der am nächsten gelegenen Messposition berechnet wurden. ...	219
Anhang Tab. 4:	Dargestellt sind die Perzentilwerte des Einzelereignispegels (SEL) und der maximale Spitzenpegel (L_{Peak}) für die Messposition bwf_4 bzw. bwf_6. Mit rot sind die Werte gekennzeichnet, die mithilfe der Gleichung 8 aus der am nächsten gelegenen Messposition berechnet wurden.	220
Anhang Tab. 5:	Dargestellt sind die Perzentilwerte des Einzelereignispegels (SEL) und der maximale ungewichtete Spitzenpegel (L_{Peak}) für die zusätzlichen Messpositionen innerhalb der Forschungsphasen 1 und 2.	222
Anhang Tab. 6:	Spektral ungewichteter und S-gewichteter Einzelereignispegel (SEL_{50} und $S-SEL_{50}$) sowie energieäquivalenter Dauerschallpegel ($L_{eq50,30s}$ und $L_{Seq50,30s}$) in der lautesten Konfiguration in einer Entfernung von 750 m.	224
Anhang Tab. 7:	Schalldruckpegel (SEL) und Spitzenpegel (L_{Peak}) in 750 m Entfernung vom Rammort – Referenzmessungen.....	225
Anhang Tab. 8:	Schalldruckpegel (SEL) und Spitzenpegel (L_{Peak}) in 750 m Entfernung vom Rammort – Konfigurationen BBC 1 und BBC 2.....	225
Anhang Tab. 9:	Durchschnittliche Entfernung der POD-Stationen zu den Baustandorten der WEAs (geordnet nach der gemittelten Entfernung zu den Rammbaustellen).....	227
Anhang Tab. 10:	Beginn der Bauarbeiten an den verschiedenen Fundamenten und deren Entfernung zur der POD-Station BW 2.....	237
Anhang Tab. 11:	Beginn der Bauarbeiten an den verschiedenen Fundamenten und deren Entfernung zu der POD-Station BWF_1.....	238
Anhang Tab. 12:	Beginn der Bauarbeiten an den verschiedenen Fundamenten und deren Entfernung zu der POD-Station BWF_2.....	239
Anhang Tab. 13:	Beginn der Bauarbeiten an den verschiedenen Fundamenten und deren Entfernung zu der POD-Station BWF_3.....	240
Anhang Tab. 14:	Beginn der Bauarbeiten an den verschiedenen Fundamenten und deren Entfernung zu der POD-Station BWF_4.....	241
Anhang Tab. 15:	Beginn der Bauarbeiten an den verschiedenen Fundamenten und deren Entfernung zu der POD-Station BWF_5.....	242
Anhang Tab. 16:	Beginn der Bauarbeiten an den verschiedenen Fundamenten und deren Entfernung zu der POD-Station BWF_6.....	243

Anhang Tab. 17: Beginn der Bauarbeiten an den verschiedenen Fundamenten und deren Entfernung zu der POD-Station Pos04_ITAW.....	244
Anhang Tab. 18: Beginn der Bauarbeiten an den verschiedenen Fundamenten und deren Entfernung zu der POD-Station T11.	245
Anhang Tab. 19: Beginn der Bauarbeiten an den verschiedenen Fundamenten und deren Entfernung zu der Pos05_ITAW.	246
Anhang Tab. 20: Beginn der Bauarbeiten an den verschiedenen Fundamenten und deren Entfernung zu der POD-Station Pos21_ITAW.....	247

Abkürzungsverzeichnis

AIC	Akaike Information Criterion (Maß für Güte eines Modells)
ARMA	Autoregressive-Moving Average
AWZ	Ausschließliche Wirtschaftszone
BACI	Before-After Control-Impact (statistischer Ansatz)
BBC 1	Großer Blasenschleier (Big Bubble Curtain) Konfiguration 1
BBC 2	Großer Blasenschleier Konfiguration 2
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BO 1	BARD Offshore 1 (Offshore Windpark)
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
BW II	Borkum West 2 (Offshore Windpark)
BWXX	Rammbaustelle für OWP BW II mit Nummer XX (z.B. BW02)
CorARMA	Korrelationsstruktur für Modelle (minimiert Autokorrelation)
C-POD	Porpoise Detector der neuen Generation (seit 2008)
dB	DeziBel (Schalldruckmessgröße)
DBBC 2a	Doppelter Großer Blasenschleier Konfiguration 2a, Trennweite 80 m
DBBC 2b	Doppelter Großer Blasenschleier Konfiguration 2b, Trennweite 10-20 m
FAD	Free Air Delivery (Kompressorkapazität)
FFH-Gebiet	Schutzgebiet gemäß Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie der EU
FFT	Fast-Fourier-Transformation
GAM	Generalised Additive Model
GBWA	German Bight Western Approach
GGB	Gebiet von gemeinschaftlicher Bedeutung
Hs	Signifikante Wellenhöhe
Lin. BBC 1	Linearer Großer Blasenschleier Konfiguration 1
Lin. BBC 2	Linearer Großer Blasenschleier Konfiguration 2
LME	Linear Mixed-Effects Model
LPeak	Spitzenschalldruckpegel
NN	Normal-Null
OSV	Offshore-Versorgungsschiff
OWP	Offshore-Windpark
PAM	Passives Akustisches Monitoring
PP10M	Schweinswalpositive 10-Minuten (Detection Positive 10-Minutes)
PPM	Schweinswalpositive Minuten (Detection Positive Minutes)
δPPM, dPPM	Standardisierte Schweinswalpositive Minuten
ROV	Tauchroboter (Remote Operating Vehicule)
T-POD	Porpoise Detector der alten Generation (vor 2008)
SCI	Site of Community Importance
SeeAnIV	Seeanlagenverordnung
SEL	Einzelereignisschalldruckpegel (Sound Exposure Level)
SPL	Schalldruckpegel (Sound Pressure Level)
StUK	Standarduntersuchungs-Konzept des BSH (z.B. StUK3)
TGB	Terschelling German Bight
UBA	Umweltbundesamt
VTG	Verkehrstrennungsgebiet
WEA	Windenergieanlage

ZUSAMMENFASSUNG

In dem Forschungsvorhaben HYDROSCHALL-OFF BW II wurde eine für den Serieneinsatz bei Offshore-Montagearbeiten geeignete Schallminderungsmaßnahme im Rahmen der Gründungsarbeiten für den Offshore-Windpark Borkum West II entwickelt. Der Windpark wird von der Firma TRIANEL WINDKRAFTWERK BORKUM GmbH & Co. KG errichtet. Der Park besteht aus 40 Windenergieanlagen (WEA) sowie einer Umspannstation und liegt ca. 45 km nördlich von Borkum. Während der Gründung der Fundamente für die WEA (Tripod-Konstruktionen) wurden 120 Pfähle mit einem Durchmesser von ca. 2,5 m mittels Impulsrammung im Sediment verankert.

Um die bei den Rammungen auftretenden Schallimmissionen zu reduzieren, wurde ein Großer Blasenschleier (engl.: Big Bubble Curtain; BBC) entwickelt. Dieses System konnte vor Beginn der Rammung verlegt werden und wurde während der Rammungen für den Windpark Borkum West II erprobt und eingesetzt. Dabei kamen verschiedene Systemkonfigurationen zum Einsatz, u. a. eine doppelte Auslegung des Blasenschleiers.

Die im Rahmen dieses Projektes beste und praktikabelste Systemkonfiguration des Blasenschleiers BBC 2 (Düsenschlauch mit kleinem Lochabstand, kleine Löcher) erzielte bei maximaler Druckluftzufuhr eine Schallminderung hinsichtlich des Einzelereignispegels (SEL_{50}) von 9 dB bis 13 dB. Diese ist als sehr gut zu bewerten und führt zu einer Reduzierung der durch vergleichbar hohe Schallimmissionen belasteten Fläche um 90%. Die akustischen Messungen der Präsenz von Schweinswalen konnten eine deutliche Verringerung der durch die Rammarbeiten verursachten Störwirkung absichern. Das Vorhaben ist damit das weltweit erste, innerhalb dessen in großem Maßstab unter Offshore-Bedingungen ein Schallminderungssystem erfolgreich eingesetzt wurde und eine positive Wirkung desselben auf eine betroffene Meeressäugerart gezeigt werden konnte. Der Große Blasenschleier hat sich in dem Test bewährt und kann daher grundsätzlich als ein geeignetes Schallminderungssystem bei Offshore-Rammarbeiten eingesetzt werden.

Offshore-Tauglichkeit des Großen Blasenschleiers:

Das Ziel des Vorhabens war die Entwicklung eines seriell einsetzbaren Verfahrens zur Reduzierung der Rammschallimmissionen bei der Errichtung von Offshore-Windparks. Der für den Einsatz beim Offshore Windpark Borkum West II entwickelte Große Blasenschleier konnte bei 31 von 40 Fundamenten ohne Zeitverzögerung in den Errichterprozess eingebunden werden. In fünf Fällen konnte das Schallminderungssystem aufgrund von technischen Problemen (z.B. Abriss der Zuluftschläuche, bzw. der Markierungsbälle), in vier Fällen aufgrund von zeitlichen Restriktionen nicht eingesetzt werden.

Durch das Projekt konnte die grundsätzliche Offshore-Tauglichkeit des Großen Blasenschleiers für die Errichtung von Tripod-Fundamenten für WEA in Wassertiefen von 27 m – 33 m gezeigt und die Einsatzmöglichkeiten dieser Schallschutztechnologie erfolgreich demonstriert werden. In dem Vorhaben wurden unterschiedliche Materialien und Verlegemethoden für den Großen Blasenschleier getestet. Die Materialien des Schallminderungssystems wurden Belastungstests unterzogen und die wetterbedingten Einsatzgrenzen ermittelt. Die Materialien und die Verlegemethoden haben sich für die speziellen Rahmenbedingungen des Vorhabens Borkum West II als geeignet herausgestellt. Durch die vorgenommenen Modifikationen konnten die mit dem Einsatz der Blasenschleier-technologie verbundenen technischen Risiken verringert und die Wirtschaftlichkeit der Schallminderungsmaßnahme verbessert werden.

Die Verwendung von Düsenschlauchsystemen, die auf großen Winden aufgetrommelt werden können, hat sich für die Auslegung des Großen Blasenschleiers aus technischer Sicht bewährt. Die Auslegung des Blasenschleier-Ringes im pre-laying-Verfahren, d.h. die Auslegung des Düsenschlauch-Ringes, bevor das Errichterschiff die zu rammende Fundamentposition anfährt, sowie das nachträgliche Anschließen und der Betrieb des Großen Blasenschleiers nach erfolgter Positionierung des Errichterschiffes erwiesen sich in diesem Projekt als erfolgreiche Vorgehensweise.

Der wissenschaftlich-technische Erkenntnisgewinn kann für den umweltverträglichen Ausbau der Offshore-Windenergie genutzt werden. Die praktische Vorgehensweise von dem hier entwickelten Verfahren kann auf Projekte mit anderen Rahmenbedingungen übertragen werden, muss aber im Einzelfall überprüft und die Methodik an die jeweiligen Errichterprozesse einzelner Vorhaben angepasst werden.

Erzielte Schallminderung:

In dem Vorhaben wurden mehrere Systemanordnungen (halboffener linearer Blasenschleier mit zwei verschiedenen Düsenschlauchkonfigurationen (Lin. BBC 1, Lin. BBC 2), ringförmiger geschlossener Blasenschleier mit zwei verschiedenen Düsenschlauchkonfigurationen (BBC 1, BBC 2) und linearer halboffener doppelter Blasenschleier mit zwei unterschiedlichen Abständen zueinander (DBBC 2a/b)) entwickelt und erprobt. Für die Systemkonfiguration BBC 2 des Großen Blasenschleiers, welche hier die beste Kombination aus erzielter Schallminderung und Praktikabilität darstellte, betrug die erzielte Schallminderung beim Einzelereignispegel SEL_{50} bei einer maximalen Druckluftzufuhr von $0,32 \text{ m}^3$ pro Minute und Schlauchmeter [$\text{m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$] im Mittel 11 dB_{SEL} ($9 \text{ dB} - 13 \text{ dB}_{SEL}$) sowie 14 dB_{LPeak} ($10 \text{ dB} - 17 \text{ dB}_{LPeak}$) bezogen auf den maximalen Spitzenpegel.

Es konnte nachgewiesen werden, dass sowohl die Düsenschlauchkonfiguration (Lochgröße und Lochabstand) als auch die verwendete Luftmenge einen entscheidenden Einfluss auf die erzielte schallmindernde Wirkung des Großen Blasenschleiers haben: Kleinere Lochgrößen (1,5 mm) bei kürzeren Abständen (0,3 m) hatten eine um 3 dB stärker schallmindernde Wirkung als größere Löcher (3,5 mm) in weiteren Abständen voneinander (1,5 m). Die Schallreduktion war bei der maximalen zugeführten Luftmenge von $0,32 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$ um 4 dB_{SEL} besser als bei $0,07 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$. Es wird erwartet, dass mit genauer Übertragung der hier getesteten Konfiguration auch unter anderen Bedingungen vergleichbare Schallminderungen erzielt werden können.

Bezug zum dualen Schallschutzgrenzwert des UBA:

Unter Verwendung des BBC 2 bei maximaler Druckluftzufuhr von $0,32 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$ lag der beurteilungsrelevante 5% Perzentilpegel des Einzelereignispegels (SEL_5) bei 73% aller Rammungen unterhalb des für eine Entfernung von 750 m geforderten Schallschutzgrenzwertes für den Einzelereignispegel von 160 dB_{SEL} , in 27% der Fälle zwischen 160 dB_{SEL} und 163 dB_{SEL} , niemals aber über 163 dB_{SEL} . Sowohl bei der Verwendung der Düsenschlauchkonfiguration BBC 1 als auch bei BBC 2 unterschritt der Spitzenpegel (L_{Peak}) bei maximaler Druckluftzufuhr immer die geforderten 190 dB_{LPeak} . Mit dem BBC 2 unterschritt der Spitzenpegel sogar in neun von zwölf Fällen den Wert 184 dB_{LPeak} .

Sonstige hydroakustische Erkenntnisse:

Versuche mit einem linearen doppelten Großen Blasenschleier (DBBC 2a und 2b) erzielten mittlere Schallminderungen beim Einzelereignispegel (SEL_{50}) von $14 \text{ dB} - 18 \text{ dB}_{SEL}$ und beim Spitzenpegel $18 \text{ dB} - 22 \text{ dB}_{LPeak}$, abhängig von der Wassertiefe und dem Abstand zwischen den beiden am Boden ausgelegten Düsenschlauchringen (zwei getrennte Blasenschleier bzw. beide Blasenschleier vereinen sich in der Wassersäule).

Messungen in Entfernungen zwischen wenigen hundert Metern bis hin zu 28 km Abstand zu Rammbaustellen ergaben, dass die derzeit verfügbaren und z.T. halbempirischen Modelle für die Ausbreitungsdämpfung von Schall im Wasser (Thiele-Formel, geometrische Ausbreitungsdämpfung) den Hydroschall ab Entfernungen von mehreren Kilometern um 10 dB und mehr unterschätzen und somit die berechneten Hydroschallimmissionen in großem Abstand zum Rammort überschätzen. Ein modifiziertes empirisches Ausbreitungsmodell basierend auf weiteren Messdaten wies hingegen deutlich geringere Abweichungen zwischen den prognostizierten und gemessenen Daten auf. Es zeigten sich jedoch z.T. erhebliche Unterschiede zwischen den Messdaten und den prognostizierten Daten bei der Schallausbreitung mit und ohne den Einsatz eines Großen Blasenschleiers.

Störwirkung auf Schweinswale:

Im Rahmen des Forschungsprojektes konnten Daten aus einem sehr umfangreichen Messstellennetz von 26 C-POD-Positionen und bis zu vier Schallmesspositionen genutzt werden, so dass eine weltweit einzigartige Datengrundlage zur Ermittlung von Reaktionen von Schweinswalen auf Unterwasserschall zur Verfügung stand.

Die Nachweisgrenze für eine Störwirkung des impulsartigen Rammschalls lag in dieser Studie bei 144 dB_{SEL} (Einzelereignispegel SEL₅₀). Anhand der festgestellten Schallausbreitungsfunktion konnte die Entfernung zur Schallquelle, in der dieser Pegel unterschritten wird, bestimmt werden. Demnach lag der Wert für die Nachweisgrenze einer Störung bei ungedämmten Rammungen bei einer Entfernung von ca. 15 km zur Schallquelle. Bei Rammungen unter Einsatz des Blasenschleiers der Konfiguration BBC 2 reichte die Störwirkung bis ca. 4,8 km und unter Einsatz des Blasenschleiers der Konfiguration BBC 1 bis ca. 6,7 km von der Schallquelle.

Durch die mit Hilfe des Großen Blasenschleiers (BBC 2) erzielte Schallminderung wird die Größe des Gebietes, in dem eine Störung von Schweinswalen verursacht wird, um 90% reduziert. Bei hypothetischer Gleichverteilung der Schweinswale im betrachteten Meeresgebiet sollte bei Einsatz des Großen Blasenschleiers im Vergleich zu Rammungen, die ohne wirksamen Schallschutz durchgeführt wurden, die Anzahl der gestörten Tiere ebenfalls um 90% verringert sein.

Der Störungseffekt wuchs bei zunehmender Lautstärke linear an (größere Lautstärke entspricht hierbei geringerer Distanz unter ähnlichen Schallschutz-Rahmenbedingungen). Bei Werten von >160 dB_{SEL} konnte die stärkste Reduzierung der Detektionsraten festgestellt werden, was mit einer annähernd vollständigen Vertreibung von Schweinswalen interpretiert wird.

Die Dauer eines signifikanten Vertreibungseffekts korrelierte nicht mit der Lautstärke. Auch am Rande der Nachweisgrenze eines Störeffektes dauerte es noch bis zu 12 Stunden, bevor sich die Detektionsrate nicht mehr von der Rate vor Beginn der Rammarbeiten unterschied. Ein signifikanter Vertreibungseffekt hielt im Median 9 bis 12 Stunden nach dem Ende der Rammung an. Die Detektionsrate war in den ersten vier Stunden nach Ende der Rammung am geringsten und stieg mit fortschreitender Zeit graduell an.

Der direkte Vergleich der Reaktion von Schweinswalen auf Rammschall gleicher Lautstärke zeigte keinen Unterschied bei gedämmten und ungedämmten Rammungen. Der Nachweis, dass die frequenzspezifische Veränderung des Schallimpulses durch den Blasenschleier zu einer Änderung der Störreichweite von Schweinswalen führt, konnte somit nicht erbracht werden. Allerdings lagen insbesondere für Rammungen mit Blasenschleier nur wenige Messdaten bei hohen Lautstärken (>150 dB_{SEL}) vor, weshalb diese Aussage nicht generalisiert werden kann.

Die Ziele des Vorhabens konnten in vollem Umfang erreicht werden: Bei der Errichtung des Offshore-Windparks Borkum West II wurde erstmalig ein Schallminderungssystem in den Errichterprozess für die Fundamente integriert. Mit der erzielten Schallminderung wurde zugleich eine deutliche Minderung der räumlichen und zeitlichen Störwirkung auf Schweinswale erreicht. Damit wurde gezeigt, dass mit der Minderung der Schallimmissionen bei Offshore-Rammarbeiten auch ein positiver Effekt für eine im öffentlichen Interesse stehende Art erzielt werden kann.

Ausblick:

Die Erfahrungen aus dem Projekt HYDROSCHALL-OFF BW II bilden eine gute Grundlage für die zukünftige Anwendung von Schallminderungsmaßnahmen beim Ausbau der Offshore-Windenergie in Deutschland. Zugleich zeigt sich aber aus anderen derzeit laufenden Vorhaben, dass die Ergebnisse des Vorhabens nur bedingt auf andere Standorte übertragbar sind und es nicht in jedem Fall gelingt, die bei Borkum West II erzielte Schallminderungswirkung unter veränderten Rahmenbedingungen zu reproduzieren. Neben einer technischen Weiterentwicklung von Blasenschleiern erscheint es in diesem Zusammenhang bedeutsam, die Wirkungsweise verschiedener Konfigurationen des Blasenschleiers unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen weiter zu untersuchen und die wesentlichen Einflussfaktoren zu beschreiben, welche die schallmindernde Wirkung bestimmen. Gleichzeitig wird aus der laufenden Diskussion über die Bewertung von Störungen durch Rammschall und die Frage, ob weitere Regelungen zur Steuerung von Rammarbeiten notwendig sind, deutlich,

dass ein großes öffentliches Interesse besteht, die Reaktion von Schweinswalen auf Unterwasserlärm räumlich und zeitlich detailliert beschreiben und bewerten zu können. Hierzu hat das Vorhaben neue Ergebnisse erbracht. Vor dem Hintergrund heterogener Datensätze von gedämmten und ungedämmten Rammungen bleiben jedoch andere Fragen offen, die Gegenstand weiterer Untersuchungen werden sollten.

SUMMARY

Within the framework of the project HYDROSCHALL-OFF BW II a new noise mitigation system appropriate for series production was developed and tested during pile driving for the offshore wind farm Borkum West II, currently being constructed by company TRIANEL WINDKRAFTWERK BORKUM GmbH & Co. KG. The wind farm, positioned 45 km north of Borkum Island, consists of 40 wind turbines (WEA) and a transformer station. During foundation work for the WEA (tripod constructions) 120 piles with a diameter of 2.5 m were driven into the sediment by a hydraulic hammer.

In order to reduce noise emission during pile driving a Big Bubble Curtain (BBC) was developed. This system could be laid out well before pile driving started and was tested and operated during construction process of the wind farm Borkum West II.

Noise mitigation regarding the sound exposure level (SEL_{50}) ranged from 9 dB to 13 dB for the most suitable bubble curtain configuration BBC 2 (hose with small nozzles at short distances to each other) under full air supply. This proved to be very efficient since it reduced the noise-polluted area by 90 %. Acoustic monitoring of harbour porpoises approved a strongly reduced disturbance of animals by pile driving. Due to these findings the project is the worldwide first where a noise mitigation system was successfully operated under offshore conditions on a large scale, and in which its positive effect on an affected marine mammal species was demonstrated. The Big Bubble Curtain was proven to be suitable in principle as a noise mitigation system for pile driving.

Aim of the project was the development of a ready-for-production system for mitigation of noise emissions by pile driving during the construction of offshore wind farms. The Big Bubble Curtain, which was developed for operation in the wind farm Borkum West II, was successfully integrated into the construction process without causing delays at 31 (out of 40) foundations. In five cases technical problems (e.g., breaking of air-supply hoses, torn marker buoys), and in four cases time limitations prevented the operation of the Big Bubble Curtain.

Suitability of the Big Bubble Curtain under offshore conditions:

Within the scope of the project the basic offshore suitability of the Big Bubble Curtain during the construction process of a wind farm in water depths of 27 – 33 m, as well as the capability of this technology was demonstrated successfully.

Big Bubble Curtains were tested with different configurations, materials and deployment methods for the project. Endurance of materials and weather restrictions were evaluated. Materials and operational methods were suitable under the special conditions of Borkum West II. By means of modifications technical risks during operation of the noise mitigation system were reduced and economic efficiency was improved.

The operation of the Big Bubble Curtain jet nozzle hoses wound onto big winches was technically successful. The pre-laying principle, i.e. circular deployment of the nozzle hose around the planned position of the turbine foundation before arrival of the jack-up vessel, then connecting and operating the hose after positioning of the jack-up vessel, proved to be successful here.

Sustainable development of offshore wind energy will substantially benefit from the scientific and technical knowledge gained during this project. The applicability of the systems operational methods to projects under different general conditions is considered to be basically given; however, applicability has to be evaluated on a case-by-case basis with the methods to be adjusted to each specific wind farm project.

Noise mitigation power of the Big Bubble Curtain:

In the context of the project several Big Bubble Curtain configurations (half-open linear bubble curtain (Lin. BBC 1, Lin. BBC 2), circular bubble curtain with two nozzle configurations (BBC 1, BBC 2), and half-open double linear bubble curtain (BBC)) were developed and tested.

Under configuration BBC 2, which represented the best combination of noise mitigation and practicability, and maximum air flow of $0.32 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$, average sound reduction amounted to

11 dB_{SEL} (9 dB – 13 dB_{SEL}) at sound exposure level (SEL₅₀), and 14 dB_{LPeak} (10 dB – 17 dB_{LPeak}) at Peak level.

It was shown that both nozzle hose configuration (nozzle size and distance) and quantity of compressed air determine the power of noise mitigation of a Big Bubble Curtain: Small nozzles (1.5 mm) at short distance to each other (0.3 m) reduced noise by 3 dB more than bigger nozzles (3.5 mm) at longer distance (1.5 m). With a maximum air flow of 0.32 m³/(min*m) noise mitigation was improved by 4 dB_{SEL} (sound exposure level SEL₅₀) when compared to 0.15 m³/(min*m). It is to be expected that the exact application of a certain configuration will result in similar noise mitigation even under different conditions.

Compliance with noise protection norms:

When operating configuration BBC 2 with full air supply the 5% percentile of the sound exposure level (SEL₅) undershot noise protection norms of 160 dB_{SEL} in 750 m distance with 73% of the WEA foundations; the remaining 27% fell between 160 dB_{SEL} and 163 dB_{SEL} and never exceeded 163 dB_{SEL} (sound exposure level SEL₅). Both with BBC 1 and BBC 2 and full air supply the Peak level always undercut the required 190 dB_{LPeak}. In nine cases out of twelve the Peak level even undercut 184 dB_{LPeak} under BBC 2.

Additional hydro-acoustic results:

Evaluation of the half-open double linear bubble curtain (DBBC 2a and 2b) yielded a reduction of noise immissions of 14 dB – 18 dB_{SEL} (sound exposure level SEL₅₀), and 18 dB – 22 dB_{LPeak}, respectively. Mitigation power depended on water depth and distance between the two bubble curtains (bubble curtains entirely separated or joining in the water column).

Measurements in various distances from pile driving (between several hundred metres and 30 kilometres) gave evidence that current models (partly half-empiric) on propagation loss of sound in water (Thiele formula, geometric propagation loss) overestimate sound levels by 10 dB and more as from a distance of several kilometres from a sound source, i.e. further apart from pile driving sound levels became more than 10 dB lower than predicted. A modified empirical model of propagation loss, based on additional data, showed much more congruence between predicted and measured values. However, considerable differences occurred between predicted values and those measured with and without a Big Bubble Curtain.

Response of harbour porpoises:

Within the project, extensive data from 26 C-POD positions and up to four hydro-acoustic points of measurement were available, adding up to a worldwide exceptional data pool for uncovering the response of harbour porpoises to underwater noise.

The limit of a disturbance effect of pile-driving noise emissions on harbour porpoises was at 144 dB_{SEL} (sound exposure level SEL₅₀). On basis of the sound propagation function established during this project a distance to the sound source could be calculated. Thus, a distance of disturbance up to 15 km was calculated from the pile driving location during uninsulated pile drivings. During the use of configuration BBC 2 and full air supply the distance of disturbance was reduced to 4.8 km, and to 6.7 km during the use of configuration BBC 1 and full air supply.

Hence, the application of the Big Bubble Curtain (BBC 2) reduced the potential area of disturbance for harbour porpoises by 90 %. Under the assumption of an equal distribution of harbour porpoises in the study area the number of disturbed animals should similarly be reduced by 90 % when operating a Big Bubble Curtain (compared to pile driving without noise reduction).

A strong linear correlation of an increasing disturbance effect with increasing sound level (corresponding to shorter distances under similar conditions regarding noise mitigation) was found. Lowest porpoise detection rates were recorded with >160 dB_{SEL} (sound exposure level SEL₅₀), which is assumed to correspond to an almost total expulsion of these animals.

The duration of a significant expulsion effect did not correlate with sound level. Even at sound levels close to the detection limit of an effect it took up to 12 hours until detection rates became similar to those before pile driving.

On average (median) a significant expulsion effect was detectable until 9 to 12 hours after pile driving activity. Detection rates were lowest until four hours after pile driving and increased gradually afterwards.

No difference was found in harbour porpoise detection rates when equally sound levels were compared directly for pile driving with noise mitigation system (BBC 2) and without mitigation. Hence, no effect in different disturbance distances of harbor porpoises resulting from a change in frequencies by the Big Bubble Curtains was observed. However, since only few data were available for pile driving with noise mitigation for highest sound levels ($>150 \text{ dB}_{\text{SEL}}$; sound exposure level SEL_{50}) the latter result should not be generalised for now.

The targets of the project were fully met: during construction of the offshore wind farm Borkum West II a noise mitigation system was integrated into the construction process for the first time. Noise mitigation resulted in a strong reduction of spatial and temporal disturbance effects on harbour porpoises. This demonstrated that a positive effect for a species of public interest can be achieved by mitigation of noise immissions resulting from offshore pile driving.

Outlook:

Experiences from the project HYDROSCHALL-OFF BW II form a sound basis regarding future application of noise mitigation systems as part of offshore wind development in Germany. However, findings of other projects gave evidence that the results of this project may only partly be applicable to other locations; under different conditions it was not always possible to reproduce noise mitigation rates yielded during this project. Besides further technical development of bubble curtains it is important to investigate their mode of action under different conditions, as well as to describe parameters relevant for BBC noise mitigation power. Ongoing discussions regarding the assessment of pile-driving noise clearly show that at the same time there is great public interest in description and evaluation of harbour porpoises response to noise pollution. The project provided new insights in this respect. However, against a backdrop of heterogeneous datasets for pile driving with and without noise mitigation other questions remain open, which should be addressed in future projects.

A PROJEKTVORSTELLUNG

A.1 Einleitung

Unterwasser-Rammarbeiten zur Installation der Stahlfundamente von Offshore-Windenergieanlagen bewirken hohe Schallemissionen, die zu Störungen und im Nahbereich zu Schädigungen von Meeressäugtieren führen können.

Vor dem Hintergrund der zu erwartenden Entwicklung einer Steigerung der Offshore-Windenergienutzung in der Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) der Deutschen Nord- und Ostsee (Situation Nordsee vgl. Abb. 1-1, S. 26) sowie angesichts des Umstandes, dass der größte Teil der Turbinen auf Stahlfundamenten errichtet werden soll, wird dem Thema Schallschutz in Deutschland eine sehr hohe Bedeutung beigemessen und die Entwicklung von Schallminderungsmaßnahmen vorangetrieben.

Zum Schutz der Meeresumwelt wurde vom Umweltbundesamt (UBA) ein Schallimmissionsvorsorgewert für Offshore-Bedingungen erarbeitet, nach dem der Einzelereignis-Schalldruckpegel (SEL) in 750 m Entfernung von der Schallquelle einen Wert von 160 dB nicht überschreiten darf (UBA 2005). Auf Basis neuerer wissenschaftlicher Erkenntnisse zur Reaktion von Schweinswalen auf impulshaltigen Schall wurde dieser Vorsorgewert später um ein zweites Kriterium ergänzt. Demnach darf auch der Spitzenschalldruckpegel (L_{peak}) in 750 m von der Schallquelle einen Schalldruckpegel von 190 dB nicht überschreiten. Das duale Schallschutzkriterium wurde im Juli 2010 zum Schutz von marinen Säugern vom BSH im Rahmen der Genehmigungspraxis für Offshore-Windparks als Grenzwert für impulshaltigen Unterwasserschall (= Rammschall) etabliert. Hierbei wurde der Schweinswal (*Phocoena phocoena* LINNAEUS, 1758) als Leitart betrachtet.

Die Stärke der Schallemissionen bei Offshore-Rammarbeiten wird wesentlich durch die eingesetzte Rammenergie und die abstrahlende Fläche des Rammguts bestimmt und kann durch eine einfache Beziehung zum Pfahldurchmesser bereits gut beschrieben werden (Nehls & Betke 2011, siehe auch Illingworth & Rodkin 2007). Für die derzeit in Deutschland fast ausschließlich eingesetzten Stahlfundamente für Offshore-Windenergieanlagen und Konverterstationen werden Pfähle mit Durchmessern zwischen zwei und sechs Metern eingesetzt. Die Schallimmissionen durch Rammarbeiten liegen dabei in allen Fällen über dem Schallschutzgrenzwert von 160 dB in 750 m Entfernung. Für sämtliche Vorhaben wären daher Schallminderungsmaßnahmen vorzunehmen.

Die Übertragung von Rammschall in das Wasser lässt sich vermindern, indem ein Medium mit geringer Dichte (Luft) zwischen Rammgut und Wasser eingebracht wird. Da es in vielen Fällen technisch sehr aufwändig wäre, eine Rammstelle einzukammern und zu entwässern (Kofferdamm), wurden Versuche unternommen, Luft in das die Rammstelle umgebende Wasser einzuleiten und den Schall durch einen Blasenvorhang oder Blasenschleier zu dämpfen. Bei einer ersten Anwendung bei Hafendarbeiten konnte eine Schalldämpfung um 3-5 dB erzielt werden mit der besten Wirkung im Frequenzbereich von 400 bis 6400 Hz (Würsig et al. 2000). Schallschutzsysteme für Rammarbeiten sind seitdem weiterentwickelt worden und vor allem bei Hafen- und Brückenarbeiten in geringen Wassertiefen eingesetzt worden (Illingworth & Rodkin 2007, Nehls et al. 2007, Nehls et al. 2009). Die schallmindernde Wirkung der eingesetzten Systeme liegt meist im einstelligen dB-Bereich, kann aber auch höhere Werte erreichen (z.B. Spence & Dreyer 2012). Auf der Grundlage von Modellierungen kommen Stokes et al. (2010) zu der Erwartung, dass mit Blasenschleiern eine Schallminderung um 10 dB erreicht werden kann. Für große entwässerte Kofferdämme wird ein Schallreduktionspotenzial von bis zu 20 dB angegeben (Koschinski & Lüdemann 2011). Eine Schallminderung über 20 dB hinaus wird aufgrund der Schallübertragung über den Boden als schwer erreichbar eingestuft. Die grundlegenden Faktoren, welche die schallmindernde Wirkung von Blasenschleiern und anderen System bestimmen, sind bisher nicht ausreichend bekannt.

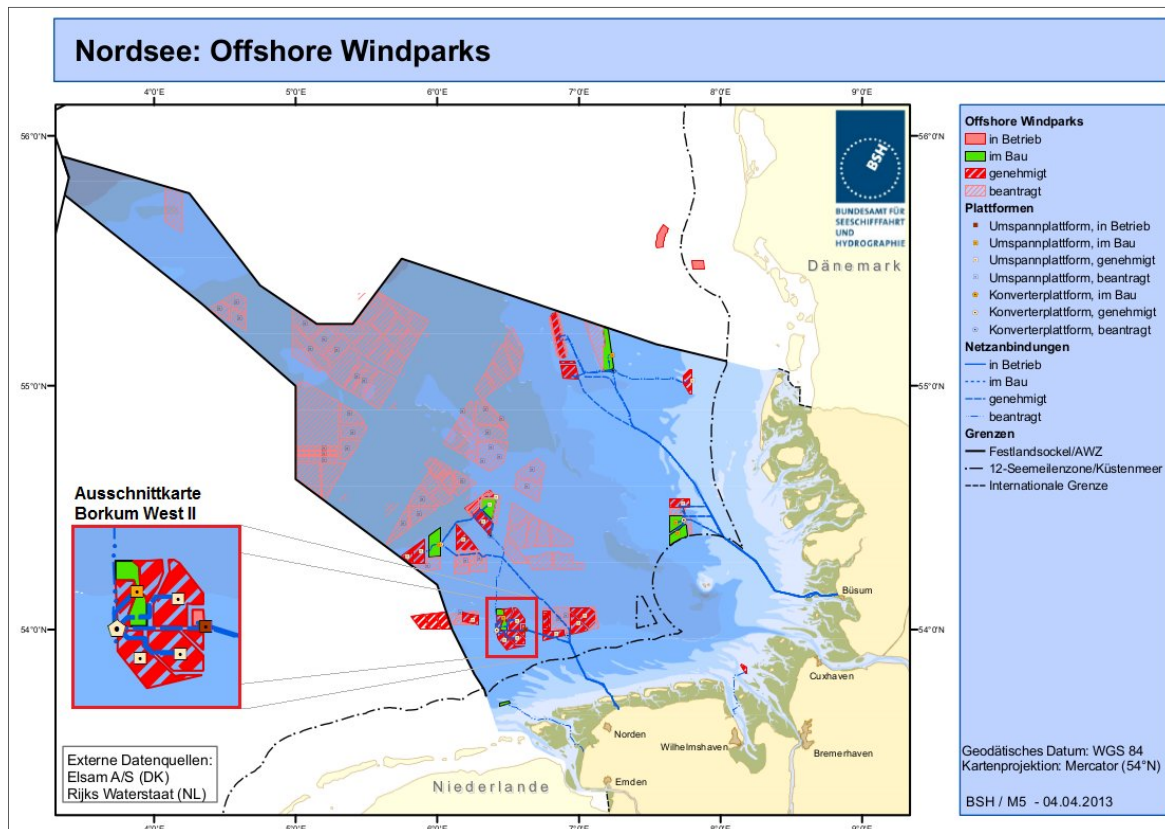


Abb. 1-1: Offshore Windparks in der Nordsee. Das Gebiet Borkum West II liegt in der Teilfläche II des am 19.12.2005 gemäß § 3a Abs. 1 der SeeAnIV festgelegten besonderen Eignungsgebietes für Windenergieanlagen „Nördlich Borkum“. Quelle BSH, verändert (www.bsh.de/de/Meeresnutzung/Wirtschaft/CONTIS-Informationssystem/index.jsp).

Bei Offshore-Rammarbeiten werden an Schallminderungsmaßnahmen hohe technische und logistische Anforderungen gestellt, bei denen u.a. große Wassertiefen und Strömungen zu beachten sind und zugleich eine Einpassung des Systems in den Bauablauf auf See gewährleistet sein muss. Blasenschleier-Systeme stellen aufgrund des recht einfachen Prinzips als Schallminderungsmaßnahme bei Offshore-Rammarbeiten eine grundsätzlich geeignete Maßnahme dar. Erste Tests im Großversuch bei den Offshore-Rammarbeiten für die Forschungsplattform FINO 3 (Grießmann et al. 2010) und den Windpark alpha ventus (Rustemeier & Rolfes 2012) verliefen in Ansätzen erfolgreich. Bei FINO 3 wurde ein Großer Blasenschleier eingesetzt, der eine Reduzierung des Hydroschalls im Bereich von 12 dB für den Einzelereignispegel und 14 dB für den Spitzenpegel in mehreren hundert Metern Entfernung (Fernfeld) bewirkte (Grießmann et al. 2010). Beim Offshore-Testfeld alpha ventus kam ein "Kleiner Blasenschleier" zum Einsatz, der im unteren Bereich eines Tripod-Fundaments erzeugt wurde. Bei anliegender Tidenströmung wurde in Strömungsrichtung eine Dämpfungswirkung von 10 dB bis 13 dB (SEL_{50}) bzw. 12 dB bis 14 dB (L_{Peak}) gemessen. Entgegen der Strömungsrichtung wurde allerdings mit 2 dB bis 4 dB (SEL_{50}) bzw. 0 dB bis 5 dB (L_{Peak}) eine deutlich geringere Schallminderung festgestellt, da in diese Richtung durch die Verdriftung der aufsteigenden Luftblasen keine (vollständige) Einhüllung des Rammpfahls gegeben war (Grießmann et al. 2010).

In dem Forschungsvorhaben HYDROSCHALL-OFF BW II, dessen Ergebnisse in dem hier vorgelegten Bericht beschrieben werden, wurde ein Blasenschleier für die Errichtung des Offshore-Windparks Borkum West II entwickelt und erprobt, die schallmindernde Wirkung gemessen sowie untersucht, ob die erreichte Schallminderung auch zu einer Reduktion der Störung von Schweinswalen führt. Der Blasenschleier wurde als Methode der Schallminderung ausgewählt, da dieser unabhängig von der Art und der Größe der Fundamentstruktur verwendet werden kann. Eine weitere wesentliche Anforderung an Schallminderungsmaßnahmen ist es, durch die Installation und Deinstallation des

technischen Schallschutzsystems die Bauabläufe nicht zu behindern und möglichst keine zeitlichen Verzögerungen zu verursachen. Da die Offshore-Montage von OWEA-Fundamenten auf günstige "Wetterfenster" angewiesen ist, erhöht jede zeitliche Verzögerung das Risiko, die Arbeiten nicht wie geplant ausführen zu können.

A.2 Das Projektgebiet Borkum West II

A.2.1 Lage des Gebietes „Borkum West II“

Das Gebiet Borkum West II bildet in etwa das nordwestliche Viertel der Teilfläche II des am 19.12.2005 gemäß § 3a Abs. 1 der SeeAnIV festgelegten besonderen Eignungsgebietes für Windenergieanlagen „Nördlich Borkum“ (vgl. Abb. 1-3, S. 28). Dort wurde der Bau von 80 Windenergieanlagen (WEA) genehmigt. Die Größe des Vorhabensgebietes beträgt bei den genehmigten 80 WEA ca. 55,6 km². Das Gebiet der ersten Bauphase, bei der 40 WEA und die Umspannplattform errichtet werden, umfasst eine Fläche von 23,28 km².

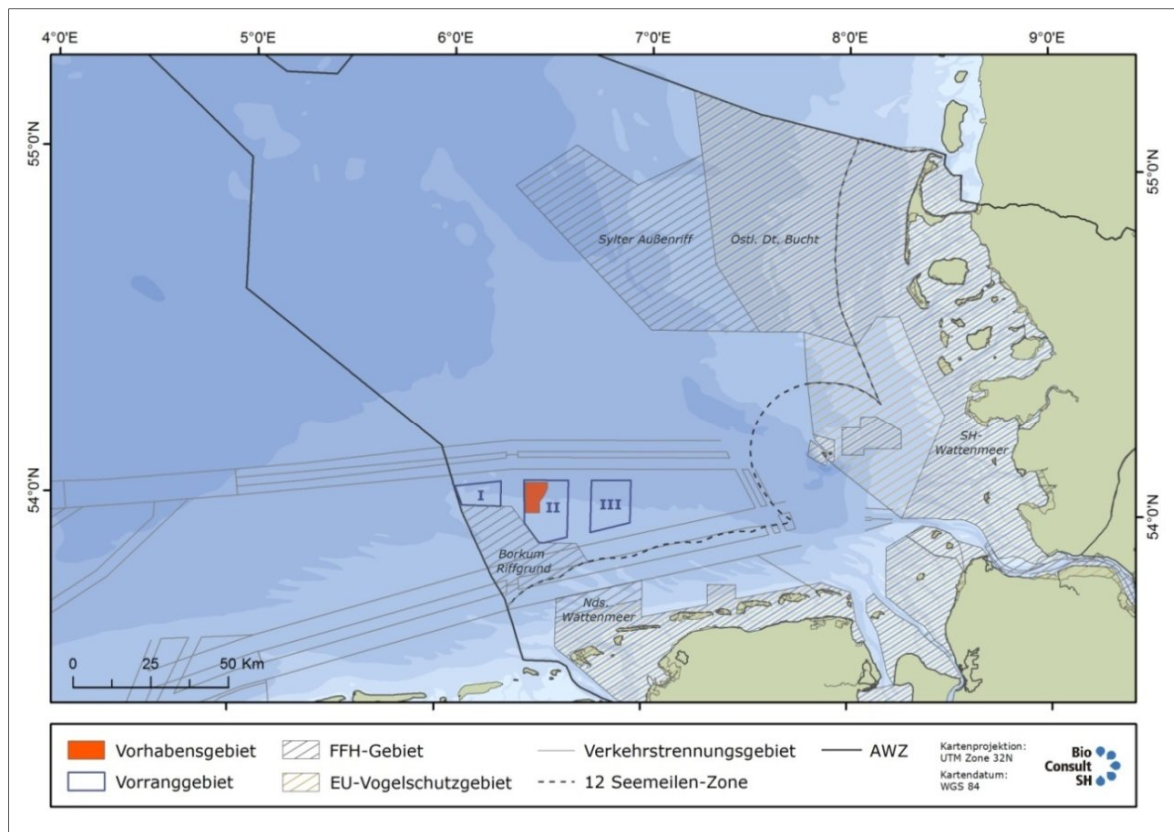


Abb. 1-2: Lage des OWP Borkum West II in der Teilfläche II des am 19.12.2005 gemäß § 3a Abs. 1 der SeeAnIV festgelegten besonderen Eignungsgebietes für Windenergieanlagen „Nördlich Borkum“.

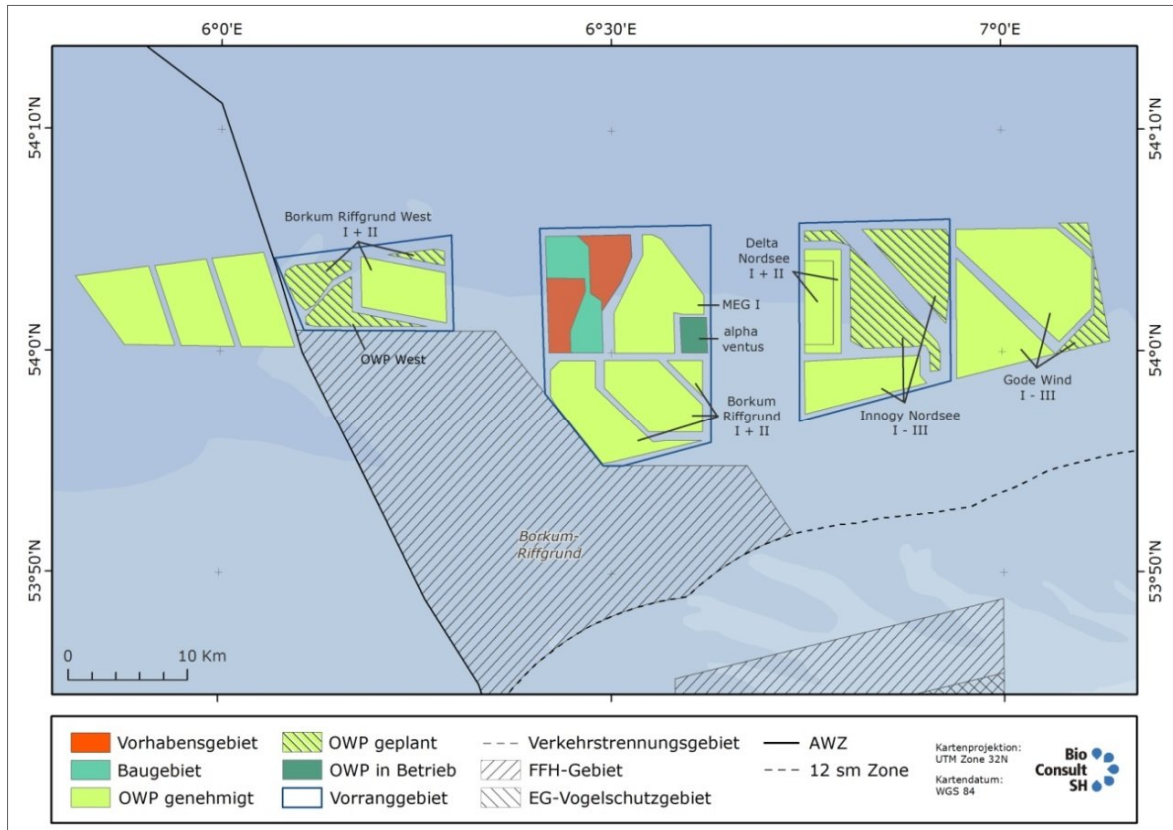


Abb. 1-3: Lage des OWP Borkum West II zu den benachbarten OWPs.

Das Gebiet Borkum West II liegt ca. 45 km nördlich vor Borkum in der Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) der Bundesrepublik Deutschland, zwischen den Verkehrstrennungsgebieten (VTG) German Bight Western Approach (GBWA) im Norden und Terschelling German Bight (TGB) im Süden (siehe Abb. 1-2, S. 27). Der jeweilige Abstand des Vorhabensgebietes beträgt zum VTG GBWA ca. 3,7 km (2 sm) sowie zum VTG TGB ca. 16,7 km (9 sm) von der südwestlichen Begrenzungslinie und ca. 14,8 km (8 sm) von der südöstlichen Begrenzungslinie. Im Westen des Vorhabensgebietes verläuft in Nord-Süd-Richtung in einer Entfernung von ca. 2,2 sm eine Schifffahrtsroute, die die o.g. Verkehrstrennungsgebiete verbindet, der sogenannte "Emskorridor", der zwischen den Vorranggebieten Teilfläche I und Teilfläche II verläuft. Die vorherrschende Windrichtung am Standort ist 210° bis 240° (Südwest). Die durchschnittliche Windgeschwindigkeit beträgt 10 m/s, entsprechend einer Windstärke von 5 Bft. Die Hauptwellenrichtung ist 330° (Nordwest).

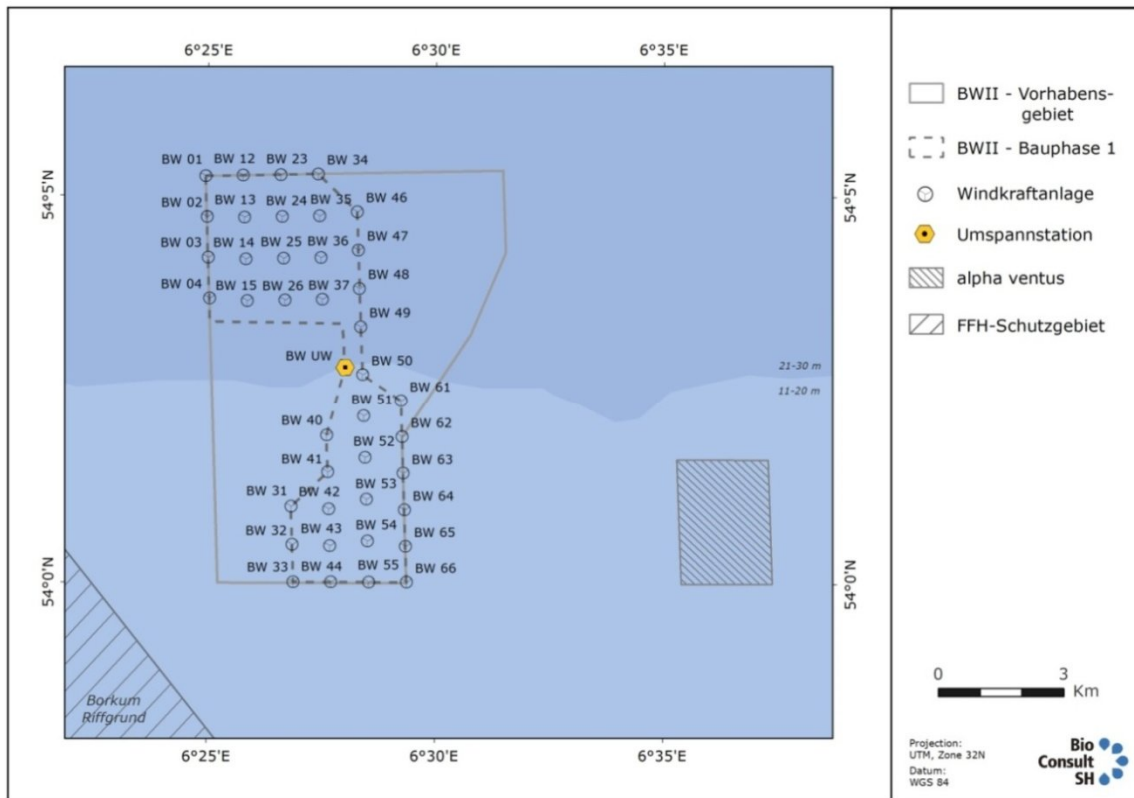


Abb. 1-4: Fläche der Bauphase I im Gebiet des OWP Borkum West II. Dargestellt ist auch die Lage der 40 Fundamente sowie der Umspannplattform.

Das Baugebiet Borkum West II liegt in Wassertiefen von ca. 27 m bis 33 m. Die Sedimentverteilung ist sehr homogen, bestehend aus relativ strukturarmen Fein- bis Mittelsanden, die gelegentlich Rippelfelder auf ihrer Oberfläche aufweisen. Die Mächtigkeit der Sandauflage bewegt sich im Bereich von ca. 1 m. Untersuchungen ergaben keine Hinweise auf die Anwesenheit von anstehendem Fels, Geschiebemergel, Steinen, Kiesen oder Grobsand am Meeresboden.

Das Vorhabensgebiet liegt fast 59 km südwestlich des FFH-Gebietes „Sylter Außenriff“ (DE 1209-301) und die einzelnen Fundamentstandorte der Bauphase 1 weisen Distanzen von ca. 3,8 km bis 10,6 km zum nordöstlich gelegenen FFH-Gebiet „Borkum Riffgrund“ (DE2104301) auf (siehe Abb. 1-2, S. 27). Beide FFH-Gebiete sind Gebiete von gemeinschaftlicher Bedeutung (GGB, engl.: Site of Community Importance – SCI), die in die Liste der Europäischen Kommission der Gebiete von gemeinschaftlicher Bedeutung für die atlantische biogeographische Region aufgenommen worden sind (Entscheidung 2008/23/EG, ABI. EG L 12 vom 15. Januar 2008, S. 1-117)

Wie man auch Abb. 1-3 (S. 28) entnehmen kann, sind die nächstgelegenen genehmigten Offshore-Windparks „MEG I“ (ca. 1 km Entfernung) und „Borkum Riffgrund“ (auch etwa 1 km Entfernung) sowie in etwa 6,5 km Distanz der OWP alpha ventus (alle in der Teilfläche II des Eignungsgebietes, siehe Abb. 1-2). In etwa 8,5 km Entfernung befindet sich der OWP Borkum Riffgrund West I (in der Teilfläche I des Eignungsgebietes), weiter entfernt liegen die OWP Delta Nordsee 1 (in der Teilfläche III des Eignungsgebietes) sowie Godewind I (östlich der Teilfläche III). Die letztgenannten OWPs befinden sich jedoch erst in der Planungsphase.

A.2.2 Technische Details des OWP Borkum West II

Der Windpark wurde am 13. Juni 2008 vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) genehmigt. Im OPW Borkum West II errichtet die Firma TRIANEL Windkraftwerk Borkum II, im Folgenden TRIANEL genannt, derzeit den Offshore Windpark Borkum West II mit 80

Windenergieanlagen (WEA) sowie einer Umspannstation. Diese 80 WEA haben eine Leistung von jeweils 5 MW (insgesamt 400 MW). Die Anlagen sollen einen Ertrag von etwa 1.760 Mio. kWh/Jahr erbringen. In der ersten Bauphase, die im September 2011 begann, werden 40 WEA und eine Umspannplattform errichtet (vgl. Abb. 1-4, S. 29). Diese 40 WEA sollten zunächst bis zum zweiten Quartal 2013 ans Netz gehen.

Bei den WEA handelt es sich um Anlagen des Typs „Areva Wind M5000-116“ mit einem Rotordurchmesser von maximal 116 m und einer Nabenhöhe von ca. 90 m (über NN). Im OWP Borkum West II werden die fertiggestellten WEA eine Gesamthöhe vom Meeresgrund von ca. 178 m haben, die Gesamthöhe ab der Wasserlinie beträgt etwa 148 m. Die Einschaltwindgeschwindigkeit dieses Anlagentyps beträgt 3,5 m/s (Windstärke 3), die Ausschaltwindgeschwindigkeit 25 m/s (Windstärke 10). Die Blattspitzengeschwindigkeit der Rotoren beträgt 90 m/s (324 km/h). Die Gondelmasse mit Rotor und Nabe hat ein Gewicht von 309 t, das Gesamtgewicht der WEA ohne Fundamentstruktur beträgt 345 t.

Im OWP Borkum West II werden die Windenergieanlagen auf Tripod-Fundamenten installiert. Tripods sind dreibeinige Strukturen, die im Projekt Borkum West II eine Höhe von etwa 50 Meter und ein Gewicht von etwa 700 Tonnen haben. Tripods weisen ein zentrales Gründungsrohr zur Aufnahme der Offshore-Windenergieanlagen auf, das mit einer dreibeinigen Gründungsstruktur aus Stahl verbunden ist. Dabei zweigen vom Zentralrohr drei Rohre schräg ab, die am Meeresboden untereinander bzw. mit dem Zentralrohr verstrebt werden. An jedem Ende des Dreibeins sind zur Aufnahme der in den Meeresboden gerammten Fundamentpfähle Hülsen angebracht. Zur Verankerung eines Tripods werden drei Pfähle mittels Impulsrammung im „pre-piling“-Verfahren teilweise über 30 Meter tief in den Meeresgrund gerammt. Bei dem „pre-piling“-Verfahren werden die (Gründungs-)Pfähle zuerst mithilfe von Schablonen (sogenannten Templates) im richtigen Abstand in den Meeresboden gerammt, später werden dann die Tripods auf diese Pfähle aufgesetzt (siehe Abb. 1-5). Die Pfähle beim OWP Borkum West II sind zwischen 31 m und 40 m lang und haben einen Durchmesser von 2,44 m. Die Wandstärke der Pfähle variierte je nach Standort zwischen 50 mm und 70 mm.

Die Rammarbeiten der insgesamt 120 Pfähle der ersten 40 WEA begannen am 03.09.2011 und wurden am 28.03.2012 abgeschlossen. Die Rammarbeiten wurden nicht kontinuierlich durchgeführt, sondern wiesen teilweise auch längere Unterbrechungen auf (vgl. Anhang Abb: 11, Anhang, S. 225). Nach Abschluss der Rammarbeiten wurden die Tripods auf die Pfähle gesetzt. Anfang April 2013 waren 34 Tripods gesetzt, die restlichen folgten bis Ende April. Nach Fertigstellung der ersten vierzig WEA soll die zweite Bauphase folgen, in der weitere 40 WEA konstruiert werden sollen.



Abb. 1-5: Ein Kranschiff platziert einen Tripod auf die zuvor gerammten Pfähle im OWP Borkum West II. Quelle: windpoweroffshore.com/2013/02/21/borkum_west_2_due_for_completion_by_autumn/#.UWQRmTdK7CA.

A.3 Zielsetzung des Projekts

In dem Projekt HYDROSCHALL-OFF BW II wurden vielfältige technische Aspekte zum Einsatz von sogenannten „Großen Blasenschleiern“ untersucht und unter Offshore-Bedingungen erprobt und weiterentwickelt. Parallel dazu wurde die Wirksamkeit des Blasenschleiers durch Schallmessungen sowie ein akustisches Monitoring zur Bestimmung der An- bzw. Abwesenheitsmuster von Schweinswalen durchgeführt. Durch die Positionierung von Messstationen in verschiedenen Entfernungen vom Baugebiet kann auf die räumliche Störwirkung geschlossen werden.

Ziel des Forschungsprojektes war es, ein großmaßstäbliches Verfahren zum serienmäßigen Einsatz von Blasenschleiern bei der Errichtung von Offshore-Windparks zu entwickeln und unter realen Bedingungen zu erproben. Als weitere Zielstellung wurde eine Ablaufprozedur für künftige Einsätze des Großen Blasenschleiers erarbeitet.

Das Vorhaben wurde bei den Rammarbeiten zur Verankerung der Gründungsstrukturen für den Offshore-Windpark Borkum West II umgesetzt.

Das Forschungsvorhaben verfolgte folgende Arbeitsziele:

- Einsatz und Erprobung des Großen Blasenschleiers als Schallminderungssystem inklusive der notwendigen Geräte unter realen Bedingungen im Errichterprozess ohne Verzögerungen im Bauablauf.
- Erarbeitung von Arbeitsstrategien zur zeit- und kosteneffizienten Auslegung und Einholung des Großen Blasenschleiers (engl. Big Bubble Curtain: BBC) unter realen Offshore-Bedingungen.
- Bestimmung der Wirksamkeit der Schallminderungsmaßnahme (Schallreduktion) von unterschiedlichen Schlauchkonfigurationen inkl. des Einflusses der zugeführten Luftmenge.
- Untersuchung der zeitlichen und räumlichen Reaktion von Schweinswalen auf Schallimmissionen zur Überprüfung der Wirkung von Schallminderungsmaßnahmen mittels automatischer Datenlogger (Klickdetektoren, sogenannte C-PODs).

A.4 Bezug zu förderpolitischen Zielen

Das Forschungsprojekt HYDROSCHALL-OFF BW II leistet einen Beitrag zu dem übergeordneten Ziel der Bundesregierung, den Anteil erneuerbarer Energien bis 2050 auf rund 50% des Primärenergiebedarfs zu steigern. Das 5. Energieforschungsprogramm, unter dem das Vorhaben beantragt wurde, führte die Weiterentwicklung der Windenergietechnik, besonders hinsichtlich ihrer technisch wirtschaftlichen Ertüchtigung für den Offshore-Einsatz, als einen wesentlichen Schwerpunkt auf.

Übergeordnete Ziele der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sind:

- Steigerung des Stromertrages aus Windenergie
- Senkung der Stromerzeugungskosten
- Erhöhung der Verfügbarkeit von Offshore-Windenergieanlagen und
- Gewährleistung eines umwelt- und naturverträglichen Ausbaus

Ein weiterer wichtiger Gegenstand der Forschungsförderung des BMU im Bereich der Offshore-Windenergie ist die ökologische Begleitforschung, insbesondere die Entwicklung und Erprobung von Maßnahmen zur Vermeidung und Verminderung von bau- und betriebsbedingten negativen Auswirkungen auf die Umwelt.

Das Vorhaben betrifft einen zentralen Bereich der Gewährleistung eines umwelt- und naturverträglichen Ausbaus der Windenergie. Die Auswirkungen von Unterwasserlärm durch Offshore-Rammarbeiten auf Meeressäugetiere werden als ein zentrales Problem beim geplanten Ausbau der Offshore-Windenergienutzung angesehen und das BSH schreibt daher den Einsatz schallmindernder Maßnahmen nach dem Stand der Technik vor. Ein Stand der Schallminderungs-

technik, der eine zuverlässige Einhaltung des gegebenen Schallschutzgrenzwerts ermöglicht, ist bislang nicht erreicht (Koschinski & Lüdemann 2011, BMU 2010, BSH 2010).

Im Rahmen der Baugenehmigung ist vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) ein Baumonitoring nach dem Untersuchungsstandard StUK 3 („Standarduntersuchung der Auswirkungen von Offshore-Windenergieanlagen auf die Meeresumwelt“, BSH 2007) sowie der Nebenbestimmung NB 14 der Genehmigung (BSH 2011) angeordnet worden. Die itap GmbH – Institut für technische und angewandte Physik GmbH – wurde von TRIANEL beauftragt, entsprechende Hydroschallmessungen innerhalb und außerhalb des Baugebiets durchzuführen. Die im Rahmen des begleitenden Baumonitorings erhobenen Hydroschallmessdaten wurden dem Forschungsvorhaben HYDROSCHALL-OFF zur Verfügung gestellt, um die statistische Aussagekraft der Analysen zu erhöhen.

A.5 Stand von Wissenschaft und Technik

Schallminderungsmaßnahmen bei Unterwasser-Rammarbeiten zielen in erster Linie darauf ab, die Ausbreitung der bei einer Rammung entstehenden Schallemissionen zu reduzieren, wogegen auf die Entstehung der Schallemissionen im allgemeinen kein Einfluss genommen wird. Die Ausbreitung von Unterwasserschall lässt sich dadurch verringern, dass zwischen Schallquelle und Umgebung ein Material mit hohem Dichteunterschied zum umgebenden Wasser eingebracht wird, wozu in erster Linie lufthaltige Hohlkörper oder lufthaltige Materialien wie Schaumstoff dienen können (Schultz von Glahn et al. 2006, Nehls et al. 2007). Eine andere Möglichkeit besteht darin, die Schallstreuung an resonanten Gasblasen im Wasser zur Schalldämmung zu nutzen (ISD et al. 2007, Nehls et al. 2007, Nehls et al. 2009, Grießmann et al. 2010, BOEM 2013).

Eine gute Wirksamkeit wird erreicht, wenn das Rammgut vollständig von Luftblasen eingehüllt wird. Dies geschieht, indem Druckluft in einen perforierten Schlauch gepumpt wird, der auf dem Meeresboden rund um die Offshore-Baustelle abgelegt ist. Durch die aufsteigenden Luftblasen wird ein "Blasenschleier" über die gesamte Wassersäule gebildet. Blasenschleier, bei denen Luft über einen Schlauch oder ein Rohr am Meeresboden in das Wasser gepumpt wird, stellen die gebräuchlichste Form von Schallminderungsmaßnahmen dar. Für alle Verfahren gilt, dass die Einsatzmöglichkeiten unter Offshore-Bedingungen besonders schwierig sind und ein ausgewähltes Verfahren sich in die Arbeitsabläufe auf See einfügen muss, um Verzögerungen im Bauablauf zu vermeiden. Letzteres ist nicht allein eine Vorgabe aus Kosten- und Planungsgründen, sondern dient auch dazu, den Zeitraum von Beeinträchtigungen von Meeressäugtieren so kurz wie möglich zu gestalten und Überlagerungen mit anderen Bauvorhaben (kumulative Wirkungen) zu reduzieren.

Die mit Blasenschleiern erzielte Schallminderung ist stark frequenzabhängig (vgl. Abb. 1-6, S. 33). Da die mit dem Blasenschleier erzielte Schallminderung bei unterschiedlichen Frequenzen unterschiedlich stark ausfällt, erfolgt die Darstellung frequenz aufgelöst in 1/3 Oktavbändern. Soll jedoch die Schallreduktion unabhängig von der Frequenz beurteilt werden, wird der gesamte Frequenzbereich als ein einzelnes Frequenzband (Breitband) betrachtet. Dies kann durch eine energetische Summation der einzelnen Frequenzbänder erfolgen (Einzahlwert), oder durch eine Mittelung des Zeitsignals (siehe hierzu auch Kapitel D.1.1, S. 67). Der so ermittelte Einzahlwert der Schallminderung bei Rammschall erreichte bei geschlossenen Blasenschleiern bisher Werte von 10 dB_{SEL} bis 12 dB_{SEL} im Einzelereignispegel und bis zu 14 dB_{LPeak} beim Spitzenpegel, bei linearen Systemen bei Sprengungen bis 18 dB_{LPeak}. Dies stellt eine erhebliche Minderung dar. Eine Reduzierung der Schallemissionen um 10 dB entspricht – bei der typischen Abnahme des Schalls mit der Entfernung in der Nordsee – einer Reduzierung der Wirkradien gleicher Schallstärke auf ein Viertel, bzw. einer Reduzierung der Fläche gleicher Schallstärke um mehr als 90 %.

Blasenschleier haben gegenüber anderen Schallminderungsmaßnahmen den Vorteil, dass sie auch eine sogenannte „aufgelöste“ Fundamentstruktur komplett umschließen, so dass alle Pfähle eines Fundaments mit einer Maßnahme erreicht werden können. Unter aufgelösten Fundamentstrukturen versteht man Strukturen, die bei minimalem Materialaufwand ein Maximum an Stabilität bieten (z.B. Tripod- oder Jacket-Fundamente). Diese aufgelösten Tragstrukturen können Vorbildern in der Natur

nachempfunden sein (Beispiel Radiolarien). Im Gegensatz zu nicht aufgelösten Fundamenten (z.B. Monopiles) sind aufgelöste Fundamentstrukturen i.d.R. großflächiger. Durch die Verwendung von aufgelösten Strukturen lässt sich der Materialaufwand und die benötigte Rammenergie reduzieren. Zusätzlich kann ein Blasenschleier auch im post-piling-Verfahren verwendet werden, da der Große Blasenschleier die gesamte Baustelle umhüllt. Beim post-piling wird zuerst die Fundamentstruktur (Jacket oder Tripod) auf dem Meeresboden abgesenkt. Im zweiten Schritt werden dann die Pfähle durch Hülsen an den Beinen der abgesenkten Fundamentstruktur in den Meeresboden gerammt oder einvibriert.

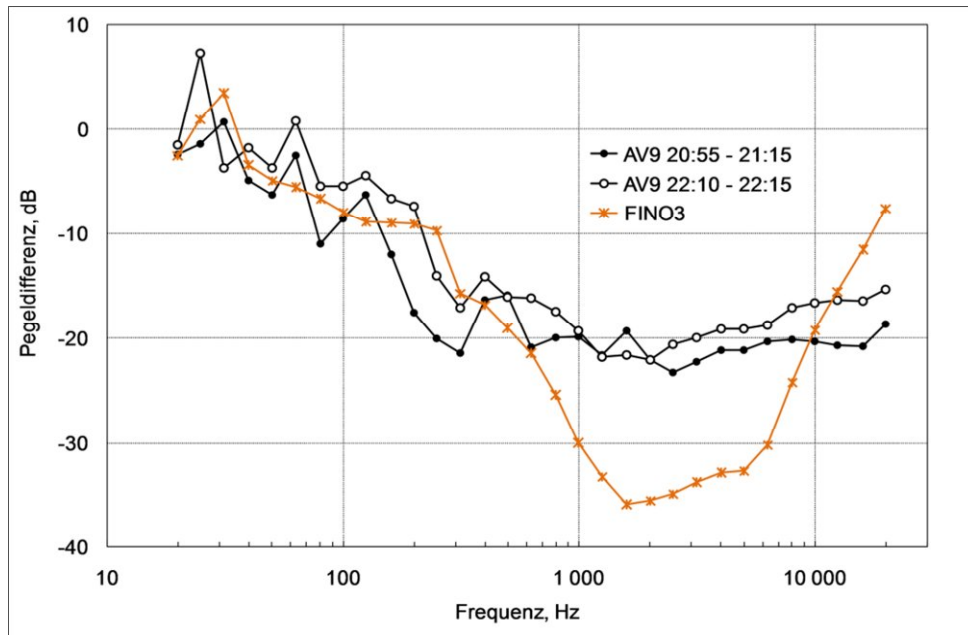


Abb. 1-6: Frequenzabhängige Schallminderung durch den Einsatz von Blasenschleiern bei Rammarbeiten für die Forschungsplattform FINO 3 und den Offshore-Windpark alpha ventus. Bei Rammgeräuschen, deren spektrales Maximum üblicherweise bei 80 bis 200 Hz liegt, ergibt sich daraus ein Einzahlwert der Schallminderung von rund 10 dB (Nehls & Betke 2011).

Über die Wirkung von Blasenschleiern und die Bedeutung der wesentlichen Variablen wie Luftmenge, Blasengröße und Verteilung der Blasen liegen nur wenige Erkenntnisse vor (s. Nehls et al. 2007, Griebmann et al. 2009, Stokes et al. 2010). Rein theoretisch ist die Schalldämmung in dB proportional zur Menge des lufthaltigen Wassers zwischen Sender und Empfänger, d.h. doppelt so viele Blasen entsprechen einer doppelt so hohen Schallminderung. Die Theorie gilt aber nur für eine große Zahl Blasen, die großen Abstand voneinander haben und über ein großes Volumen verteilt sind, entsprechend einem langen Schallweg durch blasenhaltiges Wasser. Bei FINO 3 wurde bei Reduzierung der eingesetzten Luftmenge eine gleichbleibende Dämmung der Schallemissionen ermittelt (Griebmann et al. 2009), aber die Aussagekraft der dortigen Einzelmessung ist nicht hoch und es kann keine generelle Aussage abgeleitet werden, dass man mit der halben Luftmenge und damit der halben Kompressorkapazität die gleiche Wirkung erzielen kann.

Aus der Literatur sind weitere Messungen sowie theoretische Abschätzungen und Studien über die Wirkungsweise von Blasenschleiern bzw. Luftblasen im Wasser bekannt (z.B. Würsig et al 2000, Illingworth 2001, Reyff 2003, Vagle 2003, Petrie 2005, Rodkin et al. 2007, Stokes et al. 2010). Der Nachteil dieser Studien ist jedoch, dass die Abschätzungen auf theoretischen Berechnungen basieren oder unter Laborbedingungen gemessen wurden, aber nicht unter Offshore-Bedingungen.

Bei Sprengungen in der Ostsee wurde mit einem linearen Blasenschleier und einer sehr hohen Luftmenge von $1 \text{ m}^3 / (\text{m} \cdot \text{min})$ eine hohe Schallminderung von 16 dB bis 19 dB erreicht (Schmidtke 2010), jedoch sind Schallquelle und Blasenschleier nicht direkt mit den Rammarbeiten für einen Windpark vergleichbar. Unter anderem entfällt beim linearen (halboffenen) Blasenschleier im

Gegensatz zur geschlossenen Anordnung das Phänomen, dass – wie bei jeder komplett eingekapselten Schallquelle – der Schallpegel innerhalb der Kapselung durch Mehrfachreflexionen ansteigen kann, was die Schalldämmung durch die Hülle bzw. durch die Luftblasen teilweise reduzieren könnte. Um die Wirksamkeit von Blasenschleiern zielgerichtet verbessern zu können, ist eine Bestimmung der maßgeblichen Einflussgrößen auf die Schallreduktion erforderlich.

Für eine Optimierung von Blasenschleiern, auch in dem Sinne, Aufwand, Offshore-Tauglichkeit und Ergebnis aufeinander abzustimmen, fehlen noch Erfahrungswerte. Offene Fragen in Bezug auf die Wirkung und Optimierung von Blasenschleiern bestehen insbesondere hinsichtlich der Beziehung zwischen Schallminderung und Luftmenge bzw. Anordnung und Größe der Blasen sowie hinsichtlich der Erhöhung der Wirkung durch mehrere Düsenschläuche. Da die Blasen je nach ihrer Größe stark frequenzselektiv wirken können, ist es wichtig, eine für das Frequenzspektrum des Rammschalls möglichst optimale Verteilung von Blasengrößen zu erzielen. Ein wichtiger Punkt bei der Optimierung ist ferner, "Lücken" im Blasenschleier unter allen Umständen zu vermeiden, da diese die Schalldämmung drastisch verschlechtern. Das betrifft beispielsweise die noch nicht gut untersuchten Eigenschaften von Blasenschleiern in Bodennähe.

Bei bisherigen Vorhaben (z.B. alpha ventus) wurden nur einzelne Systeme an vereinzelt Fundamentstrukturen verwendet. Hierbei wurden die Rammarbeiten auf die zeitlichen Bedürfnisse der Installation und des Betriebs der Schallminderungsmaßnahme angepasst sowie unter optimalen Wetterbedingungen durchgeführt, so dass diese Erfahrungen für den Einsatz bei ganzen Windparks im realen Errichterprozess nicht ausreichend sind. Es ist daher notwendig, Erfahrungen zu sammeln sowie Materialien und Verfahren zu entwickeln, die den Ansprüchen unter realen Offshore-Bedingungen gerecht werden.

Schweinswale reagieren aversiv auf hohe Unterwasserschallpegel und bei Offshore-Rammarbeiten ohne Schallminderung wurde eine Störwirkung bis 20 km Entfernung festgestellt (u.a. Brandt et al. 2011). Die Reaktion von Schweinswalen auf Rammarbeiten weist eine deutliche Abhängigkeit zur Höhe der Schallimmissionen auf: je höher die Schallpegel, desto stärker ist die Reduktion der Schweinswalhäufigkeit und desto länger ist die Erholungszeit, bis nach einer Rammung der gestörte Bereiche wieder die Ausgangswerte erreicht. Die bisher vorliegenden Untersuchungen weisen auf einen Gradienten der Störwirkung hin, der jedoch bisher nur ansatzweise beschrieben werden konnte.

Über die Wirkung von Blasenschleiern oder anderen Schallminderungsmaßnahmen bezüglich einer verminderten Störung von Schweinswalen liegen bislang keine Untersuchungen vor. Die bisherigen Untersuchungen bei Offshore-Rammarbeiten lassen einen Bezug der Reaktionszeit von Schweinswalen und der Stärke der Schallemissionen erkennen, so dass eine positive Wirkung von Schallminderungsmaßnahmen zu erwarten ist. Dies gilt umso mehr, als die Schallminderung in den höheren Frequenzen, also im Hörbereich der Schweinswale, stärker als in den tiefen Frequenzen ist. Eine Überprüfung dieser Annahme steht jedoch noch aus und es kann ebenso wenig ausgeschlossen werden, dass auch Schallemissionen in tiefen Frequenzen eine Störwirkung hervorrufen.

B DER GROSSE BLASENSCHLEIER (BBC)

B.1 Konzept des Großen Blasenschleiers

Für einen Großen Blasenschleier wird Luft in ein am Meeresboden liegendes Rohr oder einen (Düsen) Schlauch gepumpt, woraus die Luft durch dafür vorgesehene Öffnungen in das Wasser entweicht. Durch den Auftrieb entsteht ein Luftblasenschleier bzw. Luftblasenvorhang. Bei einem Großen Blasenschleier kann die komplette Baustelle (Errichterschiff und Fundamentstruktur) mit einem Blasenschleier umhüllt werden. Der Schall, der bei den Rammarbeiten entsteht, muss die aufsteigenden Luftblasen passieren und wird dabei reflektiert, gestreut und somit reduziert (vgl. Abb. 1-7 und Abb. 1-8). Die schalldämmende Wirkung von Luftblasen im Wasser kann auf zwei physikalische Prinzipien zurückgeführt werden: 1. Schallstreuung an Luftblasen und 2. Reflexion am Übergang zwischen Wasserschichten mit und ohne Blasen (Luft-Wasser-Gemisch).

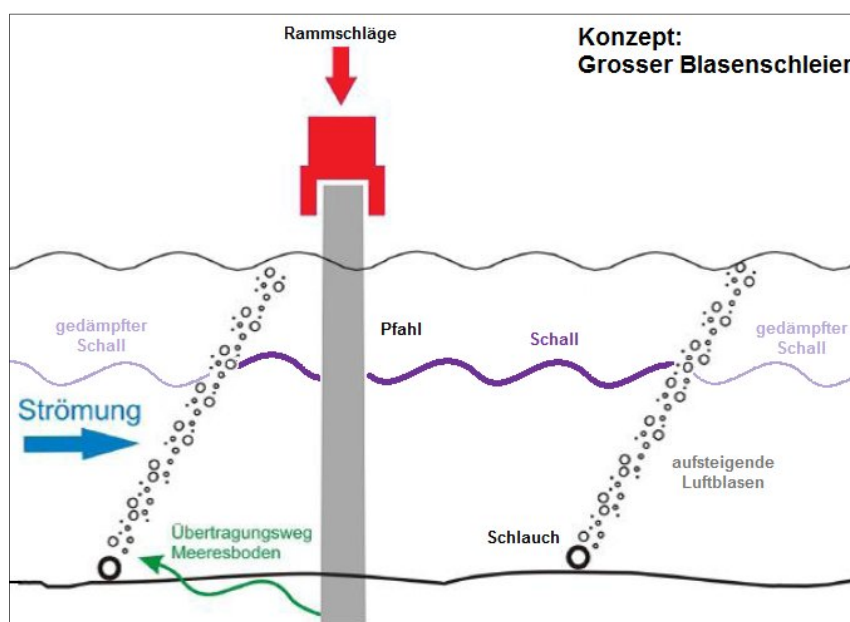


Abb. 1-7: Skizze des Prinzips des Großen Blasenschleiers (Quelle: ISD 2010, verändert).

Schallstreuung

Bei der Schallstreuung wird der Schall an Blasen reflektiert bzw. abgelenkt / gestreut. Eine Gasblase im Wasser ist ein schwingungs- und resonanzfähiges Gebilde, wodurch sie für eine einfallende Schallwelle um ein Vielfaches größer wirken kann, als es ihrer geometrischen Größe entspricht. Allerdings tritt dieser Effekt nur bei der Resonanzfrequenz auf, die von den Abmessungen der Blase und dem Wasserdruck abhängt. Ober- und vor allem unterhalb der Resonanzfrequenz ist die Streuwirkung gering (siehe z.B. Medwin & Clay 1998). Da man es aber in der Regel mit einer Verteilung unterschiedlich großer Luftblasen zu tun hat, ist eine schalldämmende Wirkung über einen größeren Frequenzbereich gegeben.

Die Schalldämmung in dB infolge Schallstreuung an den Blasen ist proportional zum Laufweg des Schalls in blasenhaltigem Wasser (= Breite des Blasenschleiers). Es ist nicht nötig oder sogar theoretisch ungünstig, dass die Blasen in einer relativ dünnen "Wand", z.B. durch Führungsbleche konzentriert sind (nach Wilke et al. 2012 bei Verwendung eines geführten kleinen Blasenschleiers oder innerhalb eines Noise Mitigation Screens von IHC). Mit einer stärkeren räumlichen Verteilung der Luftblasen in der Wassersäule lässt sich die Schalldämmung erhöhen.

Mit einer Anordnung aus zwei gleichartigen Blasenschleiern hintereinander, die nicht ineinander fließen, wird der Laufweg insgesamt verdoppelt (die blasenfreie Strecke zwischen den beiden Blasenschleiern spielt keine Rolle), und es ist mit einer Schalldämmung zu rechnen, die durch Streuung theoretisch doppelt so hoch ist wie die eines einzelnen Blasenschleiers.

Reflexion am Übergang zwischen Wasserschichten mit und ohne Blasen (Luft-Wasser-Gemisch)

Beim Durchgang von Schall durch eine Wand bzw. eine Schicht aus einem anderen Medium, als dies vor und hinter der Wand der Fall ist, wird nur ein Teil des Schalls weitergeleitet (Transmission); der Rest wird reflektiert. Die Schallreflektion hängt von den Schallkennimpedanzen (Wellenwiderstand) der beiden Materialien (hier Wasser und Wasser-Luft-Gemisch) ab. Je stärker sich diese unterscheiden, umso weniger Schallenergie wird weitergeleitet. Zusätzlich wird, je nach Materialeigenschaft, die transmittierte Schallwelle innerhalb des zweiten Mediums ebenfalls reduziert. Diese Schallreduktion wächst mit der Schichtdicke (hier Breite des Blasenschleiers) aufgrund der frequenzabhängigen Dämpfung im Material bis zu einer maximalen Schichtdicke an; über diese Dicke hinaus ergibt sich jedoch keine Verbesserung. Eine theoretische überschlägige Berechnungsformel ist z. B. in Heckl & Müller (1994, S. 20) zu finden. Dieser Effekt kann auch beim Blasenschleier eine Rolle spielen, da bei der derzeit üblichen Ausführung verhältnismäßig abrupte Übergänge zwischen lufthaltigem und blasenfreiem Wasser vorhanden sind. Die Größe der einzelnen Blasen ist bei diesen Überlegungen nicht relevant (sofern diese sehr klein im Verhältnis zur Wellenlänge sind), so dass nicht wie oben die Streuung an einzelnen Blasen betrachtet werden muss. Es geht lediglich der Anteil der Luft je m^3 Wasser mit ein. Die Schallkennimpedanz ist das Produkt aus der Dichte eines Stoffes und der Schallgeschwindigkeit darin. Schon geringe Beimengungen von Luft ändern zwar kaum die Dichte, senken jedoch stark die Schallgeschwindigkeit (Jensen et al. 2011). Die Schallgeschwindigkeit im Wasser beträgt in etwa 1.500 m/s , in Luft hingegen nur ca. 340 m/s . Bei einem Luft-Wasser-Gemisch wird sich je nach Verhältnis eine Schallgeschwindigkeit zwischen den o. g. Werten einstellen.

Nach einer überschlägigen Berechnung ist bei einem doppelten Blasenschleier mit einem relativen Luftanteil von 10^{-3} mit einer Schallminderung im einstelligen dB-Bereich zu rechnen, die zusätzlich zum oben beschriebenen Effekt der Schallstreuung wirksam ist.



Abb. 1-8: Der Große Blasenschleier in Betrieb bei Rammarbeiten im Windpark Borkum West II.

B.2 Bereits vorliegende Erfahrungen mit dem Blasenschleier unter Offshore-Bedingungen

Im Projekt FINO 3 erfolgte eine der ersten großmaßstäblichen Einsätze eines Großen Blasenschleiers unter realen Offshore-Bedingungen (Grießmann et al. 2010). Die Firma HYDROTECHNIK Lübeck GmbH stellte einen Großen Blasenschleier als Schallschutzsystem im Rahmen dieser Offshore-Rammarbeiten her. Gerammt wurde dort ein Monopile mit einem maximalen Durchmesser von 4,7 m und einer Einbindetiefe von ca. 30 m. Die Wassertiefe am Standort betrug ca. 23 m. Um den zu rammenden Pfahl wurde im Abstand von 70 m ein Großer Blasenschleier in Form eines geschlossenen Sechsecks verlegt (Grießmann et al. 2010). Dabei wurde ein starres Düsenrohr verwendet, das auf dem Meeresboden rund um die Rammbaustelle verlegt wurde. Das beim Projekt FINO 3 eingesetzte Düsenrohr eignete sich gut zur Verteilung der Druckluft unter Wasser. Aufgrund seiner Steifigkeit ließ sich das Düsenrohr jedoch nicht in seiner Gesamtlänge transportieren, da es nicht aufgerollt werden konnte. Es wurde also in Segmente unterteilt, die vor Ort (Offshore) zusammengesetzt werden mussten, um die nötige Gesamtlänge zu erreichen. Die Installation erfolgte vor Ort durch Taucher und konnte somit nur bei günstigem Wetter mit wenig Wellengang erfolgen. Die Installationszeit des Düsenrohres betrug mehrere Stunden.

Im OWP Testfeld alpha ventus wurde ein „Kleiner gestufter Blasenschleier“ einmalig bei einem Fundamentstandort eingesetzt (Rustemeier et al. 2010). Bei diesem System wirkte ebenfalls die Firma Hydrotechnik Lübeck mit. Die Funktionsweise und die physikalischen Wirkungsmechanismen eines Großen und Kleinen gestuften Blasenschleiers sind jedoch aufgrund der Distanz zwischen Blasenschleier und zu rammendem Pfahl nicht exakt miteinander zu vergleichen.

Im Projekt Borkum West II sollte ein Großer Blasenschleier im laufenden Bauprozess verwendet werden. Daher musste ein System entwickelt werden, das weder zeitintensiv in der Offshore-Installation sein durfte, noch den Baufortschritt in irgendeiner Weise negativ beeinflusste. Dies bezog sich auch auf die möglichen Wetterrestriktionen eines Blasenschleiersystems: Auslegung, Betrieb und Einholung des Blasenschleiersystems mussten unter denselben Wetterbedingungen erfolgen können, unter welchen auch Rammungen der Gründungsstrukturen stattfanden (Wetterrestriktionen der Rammplattform siehe S. 46). Daher musste für die zuvor im Projekt FINO 3 verwendeten Rohre eine Alternative gefunden werden, die rund um die Rammbaustelle verlegt werden konnte, dabei aber flexibler und leichter zu transportieren sein musste. Auch sollten das Verlegen und Heben des Blasenschleiers von einem Schiff aus und stets ohne Einsatz von Tauchern möglich sein.

Diese Bedingungen konnten nur durch ein flexibles Schlauchsystem erfüllt werden. Es musste daher ein Schlauchtyp gefunden werden, dessen Innendurchmesser zur eingesetzten Luftmenge und dem geplanten Luftdruck passte. Zudem sollte das Risiko einer Verdrehung bzw. Abknickung während der Installation auf dem Meeresboden durch geeignete Materialwahl und Auslegungsmethoden minimiert werden. Schließlich sollten die Materialien der Teilkomponenten des Blasenschleiersystems so gewählt werden, dass diese einem mehrfachen Einsatz unter realen Offshore-Bedingungen standhalten konnten. Die genauen Anforderungen, die an den Großen Blasenschleier gestellt wurden, können Kapitel B.3.1 entnommen werden.

B.3 Allgemeine Beschreibung des eingesetzten Großen Blasenschleiers

B.3.1 Anforderungen an das Schallminderungssystem

Im Folgenden sind die verschiedenen Anforderungen an das einzusetzende Blasenschleiersystem und dessen Teilkomponenten zusammengefasst:

- Einsetzbarkeit unter realen Offshore-Bedingungen (Wetterrestriktionen vgl. S. 46)
- Tauglichkeit aller Teilkomponenten für den Serieneinsatz hinsichtlich Dauerbelastungsfestigkeit des (Schlauch-)Materials
- Kammdruckfestigkeit des Schlauchs
- Abriebfestigkeit des Schlauchs
- Ausfallsicherheit des Systems bzw. Möglichkeit der schnellen Reparatur im Falle eines Schadens
- keine zeitliche Verzögerung des Bauablaufs
- keine Behinderung der Bauprozesse
- ausreichende Schallreduktion, um den dualen Schallschutzgrenzwert von 160 dB_{SEL} (Einzelereignispegel) und 190 dB_{LPeak} (Spitzenpegel) in 750 m Entfernung zum Rammort einzuhalten
- Erfüllung der Anforderungen des Gesundheitsschutzes, der Arbeitssicherheit und des Umweltmanagements (Health, Safety and Environment [HSE]-Anforderungen)
- Wirtschaftlichkeit

B.3.2 Beschreibung der technischen Komponenten des eingesetzten Großen Blasenschleiers

Das Schallminderungssystem Großer Blasenschleier besteht aus einer Reihe verschiedener technischer Systemkomponenten, durch deren Konfiguration das Erscheinungsbild und die schallmindernde Wirksamkeit maßgeblich gesteuert wurden. Die Komponenten werden im Folgenden vorgestellt:

- Verlegeschiff (hier: *Noortruck*)
- Kompressoren
- Luftversorgungsschläuche (Zuluftschläuche)
- Markierungsbojen
- Düsen­schläuche mit Luftaustrittsöffnungen
- Winden
- Power Pack

Das ganze Blasenschleiersystem wurde im Vorfeld der Offshore-Rammarbeiten sowohl an Land, wie auch auf See getestet (Kapitel B.4.1 sowie Anhang, S. 206f).

Blasenschleier-Versorgungsschiff *Noortruck*

Das Versorgungsschiff des Blasenschleiersystems, die *Noortruck*, ist ein ehemaliger Offshore-Versorger OSV, der von der Reederei Bitunamel-Feldmann im Jahr 2011 für die Belange des Großen Blasenschleiers nach Vorgabe der HYDROTECHNIK Lübeck GmbH umgebaut wurde. Zusätzlich wurde die *Noortruck* mit einem Side-Scan-Sonar ausgestattet, das zum späteren Orten und Einmessen des verlegten Düsen­schlauches am Meeresboden verwendet wurde. Zusätzlich zum Hauptantrieb (Zwei Propeller, angetrieben durch zwei Viertakt-Dieselmotoren MWM TBD 1300 KW (1800 PS)) ist die *Noortruck* noch mit jeweils einem Bug- und Heckstrahlruder ausgestattet.



Abb. 1-9: Das Blasenschleier-Versorgungsschiff Noortruck.

Die Komponenten des Blasenschleiers wie Schlauchwinden und Kompressoren wurden zum größten Teil mit Twist Looks (Verriegelungen, die Wechselbehälter oder ISO-Container mit dem Trägerfahrzeug verbinden) auf dem Deck der *Noortruck* befestigt; diese waren somit schnell und verhältnismäßig einfach austauschbar. Die Hauptkomponenten sind: Kompressoren für die Generierung von Druckluft, Treibstofftanks für die Kompressoren, Winden für den Düsen Schlauch und Power Packs für die Betätigung der Winden. Dennoch war an Deck noch ausreichend Platz, um eventuell anfallende Reparaturen sicher durchführen zu können (vgl. Abb. 1-10 und Abb. 1-11).



Abb. 1-10: Das Deck bietet noch ausreichend Platz, um kleinere Reparaturen durchführen zu können. Beim Verlegen des Blasenschleiers läuft der Düsen Schlauch kontrolliert über das Heck in die See.

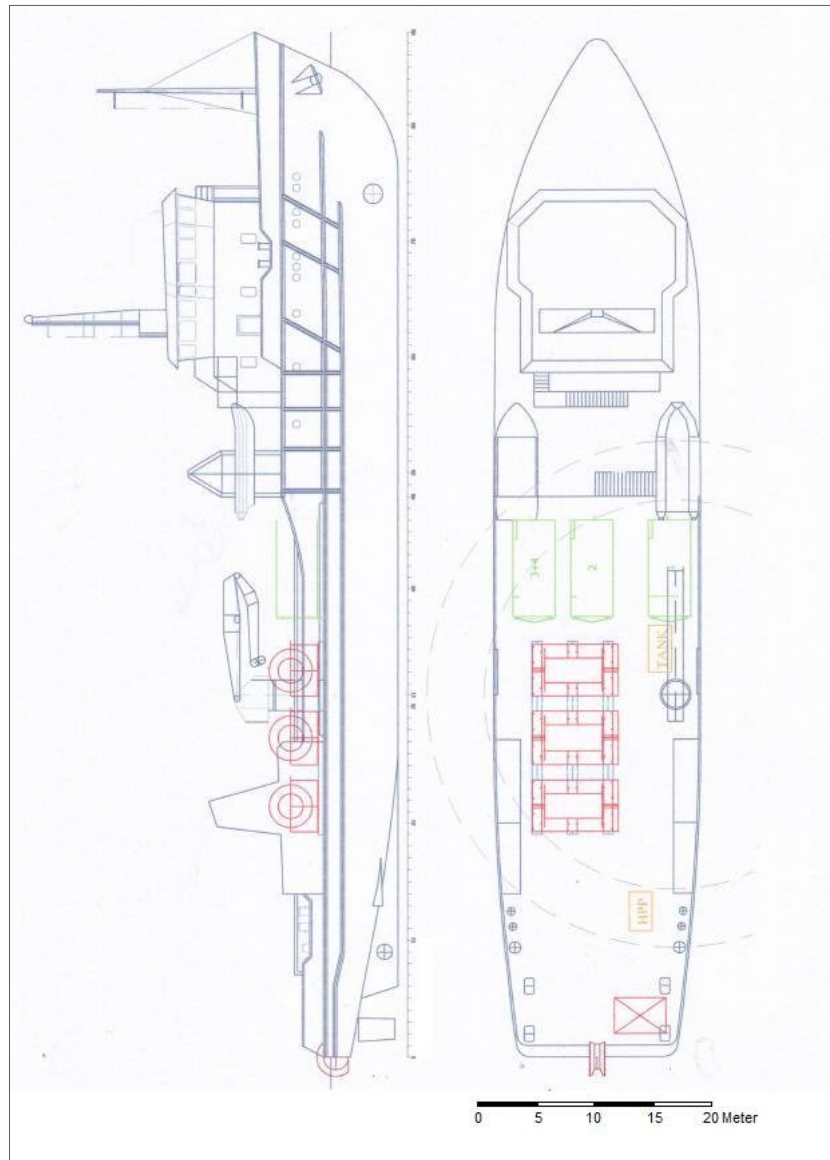


Abb. 1-11: Decksplan der Noortruck.

Luftversorgung (Kompressoren)

Für die (Druck-) Luftversorgung des Blasenschleiers wurden vier ölfrei verdichtende Schraubenkompressoren mit Dieselmotor auf dem Verlegeschiff aufgestellt (Typ: Atlas Copco PTS 916, siehe Abb. 1-12). Ein Kompressor dieser Art komprimiert ca. 43 m³ Luft pro Minute (FAD = Free Air Delivery, Kompressorkapazität: vom Kompressor angesogene Luftmenge pro Zeiteinheit).

In Tab. 1.1 ist die verwendete (Gesamt-) Luftmenge für den Betrieb des Großen Blasenschleiers unter Verwendung unterschiedlicher Anzahl von Kompressoren zusammengefasst.

Tab. 1.1: *Verwendete (Gesamt-) Luftmengen für den Betrieb des Großen Blasenschleiers bei unterschiedlicher Anzahl von Kompressoren.*

Anzahl der verwendeten Kompressoren	Gesamtluftdruck (bar)	Komprimierte Luftmenge [m ³ / min]	Luftmenge pro Meter Schlauch pro Minute [m ³ / (m * min)] ^{*1}
1	ca. 1	43	0,07
2	ca. 5	86	0,15
3	ca. 7	129	0,23
4	ca. 9	172	0,32

*1 Bei einer Schlauchlänge von 560 m



Abb. 1-12: *Eingesetzter Kompressor zur Generierung der notwendigen Luftmenge für den Blasenschleier.*

Luftversorgungsschläuche (Zuluftschläuche)

Die Luftversorgungsschläuche (Zuluftschläuche) leiten die Druckluft von den Kompressoren über ein Verteilungsventil auf dem Schiff zum am Meeresboden positionierten Düsen Schlauch. Diese Zuluftschläuche besitzen keine Löcher für einen Luftauslass. Sie müssen auch bei schlechtem Wetter einsetzbar sein, so dass besonders leichte Schlauchmaterialien zum Einsatz kamen.

Die Länge dieser Schläuche beträgt jeweils 40 m. Der Blasenschleierschlauch (Düsen Schlauch mit Löchern) wird durch diese Luftversorgungsschläuche von zwei Seiten mit Druckluft versorgt. Die Enden der Luftversorgungsschläuche sind mit Markierungsbojen markiert.

Markierungsbojen

Nach dem Verlegen des Düsen Schlauches inkl. Luftversorgungsschlauch im pre-laying-Verfahren muss das Verleges Schiff häufig für längere Zeit die nähere Umgebung der Rammbaustelle verlassen, damit sich die Rammp Plattform in Position bringen kann. Erst nach der Positionierung der Errichter Plattform darf sich das Blasenschleier-Verleges Schiff der Rammbaustelle wieder nähern, die Markierungsbojen heben und den Blasenschleier für den Betrieb vorbereiten (vgl. Kapitel B.4.2, S. 45 f).

Dazu ist es notwendig, dass die Luftversorgungsschläuche jederzeit schnell und problemlos wieder aufgefunden werden können. Aus diesem Grund werden an den Enden der Luftversorgungsschläuche große Markierungsbojen befestigt (vgl. Abb. 1-13).



Abb. 1-13: Rechts neben dem Seemann im blauen Arbeitsanzug ist ein Luftversorgungsschlauch (1) zu sehen. Das Ende des Luftversorgungsschlaches ist mit einer Markierungsboje versehen. Auch der Düsen Schlauch ist auf dem Bild erkennbar (2).

Düsenschläuche

Der Düsen Schlauch ist die Hauptkomponente des „Großen Blasenschleiers“. Dieser Schlauch wird ringförmig um die Rammbaustelle auf dem Meeresboden verlegt. In den Düsen Schlauch sind Luftaustrittsöffnungen mit definierter Größe und in definiertem Abstand zueinander gebohrt, durch die die zugeführte Druckluft entweicht und so den Luftblasenschleier bildet.

Die Düsen schläuche sind Saug- und Druckschläuche mit hoher Kammdruck- und Abriebfestigkeit, die auf der gesamten Länge mit Metallmanschetten und einer Kette ummantelt sind. Die Manschetten und die Kette dienen einerseits als Ballast, damit der im Betrieb luftgefüllte Schlauch auf dem Meeresboden liegen bleibt, und andererseits zur Aufnahme der besonders beim Verlegen und Bergen des Düsen Schlauches auftretenden Zugkräfte. Der Vorteil der Ballastbefestigung außerhalb des Düsen Schlauches ist, dass der Wirkungsquerschnitt des Düsen Schlauches nicht verkleinert wird und beim Hindurchströmen der Luft keine unnötigen Turbulenzen bzw. Verwirbelungen entstehen.



Abb. 1-14: Düsen Schlauch ummantelt mit Stahlmanschette und Kette auf einer Winde an Bord der Noortruck.

Nachteil dieses Aufbaus ist, dass der Düsen Schlauch dadurch „dicker“ und schwerer wird und somit größere Winden zum Auftrommeln an Bord der Noortruck notwendig wurden. Die Gesamtlänge eines Düsen Schlauches betrug 560 m.



Abb. 1-15: Düsenschlauch auf dem Meeresgrund, Blasenschleier in Betrieb.

Im Zeitraum zwischen September und Dezember 2011 wurden zwei unterschiedliche Düsenschlauchkonfigurationen verwendet, die abwechselnd eingesetzt wurden:

1. Die Düsenschlauchkonfiguration "BBC 1" ist mit Luftaustrittsöffnungen mit Durchmessern von 3,5 mm versehen, die jeweils 1,5 m Abstand voneinander haben. Diese Konfiguration basiert auf der Annahme, dass die Größe der Luftblasen mit der Größe der Austrittsöffnungen korreliert. Mit dieser Konfiguration sollte getestet werden, ob große Luftblasen eine bessere Reduktion bei tieferen Frequenzen bewirken können.
2. Die Düsenschlauchkonfiguration "BBC 2" besitzt Luftaustrittsöffnungen mit einem Durchmesser von 1,5 mm, die in einem Abstand von 0,3 m gebohrt sind. Diese Konfiguration basiert auf Erfahrungswerten der Fa. HYDROTECHNIK Lübeck aus der praktischen Anwendung von Ölsperren bei Hafendarbeiten. Zudem wurde eine vergleichbare Lochgrößen-Lochabstands-Konfiguration im Forschungsprojekt FINO 3 verwendet (Grießmann et al. 2010).

Beide Düsenschlauchkonfigurationen besaßen dieselbe Länge (560 m).

Ab Januar 2012 wurden nur noch zwei Schläuche der Konfiguration BBC 2 abwechselnd eingesetzt. Dafür gab es zwei Gründe: Erstens konnte die Düsenschlauchkonfiguration BBC 1 nicht mehr eingesetzt werden, da dieser Schlauch aufgrund der Tests in der Ostsee und dem Einsatz im Baubetrieb schon Verschleißerscheinungen aufwies (vgl. Kapitel B.4.1, S. 44). Zweitens zeigte die erste Forschungsphase dieses Projektes, dass die Konfiguration BBC 2 eine deutlich bessere Schallreduktion bei vergleichbarer Luftmenge erzielt als die Konfiguration BBC 1.

Winden

Die Düsenschläuche wurden auf speziell angefertigten Winden (Trommeln) gelagert (siehe Abb. 1-14, S. 42). Die Winden wurden so ausgewählt, dass ein kompletter Düsenschlauch inkl. Metallmanschetten (Gesamtgewicht: ca. 5 t) auf einer Winde auf- und abgerollt werden konnte. Angetrieben wurden die Winden von einem Hydraulikmotor (Power Pack), der die Winden auch abbremsen konnte, so dass ein kontrolliertes Auslegen der Schläuche möglich war.

Insgesamt befanden sich drei Winden an Deck der *Noortruck*, so dass theoretisch drei komplette Düsenschlauchsysteme an Bord vorgehalten werden konnten. In der Praxis wurden zwei Düsenschlauchsysteme zeitgleich Offshore eingesetzt, wobei i.d.R. ein Düsenschlauch immer am Meeresboden ausgelegt war. Eine Trommel wurde für die Auslegung/Bergung der Düsenschläuche verwendet, auf einer weiteren Trommel wurden die notwendigen Zuluftschläuche gelagert und die dritte Trommel konnte für die Lagerung von Ersatzteilen verwendet werden.

Power Pack

Das Power Pack erzeugt die hydraulische Energie, die für die Betätigung der Winde benötigt wird. Es ist mit einem Bedienfeld ausgerüstet, von dem aus die Drehrichtung und Geschwindigkeit der Windentrommel sowie die Schlauchführung gesteuert wird. Mit Hilfe dieses Hydraulikmotors ist es auch möglich, die Winden abzubremsen, so dass verhindert werden kann, dass sich der Schlauch aufgrund seines Eigengewichtes unkontrolliert immer schneller abtrommelt.

B.4 Einsätze des Großen Blasenschleiers im OWP-Bauvorhaben Borkum West II

B.4.1 Voruntersuchungen an Land und Testauslegungen auf der Ostsee

Das Schallminderungssystem Großer Blasenschleier (vgl. Kapitel B) wurde eigens für diesen Windpark entwickelt und angefertigt. Bevor die Bauarbeiten im Windpark begannen, wurde das System ausgiebig an Land und zu Wasser getestet (für eine detaillierte Beschreibung aller Vorversuche siehe Anhang S. 206). Hierzu gehörte auch das Entwickeln der geeigneten Arbeitsabläufe und Verfahren für

- i. das Auslegen und Bergen der Düsensschläuche unter Offshore-Bedingungen,
- ii. die Ortung des ausgelegten Düsens Schlauches am Meeresboden mittels Side-Scan Sonar und
- iii. der Betrieb des Systems.

Die ersten Handhabungsversuche mit dem Großen Blasenschleier unter realen Offshore-Bedingungen erfolgten bei Testauslegungen in der Ostsee (Sommer 2011). Hierbei wurden auch Materialbelastungstests an Land und Offshore sowie Verlegungs- und Ortungstests auf der Ostsee durchgeführt. Durch diese Tests wurden die Arbeitsabläufe spezifiziert und kleinere Verbesserungen im Aufbau und in der Handhabung des Blasenschleiersystems entwickelt (z.B. Sicherungsseile, Wahl von Schekeln). Bei den Tests in der Ostsee zeigte sich, dass weder mit dem Tauchroboter (ROV) noch mit dem Side-Scan-Sonar ein genaues Einmessen des ausgebrachten Düsens Schlauches auf dem Meeresboden möglich war. Wie sich herausstellte, hing dieses mit dem vorherrschenden Sediment zusammen. In dem Testgebiet in der Ostsee war der Meeresboden sehr schlammig, was dazu führte, dass der Düsen Schlauch nach dem Verlegen in das Sediment einsank und abschnittsweise von diesem vollständig bedeckt wurde.

Auch bei dem späteren Einsatz in der Nordsee, wo Sand das vorherrschende Sediment war, war ein schnelles unkompliziertes Einmessen mit dem ROV weiterhin nicht möglich. Ein Einmessen des Düsens Schlauches mit dem Side-Scan-Sonar funktionierte in der Nordsee hingegen gut und bildete den Düsen Schlauch als scharfe Kontur ab, wodurch es möglich war, mittels GPS die Koordinaten der Lage des Schlauches zu ermitteln und diese an die Rammplattform weiterzugeben (siehe Anhang, S. 208).

Die Kompressoren wurden im Vorfeld der Rammarbeiten im OWP auf eine Schrägstellung von 12° geprüft. Es gab keinen durch diese Schrägstellung oder aufgrund von wellenbedingten Schiffsbewegungen verursachten Ausfall der eingesetzten Kompressoren.

Im Februar 2012 traten teilweise Temperaturen von bis zu -15°C auf. Aufgrund dieser ungewöhnlichen Temperaturen wurde der verwendete Diesel zähflüssiger und verstopfte die eingebauten Dieselfilter. Durch die Verwendung des Treibstoffes aus einem tieferliegenden Tank und einen regelmäßigen Austausch der Dieselfilter konnte ein Ausfall der Kompressoren verhindert werden. Zusätzlich wurde ab diesem Zeitpunkt der Gesamtluftdruck am Zuluftverteiler alle 30 Minuten kontrolliert, da sich i.d.R. der Ausfall eines Kompressors durch den Abfall des Gesamtluftdruckes bemerkbar macht (vgl. Tab. 1.1, S. 41).

B.4.2 Auslegung des Blasenschleiers

Im Windpark Borkum West II werden Tripod-Strukturen für die Gründung der Windenergieanlagen verwendet. Zur Verankerung der Gründungsstruktur wurden pro Fundamentstandort drei Pfähle mittels Impulsrammung im „pre-piling“-Verfahren ins Sediment gebracht. Dies bedeutet, dass zuerst die Pfähle im Sediment verankert werden und anschließend der Tripod auf die drei Pfähle montiert wird. Die Gründungsarbeiten (Impulsrammung) wurden durch die Rammplattform bzw. das Errichterschiff *Goliath* ausgeführt (siehe Abb. 1-17, technische Details der *Goliath* siehe Anhang, S. 203).

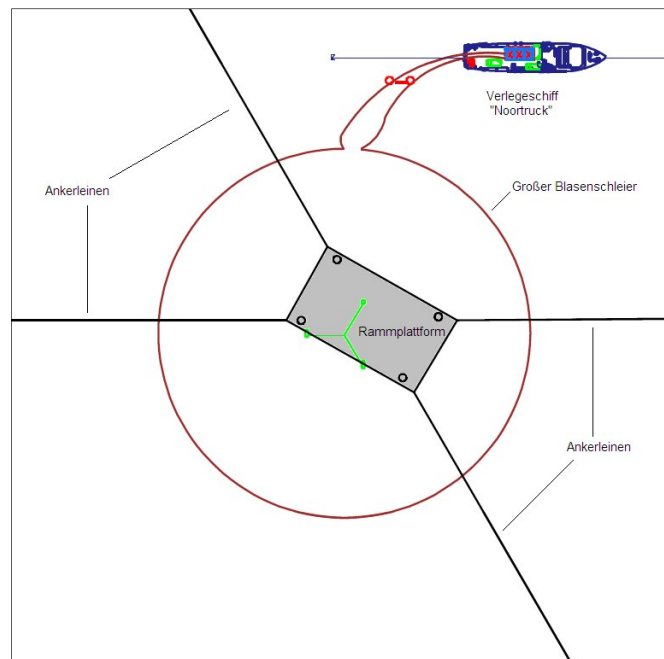


Abb. 1-16: Skizze des Großen Blasenschleiers um die Rammplattform. Erkennbar ist der Schlauchring, der von dem Düsen Schlauch gebildet wird, sowie die Luftversorgungsschläuche, die den Ring mit der Noortruck verbinden, und die großen Ankerrossen, die die Goliath auf Position halten (alle Rechte bei HYDROTECHNIK Lübeck GmbH).

Die notwendigen Pfähle wurden durch eine unterhalb der *Goliath* absenkbare Schablone in Position gehalten und mittels eines Rammhammers (Typ IHC Hydrohammer, Typ S-1200) im Impulsrammverfahren ins Sediment getrieben.

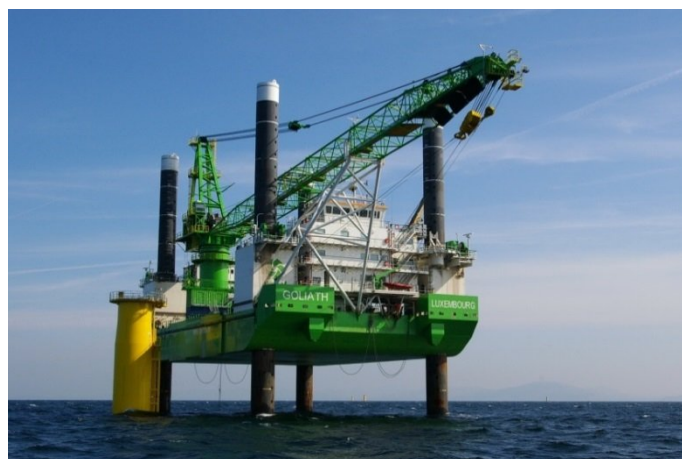


Abb. 1-17: Rammplattform Goliath (Quelle: http://www.geosea.be/EN/Equipment_post.html?postId=36).

Von der *Goliath* aus wurden auch die Vergrämungsmaßnahmen vor dem Beginn der Rammarbeiten durchgeführt, um sicherzustellen, dass sich bei Beginn der Rammtätigkeit keine marinen Säugetiere mehr im näheren Umfeld der Rammbaustelle befanden.

Der Große Blasenschleier wurde vom Verlegeschiff *Noortruck* im pre-laying-Verfahren verlegt und betrieben, d.h. der notwendige Düsenschlauch wurde vor dem Eintreffen und Positionieren der Errichterplattform ausgelegt und die beiden Enden der Zuluftschläuche an der Wasseroberfläche mittels Bojen markiert. Nachdem sich die Errichterplattform in den Düsenschlauchring gestellt hatte, wurden die beiden Enden des Düsenschlauches vom Blasenschleier-Verlegeschiff aufgenommen und an die Luftversorgung (Verteilerventil an Bord der *Noortruck*) angeschlossen, so dass das Schallminderungssystem in Betrieb gehen konnte. Die Zuschaltung der notwendigen Luft für den Betrieb des Blasenschleiers erfolgte nach Absprache mit der Errichterplattform wenige Minuten vor dem Rammbeginn.

Es wurden zeitgleich zwei komplette Düsenschlauchsysteme verwendet, die abwechselnd um die nächsten zwei Fundamentstandorte verlegt werden konnten. In der Regel erfolgte eine Aufnahme des ersten Düsenschlauches am vorigen Standort und eine Auslegung an der danach geplanten Position, während sich die Errichterplattform in den bereits verlegten zweiten Düsenschlauch am zu rammenden Fundamentstandort positionierte.

Bei der Verlegung des Düsenschlauches wurde der von den Stahlmanschetten und der Kette beschwerte Düsenschlauch von der Winde abgetrommelt und über das Heck des Verlegeschiffes auf den Meeresboden abgesenkt (vgl. Abb. 1-15, S. 43). Sobald der Schlauch den Meeresboden erreicht hatte, folgte das Schiff dem vorgegebenen Kurs um die geplante Rammposition herum, bis der Düsenschlauch einen geschlossenen Kreis bildete (vgl. Abb. 1-18, S. 47). Nach Beendigung der Rammung wurden die Luftversorgungsschläuche von den Düsenschläuchen gelöst, die Ballast- bzw. Zugkette des Düsenschlauches mit der Windentrommel verbunden und der Düsenschlauch aufgetrommelt.

In der Regel wurde der Blasenschleier ringförmig um den jeweiligen Standort der nächsten Rammarbeiten verlegt. Nach der Verlegung eines Druckschlauches wurde mit Hilfe eines Sonargerätes (Side-Scan-Sonar) an Bord der *Noortruck* durch nochmaliges Überfahren des am Meeresboden verlegten Düsenschlauches die exakte Position des verlegten Schlauches messtechnisch bestimmt (siehe Abb. 1-18, S. 47). Es zeigte sich, dass ein nahezu vollständiger Kreis ausgelegt werden konnte und aufgrund der Schlauchlänge von 560 m auch der Mindestabstand von 70 m zu der Arbeitsplattform *Goliath* eingehalten wurde.

Die Errichterplattform *Goliath* erstellte aufgrund von wetterbedingten Restriktionen (siehe Tab. 1.2) tagesaktuell einen Plan über die geplanten Bauschritte an den nächsten Fundamenten. In der nachfolgenden Tabelle (Tab. 1.2) sind die maximalen Einsatzgrenzen, bei denen die Errichterplattform sowie das Versorgungsschiff *Maersk Finder* für die Nachlieferung der notwendigen Pfähle arbeiten konnten, zusammengefasst:

Tab. 1.2: Wellenbedingte Grenzen des Einsatzes der Arbeitsplattform und des Versorgungsschiffes zur Zulieferung der notwendigen Pfähle.

Tätigkeit	Max. Wellenhöhe	
	<i>Goliath</i>	Versorger <i>Maersk Finder</i>
Manövrieren / Schiffsbewegungen	1,5 m	1,5 m
Hebebewegung und Positionierung der Pfähle	1,0 m	-
Rammtätigkeit	1,5 m	-
Übergabe von Pfählen	1,0 m	1,0 m

Die *Noortruck* kann ihre Aufgaben bis zu einer signifikanten Wellenhöhe (H_s) von 2,0 m durchführen. Erst bei höheren Wellen oder bei Windgeschwindigkeiten von über 15 m/sec konnten weder eine

Auslegung/Einholung noch eine Vermessung oder ein Betrieb des Blasenschleiersystems durchgeführt werden.

B.4.3 Durchgeführte Auslegungsarten und Düsen Schlauchkonfigurationen

Ringförmiger (geschlossener) Blasenschleier (BBC 1, BBC 2)

In Abb. 1-18 ist die Verlegung eines ringförmigen Blasenschleiers am Beispiel der Auslegung am Fundament BW15 dargestellt. Es musste gewährleistet sein, dass der Blasenschleierring mindestens einen Sicherheitsabstand von 60 m (schwarzer Kreis) zum Mittelpunkt (Fundamentstandort) einhielt, damit eine nachträgliche Positionierung (Aufjacken) der Errichterplattform innerhalb des Düsen Schlauches gewährleistet werden konnte. Mithilfe eines Side-Scan-Sonars wurde die tatsächliche Lage (Dreiecke) eingemessen. Es zeigte sich, dass eine kreisförmige Verlegung mit einer Toleranz von wenigen Metern durchführbar war. Im Fall, dass der Blasenschleier innerhalb des 60 m Sicherheitsradius lag, musste der Düsen Schlauch wieder aufgenommen und neu verlegt werden. Die exakte Lage jeder Verlegung wurde vor der Ankunft des Errichterschiffes *Goliath* an dieses zur Abnahme verschickt.

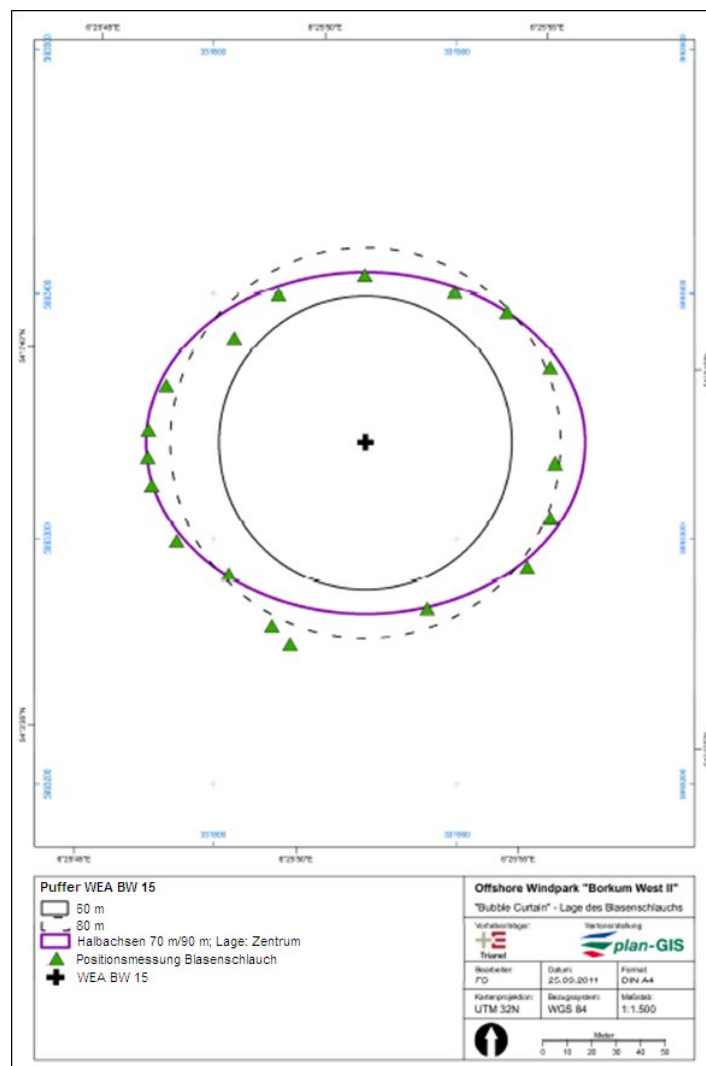


Abb. 1-18: Positionsmessung eines ringförmig am Meeresboden verlegten Blasenschleierschlauches (Düsen Schlauch) am Beispiel des Fundamentstandortes BW15. Die grünen Dreiecke zeigen die eingemessenen Lagepunkte des Düsen Schlauchs am Meeresboden.

Aufgrund von Experimenten im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde bei vier Fundamentstandorten von der kreisförmigen Verlegung des Blasenschleiers systematisch abgewichen (zweimalig halboffener linearer BBC; zweimalig halboffener doppelter BBC, vgl. Tab. 1.3, S. 51), die im Folgenden dargestellt sind.

Halboffener (linearer) Blasenschleier (Lin. BBC 1, Lin. BBC 2)

Zu Beginn der Rammarbeiten an den Fundamentstandorten BW01 und BW03 im September 2011 wurde etwa 400 m östlich der Errichterplattform *Goliath* ein einzelner linienförmiger Blasenschleier installiert. Die Länge des verwendeten Düsenschlauches betrug 440 m, wobei der Düsenschlauch in gerader Linie in Nord-Süd-Richtung ausgelegt wurde. Für eine solche Konfiguration, welche die Geräuschquelle nur einseitig abschirmt, hat sich die Bezeichnung „(halb-) offener Blasenschleier“ etabliert. Die Luft wurde nur am nördlichen Ende des Schlauchs von der *Noortruck* aus eingespeist. Die Messgeometrie ist in Abb. 1-19 skizziert. Für den Fundamentstandort BW01 wurde die Düsenschlauchkonfiguration 2 (Lin. BBC 2) und für den Fundamentstandort BW03 die Düsenschlauchkonfiguration 1 (Lin. BBC 1) verwendet.

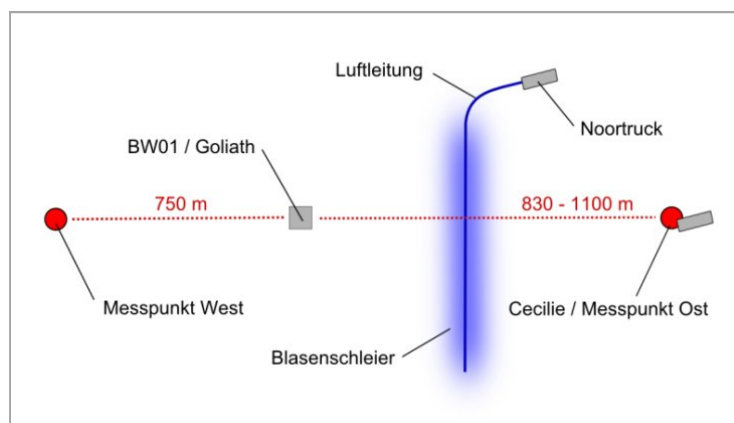


Abb. 1-19: Halboffener (linearer) Blasenschleier inklusive der Schallmessgeometrie beim Fundamentstandort BW01 während der Forschungsphase 1.

Halboffener (linearer) doppelter Blasenschleier (DBBC 2a, DBBC 2b)

Zusätzlich wurde an zwei Standorten während der Forschungsphase 2 im Februar und März 2012 ein linearer (halboffener) doppelter Blasenschleier mit der Düsenschlauchkonfiguration 2 (DBBC 2) zu Testzwecken ausgelegt. Am ersten Standort (BW24) wurde ein Schlauch von 560 m Länge ellipsenartig nördlich der Rammbaustelle ausgebracht (vgl. Abb. 1-20, S. 49), wobei die Nebenachse der Ellipse den Abstand des doppelten Blasenschleiers darstellt.

Am zweiten Standort (BW33) wurden zwei halbe Schläuche (jeweils ca. 280 m lang) parallel in einer halbkreisähnlichen Form nördlich der Rammbaustelle in einem definierten Abstand zueinander ausgelegt (siehe Abb. 1-21, S. 50).

Mit diesen beiden Verlegungsvarianten sollte die Wirkungsweise eines doppelten Blasenschleiers in Abhängigkeit vom Abstand der Schläuche zueinander untersucht werden. Dabei wurde einmal ein Abstand von ca. 10 m bis 20 m (DBBC 2a; 10-20 m entspricht ungefähr der einfachen Wassertiefe am Fundament BW33, siehe Abb. 1-21) und einmal ein Abstand von ca. 80 m (DBBC 2b; 80 m entspricht ungefähr der dreifachen Wassertiefe am Fundament BW24, siehe Abb. 1-20) zwischen den beiden Schläuchen getestet. Im ersten Fall vereinten sich die beiden aufsteigenden Blasenschleier in Richtung zur Wasseroberfläche zu einem an der Wasseroberfläche nahezu doppelt so breiten Blasenschleier. Im zweiten Fall wurden die beiden parallelen Blasenschleier so ausgelegt, dass diese vollständig getrennt waren, d.h. der Schall musste hier nacheinander zwei unabhängige einfache Blasenschleier passieren.

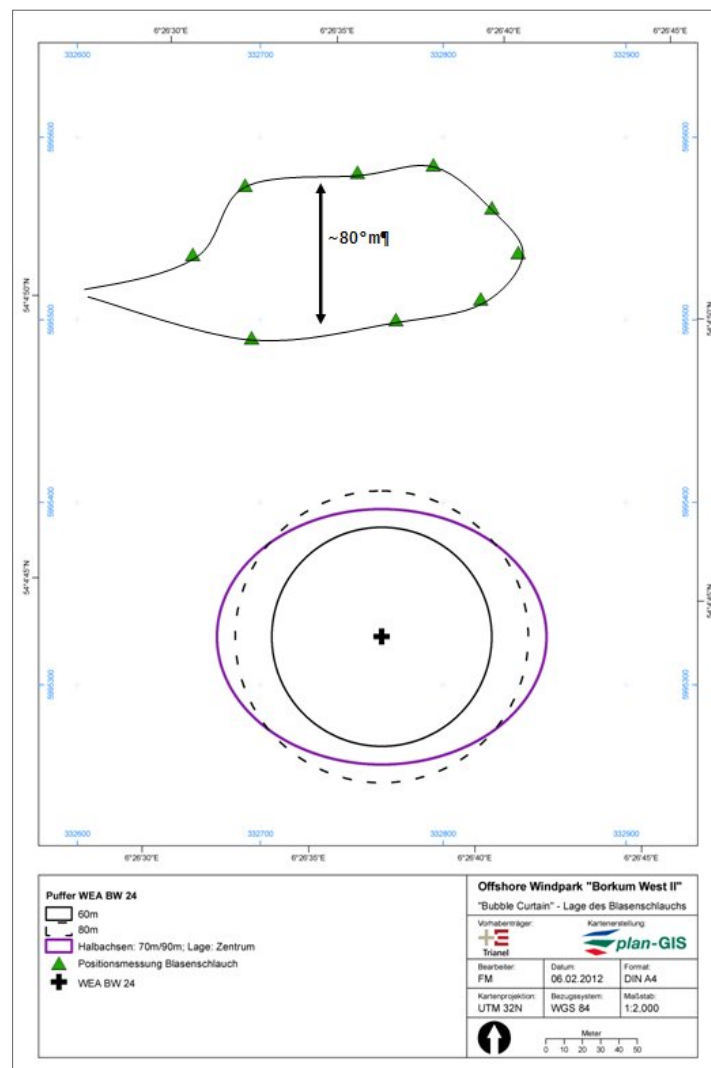


Abb. 1-20: Positionsmessung des am Meeresboden verlegten doppelten Blasenschleiers (ein Düschlauch elliptisch auf einer Seite der Rammbaustelle ausgelegt) beim Fundamentstandort BW24.

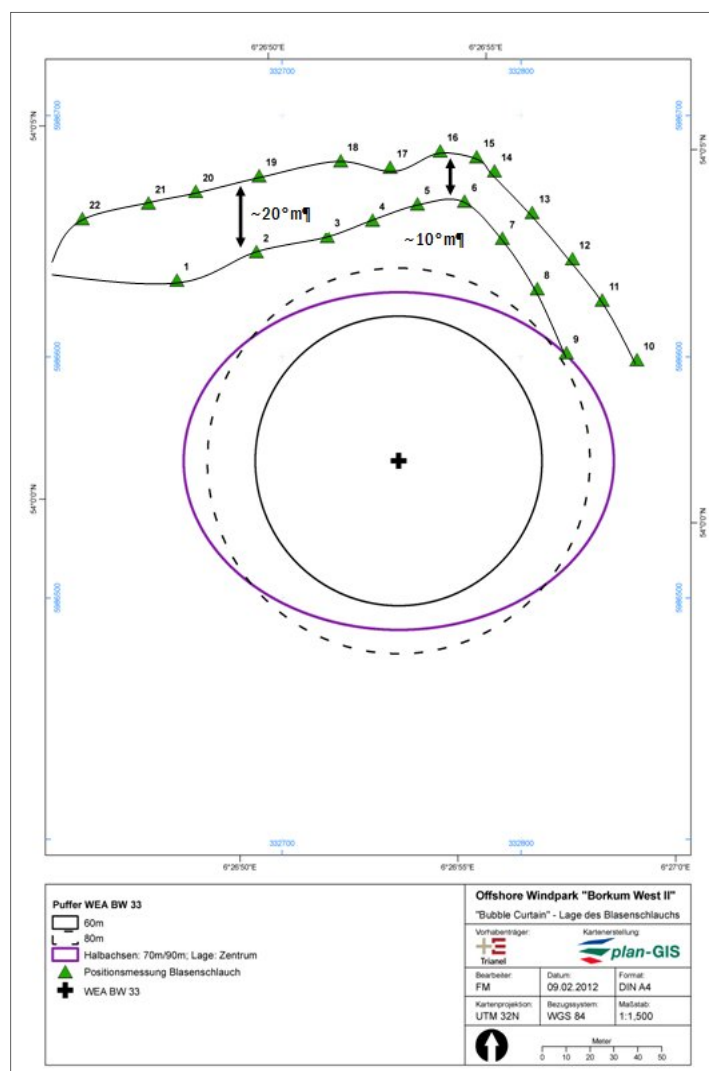


Abb. 1-21: Positionsmessung eines verlegten doppelten Blasenschleiers (zwei getrennte Düsen-schläuche mit je 280 m Länge) mit einem Abstand von ca. 10 m bis 20 m beim Fundamentstandort BW33.

Eingesetzte Blasenschleier-Systemkonfigurationen

In der folgenden Tabelle (Tab. 1.3) sind die Auslegungen und dazugehörigen Formen des Blasenschleiers für jeden Fundamentstandort während sämtlicher Rammaktivitäten im OWP Borkum West II zusammengefasst. Der Fall, dass kein Blasenschleier ausgelegt oder betrieben wurde, wird im Folgenden „Referenz“ genannt.

Tab. 1.3: Auslegungsart und Konfiguration des Blaseschleiers bei den verschiedenen Fundamentstandorten.

WEA	Datum	Blaseschleier (BBC)	Schlauchtyp	Art des BBC* ¹	Max. Anzahl Kompressoren	Luftmenge [m ³ /(min*m)]
BW01	03.09.11	Ja	2	Lin. BBC 2	4	0,0; 0,32 (Variation)
BW03	09.09.11	Ja	1	Lin. BBC 1	4	0,0; 0,32 (Variation)
BW46	16.09.11	Nein	-	-	-	-
BW47	23.09.11	Ja	2	BBC 2	4	0,32
BW15	28.09.11	Ja	1	BBC 1	4	0,15; 0,23; 0,32 (Variation)
BW14	30.09.11	Ja	2	BBC 2	2 bis 4	0,15; 0,23; 0,32 (Variation)
BW12	01.10.11	Ja	1	BBC 1	4	0,32
BW34	14.10.11	Ja	2	BBC 2	4	0,32
BW26	16.10.11	Ja	1	BBC 1	4	0,32
BW35	28.10.11	Nein	-	-	-	0,00 (Referenz)
BW49	29.10.11	Ja	1	BBC 1	4	0,07; 0,15; 0,23; 0,32 (Variation)
BW41	31.10.11	Nein	-	-	-	0,00 (Referenz)
BW42	02.11.11	Ja	1	BBC 1	4	0,32
BW43	04.11.11	Nein	-	-	-	0,00 (Referenz)
BW54	06.11.11	Ja	2	BBC 2	4	0,00; 0,07; 0,15; 0,23; 0,32 (Variation)
BW53	09.11.11	Ja	1	BBC 1	4	0,32
BW50	12.11.11	Ja	2	BBC 2	4	0,32
BW61	13.11.11	Ja	1	BBC 1	4	0,32
BW64	16.11.11	Ja	2	BBC 2	4	0,32
BW44	18.11.11	Ja	1	BBC 1	4	0,32
BW65	19.11.11	Ja	2	BBC 2	4	0,32
BW66	21.11.11	Ja	2	BBC 2	4	0,32
BW55	21.11.11	Ja	2	BBC 2	4	0,32
BW52	28.01.12	Ja	2	BBC 2	2 oder 3	0,15 oder 0,23
BW62	29.01.12	Ja	2	BBC 2	3 (?)	0,23 (?)
BW63	03.02.12	Nein	-	-	-	0,00 (Referenz)
BW51	04.02.12	Ja	2	BBC 2	2 oder 3	0,00; 0,07; 0,15; 0,23? (Variation)
BW48	06.02.12	Ja	2	BBC 2	3	0,07; 0,15; 0,23 (Variation)
BW24	09.02.12	Ja	2	DBBC 2b	4 (?)	0,00; 0,32
BW33	04.03.12	Ja	2	DBBC 2a	4	0,32
BW32	06.03.12	Nein	-	-	-	0,00 (Referenz)
BW31	14.03.12	Nein	-	-	-	0,00 (Referenz)
BW40	16.03.12	Nein	-	-	-	0,00 (Referenz)
BW36	17.03.12	Nein	-	-	-	0,00 (Referenz)
BW23	21.03.12	Ja	2	BBC 2	3 (?)	0,23
BW13	23.03.12	Ja	2	BBC 2	3 (?)	0,23
BW25	24.03.12	Ja	2	BBC 2	3 (?)	0,23
BW02	25.03.12	Ja	2	BBC 2	4	0,32
BW37	27.03.12	Ja	2	BBC 2	4	0,32
BW04	28.03.12	Ja	2	BBC 2	4	0,32

*¹ Lin. BBC 1, Lin. BBC 2: halboffener linearer Blaseschleier; BBC 1/BBC 2: – ringförmiger geschlossener Blaseschleier des Typs 1 oder 2; DBBC 2a und DBBC 2b: halboffener doppelter Blaseschleier.

B.5 Erfahrungen im Umgang mit dem eingesetzten Blasenschleiersystem

B.5.1 Allgemeine Handhabung

Im Unterschied zu Anwendungstests eines Blasenschleiersystems in der Ostsee spielen in der Nordsee beim OWP Borkum West II die starken Strömungswechsel eine große Rolle beim Auslegen und Betrieb des Blasenschleiers. Hier musste sich die Navigation der *Noortruck* beim Verlegen des Düsenschleiers sehr stark den gerade vorherrschenden Strömungen anpassen, damit ein kreisförmiges Verlegen des Düsenschlauches mit dem richtigen Abstand rund um die geplante Baustelle gelang. Ebenfalls musste ein zweiter Anker beim Betrieb des Blasenschleiers verwendet werden, damit die Position des Verlegeschiffes gehalten werden konnte.

Zudem zeigte sich, dass ein mehrmaliges Trainieren sämtlicher Arbeitsabläufe unter Offshore-Bedingungen (Crew-Training) zwingend erforderlich ist.

Die Markierungsbojen ermöglichten ein schnelles Auffinden der im pre-laying-Verfahren ausgelegten Düsenschläuche, so dass diese rasch an die Luftversorgungsschläuche angeschlossen werden konnten.

Im Verlauf des gesamten Bauvorhabens gingen dreimal die Markierungsbojen des Düsenschlauches verloren, dies geschah vermutlich aufgrund von Sturmereignissen zwischen Auslegung und geplantem Anschluss und Betrieb des Blasenschleiers. Es kann jedoch auch nicht ausgeschlossen werden, dass die Markierungsbojen von einem Bauschiff überfahren wurden. Das System der Markierungsbojen bedürfen einer Überarbeitung (z.B. größer, Radarreflektoren, Beleuchtung), um beides in Zukunft weitgehend auszuschließen.

B.5.2 Durchschnittliche Verlege- und Bergezeiten des Blasenschleiers

Die Erfahrungen im Baubetrieb zeigten, dass für die Verlege- bzw. Bergungsarbeiten eines 560 m langen Düsenschlauches mit Vor- und Nachbereitung insgesamt ca. 5,5 Stunden benötigt werden. Hierbei nehmen die Verlegung bzw. Bergung des Düsenschlauchs jeweils etwa 1,5 Stunden in Anspruch. Das Vermessen des verlegten Schlauches sowie der Anschluss bzw. das spätere Lösen der Luftversorgungsschläuche (Zuluftschläuche) an den Düsenschlauch dauert insgesamt nochmals 4 Stunden.

Die Verlegeform des Blasenschleiers (halboffener oder geschlossener ringförmiger BBC) hat keinen Einfluss auf die o.g. Verlegezeit. Lediglich beim halboffenen doppelten Blasenschleier am Fundamentstandort BW 33, bei dem zwei getrennte Düsenschläuche nacheinander ausgelegt wurden, war der notwendige Zeitaufwand entsprechend größer.

B.5.3 Wetterbedingte Restriktionen

Der Große Blasenschleier konnte im Rahmen der Tests (Ostsee) und im laufenden Baubetrieb (Borkum West II) bis zu einer signifikanten Wellenhöhe (H_s) von 2,0 m verlegt und betrieben werden. Erst bei höheren Wellen oder bei Windgeschwindigkeiten von über 15 m/s konnten weder eine Auslegung/Einholung noch eine Vermessung oder ein Betrieb des Blasenschleiersystems durchgeführt werden. Somit unterliegt das hier getestete Blasenschleiersystem geringeren wetterbedingten Restriktionen als die in diesem Projekt eingesetzte Errichterplattform (vgl. Tab. 1.2, S. 46) sowie das Versorgerschiff, welches die Errichterplattform mit Pfählen und weiteren notwendigen Materialien versorgt, so dass keine zeitlichen Verzögerungen durch den Blasenschleier auftraten.

B.5.4 Lebensdauer der einzelnen Komponenten des BBC

Abschätzung der Lebensdauer der Düsenschläuche

Durch die anfänglich noch ungeübte Handhabung und die starke Beanspruchung des Düsen Schlauches BBC 1 – auch aufgrund der vorhergehenden Tests in der Ostsee – musste ein Schlauch von einer Länge von 560 m im Frühjahr 2012 ausgetauscht werden. Der Schlauch wies Verschleißerscheinungen auf. Die bisherigen Erfahrungen haben gezeigt, dass man einen Düsen Schlauch etwa 30mal einsetzen kann, bevor ein mindestens abschnittsweiser Austausch von Teilsegmenten des Düsen Schlauches notwendig ist.

Bei Auftreten von kleineren Schäden können diese in der Regel an Bord des Verlegeschiffes während der Einholung des Düsen Schlauches erfolgen (z.B. defekte Stahlmanschette oder gerissene Kette).

Abschätzung der Lebensdauer der Ballastkette

Im Rahmen des Projektes Borkum West II musste keine Ballastkette ausgewechselt werden. Daher kann die Lebensdauer dieser Komponente nur geschätzt werden. Die Firma HYDROTECHNIK Lübeck GmbH geht davon aus, dass eine Ballastkette ca. 60mal eingesetzt werden kann.

Abschätzung der Lebensdauer der Luftzufuhrschläuche

Im Rahmen des Projektes Borkum West II musste kein Luftversorgungsschlauch ausgewechselt werden. Es wird aber davon ausgegangen, dass die Luftversorgungsschläuche mindestens 80mal eingesetzt werden können, bevor ein Austausch notwendig wird.

Ermittlung der Lebensdauer der Winden

Auch bei den Winden trat im Rahmen des Projektes Borkum West II kein Schaden auf. Aufgrund der auf die Winden wirkenden Belastungen, kann man aber davon ausgehen, dass ein Austausch etwa alle 80 Einsätze nötig sein könnte.

Lebensdauer der Kompressoren

Im Rahmen des Projektes Borkum West II musste kein Kompressor ausgetauscht werden. Es lässt sich daher allein aufgrund der in diesem Projekt gesammelten Erfahrungen keine Aussage hinsichtlich der Lebensdauer der Kompressoren treffen.

Durch die sehr geringen Temperaturen im Februar und März 2012 mussten allerdings die Dieselfilter in regelmäßigen Intervallen getauscht werden.

Eine regelmäßige Kontrolle der Kompressoren vor und während jedes Betriebes (ca. alle 30 Min.) erwies sich als notwendig.

Lebensdauer des Power Packs

Im Rahmen des Projektes Borkum West II musste kein Power Pack ausgetauscht werden. Es lässt sich daher keine Aussage hinsichtlich der Lebensdauer des Power Packs treffen.

B.6 Kosten des Großen Blasenschleiers

Die Kosten der Schiffsmobilisierung sind abhängig von der Standardausrüstung des Schiffes. In der Regel muss das Schiff extra für den begleitenden Blasenschleiereinsatz bei Rammarbeiten ausgestattet umgebaut werden. Hierfür ist einmalig eine kleinere bis mittlere sechsstellige Summe anzusetzen.

Die Kosten für die Beschaffung und Installation der Kompressoren, Winden und Power Packs ergeben eine mittlere fünfstellige Summe.

Der Zeitbedarf für das Verlegen und das Heben des Großen Blasenschleiers beträgt pro Rammbaustelle insgesamt 5,5 Stunden. Der gesamte Zeitbedarf für das Betreiben des Großen Blasenschleiers ist abhängig von der Dauer der Rammarbeiten. Die Dauer der Rammarbeiten bestimmen die Kosten für die Bereitstellung der Komponenten (Personal, Treibstoff, Schiffskosten etc.). Laufende Kosten aufgrund des Materialverschleißes beliefen sich in den Untersuchungen auf

eine kleinere vierstellige Summe und sind aufgrund der niedrigen Summe als vernachlässigbar zu betrachten.

Eine große Rolle hinsichtlich der Gesamtkosten spielt das Wetter. Durch eine längere Schlechtwetterperiode können sich die Gesamtkosten für den Großen Blasenschleier stark erhöhen, da die meisten Posten (z.B. Schiffscharter, Personalkosten etc.) weiter laufen, auch wenn nicht gerammt werden kann und somit auch der Blasenschleier nicht zum Einsatz kommt.

Die Gesamtkosten für den Blasenschleier in diesem Projekt auf eine kleinere bis mittlere siebenstellige Summe. Wie sich diese Kosten auf die verschiedenen Posten verteilen, ist Abb. 1-22 zu entnehmen.

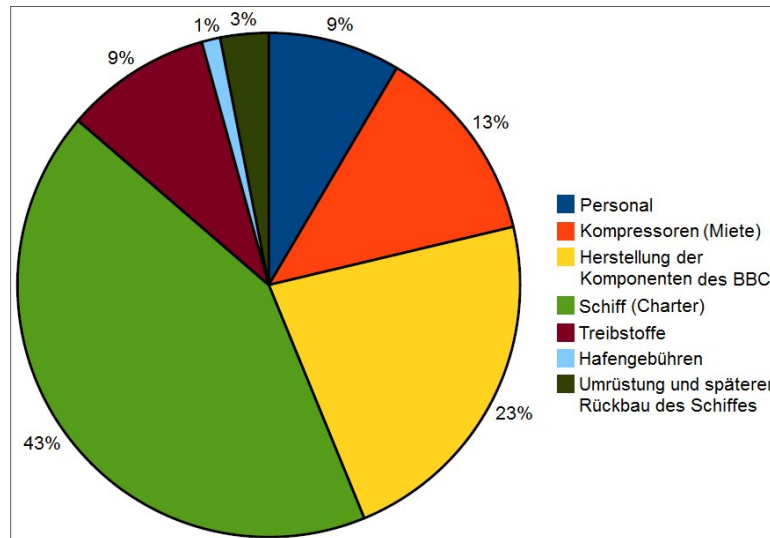


Abb. 1-22: Kostenanteile der verschiedenen Posten für den Einsatz des Großen Blasenschleiers beim OWP Borkum West II.

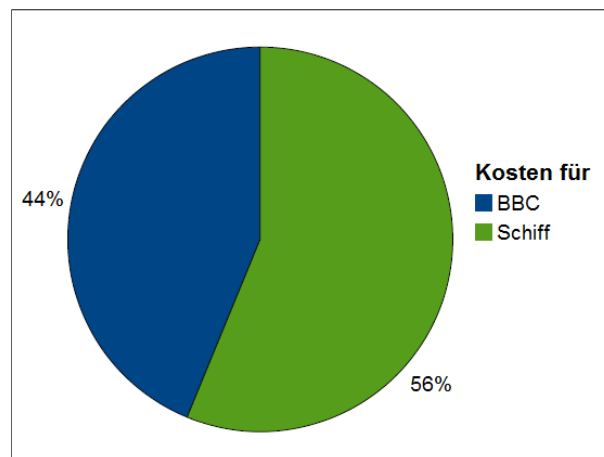


Abb. 1-23: Anteile der Schiffskosten und der Kosten für das Blasenschleiersystem im direkten Vergleich. Die Kosten für den Blasenschleier setzen sich aus Herstellungskosten, Miete für die Kompressoren und Personalkosten zusammen (vgl. Abb. 1.22). Die Treibstoffkosten werden dagegen komplett den Schiffskosten zugeordnet, auch wenn der Treibstoff zusätzlich zum Antreiben der Kompressoren des BBC genutzt wurde.

B.7 Diskussion

B.7.1 Optimierungspotenzial des Großen Blasenschleiers aus technischer Sicht

Die Verlegung eines „flexiblen“ auftrommelbaren Düsenschlauches im pre-laying-Verfahren (siehe Kapitel B.4.2) hat sich in diesem Projekt bewährt. Es zeigte sich allerdings auch, dass die Einsetzbarkeit des Düsenschlauches aufgrund von Verschleiß zeitlich begrenzt ist und es z.T. zu kleineren Schäden am Düsenschlauch während der Auslegung und Einholung kam. Diese Schäden konnten in der Regel an Bord des Verlegeschiffes behoben werden. Es besteht jedoch noch Optimierungsbedarf bei der Wahl einzelner Materialkomponenten (z.B. des Düsenschlauchmaterials), um die Einsetzbarkeit und Haltbarkeit zu verbessern.

Der Vorteil der Auslegung des Düsenschlauches vor Positionierung der Errichterplattform (pre-laying-Verfahren) ist, dass dieser Arbeitsschritt ohne eine zeitliche Verzögerung in den normalen Bauablauf eingebunden werden kann und dem Errichterschiff vor dem Eintreffen die genaue Lage des Blasenschleiers bekannt ist. Damit wird die Möglichkeit einer „falschen Auslegung“ (Nicht-Einhaltung von Mindestabständen) oder von Beschädigungen der beteiligten Schiffe bzw. des Blasenschleiers minimiert. Ein Nachteil des pre-laying-Verfahrens ist, dass bei zeitlichen Verzögerungen des Bauablaufs durch schlechtes Wetter die Markierungsbojen zum Teil beschädigt oder abgerissen werden können, so dass eine Aufnahme der Blasenschleieranschlüsse und der damit verbundene Betrieb des Blasenschleiers nicht immer gewährleistet werden kann. Es ist noch technischer Optimierungsbedarf in der Sicherung dieser Markierungspunkte notwendig.

Zusätzlich zeigte sich, dass bei schlammigen Sedimenten oder sehr weichen Sanden die Einmessung der Lage des Blasenschleierringes am Meeresboden durch Side-Scan-Sonar zum Teil Schwierigkeiten bereiten kann, da der Düsenschlauch nahezu vollständig im Sediment versinken kann. Auch hier sind noch technische Verbesserungen notwendig, um diesen Arbeitsschritt unter Offshore-Bedingungen praktikabler zu gestalten.

Als mögliches Problem bei der Auslegung des Blasenschleiers bei künftigen Bauvorhaben werden die immer größer werdenden Errichterschiffe und die damit verbundenen wachsenden Anforderungen an den Großen Blasenschleier gesehen. Unter diesen Umständen müssten die Schlauchlängen erheblich verlängert werden, so dass sich das Risiko von Verdrehungen und Abknickungen des Düsenschlauches beim Verlegen deutlich erhöhen könnte. Zudem würden die Anforderungen an Material, Verlegeschiff und Besatzung damit erheblich steigen. So ist ggfs. der Einsatz von biegesteiferen Düsenschläuchen notwendig. Außerdem könnte eine Auslegung des Düsenschlauches unter Druck (Zugabe von Druckluft) das Risiko einer möglichen Verdrehung minimieren.

Hinzu kommt, dass mit zunehmender Schlauchlänge zusätzliche oder leistungsfähigere Kompressoren eingesetzt werden müssten, um die notwendige Luftmenge zu produzieren (vgl. Tab. 1.1, S. 41).

Ebenfalls kann auf der bisherigen Erfahrungslage nicht beurteilt werden, bis zu welcher Wassertiefe und bis zu welcher Schlauchlänge ein Blasenschleiersystem zuverlässig ausgelegt und betrieben werden kann.

Aufgrund der Bauart wird der eingesetzte Blasenschleier in der Regel von kleinen bis mittleren Schiffen ausgebracht und betrieben, deren Einsatzgrenzen bei einer signifikanten Wellenhöhe (H_s) von ca. 2,0 m liegen. In Zukunft werden Rammarbeiten aber wahrscheinlich von größeren Errichterschiffen durchgeführt, die in der Lage sind, auch noch bei signifikanten Wellenhöhen von ggfs. $\geq 3,0$ m Rammungen durchzuführen. Es ist daher zwingend notwendig, die Grenzen der Verlegung (Auslegung und Einholung) und des Betriebs des Blasenschleiers hinsichtlich der Wetterbedingungen, Wassertiefen und Schlauchlängen unter Offshore-Bedingungen zu ermitteln, sowie die Verlegemethode und die Materialkomponenten des Blasenschleiers auf die jeweiligen Rahmenbedingungen des Bauvorhabens abzustimmen und zu optimieren.

Des Weiteren sind Strategien und Methoden zu entwickeln, um Probleme bei den technischen Teilkomponenten (z.B. Ausfall von Kompressoren, Abriss von Markierungsbojen) zu minimieren oder ggfs. kompensieren zu können. Hierzu könnten unter Umständen Ersatzsysteme notwendig werden.

B.7.2 Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Projekte

Da die Rammarbeiten sehr von der Art des Errichterschiffes wie auch der Art der Fundamentstrukturen der Windkraftanlage abhängig sind, ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus diesem Projekt auf andere Projekte nicht ohne weiteres möglich.

So ist zu vermuten, dass die Auslegung sämtlicher Teilkomponenten für jeden zukünftigen Einsatz individuell angepasst werden muss. Dies gilt insbesondere für die Düsenschlauchlänge, das Material der Düsenschläuche, die Anzahl der Düsenschläuche, die Auslegung von einem einfachen oder doppelten Blasenschleier und die notwendigen Gesamtluftmenge. Zudem ist mit der jeweiligen bauausführenden Firma zu klären, ob der Düsenschlauch im pre-laying-Verfahren oder post-laying-Verfahren ausgelegt werden kann bzw. darf. Aus diesen Gründen kann es auch keine standardisierte Methode der Auslegung des Systems Großer Blasenschleier geben: Jedes neue Projekt stellt seine eigenen Herausforderungen hinsichtlich des Arbeitsablaufes. Daher muss in jedem Projekt mit einer gewissen Einarbeitungszeit und Lernkurve gerechnet werden, bis die Arbeitsabläufe optimiert sind. Gleiches gilt auch für den Fall einer grundlegenden Konfigurationsänderung des Blasenschleiers.

B.8 Technisches Fazit

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ergaben sich aus dem Einsatz des Großen Blasenschleiers im laufenden Baubetrieb im Projekt Borkum West II folgende Resultate:

- Es wurden unterschiedliche Materialien und Verlegemethoden für den Großen Blasenschleier getestet, so dass dieses Schallminderungssystem unter Offshore-Bedingungen in den realen Errichterprozess eingebunden werden konnte.
- Die Materialien wurden Belastungstests unterzogen und die wetterbedingten Einsatzgrenzen dieser Systemkonfiguration des Blasenschleiers ermittelt. Es konnte gezeigt werden, dass die verwendeten Materialien für einen Serieneinsatz hinsichtlich Wiederverwendbarkeit und Verschleiß geeignet sind.
- Die Verwendung von auftrommelbaren Düsenschlauchsystemen, für die Auslegung des Großen Blasenschleiers hat sich aus technischer und zeitlicher Sicht bewährt. Die Auslegung des Blasenschleiertringes im pre-laying-Verfahren (d.h. Auslegung des Düsenschlauchringes, bevor das Errichterschiff die zu rammende Fundamentposition anfährt, und das nachträgliche Anschließen und der Betrieb des Großen Blasenschleiers nach erfolgter Positionierung des Errichterschiffes) haben sich in diesem Projekt ebenfalls bewährt. Hierdurch ergaben sich keine zeitlichen Verzögerungen im realen Errichterprozess durch den Einsatz des Großen Blasenschleiers.
- Die Testausbringungen in der Ostsee wie auch der Einsatz des Großen Blasenschleiers im OWP Borkum West II haben aufgezeigt, dass kleinere Schäden an den Düsenschläuchen schnell und problemlos direkt beim Einholen des Blasenschleiers repariert werden können.
- Der Große Blasenschleier konnte im Rahmen der Tests und im laufenden Baubetrieb bis zu einer signifikanten Wellenhöhe (H_s) von 2,0 m verlegt und betrieben werden. Erst bei Windgeschwindigkeiten von über 15 m/s wurden diese Bedingungen erreicht und die Arbeiten am Blasenschleier aus Sicherheitsgründen eingestellt. Diese wetterbedingten Restriktionen lagen oberhalb der Restriktionen der Errichterplattform, die schon bei geringeren Wellenhöhen ihre Arbeiten einstellen musste.
- Der Große Blasenschleier konnte bei 31 von 40 Fundamenten ohne Zeitverzögerung in den realen Errichterprozess eingebunden werden. Es zeigte sich jedoch auch, dass in fünf Fällen

aufgrund von technischen Problemen (z.B. Abriss der Zuluftschläuche oder Markierungsbojen) und in vier Fällen aufgrund von zeitlichen Restriktionen der Große Blasenschleier nicht eingesetzt werden konnte.

- Unter realen Offshore-Bedingungen sind Verlegung, Einmessung und Betrieb des Blasenschleiers nur durch eine erfahrene und trainierte Schiffscrew sowie mit einem speziell ausgerüsteten Blasenschleier-Verlegeschiff zu realisieren. Bei jeder Änderung in der Verlegungstechnik (z.B. doppelter Blasenschleier), von Teilkomponenten (Austausch von Markierungsbojen oder Schläuchen) bedarf es mehrfacher Testläufe, um den Blasenschleier zuverlässig einsetzen zu können (Lernkurve).
- Die vor Projektbeginn erarbeiteten Anforderungen des Gesundheitsschutzes, der Arbeitssicherheit und des Umweltmanagements (Health, Safety and Environment [HSE]-Anforderungen) haben sich bewährt. Im Zuge des häufigen Einsatzes des Großen Blasenschleiers kam es in keinem Fall zu Personenschäden oder Umweltverschmutzungen.
- Es sind technische Verbesserungen für eine sichere, praktikable und zuverlässige Anwendung des Großen Blasenschleiers hinsichtlich der Materialauswahl von Teilkomponenten (z.B. Steifigkeit von Düsenschläuchen) und der Auslegungsverfahren (z.B. pre-laying-Verfahren mit oder ohne Zugabe von Druckluft; Wiederauffindbarkeit von Markierungsbojen) notwendig.
- Es konnten keine Belastungsgrenzen (Stichwort: Lebensdauer) für folgende Teilkomponenten ermittelt werden: Winden, Power Pack, Zuluftschläuche, Ballastmanschetten mit Ringen und Kette.
- Der wiederholte Einsatz des Blasenschleiersystems zeigte, dass eine regelmäßige Kontrolle der eingesetzten Kompressoren (Drehzahl und Gesamtbetriebsdruck am Verteilerventil) notwendig ist.
- Eine Übertragung der technischen Auslegung des Blasenschleiersystems bzw. die Bestimmung einer optimalen Konfiguration des Blasenschleiersystems für zukünftige Anwendungen ist nach derzeitigem Kenntnisstand nicht möglich. Es fehlen u.a. Erkenntnisse über mögliche physikalische und technische Grenzen im Hinblick auf Wassertiefe, verwendete Luftmenge, Düsenschlauchlänge und Betriebsdruck der Druckluft.
- Die Auslegung eines halboffenen doppelten Blasenschleiers hat nach technischen Gesichtspunkten gut funktioniert.

C MESSKONZEPT UND DURCHFÜHRUNG

C.1.1 Versuchsplanung und Zeitraum

Die Hydroschallmessungen innerhalb dieses Forschungsvorhabens wurden in folgende zwei Forschungsphasen unterteilt:

- Phase 1: Messung der Einflussparameter „Düsenschlauchkonfiguration“ und verwendete „Luftmenge“ auf die Wirksamkeit (Schallreduktion) der Schallminderungsmaßnahme Großer Blasenschleier an 17 Fundamenten bzw. 51 Pfählen im Zeitraum September bis November 2011.
- Phase 2: Messung der schallmindernden Wirkung bei Verwendung von zwei hintereinander geschalteten Blasenschleiern (doppelter linearer Blasenschleier) an weiteren sechs Fundamenten, also 18 Pfählen, im Zeitraum Februar bis März 2012. Dies geschah vor dem Hintergrund der Annahme einer erhöhten Schallminderung bei Verwendung eines doppelten Blasenschleiers.

In beiden Forschungsphasen wurde die räumlich-zeitliche Reaktion der Schweinswale auf den durch die Rammarbeiten emittierten Unterwasserschall mit autonomen Data-Loggern – sogenannten C-PODs – registriert (vgl. Kapitel E, S. 139 ff).

C.1.2 Messkonzept und verwendete Messgeräte

Für das Forschungsvorhaben wurde an insgesamt 23 Fundamenten jeweils eine Messposition in einem Abstand von 750 m und 1.500 m zum jeweiligen Fundament innerhalb des Baufeldes sowie an einem festen Punkt nahe des Baufeldes in einem Abstand von mehreren hundert Metern bis wenigen Kilometern zum Baufeld mit Hydroschallmessgeräten ausgestattet. Zusätzlich wurden an mehreren dieser insgesamt 23 Fundamente bis zu drei weitere Hydroschallmessgeräte in einem Umkreis von 400 m bis 1.500 m zum jeweiligen Fundamentstandort ausgelegt. Diese Messsysteme dienen der Weiterentwicklung und Evaluierung des eingesetzten Schallminderungssystems.

Im Rahmen der Bautätigkeiten zum OWP Borkum West II (BW II) wurden zusätzlich die Hydroschallimmissionen jeweils in einem Abstand von 750 m und 1.500 m vom Fundament und an zwei festen Messpositionen außerhalb des Baufeldes im Rahmen des begleitenden Baumonitorings bzw. der Effizienzkontrolle des eingesetzten Schallminderungssystems an allen Fundamenten gemessen. Dies geschah nach Vorgabe des BSH (Genehmigungsbescheid inkl. NB 14) und in Anlehnung an die Messvorschrift für Unterwasserschallmessungen des BSH (2011) sowie das Standarduntersuchungskonzept (StUK3 2007) des BSH.

In Abstimmung zwischen den Projektpartnern und dem zukünftigen OWP Betreiber (Trianel) können sämtliche Messdaten aus dem Baumonitoring bzw. der Effizienzkontrolle innerhalb dieses Forschungsvorhabens kostenneutral verwendet werden. Damit erhöht sich die Datenbasis von 23 Fundamenten erheblich. Zusätzlich kann auch die Wirksamkeit des eingesetzten Schallminderungssystems in großer Entfernung (mehrere Kilometer) zum Rammort untersucht werden.

Sämtliche eingesetzten Messsysteme zur Aufzeichnung des Hydroschalls sind autonome abgesetzte Messsysteme, die von der itap GmbH entwickelt wurden. In Abb. 1-24 ist ein Foto eines autonomen abgesetzten Messsystems dargestellt. Um keine zusätzlichen Behinderungen für Baufahrzeuge zu schaffen, wurden für die Messgeräte in 750 m, 1.500 m und an den zwei festen Messpositionen außerhalb des Baufeldes in den Forschungsphasen 1 und 2 sowie in dem Baumonitoring die Verankerungen der von BioConsult SH ausgelegten Schweinswal-Klickdetektoren (C-PODs) mit genutzt. Ein solches Vorgehen hat sich bei Schallmessungen beim Offshore Windpark alpha ventus und anderen Forschungsprojekten bewährt. Für die weiteren bis zu drei Hydroschallmessgeräte innerhalb des Baufeldes während der Forschungsphasen 1 und 2 wurden komplett autarke

Messgeräte inkl. Verankerungen und Markierungen an der Wasseroberfläche verwendet (Abb. 1-24, Foto). In Abb. 1-24 (Grafik) ist die Verankerung der kombinierten Messsysteme für Hydroschall und Schweinswal-Klickdetektoren in einer schematischen Skizze dargestellt.



Abb. 1-24: Links: Autonomes Hydroschallmessgerät inkl. eigener Verankerung. Von links nach rechts: Auftriebskörper für Hydrophon, Hydrophon mit Schutzkorb, Gehäuse mit Messelektronik (liegt beim Einsatz am Meeresboden), zusätzlicher Anker, Markierungsboje. Rechts: Verankerung der C-PODs und der Hydroschallmessgeräte. Beim Einsatz an C-POD-Stationen entfällt die eigene Verankerung an den Hydroschallmessgeräten.

Die abgesetzten Messsysteme besitzen jeweils ein Hydrophon (Unterwassermikrofon), das StUK3-konform in etwa 2,0 m bis 4,0 m Höhe über dem Meeresboden (Sediment) positioniert wird. Diese Hydrophonhöhe wurde bei sämtlichen Messungen innerhalb des Forschungsvorhabens verwendet, um eine Vergleichbarkeit aller Messdaten (Forschungsvorhaben und Effizienzkontrolle) zu gewährleisten.

Um Verwechslungen zu vermeiden, sind die C-POD Stationen und die Hydroschallmesssysteme mit denselben Messpositions-Kürzeln versehen. Tab. 1.4 zeigt eine Auflistung der Messpositionen inkl. Bezeichnung und Koordinaten.

Tab. 1.4: Verwendete Messpositionen der Schweinswaldetektoren (C-PODs) und Hydroschallmesssysteme innerhalb des Forschungsvorhabens und der Effizienzkontrolle.

lfde Nr.	Bezeichnung	Koordinaten		C-POD	Hydroschall
		Longitude	Latitude		
1	POD_mob1	750 / 1.500 m Entfernung vom jeweiligen Pfahl		ü ¹	ü
2	POD_mob2			ü ¹	ü
3	bwf_1	6°26,770	54°03,210	ü	ü
4	bwf_2	6°23,950	54°02,490	ü	—
5	bwf_3	6°24,100	54°00,700	ü	—
6	bwf_4	6°18,900	53°56,200	ü	ü ²
7	bwf_5	6°17,550	53°53,840	ü	—
8	bwf_6	6°15,730	53°51,460	ü	ü ²
9	MEG1	6°10,712	54°0,108	ü	—
10	BW2	6°29,37	54°4,922	ü	—
11	02_ITAW	6°13,708	53°58,355	ü	—
12	04_ITAW	6°29,013	54°3,464	ü	—
13	05_ITAW	6°28,832	53°59,741	ü	—
14	10_ITAW	6°36,325	54°3,465	ü	—
15	19_ITAW	6°44,055	54°1,31	ü	—
16	21_ITAW	6°58,725	54°2,552	ü	—
17	T1	6°35,171	54°0,926	ü	—
18	T2	6°36,197	54°1,948	ü	—
19	T3	6°37,809	54°0,25	ü	—
20	T4	6°35,026	54°0,224	ü	—
21	T5	6°33,894	54°0,4	ü	—
22	T6	6°38,698	54°0,397	ü	—
23	T7	6°36,203	53°59,151	ü	—
24	T8	6°36,274	54°5,343	ü	—
25	T9	6°20,9	54°7,48	ü	—
26	T10	6°21,406	53°59,28	ü	—
27	T11	6°30,72	53°52,8	ü	—
28	T12	6°29,823	53°57,908	ü	—

¹ Diese C-PODs waren nicht Teil des hier vorgestellten Forschungsprojektes.

² Es wurde für das FFH-Gebiet entweder an dem festen POD „bwf_4“ (lfd. Nr. = 6) oder an dem POD „bwf_6“ (lfd. Nr. = 8) ein Messsystem für Unterwasserschall verwendet.

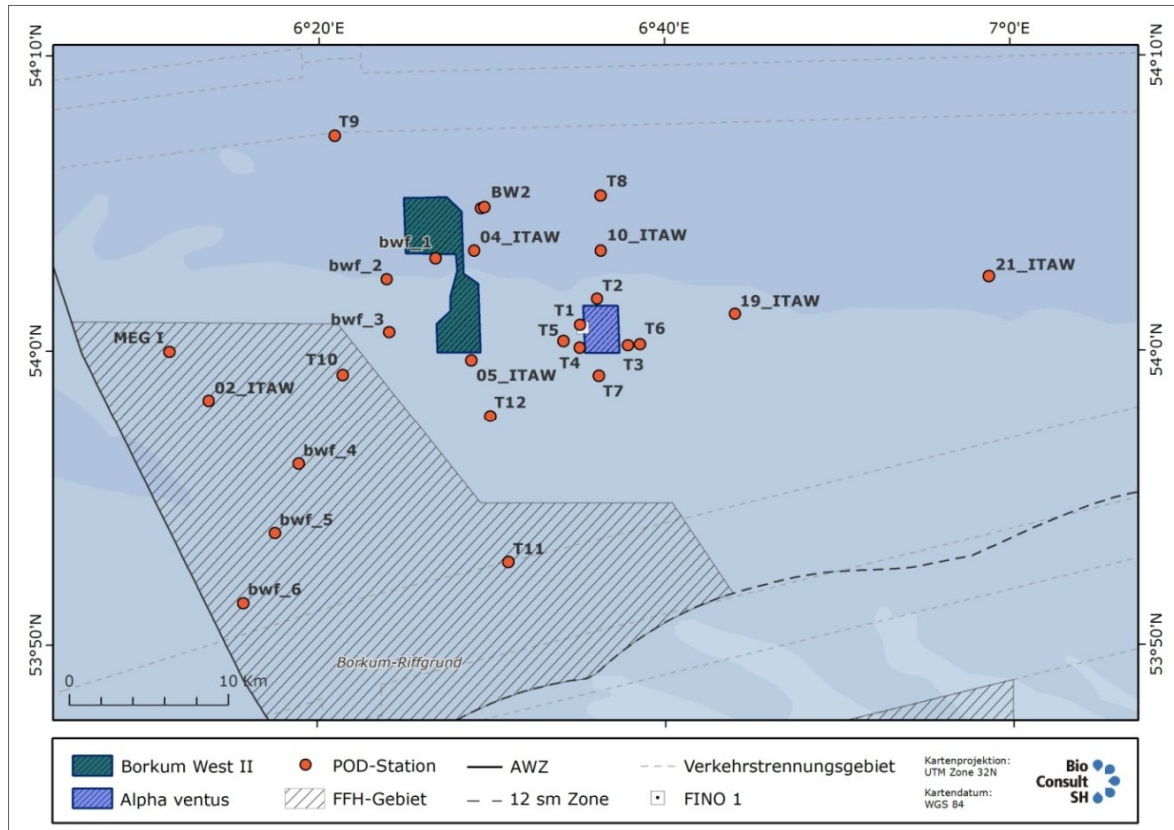


Abb. 1-25: Darstellung der festen Messpositionen der Schweinswalklickdetektoren (C-PODs) und Hydroschallmesssysteme für das Forschungsvorhaben HYDROSCHALL OFF BW II und das Baumonitoring (Effizienzkontrolle) zum Bau des OWPs Borkum West II. Die Bezeichnungen und Koordinaten der Messpositionen sowie deren Belegung mit C-PODs und Hydrophonen können Tab. 1.4 entnommen werden.

Tab. 1.5: Auflistung der für die Hydroschallmessungen eingesetzten Geräte.

Gerät	Hersteller	Wichtige techn. Daten / Anzahl	Bemerkung
Autonomes Unterwasserschallmesssystem	itap	Frequenzbereich: 10 Hz- 20 kHz Aufnahmekapazität: ca. 50 h Anzahl: 2 x 4 Stk. In Forschungsphase 1 & 2 zusätzlich 3 Stk.	
Hydrophon TC 4033	RESON	Empfindlichkeit: ca. 0,5 pC/Pa Anzahl: 2 x 3 Stk. In Forschungsphase 1 & 2 zusätzlich 3 Stk.	Für Messungen an den mobilen PODs und POD1 (bwf1)
Hydrophon B&K 8106	Bruel & Kjær	Empfindlichkeit: ca. 2 mV/Pa Anzahl: 2 x 1 Stk.	Für Messungen im FFH-Gebiet
Leistungsverstärker	itap	0,1 mV/pC	In Verbindung mit den Hydrophonen der Fa. RESON
Druckkammer	itap	80 bis 160 Hz, 140 – 155 dB re 1µPa einstellbar	Kalibrierung von Hydrophonen und Messsystemen im Labor
Mikrofon-Kalibrator 4231	Bruel & Kjær		
Mikrofon 4189 und Vorverstärker 2671 als Referenz in Druckkammer	Bruel & Kjær		
Signal Analyzer 35670a	Hewlett-Packard		

In Tab. 1.5 sind die eingesetzten Geräte für die Hydroschallmessungen zusammengefasst. Die eingesetzten Hydroschallmesssysteme zeichneten die Zeitsignale („Tonbandaufnahmen“) der Unterwassergeräusche (Hydroschall) eigenständig für vier bis sechs Wochen im MP3-Format ($f_s = 44,1$ kHz) auf. Anschließend mussten die Systeme ausgetauscht werden. Die Auswertung der Daten erfolgte an Land. Die Messposition „bwf_1“ (vgl. Tab. 1.4 und Abb. 1-24) war durchgehend mit einem Hydroschallmessgerät ausgestattet. Im FFH-Gebiet waren für das Baumonitoring die Messpositionen bwf_4 und bwf_6 alternierend, jedoch insgesamt durchgehend mit einem Hydroschallmessgerät ausgestattet.

Bei den eingesetzten C-PODs handelt es sich um Geräte, die von der britischen Firma Chelonia Ltd. hergestellt und vertrieben werden. Weitere Details können Kapitel E.3.2 (S. 144 f) entnommen werden.

C.1.3 Durchführung

Auslegung der Messsysteme

In den Forschungsphasen 1 und 2 wurden die mobilen Messpositionen *POD mobil 1* und *POD mobil 2* sowie eventuelle weitere mobile Hydroschallmessgeräte in der Regel vor Rammbeginn an einem Fundamentstandort positioniert. Die Messpositionen außerhalb des Baufeldes wurden in regelmäßigen Wartungsintervallen mit einem separaten Schiff angefahren und die Messsysteme (C-PODs und Hydroschallmessgeräte) in Intervallen von ca. 6 Wochen getauscht. Schlechtes Wetter konnte die Wartungsintervalle z. T. auf acht Wochen verlängern. Sämtliche Messsysteme befanden sich – abgesehen von Positionsarbeiten und Austauscharbeiten – durchgehend im Wasser.

Zu Beginn der Errichtungsarbeiten zum OWP Borkum West II (Forschungsphase 1) gab es technische und zeitliche Inkonsistenzen hinsichtlich der Verlegung eines vollständig geschlossenen ringförmigen Blasenschleiers, so dass für die beiden ersten Fundamentstandorte (BW01 und BW03) lediglich ein linearer, d. h. linienförmiger Blasenschleier auf einer Seite des zu rammenden Pfahles ausgelegt wurde. Ein Aufzeichnungsgerät wurde etwa 750 m westlich von der Position BW01 (*POD mobil 1*, vgl. Abb. 1-19, S. 48) ausgelegt. Zwischen diesem Gerät und dem zu rammenden Fundament war kein Blasenschleier ausgelegt. Ein zweiter zusätzlicher Messpunkt (Zusatzsystem für Forschungsphase 1) befand sich östlich des Fundamentes „hinter“ dem linearen Blasenschleier. Dieses Messsystem wurde von Bord des Begleitschiffes *Cecillie* aus betrieben. Hierbei handelte es sich um eine Hydroschallmessung vom Schiff aus, d.h. es wurde kein zusätzliches abgesetztes Messsystem verwendet. Aufgrund der Strömung variierte dessen Abstand zum Fundament zwischen 830 m bis 1.100 m (vgl. Abb. 1-19).

In der Forschungsphase 2 wurden vor dem Rammen bis zu drei zusätzliche Messsysteme (abgesetzte Systeme der itap GmbH) um den jeweiligen Fundamentstandort ausgelegt. An den Fundamenten BW 51, BW 48 und BW 24 wurden drei zusätzliche mobile Hydroschallmessgeräte in Abständen von 400 m bis 1.500 m eingesetzt. Am Fundament BW 33 wurden zusätzlich zwei mobile Hydroschallmessgeräte im Abstand von 750 m eingesetzt. Sämtliche zusätzlichen Messsysteme waren „hinter“ die linearen doppelten Blasenschleier-Konfigurationen ausgelegt worden, d.h. hier wurde der tatsächlich durch den linearen doppelten Blasenschleier reduzierte Schall gemessen. Die mobilen PODs innerhalb des Baugebietes sowie die beiden festen PODs außerhalb des Baufeldes lagen bei den Fundamenten BW 33 und BW 24 auf der Seite des Fundaments, die nicht oder nur teilweise durch den Blasenschleier abgeschirmt wurden. Während der Forschungsphasen 1 und 2 des Forschungsvorhabens HYDROSCHALL OFF BW II befanden sich Mitarbeiter der itap GmbH und BioConsult SH im Baufeld an Bord der Schiffe Noortruck (Verlegeschiff des BBCs), *Cecillie* (Schiff für das begleitende biologische Baumonitoring gemäß StUK3) oder dem Errichterschiff *Goliath*.

Messprogramm für Hydroschallmessungen

Tab. 1.6 gibt eine Übersicht sämtlicher hydroakustischer Messdaten, die während des Forschungsprojektes und Baumonitorings (Effizienzkontrolle) beim OWP Borkum West II erhoben wurden.

Tab. 1.6: Übersicht über sämtliche vorhandenen hydroakustischen Messungen und Ausfälle beim OWP Borkum West II.

Nr.	Position	Messpositionen der Hydrophone				
		mob. 1	mob. 2	bwf_1	bwf_4	bwf_6
1	BW01	ü	defekt	ü	ü	defekt
2	BW03	ü	defekt	ü	ü	defekt
3	BW46	ü	defekt	ü	ü	defekt
4	BW47	ü	defekt	ü	ü	defekt
5	BW15	ü	(ü)	ü	ü	n.v.
6	BW14	ü	(ü)	ü	ü	n.v.
7	BW12	ü	(ü)	ü	ü	n.v.
8	BW34	ü	(ü)	ü	ü	n.v.
9	BW26	ü	(ü)	ü	ü	n.v.
10	BW35	ü	(ü)	ü	ü	n.v.
11	BW49	ü	(ü)	ü	n.v.	ü
12	BW41	ü	(ü)	k.A.	n.v.	ü
13	BW42	ü	(ü)	k.A.	n.v.	ü
14	BW43	k.A.	k.A.	k.A.	n.v.	ü
15	BW54	ü	ü	k.A.	n.v.	ü
16	BW53	ü	ü	k.A.	n.v.	ü
17	BW50	ü	ü	ü	n.v.	ü
18	BW61	ü	ü	ü	n.v.	ü
19	BW64	ü	ü	ü	n.v.	ü
20	BW44	ü	ü	ü	n.v.	ü
21	BW65	ü	ü	ü	n.v.	ü
22	BW66	ü	ü	ü	n.v.	ü
23	BW55	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
24	BW52	k.A.	k.A.	ü	ü	n.v.
25	BW62	ü	ü	ü	ü	n.v.
26	BW63	ü	ü	ü	ü	n.v.
27	BW51	ü	ü	ü	ü	n.v.
28	BW48	ü	ü	ü	ü	n.v.
29	BW24	ü	ü	ü	ü	n.v.
30	BW33	V.	ü	ü	k.A.	ü
31	BW32	V.	ü	ü	k.A.	ü
32	BW31	V.	ü	ü	k.A.	ü
33	BW40	V.	ü	ü	k.A.	ü
34	BW36	V.	ü	ü	k.A.	ü
35	BW23	V.	ü	ü	k.A.	ü
36	BW13	ü	ü	ü	k.A.	ü
37	BW25	ü	ü	ü	k.A.	ü
38	BW02	ü	ü	ü	k.A.	ü
39	BW37	ü	ü	ü	k.A.	ü
40	BW04	ü	ü	ü	k.A.	ü

ü Messung erfolgt; (ü) z. T. Störungen durch hohe Nebengeräusche, so dass nicht alle Rammgeräusche für die anschließende Auswertung verwendet werden konnte.

defekt: Messung nicht erfolgt aufgrund technischer Probleme o. ä.

n.v.: Messposition wird für diesen Zeitraum nicht verwendet

k.A.: keine Auslegung bzw. kein Austausch der Messsysteme erfolgt

V.: Verlust des kompletten Messsystems

Zum Teil gab es Ausfälle bei den Hydroschallmessungen. Zu Beginn der Messungen im September 2011 (Forschungsphase 1) fielen die Messposition POD mobil 2 und bwf_6 wegen technischer Defekte komplett aus. Ab dem 12.11.2011 (Fundament BW15) zeichneten die Austauschsysteme

korrekt auf, jedoch wurden an der Messposition POD mobil 2 erhebliche Kettengeräusche (Störgeräusche) aufgezeichnet. Durch die Verwendung eines Störgeräuschefilters wurden für die anschließende Analyse nur die Signalanteile verwendet, die störgeräuschebefreit waren. Das Messsystem POD mobil 1 wurde am 01. März 2012 erfolgreich ausgebracht und positioniert. Mehrere Tage später war dieses Messsystem inkl. Markierungsspiere nicht mehr vorhanden. Vermutlich ist eines der Baufahrzeuge über die Markierungsspiere gefahren. Das System konnte Ende 2012 komplett geborgen werden. Die Aufzeichnungen dieses Gerätes waren jedoch durch die lange Liegezeit unter Wasser nicht mehr auszuwerten.

Es sind keine Messdaten aufgrund von Überschneidungen zwischen dem Austausch von Messsystemen und Rammarbeiten an den Fundamenten BW 52 (komplett) und BW 55 (nur innerhalb des Baufeldes) vorhanden.

In der nachfolgenden Tabelle sind die tatsächlichen Entfernungen sämtlicher Hydroschallmessgeräte zu den jeweiligen Fundamentstandorten zusammengefasst. Aus diversen Gründen (Zeitrestriktionen durch den Bauprozess, Wetter, unerwartete Änderung der Baustellenfolge etc.) war es der *Noortruck* nicht immer möglich, die mobilen PODs (inkl. der akustischen Messsysteme) nach Ausbringung des Düsen Schlauches und vor Beginn der Rammarbeiten noch an die vorgesehenen Positionen in 750 m und 1.500 m Abstand zum Fundamentstandort zu verlegen. Daher kam es zum Teil zu erheblichen Abweichungen von den geplanten Entfernungen von 750 m und 1.500 m Entfernungen zum jeweiligen Fundamentstandort.

Tab. 1.7: Tatsächliche Abstände der Messpositionen zum Rammort.

Position	Abstand zwischen Rammbaustelle und Messsystem [m]				
	mobil 1	mobil 2	bwf_1	bwf_4	bwf_6
BW 01	742	1.506	4.328	18.043	27.497
BW 03	1.474	711	2.734	16.273	25.721
BW 46	648	1.678	3.337	18.955	28.291
BW 47	782	1.733	2.578	18.206	27.507
BW 15	1.593	737	1.352	15.770	25.177
BW 14	744	1.480	2.129	16.636	26.063
BW 12	1.607	3.389	3.993	18.409	27.857
BW 34	739	1.465	3.902	19.246	28.649
BW 26	3.312	2.302	853	16.243	25.606
BW 35	1.477	737	2.927	18.396	27.776
BW 49	4.299	2.397	1.653	16.758	25.965
BW 41	732	5.895	3.412	13.616	22.624
BW 42	1.488	6.774	4.278	13.024	21.926
BW 43	-	-	-	12.466	21.243
BW 54	741	1.545	5.276	13.245	21.900
BW 53	741	1.647	4.338	13.849	22.656
BW 50	747	1.498	1.944	15.904	25.029
BW 61	1.446	3.228	3.058	16.070	25.043
BW 64	730	1.510	4.997	14.398	23.038
BW 44	1.514	3.916	6.006	11.959	20.589
BW 65	464	797	5.765	13.905	22.399
BW 66	741	743	6.541	13.462	21.789
BW 55	-	-	-	-	-
BW 52	-	-	3.436	14.497	-
BW 62	700	1.439	3.610	15.483	24.362
BW 63	1.390	903	4.270	14.925	23.693
BW 51	685	1.279	2.606	15.184	24.222
BW 48	750	1.487	1.961	17.473	26.731
BW 24	2.525	1.485	2.845	17.940	27.355
BW 33	1.465	762	5.930	11.242	20.024
BW 32	750	1.465	5.039	11.801	20.719
BW 31	750	1.483	4.127	12.412	21.444
BW 40	750	1.400	2.558	14.238	23.334
BW 36	750	6.500*	1.977	17.562	26.910
BW 23	749	1.497	3.844	18.812	28.242
BW 13	754	5.500*	3.040	17.516	26.956
BW 25	669	3.300	1.847	17.083	26.476
BW 02	1.564	2.511	3.486	18.043	26.606
BW 37	734	1.479	1.119	16.745	26.055
BW 04	746	1.512	2.116	15.404	24.843

* Position der Messsysteme nicht eindeutig protokolliert. Entfernung auf der Grundlage von akustischen Messdaten abgeschätzt. Für die Fundamente BW13 und BW36 können keine exakten Bestimmungen der Positionen für die mobilen PODs angegeben werden, da keine Protokolle und/oder widersprüchliche Angaben zur Positionierung vorlagen. Die Entfernungen wurden auf der Basis der vorhandenen Messdaten und Entfernungen an der Position bwf_1 mit Hilfe der geometrischen Ausbreitungsdämpfung für mobile POD 1 Stationen abgeschätzt.

D HYDROSCHALLMESSUNGEN UND EVALUATION DER SCHALLMINDERUNG EINES GROSSEN BLASENSCHLEIERS

D.1 Schalltechnische Grundlagen

Schall ist eine rasche, oft periodische Schwankung des Drucks, die dem Umgebungsdruck (im Wasser also dem hydrostatischen Druck) additiv überlagert ist. Damit einher geht eine „Hin-und-Her-Bewegung“ der Wasserteilchen, die üblicherweise durch deren Geschwindigkeit, der sogenannten Schallschnelle v (engl. „particle velocity“), beschrieben wird. Die Schallschnelle kennzeichnet die Wechselgeschwindigkeit, mit der ein Teilchen um seine Ruhelage in einem Medium schwingt. Die Schallschnelle ist nicht mit der Schallgeschwindigkeit c_{Wasser} , also der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalles in einem Medium zu verwechseln, die in der Regel bei Wasser $c_{Wasser} = 1500 \text{ m/s}^2$ beträgt. In der Regel ist die Schallschnelle v deutlich kleiner als die Schallgeschwindigkeit c . Schalldruck p und Schallschnelle v sind über die akustische Kennimpedanz Z , die den Wellenwiderstand des Mediums charakterisiert, folgendermaßen verknüpft:

$$Z = \frac{p}{v} \quad \text{Gleichung 1}$$

Im Fernfeld, d. h. in einigem Abstand (frequenzabhängig) von der Schallquelle, ist die Impedanz gegeben durch:

$$Z = \rho c \quad \text{Gleichung 2}$$

mit

ρ = Dichte des Mediums.

Für eine Schalldruckamplitude von beispielsweise 1 Pa (entspricht bei einem sinusförmigen Signal einem Schalldruckpegel von 117 dB re 1 μPa bzw. einem Spitzenpegel von 120 dB re 1 μPa ; siehe Kapitel D.1.1) erhält man daraus für die Schallschnelle in Wasser einen Wert von ca. 0,7 $\mu\text{m/s}$.

D.1.1 Schallpegelgrößen

In der Akustik wird die Intensität von Geräuschen in der Regel nicht direkt durch die Messgröße Schalldruck (oder Schallschnelle) beschrieben, sondern durch den aus der Nachrichtentechnik bekannten Pegel in dB (Dezibel). Allerdings gibt es verschiedene Schallpegelgrößen. In diesem Forschungsvorhaben werden folgende Pegelgrößen in Anlehnung an das Standarduntersuchungskonzept des BSH (StUK3 2007) und die Messvorschrift für Unterwasserschallmessungen des BSH (2011) verwendet:

- (Energie-) Äquivalenter Dauerschallpegel L_{eq}
- Einzelereignispegel L_E (identisch mit dem Sound Exposure Level – SEL)
- Spitzenpegel L_{Peak}

Vom BSH wurde auf Grundlage von Vorarbeiten des Umweltbundesamtes (UBA) in Abstimmung mit den Naturschutzfachbehörden ein Schallschutzgrenzwert für Rammschallimmissionen festgelegt. Dieser Schallschutzgrenzwert ist als duales Kriterium mit 160 dB_{SEL} für den Einzelereignispegel (SEL) und 190 dB_{LPeak} für den Spitzenpegel (L_{Peak}) in einer Entfernung von 750 m definiert.

Durch die Festlegung dieses dualen Lärmkriteriums soll einer Schädigung von Schweinswalen und anderen marinen Säugetieren durch schallintensive Aktivitäten (z. B. Rammungen) vorgebeugt werden.

Laut Messvorschrift des BSH (2011) ist der Wert von 160 dB_{SEL} mit dem Einzelereignispegel (SEL₅, d.h. 5% Perzentilwert) zu vergleichen. Sollten Überschreitungen vorliegen, so ist das Ausmaß der Überschreitungen in geeigneter Form darzustellen. Gemäß der Messvorschrift des BSH (2011) ist ebenfalls der gemessene Spitzenschalldruckpegel (L_{Peak}) für jede Rammung zu dokumentieren. In der Empfehlung des UBAs wird jedoch als Parameter für den Spitzenpegel nicht der L_{Peak} sondern der L_{Peak-to-Peak} für die Darstellung des Spitzenschalldruckpegels vorgeschlagen. In Abb. 1-26 ist der Unterschied zwischen dem L_{Peak} und dem L_{Peak-to-Peak} dargestellt. Im lautesten anzunehmenden Fall, dass der Unterdruck gleich dem Überdruck ist, beträgt der Unterschied zwischen L_{Peak-to-Peak} und L_{Peak} 6 dB. In der Regel beträgt der Unterschied zwischen den beiden Parametern bei Rammschall weniger als 6 dB (unveröffentlichte Messdaten der itap GmbH). Eine verbindliche Definition in Form einer technischen Richtlinie oder einem Standard, welcher Parameter für den Spitzenpegel (L_{Peak} oder L_{Peak-to-Peak}) anzuwenden ist, liegt derzeit nicht vor. In diesem Forschungsvorhaben wird aufgrund der besseren Vergleichbarkeit mit Literaturdaten der Spitzenpegel über L_{Peak} dargestellt.

Mit der o.g. Auswahl an akustischen Parametern kann man die Ergebnisse direkt mit vorherigen Studien und Vorgaben des BSH hinsichtlich der Lärmeinwirkung auf marine Meeressäuger vergleichen. Der L_{eq} und der L_E bzw. SEL können sowohl frequenzunabhängig angegeben werden, d. h. als breitbandige Einzahlwerte, als auch frequenz aufgelöst, z. B. in 1/3-Oktav-Bändern (Terzspektrum).

Im Folgenden werden die o. g. Pegelgrößen kurz beschrieben.

(Energie-) Äquivalenter Dauerschallpegel L_{eq}

Der L_{eq} ist die gebräuchlichste Messgröße in der Akustik und definiert als

$$L_{eq} = 10 \log \left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p(t)^2}{p_0^2} dt \right) \text{ [dB]} \quad \text{Gleichung 3}$$

mit

$p(t)$ = zeitlich sich verändernder Schalldruck

p_0 = der Bezugsschalldruck (bei Unterwasserschall 1 µPa)

T = die Mittelungszeit.

In Worten bedeutet Gleichung 3: Quadriere die beobachteten zeitlich veränderbaren Schalldrücke $p(t)$, bilde den Mittelwert über die Zeit T und dividiere durch den quadrierten Bezugsschalldruck p_0^2 (energetische Mittelung). Der mit 10 multiplizierte Logarithmus von diesem Wert ist der energieäquivalente Dauerschallpegel L_{eq} in dB.

Einzelereignispegel L_E bzw. SEL

Zur Charakterisierung von Rammgeräuschen ist der L_{eq} allein kein ausreichendes Maß, da er nicht nur von der Stärke der Rammschläge abhängt, sondern auch von der Mittelungszeit und von den Pausen zwischen den Rammschlägen. Besser geeignet ist der Einzelereignispegel L_E bzw. engl. Sound Exposure Level (SEL; im deutschen Sprachraum wird vorwiegend der Einzelereignispegel L_E verwendet), der folgendermaßen definiert ist:

$$L_E = SEL = 10 \log \left(\frac{1}{T_0} \int_{T_1}^{T_2} \frac{p(t)^2}{p_0^2} dt \right) \text{ [dB]} \quad \text{Gleichung 4}$$

mit

T_1 und T_2 = Anfangs- bzw. Endzeit der Mittelungen (sind so zu wählen, dass das Schallereignis zwischen T_1 und T_2 liegt)

T_0 = Bezugswert 1 Sekunde

Der Einzelereignispegel eines Schallimpulses (Rammschlag) ist damit der energieäquivalente Dauerschallpegel (L_{eq}) eines kontinuierlichen Schalls von 1 s Dauer und der gleichen Schallenergie wie der (kurzzeitige) Impuls.

Der SEL bzw. L_E ist schwieriger direkt zu messen als der L_{eq} , die beiden Größen können jedoch einfach ineinander umgerechnet werden (Messvorschrift des BSH 2011):

$$SEL = 10 \log \left(10^{L_{eq}/10} - 10^{L_{hg}/10} \right) - 10 \log \frac{nT_0}{T} \text{ [dB]} \quad \text{Gleichung 5}$$

mit

n = Anzahl der Schallereignisse, also der Rammschläge, innerhalb der Zeit T

T_0 = 1 s

L_{hg} = Stör- bzw. Hintergrundpegel zwischen den einzelnen Rammschlägen

Gleichung 5 liefert somit aus einer L_{eq} -Messung den mittleren Einzelereignispegel SEL bzw. L_E von n Schallereignissen (Rammschlägen). Im Falle, dass der Hintergrundpegel zwischen den Rammschlägen deutlich geringer als der Rammschall ist (z. B. >10 dB), kann mit hinreichender Genauigkeit mit einer Vereinfachung von Gleichung 5 gerechnet werden (Messvorschrift des BSH 2011):

$$SEL \approx L_{eq} - 10 \log \frac{nT_0}{T} \text{ [dB]} \quad \text{Gleichung 6}$$

In der Praxis werden i.d.R. 30 s-Intervalle als Zeitabschnitte gewählt. Je nach Anwendung werden ein bis max. 30 Rammschläge in diesem Zeitabschnitt durchgeführt.

Spitzenpegel L_{Peak}

Diese Größe ist ein Maß für Schalldruckspitzen. Im Gegensatz zu L_{eq} und L_E bzw. SEL gibt es keine Mittelwertbildung:

$$L_{Peak} = 20 \log \left(\frac{|p_{Peak}|}{p_0} \right) \text{ [dB]} \quad \text{Gleichung 7}$$

mit

p_{Peak} = maximal festgestellter positiver oder negativer Schalldruck

Ein Beispiel ist in Abb. 1-26 dargestellt. Der Spitzenpegel L_{Peak} liegt stets höher als der Einzelereignispegel. In der Regel beträgt der Unterschied zwischen dem L_{Peak} und dem SEL bei Rammarbeiten 20 dB bis 25 dB (vgl. Kap.D.7, S. 114).

Vor dem eigentlichen Rammschallimpuls kommt eine meist sinusförmige Schallwelle mit ca. 0,05 s Vorlauf am Hydrophon an. Diese Schallwelle wird oftmals „Preblow“ genannt und ist vermutlich der Anteil, der durch den Rammschlag über den Pfahl ins Sediment eingeleitet und vom Sediment ins Wasser abgestrahlt wird (Bodenkopplung). Dieser Schallanteil ist „schneller“ als der eigentliche Rammschlag, da die Schallgeschwindigkeiten im Pfahl und im Sediment in der Regel deutlich höher sind als im Wasser. In der Regel ist der Preblow um einen Faktor 10 (und mehr) kleiner als der eigentliche Rammschall, der durch den Pfahl direkt ins umgebende Wasser abgestrahlt wird (Direktschall). Im vorliegenden Fall (Abb. 1-26) ist der Preblow nicht stark ausgeprägt. Es liegen aber auch Messungen von Standorten vor, bei denen diese Bodenkopplung deutlich größere Amplituden aufweist (z. B. Wilke et al. 2012). Diese Bodenkopplungen werden hinsichtlich ihrer Ausprägung, der vorhandenen Bodenprofile und ihres Einflusses auf den gemessenen Hydroschall im akustischen Nah- und Fernfeld derzeit im Forschungsvorhaben BORA¹ u. a. durch zeitgleiche Messungen des Hydroschalls und der Bodenbewegungen (Erschütterung) bei Rammaktivitäten untersucht. Im vorliegenden Bericht können jedoch noch keine Ergebnisse aus diesen Projekten berücksichtigt werden.

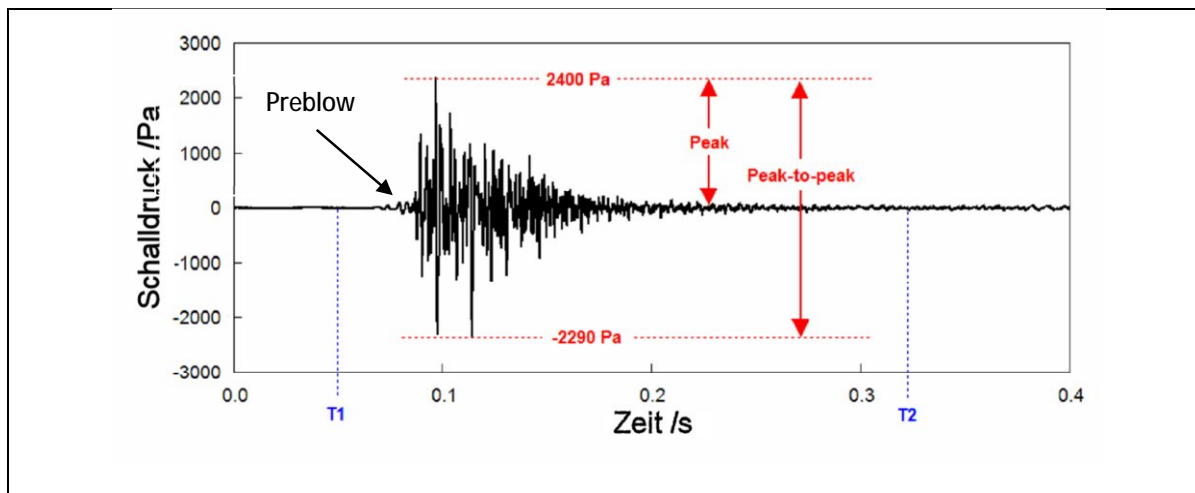


Abb. 1-26: Typisches gemessenes Zeitsignal des Unterwasserschalls bei einem Rammschlag in einigen 100 Metern Entfernung.

D.1.2 Schallausbreitung in der Nordsee

Einfluss des Abstands von der Schallquelle

Für überschlägige Rechnungen kann man annehmen, dass der Schalldruck mit der Entfernung nach einem einfachen Potenzgesetz (geometrische Ausbreitungsdämpfung) abnimmt (Messvorschrift des BSH, 2011). Der Pegel in dB verringert sich dann um:

¹ BORA: Entwicklung eines Berechnungsmodells zur Vorhersage des Unterwasserschalls bei Rammarbeiten zur Gründung von OWEA, BMU und PTJ gefördertes Projekt, FKZ 0325421A/B/C.

$$TL = k \cdot \log\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \text{ [dB]} \quad \text{Gleichung 8}$$

mit

r_1 und r_2 = Entfernung zur Schallquelle vergrößert sich von r_1 auf r_2

TL = Durchgangsdämpfung; engl. Transmission Loss

k = Konstante (für die Nordsee kann $k = 15$ angesetzt werden)

Häufig wird die Durchgangsdämpfung bzw. TL (engl. Transmission Loss) für einen Abstand $r_1 = 1$ m (fiktiver Abstand zur punktförmig gedachten Quelle) angegeben. Die daraus zu berechnende Schalleistung eines Rammschlages in 1 m Entfernung wird oftmals auch als Quellpegel bezeichnet. Gleichung 8 vereinfacht sich dann zu $TL = k \log(r/\text{Meter})$. Diese einfache Rechnung berücksichtigt allerdings nicht, dass die Abnahme des Schalldrucks mit der Entfernung auch von der Frequenz abhängt. Zusätzlich ist zu beachten, dass die o. g. Formel streng genommen nur für das „akustische Fernfeld“ eines akustischen Signals gilt, d. h. in einigem Abstand (frequenzabhängig) von der Quelle (z. B. $ESRa^2$, Wilke et al. 2012, Bellmann & Gerke 2012). Im Medium Luft liegt die Grenze zwischen Nah- und Fernfeld frequenzabhängig bei ca. 2λ (λ – Wellenlänge; frequenzabhängig). Für Unterwasserschall bei Rammungen von Windenergieanlagen liegen keine detaillierten Studien vor, die Nah- und Fernfeld trennen können. Es ist zu vermuten, dass die Grenze zwischen Nah- und Fernfeld etwa im Abstand von 250 m (frequenzabhängig) liegt (Hinweise in Bellmann 2011, Bellmann & Gerke 2012, Bellmann & Gerke 2013).

Zusätzlich macht sich bei Abständen von einigen Kilometern die Absorption im Wasser bemerkbar und bewirkt eine weitere Verringerung des Schalldrucks (Medwin 2005). Des Weiteren haben bei solch großen Entfernungen bestimmte Wetterbedingungen (z.B. Wellenschlag, Regen und Wind) einen Einfluss auf den Schallpegel im Wasser; bei starkem Wind und Seegang ist der Schalldruckpegel niedriger. Dies liegt an der größeren Oberflächenrauigkeit des Meeres bei Wellenschlag mit dem damit verbundenen erhöhten Lufteintrag in die obere Meeresschicht.

Thiele & Schellstede (1980) haben halbempirische Näherungsformeln zur Berechnung der Schallausbreitung für verschiedene Gebiete der Nordsee sowie für „glatte“ und für „raue“ See veröffentlicht. Die nachfolgende Formel gilt für glatte See:

$$TL = (16.07 + 0.185 F)(\log(R) + 3) + (0.174 + 0.046 F + 0.005 F^2)R \text{ [dB]} \quad \text{Gleichung 9}$$

mit

F = $10 \log(f/[\text{kHz}])$

R = r_1/r_2 ; Entfernung zur Schallquelle vergrößert sich von r_1 auf r_2

Streng genommen gelten die Zusammenhänge aus Gleichung 9 nur für winterliche Bedingungen mit guter Durchmischung des Wassers ohne ausgeprägtes Schallgeschwindigkeitsprofil in der Nordsee (Deutsche Bucht). Es ist jedoch davon auszugehen, dass eine vollständige Durchmischung des Wassers und somit kein ausgeprägtes Schallgeschwindigkeitsprofil im Untersuchungsgebiet zum Zeitpunkt sämtlicher Messungen vorlag.

²ESRa: Evaluation von Systemen zur Rammschallminderung an einem Offshore-Testpfahl, BMU und PTJ gefördertes Projekt, FKZ 0325307

Einfluss der Wassertiefe

Die Schallausbreitung im Meer wird auch von der Wassertiefe beeinflusst. Unterhalb einer bestimmten Grenzfrequenz ist keine kontinuierliche Schallausbreitung möglich; je flacher das Gewässer, umso höher ist diese Frequenz. Eine überschlägige Berechnungsformel der Grenzfrequenz stammt aus Thiele & Schellstede (1980):

$$f_g = \frac{c_{\text{Wasser}}}{4h} \sqrt{\frac{1}{1 - \left(\frac{c_{\text{Wasser}}}{c_{\text{Sediment}}}\right)^2}} \quad \text{Gleichung 10}$$

mit

c_{Wasser} = Schallgeschwindigkeit in Wasser (i.d.R. ~1.500 m/s)

c_{Sediment} = Schallgeschwindigkeit im Sediment (abhängig vom Bodenprofil)

h = Wassertiefe

In 25 m tiefem Wasser (wie beim OWP Borkum West II) und unter der Annahme, dass dort Sande verschiedener Dichte am Meeresboden geschichtet sind (c_{Wasser} im Bereich von 2.000 m/s), liegt die Grenzfrequenz f_g in der Größenordnung von ca. 30 Hz. Schall in der Nähe der Grenzfrequenz wird stärker abgeschwächt bzw. gedämpft als z. B. durch Gleichung 9 berechnet. Dieser Effekt bzw. Einflussfaktor ist jedoch aufgrund der Charakteristik von Rammschallspektren sowie den beim OWP Borkum West II gemessenen Wassertiefen nicht relevant für die Auswertungen in diesem Projekt (Nehls & Bellmann 2013).

D.2 Auswertungs- und Darstellungskonzept

D.2.1 Auswertungsmethode

Sämtliche Hydroschallaufzeichnungen liegen als Mono-Zeitsignale (MPEG3-Dateien) vor. Die Samplingfrequenz der Messsysteme betrug $f_s = 44,1$ kHz.

Durch eine Hochpassfilterung (Grenzfrequenz 20 Hz, Butterworth-Filter 6. Ordnung) wurden zunächst die typischen durch Wind und ggfs. Wellenschlag erzeugten tieffrequenten Signalanteile in den Hydrophonsignalen abgeschwächt.

Durch die Bestimmung des energieäquivalenten Dauerschallpegels L_{eq} über jeweils 30 s und die zusätzliche Zählung der in diesem Zeitraum erfolgten Rammschläge erfolgte die Berechnung des mittleren Schallereignispegels (L_E bzw. SEL) mittels einer Fast-Fourier-Transformation (FFT). Diese Größe stellte somit den Mittelwert des Einzelereignispegels über 30 s dar. Diese Vorgehensweise war i. d. R. möglich, da Störgeräusche zwischen einzelnen Rammschlägen um mindesten 10 dB leiser waren als die Rammimpulse. Zunächst wurde eine FFT³ der Länge 2^{22} bzw. 2^{23} berechnet und anschließend in normierte Terzspektren (1/3-Oktave-Werte) umgerechnet. Aufgrund der hohen Frequenzauflösung war diese Umrechnung auch bei niedrigen Frequenzen hinreichend genau. Für

³ Bei dem FFT-Verfahren wird aus dem Zeitsignal ein Frequenzsignal mittels Fast-Fourier-Transformation berechnet.

Anschließend wird daraus ein standardisiertes Terzspektrum gebildet. Alternativ kann man statt des FFT-Verfahrens auch ein Verfahren über Filter im Zeitbereich verwenden, um das standardisierte Terzspektrum zu ermitteln. Die Ergebnisse beider Verfahren weichen nach ersten Berechnungen des itap nicht signifikant voneinander ab. Für angeordnete Baumonitoringaufgaben und Effizienzkontrollen wird ab April 2012 nach Maßgabe des BSH mittels Filterung vorgegangen.

die Darstellung der Ergebnisse wurden die Terzspektren auf den Frequenzbereich von 12,5 Hz bis 16 kHz beschränkt⁴.

Sämtliche mathematischen Operationen wurden mittels eines vom itap entwickelten Programms für Matlab (Mathworks) durchgeführt. Das Programm wurde mithilfe eines Spektrum-Analysators (HP35670a Dynamic Signal Analyzer) verifiziert.

Typischerweise gab es 20-25 Rammschläge pro 30 s. Intervalle mit weniger als $n = 7$ Schlägen pro 30 s wurden im Folgenden nicht für die Beurteilung der Schallreduktion des Blasenschleiers herangezogen. Das bedeutet, dass in diesem Bericht keine Aussagen über den Softstart bzw. den Einfluss der Rammenergie auf den Einzelereignispegel beim Softstart getroffen werden konnten. In der Regel waren 30 s-Intervalle, in denen weniger als 7 Rammschläge auftraten, Intervalle mit Softstart, bei denen deutlich geringere Rammenergien verwendet wurden. Zudem variierte die Rammenergie zu Beginn einer Rammung sehr stark, so dass eine Mittelwertbildung über mehrere Rammschläge hinweg erhebliche Ungenauigkeiten aufwies. Dies galt ebenfalls, wenn bezüglich derselben Rammung die Anzahl der Schläge zwischen mehreren Messpositionen um mehr als drei Schläge voneinander abwich. Dies war jedoch nur bei einem Fundament der Fall (vgl. Kap. D.6.3 „Zeitgleiche Rammungen an zwei unterschiedlichen Standorten“, S. 137).

D.2.2 Auswahl der hydroakustischen Messdaten für weitergehende Analysen

Das Schallschutzsystem Großer Blasenschleier wurde in unterschiedlichen Auslegungsvarianten getestet. Zusätzlich wurden (systematische) Variationen unterschiedlicher möglicher Einflussfaktoren auf die Schallminderung des Blasenschleiersystems getestet (vgl. auch Tab. 1.3, S. 51). Folgende Konfigurationen der Auslegungsmethoden für den Blasenschleier und Variationen von möglichen Einflussparametern wurden untersucht:

Auslegungsart: Linearer (halboffener) Blasenschleier (lin. BBC); ringförmiger Blasenschleier (BBC) und linearer doppelter Blasenschleier (DBBC). Zudem wurden Rammungen ohne ein Schallminderungssystem durchgeführt (Referenzmessung).

Variation möglicher Einflussfaktoren: Düsenschlauchkonfiguration (großer Lochabstand mit großen Löchern – BBC 1; kleiner Lochabstand mit kleinen Löchern – BCC 2), verwendete Luftmenge, Abstand zwischen den beiden Blasenschleiern beim linearen doppelten Blasenschleier (vgl. Tab. 1.3, S. 51).

In der Regel bezieht sich die nachfolgende Auswertung hinsichtlich der Wirksamkeit des Großen Blasenschleiers auf die beiden mobilen POD-Stationen (1/2) innerhalb des Baufeldes in einem Abstand von ca. 750 m und ca. 1.500 m zum Fundament. In Forschungsphase 2 wurden zusätzliche Messsysteme im Umkreis bis ca. 1.500 m ausgebracht. Diese Messergebnisse wurden ebenfalls für die Evaluation der Schallminderung von BBCs verwendet. Im Falle, dass eine der beiden mobilen Messstationen ausgefallen war, wurden die Daten der festen Messstation bwf_1 in einiger Entfernung (Abstand zu den Fundamentstandorten 800 m bis 6.000 m) hinzugezogen.

Es wurden etwaige Ausfälle von Kompressoren sowie besondere Ereignisse in den entsprechenden Protokollen dokumentiert. Des Weiteren lagen nicht für jede Rammung an jedem Fundamentstandort hydroakustische Messdaten vor (vgl. Tab. 1.8). Ziele der nachfolgenden Auswertungen waren die Weiterentwicklung und Verbesserung des eingesetzten Schallminderungssystems (BBC) hinsichtlich der potenziellen schallmindernden Wirkung und die Identifizierung möglicher Einflussfaktoren auf die Stärke der Schallminderung. Aus diesen Gründen wurden für jede getestete Blasenschleierkonfiguration nur jene validen (störungsfreien) Messdatensätze für die nachfolgende

⁴ Aufgrund der gewählten Abtastrate (Samplingfrequenz) bei der Aufnahme von 44,1 kHz ist eine Darstellung der Terz von 20 kHz nicht mehr möglich.

Auswertung herangezogen, die alle notwendigen Angaben zum Betriebszustand des Blasenschleiers sowie die exakten Abstände zwischen Rammort und Messpositionen beinhaltet.

Tab. 1.8 fasst sämtliche Messdaten zusammen, die für die anschließende Auswertung der einzelnen BBC-Konfigurationen herangezogen wurden.

Tab. 1.8: Liste der zur Auswertung herangezogenen Messdaten.

Nr.	BBC-Konfiguration	Düsenschlauch (BBC)	Wandstärke [mm]	Fundamente
1	linear (linear)	1 und 2	50	BW01 und BW03
2	ringförmig (geschlossen)	1	50	BW15, BW12, BW26, BW49, BW42, BW53, BW61 und BW44
3	ringförmig (geschlossen)	2	50	BW47, BW14, BW34, BW54, BW50, BW64, BW65, BW66, BW02, BW37 und BW04
4	ringförmig (geschlossen)	2	70	BW23
5	doppelt linear	2	70	BW24 und BW33
6	Referenz (kein BBC)	-	50	BW46, BW35 und BW41
7	Referenz (kein BBC)	-	70	BW63, BW24, BW32, BW31, BW40 und BW36

Bei den Fundamenten BW15, BW14, BW49, BW54, BW51, BW48, BW24 und BW33 wurden systematische Änderungen der verwendeten Luftmenge durchgeführt. So wurde z. B. bei Fundament BW54 der Blasenschleier zeitweise mit einem, zwei, drei oder vier Kompressoren mit Druckluft versorgt bzw. für einen Zeitraum von mehreren Minuten komplett ausgestellt (Referenzmessung). Für die Auswertung wurden jeweils die Zeitabschnitte mit einer konstanten Luftmenge pro Zeiteinheit separat ausgewertet, so dass beispielsweise für das Fundament BW54 Werte ohne und mit Blasenschleier (letztere bezüglich unterschiedlicher Luftmengen) vorlagen.

Im Anhang (S. 211) sind die Messwerte (Einzelereignispegel und Spitzenpegel) sämtlicher Messpositionen aus dem Effizienzbericht (Bellmann & Gerke 2012) und diesem Forschungsvorhaben tabellarisch zusammengefasst.

D.2.3 Dokumentation der Messergebnisse

Zur Dokumentation werden die folgenden akustischen Kenngrößen in Anlehnung an die Messvorschriften des BSH (2011) und Literaturdaten (Bellmann 2013) verwendet:

L_{eq} = energetischer Mittelwert über 30 Sekunden

SEL_{90} = 30-Sekunden Perzentilpegel des Einzelereignispegels, der von 90% der Messwerte im betrachteten Zeitintervall überschritten wird

SEL_{50} = 30-Sekunden Perzentilpegel des Einzelereignispegels, der von 50% der Messwerte im betrachteten Zeitintervall überschritten wird (Median)

SEL_5 = 30-Sekunden Perzentilpegel des Einzelereignispegels, der von 5% der Messwerte im betrachteten Zeitintervall überschritten wird

L_{peak} = Maximaler Spitzenschalldruckpegel

Diese Auswahl an Kenngrößen ermöglicht die Untersuchung von Einflussfaktoren während einer Rammung (Rammenergie, Mantelfläche etc.).

D.2.4 Darstellung akustischer Parameter in diesem Bericht

Für die Evaluation von Schallereignissen in einer definierten Entfernung zur Quelle können die Schallimmissionen zum einen als breitbandige Parameter oder Summenpegel dargestellt werden,

d. h. der gesamte Schall ohne Einschränkung des Frequenzbereichs wird in einem Einzahlwert zusammengefasst. Im Fall von Rammtätigkeiten wird z. B. der Einzelereignispegel (SEL) berechnet. Vorteil dieser Darstellungsweise ist, dass man die Schallimmissionen an einem Ort mit nur einem Einzahlwert beschreiben kann.

Die Wirkung von Schall auf Lebewesen bzw. die Hörfähigkeit derselben hängt neben der Schallstärke auch wesentlich von der Frequenz ab, da das Hörvermögen verschiedener Arten nicht bei allen Frequenzen gleich ist (z. B. beim Menschen: Zwicker & Fastl 1999; beim Schweinswal: Kastelein et al. 2011). Die Ausbreitung des Schalls im Meer ist ebenfalls frequenzabhängig (vgl. Kapitel D.6.2, S. 98). Hinzu kommt, dass gemessene breitbandige Werte manchmal durch Störungen dominiert werden können, die außerhalb des interessierenden Frequenzbereichs liegen, z. B. tieffrequenter „Pseudoschall“ infolge von Wellenbewegungen. Daher werden neben dem Breitbandpegel oftmals auch *Spektren*, also frequenz aufgelöste Darstellungen benutzt. Um von der frequenz aufgelösten Darstellung zu einem Einzahlwert zu kommen, muss eine energetische Aufsummierung jedes einzelnen dargestellten Wertes im Spektrum erfolgen, so dass die einzelnen Werte im Spektrum niedriger als der Summenpegel sind. Aufgrund der logarithmischen dB-Arithmetik wird allerdings der Summenpegel wesentlich durch das Maximum im Spektrum bestimmt.

Bei der frequenzabhängigen Darstellung (Spektrum) ist zwischen Darstellungen mit a) konstanter absoluter Bandbreite und b) konstanter relativer Bandbreite zu unterscheiden. Im Fall a) ist die Frequenzachse in gleich große Intervalle von z. B. 1 Hz Breite eingeteilt, im Fall b) ist die Breite der Frequenzschritte proportional zur Frequenz. In diesem Forschungsbericht werden die gemessenen Rammgeräusche mit einer Frequenzauflösung von 1/3 Oktave (Terzspektren) dargestellt. Das Terzspektrum fällt in die Kategorie b), die zur Beurteilung biologischer Effekte meist besser geeignet ist, da oftmals das Terzspektrum mit der spektralen Verarbeitung des Gehörs übereinstimmt (z. B. beim Menschen; Zwicker & Fastl 1999). Werte aus Spektren mit unterschiedlicher Darstellung können in der Regel nicht ohne (energetische) Umrechnung miteinander verglichen werden.

Für die Evaluation und Darstellung der Schallminderung der eingesetzten Blasenschleierkonfiguration (als Summenpegel; in Terzspektren) wurden aufgrund der unterschiedlichen Abstände der Messpositionen zum Rammort (vgl. Tab. 1.7, S. 65) sämtliche Messwerte mithilfe der geometrischen Ausbreitungsdämpfung ($SEL = SEL_{750m} - 15 \log_{10}(R/750 \text{ m})$; vgl. Kapitel D.1, S. 66) auf einen exakten Abstand von 750 m in Anlehnung an die Messvorschrift des BSH (2011) normiert. Dieses Vorgehen konnte angewandt werden, da die Entfernungsunterschiede zwischen den realen Messpositionen und dem geforderten 750 m-Abstand um höchstens den Faktor 4 voneinander abwichen und in diesen Abstandsbereichen die geometrische Ausbreitungsdämpfung mit realen Messdaten korreliert (vgl. Kap. D.6.2). Damit konnte sichergestellt werden, dass die Evaluation des in diesem Forschungsvorhaben eingesetzten Blasenschleiers mit Literaturdaten (z. B. Messungen aus dem Projekt HYDROSCHALL OFF BO1 – „Kleiner Blasenschleier“⁵; siehe Bellmann & Gerke 2012) und weiteren Effizienzkontrollen aus derzeit bestehenden und zukünftigen OWP-Baustellen mit unterschiedlichen Schallminderungssystemen (z. B. OWP Riffgat – Gerke & Bellmann 2012; OWP Meerwind Süd/Ost – Bellmann et al. 2013) vergleichbar ist.

D.2.5 Einfügungsdämpfung

Zur qualitativen Charakterisierung der Wirkungsweise eines Schallminderungssystems wird in der Regel die (Schall-) Durchgangsdämpfung bzw. Einfügungsdämpfung (englisch: insertion loss)

⁵HYDROSCHALL OFF BO1 (Kleiner Blasenschleier): Untersuchung und Erprobung eines kleinen Blasenschleiers (engl. Small Bubble Curtain - SBC) zur Minderung von Unterwasserschall bei Rammarbeiten für die Gründungen von Offshore Windenergieanlagen; BMU und PTJ gefördertes Projekt, FKZ 0325334A/B/C/G

betrachtet. Die Durchgangsdämpfung lässt sich breitbandig, d. h. als Einzahlwert, oder frequenz aufgelöst, z. B. als Terzspektrum, darstellen.

Breitbandige (einzahlige) Einfügungsdämpfung: Bei der breitbandigen Darstellung wird der breitbandige Einzelereignispegel (SEL-Wert) oder der Spitzenpegel (L_{Peak}) bei Verwendung eines Schallminderungssystems von dem z.B. breitbandigen Einzelereignispegel der Referenzmessung (ohne Schallminderungssystem) abgezogen, d. h. die Differenz (ΔSEL oder ΔL_{Peak}) berechnet. Je höher die Differenz ist, desto größer ist die Durchgangsdämpfung bzw. desto besser ist das Schallminderungssystem.

Derzeit liegt keine standardisierte Methode der Berechnung bzw. Evaluation der Schallminderung von Schallminderungssystemen vor. In der Messvorschrift für Unterwasserschallmessungen des BSH (2011) wird lediglich vermerkt, dass die Varianz der Messwerte durch Darstellung einzelner Perzentilwerte adäquat dokumentiert werden soll (vgl. Kapitel D.2.3, S. 73).

Es ist bekannt, dass der Einzelereignispegel (SEL) über die Rammung eines Pfahles, aber auch von Pfahl zu Pfahl eines Fundamentstandortes, sowie von Fundamentstandort zu Fundamentstandort deutlich im Pegel variieren kann (siehe Kapitel D.2.3). Somit werden sich auch Unterschiede (Varianzen) in der Berechnung der Schallminderung über verschiedene Pfähle und Fundamentstandorte bzw. zu Beginn, in der Mitte und am Ende einer Pfahlrammung ergeben. Für die Evaluation der schallmindernden Wirkung jeder getesteten Konfiguration werden daher in diesem Bericht Mittelungen über alle Pfähle und alle Fundamente mit gleicher Blasenschleierkonfiguration angegeben. Durch die Darstellung der Differenzen unterschiedlicher Perzentilwerte der akustischen Parameter (Einzelereignispegel und Spitzenpegel) wird die Varianz der Schallreduktion jeder getesteten Konfiguration dargestellt. Dieses Vorgehen war notwendig, da nicht bei sämtlichen Blasenschleierkonfigurationen eine Referenzmessung an einem Pfahl durchgeführt werden konnte.

In den nachfolgenden Tabellen sind folgende (einzahlige) Differenzen für den Einzelereignispegel (SEL) für die Charakterisierung der erzielten Schallreduktion pro Blasenschleierkonfiguration zusammengefasst:

- Minimale Schallminderung: $\Delta SEL = SEL_{50,Ref} - SEL_{05,BBC-Konfiguration}$
- Mittlere Schallminderung: $\Delta SEL = SEL_{50,Ref} - SEL_{50,BBC-Konfiguration}$
- Maximale Schallminderung: $\Delta SEL = SEL_{50,Ref} - SEL_{90,BBC-Konfiguration}$

Als Referenzwert wird der $SEL_{50,Ref}$ (Mittelwert über alle kompletten Rammungen ohne Blasenschleier) als Bezugswert definiert. Für die Betrachtung des Spitzenpegels (L_{Peak}) wird im Folgenden das Maximum aller durchgeführten Referenzmessungen verwendet ($L_{Peak,max,Ref}$). Für die Charakterisierung der Varianz der Schallreduktion durch verschiedene Blasenschleierkonfigurationen werden folgende Differenzen angegeben:

- Minimale Schallminderung: $\Delta L_{Peak} = L_{Peak,max,Ref} - L_{Peak,max,BBC-Konfiguration}$
- Mittlere Schallminderung: $\Delta L_{Peak} = L_{Peak,max,Ref} - L_{Peak,Mittelwert,BBC-Konfiguration}$
- Maximale Schallminderung: $\Delta L_{Peak} = L_{Peak,max,Ref} - L_{Peak,min,BBC-Konfiguration}$

Diese Darstellungsmethode der erzielten Schallminderung wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens entwickelt, da in der Messvorschrift für Unterwasserschallmessungen des BSH (2011) keine Vorgaben zur Ermittlung der Effizienz einer Schallschutzmaßnahme enthalten war. Bei den derzeitigen Effizienzkontrollen in laufenden Bauvorhaben in Deutschland wird diese Art der Evaluation von eingesetzten Schallminderungsmaßnahmen ebenfalls verwendet, sodass eine gute Vergleichbarkeit zu weiteren (Literatur-) Daten, insbesondere aus derzeitigen Effizienzkontrollen, besteht.

Spektrale Einfügungsdämpfung (Differenzspektrum): Bei der frequenz aufgelösten Darstellung der Durchgangsdämpfung eines Schallminderungssystems werden nicht die breitbandigen Einzelereignispegel (SEL), sondern die frequenz aufgelösten Einzelereignispegel, hier Terzspektren, verwendet und voneinander abgezogen. Dabei wird das Terzspektrum der Referenzmessung von dem Terzspektrum der Messung mit Schallschutzkonfiguration (BBC) abgezogen. Es ergeben sich durch diese Berechnungsmethode somit negative Werte für ein funktionierendes Schallminderungssystem.

Für die nachfolgenden Abbildungen wurden die 50% Perzentil-Terzspektren des Einzelereignispegels über die Pfahlrammungen, bei denen die gleiche Blasenschleierkonfiguration (BBC 2 mit Pfahldurchmesser 50 mm) eingesetzt wurde, alle Fundamente mit gleicher Blasenschleierkonfiguration gemittelt und das 50% Perzentil-Terzspektrum des Einzelereignispegels der gemittelten Referenzmessungen (Pfahldurchmesser 50 mm) abgezogen. Zur Verdeutlichung der spektralen Einfügungsdämpfung (Differenzspektren) sind in Abb. 1-27 das Terzspektrum der Referenzmessungen und das Terzspektrum einer getesteten Konfiguration des Blasenschleiers (BBC 2 mit maximaler Luftmenge) dargestellt.

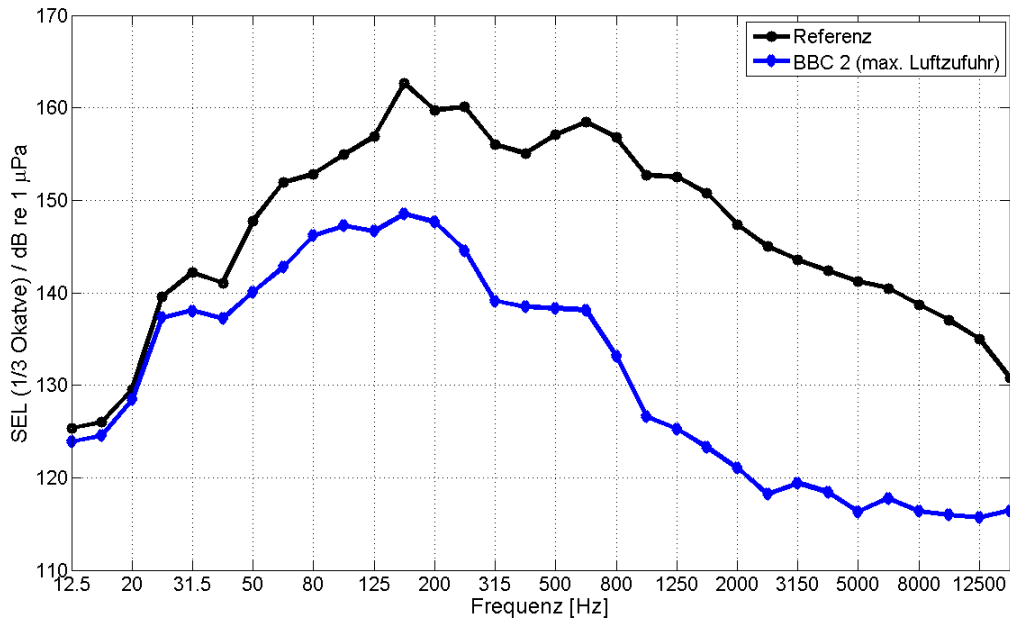


Abb. 1-27: Terzspektren des Einzelereignispegels der (gemittelten) Referenz (ohne Schallminderungssystem; schwarze Linie) im Vergleich zu einer ausgewählten BBC-Konfiguration (BBC 2 mit maximaler Luftmenge, blaue Linie) in einem Abstand von 750 m zum Rammort. Die Messungen erfolgten in Abständen zwischen 685 m und 850 m und wurden mittels geometrischer Ausbreitungsdämpfung auf einen exakten Abstand von 750 m normiert.

Im Beispiel zeigt sich – mit Ausnahme des Frequenzbereiches zwischen 400 Hz und 2.000 Hz – ein typisches Terzspektrum für die Rammung ohne Schallminderungssystem (z. B. Vergleich mit Nehls & Betke 2011). Die maximale akustische Energie durch den Rammschlag ergibt sich im Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 400 Hz. Zu höheren und niedrigeren Frequenzen fällt das Spektrum deutlich ab. In dem Frequenzbereich zwischen 400 Hz und 2.000 Hz fallen die Pegel i.d.R. zu höheren Frequenzen deutlich stärker ab als in obiger Abbildung. Diese Unterschiede zu einem typischen Terzspektrum sind nicht geklärt und vermutlich auf die örtlichen Gegebenheiten und Randbedingungen der Rammungen zurück zu führen.

Bei Verwendung eines Blasenschleiers zeigen sich im Terzspektrum bei tiefen Frequenzen keine wesentlichen Unterschiede zur Referenzsituation ($f < 20$ Hz); zu höheren Frequenzen nimmt die Differenz zwischen Referenzmessung und BBC-Messung zu. Für den Fall "Rammung mit Blasenschleier" liegt das Energiemaximum des Einzelereignispegels Das Energiemaximum bei eingesetztem Schallschutzsystem (BBC) befindet sich im Bereich 80 Hz bis ca. 200 Hz.

Zur Verdeutlichung der schallmindernden Wirksamkeit (Einfügungsdämpfung) des Großen Blasenschleiers ist in Abb. 1-28 das Differenzspektrum dargestellt.

Negative Werte im Differenzspektrum bedeuten, dass eine Reduktion des Hydroschalls bei dieser (Mitten-) Frequenz erfolgt. Null und positive Werte bedeuten, dass keine Reduktion vorliegt.

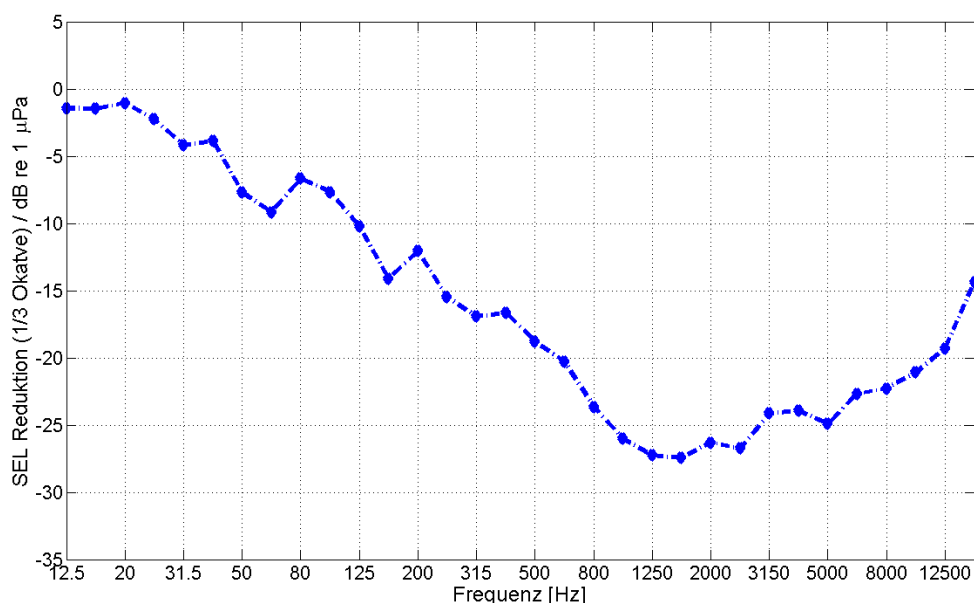


Abb. 1-28: Differenzspektrum zu Abb. 1-27 (Differenz zwischen Terzspektrum mit und ohne Blasenschleier).

Es ergibt sich für die dargestellte BBC-Konfiguration (BBC 2 mit maximaler Luftzufuhr) eine Schallminderung von 0 dB bis 10 dB im Frequenzbereich $31,5 \text{ Hz} \leq f \leq 100 \text{ Hz}$. Im Bereich des höchsten Energieeintrags ($100 \text{ Hz} \leq f \leq 400 \text{ Hz}$) ergeben sich Werte von etwa 10 dB bis 15 dB. Zu höheren Frequenzen nimmt die Dämpfung nochmals bis zu Werten von über 25 dB (im Frequenzbereich 1 kHz bis 3 kHz) zu. Im hochfrequenten Bereich ($f > 4.000 \text{ kHz}$) reduziert sich die Dämpfung anschließend stetig von über 25 dB auf unter 10 dB. Dieser Verlauf der frequenz aufgelösten Durchgangsdämpfung ist typisch für diverse Schallminderungssysteme (z. B. Bellmann 2012, Nehls & Betke 2011).

Eine Ursache für die Abnahme der Dämpfung zu hohen Frequenzen hin könnte darin bestehen, dass in diesem Frequenzbereich durch die Rammung wenig akustische Energie eingetragen wird. Eventuell wird schon bei einer Schallreduktion von 10 dB bis 20 dB ein Pegel erreicht, der sich im Bereich des Hintergrundschallpegels befindet. Ein anderer möglicher Grund wäre die frequenzabhängige Schallreduktion des Blasenschleiers (vgl. Kapitel B.1, S. 35).

D.2.6 Messunsicherheit und Messvarianz

Messunsicherheit

Nach dem Messkonzept für Unterwasserschallmessungen des BSH (2011) dürfen nur Messsysteme eingesetzt werden, deren gesamte Messkette eine Abweichung der Empfindlichkeit $< 2 \text{ dB}$ bzw. $\pm 1 \text{ dB}$ besitzen. Die verwendeten Messsysteme der itap GmbH erfüllen diese Anforderungen und besitzen eine hohe Reproduzierbarkeit von $\leq \pm 1 \text{ dB}$ Abweichung. Des Weiteren werden die verwendeten Hydrophone regelmäßig einer internen und externen Kalibrierung unterzogen. In der Regel ist jedoch bei Feldmessungen im Offshore-Bereich auch bei ruhiger See eine unsystematische Messunsicherheit bei Wiederholungsmessungen im Bereich von $\geq \pm 2 \text{ dB}$ zu erwarten. Zu tieferen Frequenzen hin ($< 100 \text{ Hz}$) werden diese Messunsicherheiten wahrscheinlich größer ausfallen, beispielsweise aufgrund von Wellenschlag. Eine systematische Untersuchung zu diesem Thema liegt jedoch nicht vor.

Messvarianz

Die Einbringung eines Gründungspfahls in den Meeresboden erfordert i. d. R. mehrere tausend Rammschläge (vgl. Tab. 1.22 und Kapitel D.3.1). Die 5% und 90% Perzentilwerte des Einzelereignispegels (SEL) liegen dabei durchschnittlich um $4 \text{ dB} \pm 1,5 \text{ dB}$ pro Pfahl auseinander (vgl. Kapitel D.8.1). Zudem ergeben sich beim Vergleich vom erzielten Einzelereignispegel (z.B. SEL_{50}) an mehreren Fundamentstandorten mit gleicher Schallschutz-Systemkonfiguration Differenzen in vergleichbarer Größenordnung.

Diese Unterschiede sind nicht auf systematische oder unsystematische Messunsicherheiten zurückzuführen, sondern lassen sich i. d. R. auf die verwendete Schlagenergie (von Softstart bis maximale Energie) und wahrscheinlich auch auf die schallabstrahlende Mantelfläche (Rammungen nur über Wasser oder auch z. T. unter Wasser) zurückführen.

Neuere Messergebnisse aus dem Baumonitoring anderer Offshore-Windparks (unveröffentlichte Messdaten der itap GmbH; Wilke et al. 2012) zeigen, dass auch die Bodenschichtung und die damit verbundenen Übertragungen der Rammenergie über den Boden einen nicht unerheblichen Einfluss auf den emittierten Hydroschall haben können (Bodenkopplung).

Diese Unterschiede in den Messergebnissen sind somit als Messvarianz (Bandbreite) zu werten und nicht als Messunsicherheit. Durch die Angaben des 5%, 50% und 90% Perzentilwertes für den Einzelereignispegel pro Fundament wird diese statistische Varianz adäquat abgebildet und kann zur Charakterisierung der gesamten Rammaktivitäten qualitativ und quantitativ genutzt werden.

D.3 Ergebnisse der Hydroschallmessungen

D.3.1 Zeitlicher Verlauf des Einzelereignispegels (SEL)

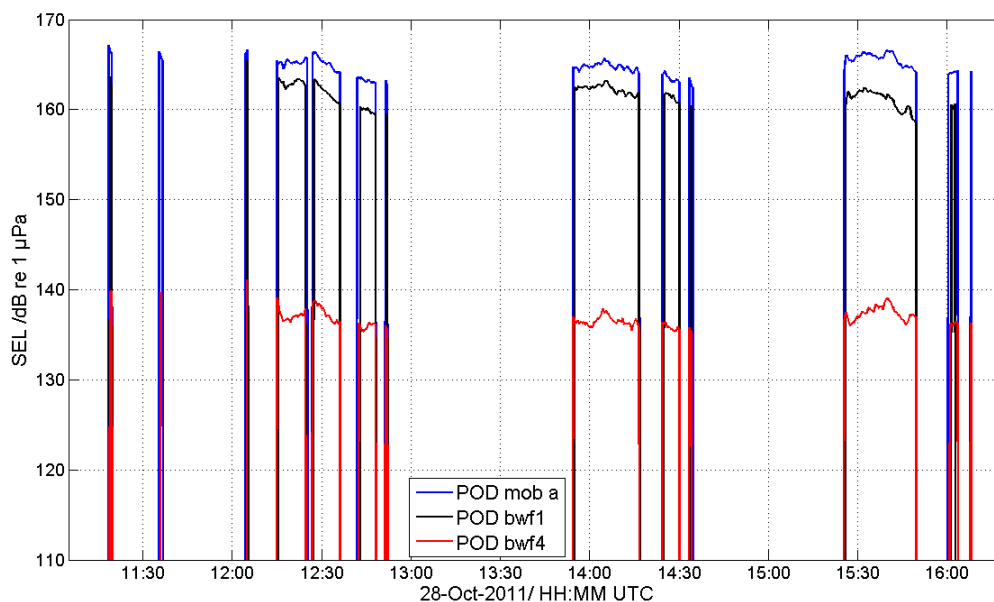


Abb. 1-29: Zeitlicher Verlauf des Einzelereignispegels (SEL, breitbandig) bei den Rammarbeiten zum Fundamentstandort BW35 an unterschiedlichen Messpositionen in unterschiedlichen Entfernungen (mob a: 1,5 km; bwf1: 2,9 km; bwf4: 18,4 km).

Der zeitliche Verlauf des Einzelereignispegels (SEL_{50}) gemessen in unterschiedlichen Entfernungen zu einer Rammung an einem Fundamentstandort (BW35) ohne die Verwendung eines Schallminderungssystems (Referenzmessung) ist in Abb. 1-29 dargestellt. Jeder Fundamentstandort

bestand aus insgesamt drei Pfählen (Tripod im pre-piling Verfahren), die nacheinander in Etappen ins Sediment gerammt wurden.

Es zeigte sich, dass die gemessenen Hydroschallimmissionen (hier Einzelereignispegel) mit zunehmendem Abstand zur Rammstelle erwartungsgemäß deutlich abnahmen.

Die Hydroschallimmissionen an einer festen Messposition variierten zum Teil über den Rammvorgang eines Pfahls um ± 3 dB (vgl. Kapitel D.3.2, S. 79). Ein Anstieg des Einzelereignispegels (SEL) zu Beginn einer Rammung ist mit einer Erhöhung der Rammenergie vom Softstart-Betrieb (ca. 200 kJ) schrittweise auf maximale Rammenergie (ca. 1.000 kJ bis 1.200 kJ) zu erklären. Der teilweise zu beobachtende Abfall der Einzelereignispegel zum Ende einer Pfahlrammung hin ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass die Pfähle gegen Ende immer unterhalb der Wasseroberfläche gerammt wurden und die abstrahlende Mantelfläche der Pfähle kleiner wurde. Jeder Pfahl reichte zum Ende einer Rammung bei Wassertiefen von mehr als 20 m nur noch ca. 6 m aus dem Sediment.

Beim Vergleich der drei zu rammenden Pfähle pro Fundamentstandort ergaben sich Unterschiede von mehreren dB zwischen den Pfählen eines Fundaments. Diese Unterschiede waren nicht vollständig auf die verwendete Rammenergie oder die abstrahlende Mantelfläche zurückzuführen und konnten nicht abschließend geklärt werden. Eventuell waren unterschiedliche Bodenkopplungen oder andere Einflussfaktoren dafür verantwortlich.

Im Anhang sind die zeitlichen Verläufe des Einzelereignispegels und des Spitzenpegels für alle Schallminderungskonfigurationen exemplarisch an jeweils einem Fundamentstandort dargestellt (Anhang S. 215 ff).

D.3.2 Gemessene Einzelereignis- und Spitzenpegel in einer Distanz von 750 m zum Rammort

In der nachfolgenden Tabelle Tab. 1.9 wurden die Messwerte der mobilen Messpositionen mithilfe der geometrischen Ausbreitungsdämpfung auf eine exakte Entfernung von 750 m normiert, damit die Messergebnisse mit dem Schallschutzgrenzwert von $160 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ und $190 \text{ dB}_{\text{LPeak}}$ zu vergleichen sind. Es wurde jeweils die mobile Messposition verwendet, die dem Zielabstand von 750 m am nächsten war, um einen möglichen Berechnungsfehler durch Verwendung der geometrischen Ausbreitungsdämpfung zu minimieren. Die beiden mobilen Messpositionen innerhalb des Baufeldes wurden in Abständen von 464 m bis 4.299 m zum jeweiligen Rammort verlegt. Die Unterschiede, die bei Verwendung unterschiedlicher Methoden und Formeln für die Ausbreitungsdämpfung entstehen (Kapitel D.8.6), befinden sich in diesem Entfernungsbereich deutlich unterhalb von 1 dB, so dass mithilfe der geometrischen Ausbreitungsdämpfung keine systematischen Fehler bei der Normierung auftreten.

Durch die Wahl des Abstandes von 750 m sind die Messwerte zudem mit diversen Literaturdaten unterschiedlicher eingesetzter Schallminderungsmaßnahmen (z. B. Wilke et al. 2012, Bellmann 2013) und Messungen aus derzeitigen bzw. zukünftigen Effizienzkontrollen beim Bau von OWPs mit unterschiedlichen Schallminderungssystemen vergleichbar. I. d. R. werden bei der Effizienzkontrolle in laufenden Bauvorhaben die akustischen Kenngrößen Einzelereignispegel und Spitzenpegel aufgrund der gegebenen Messvarianz auf ganze dB-Werte gerundet. Von diesem Vorgehen wird im vorliegenden Fall abgewichen, um die nachfolgenden Berechnungen über verschiedene Systemkonfigurationen transparent zu halten.

Im Anhang (S. 215) sind sämtliche Messergebnisse jeder Rammung und jeder Messposition zusammengefasst.

Tab. 1.9: Einzelerignispegel (SEL) und Spitzenpegel (L_{Peak}) normiert auf eine Entfernung von 750 m.

Nr	Fund.	Pfahl Wandstärke [mm]	BBC-Typ	Einzelerignispegel SEL [dB]			L_{Peak} [dB]	Luftmenge	Kommentar
				90%	50%	5%			
1	BW01	50	Lin. BBC 2 ⁶	167,7	170,4	172,3	197,5	0	Messposition ohne BBC ^{*1}
				152,2	156,6	162,6	184,9	0,32	Zusatzmessgerät „hinter“ dem angeschalteten lin. BBC
				158,7	167,3	169,2	193,9	0	Zusatzmessgerät „hinter“ dem kurzzeitig ausgeschalteten lin. BBC
2	BW03	50	Lin. BBC 1	155,8	157,9	159,8	182,7	0,32	Messposition „hinter“ BBC Variation der Luftmenge
3	BW46	50	-	164,1	166,8	169,4	196,2		
4	BW47	50	BBC 2	159,5	161,3	162,2	186,5	0,32	
5	BW15	50	BBC 1	159,4	161,7	163,6	186,1	0,32	Variation der Luftmenge
			BBC 1	159,6	161,5	162,4	183,5	0,23	
			BBC 1	160,0	163,4	164,3	183,6	0,15	
6	BW14	50	BBC 2	158,7	159,7	161,9	183,1	0,23	Variation der Luftmenge
			BBC 2	159,7	160,8	161,9	183,0	0,15	
			BBC 2	156,7	157,8	159,5	180,5	0,32	
7	BW12	50	BBC 1	158,7	161,0	163,2	184,6	0,32	
8	BW34	50	BBC 2	153,8	156,8	158,2	185,3	0,32	
9	BW26	50	BBC 1	157,5	159,5	161,5	183,3	0,32	
10	BW35	50	-	167,5	169,3	170,8	192,8		
11	BW49	50	BBC 1	159,5	160,8	162,3	182,1	0,32	Variation der Luftmenge
			BBC 1	158,1	159,8	160,8	182,8	0,23	
			BBC 1	160,1	161,7	162,8	183,9	0,15	
			BBC 1	162,6	163,9	165,1	187,0	0,07	
12	BW41	50	-	166,1	169,4	170,7	195,1		
13	BW42	50	BBC 1	159,5	162,0	165,2	187,1	0,32	
14	BW43	50	-	-	-	-	-		Kein Messsystem ausgelegt
15	BW54	50	BBC 2	153,8	157,8	160,0	182,1	0,32	Variation der Luftmenge
			BBC 2	159,4	162,1	163,6	186,1	0,23	
			BBC 2	157,6	159,2	161,2	183,7	0,15	
			BBC 2	161,5	163,2	163,9	187,0	0,07	
			BBC 2	163,2	167,1	167,3	191,8	0	
16	BW53	50	BBC 1	154,8	158,3	160,2	183,4	0,32	
17	BW50	50	BBC 2	154,2	157,0	159,9	183,4	0,32	
18	BW61	50	BBC 1	158,6	162,1	165,6	188,3	0,32	
19	BW64	50	BBC 2	153,1	156,6	158,4	180,6	0,32	
20	BW44	50	BBC 1	161,1	162,9	164,8	187,7	0,32	
21	BW65	50	BBC 2	154,0	157,2	160,0	183,6	0,32	
22	BW66	50	BBC 2	152,2	155,1	157,7	181,5	0,32	
23	BW55	50	BBC 2	-	-	-	-		Kein Messsystem ausgelegt
24	BW52	50	BBC 2	163,8	167,6	170,1	192,9	?	
25	BW62	50	BBC 2	160,0	162,3	164,8	187,4	0,23	
26	BW63	70	-	168,9	169,9	172,2	195,1		Auf der Grundlage der Messergebnisse ist von

⁶ Lin. BBC 2 wurde nur für wenige Minuten ausgeschaltet. Zudem variierte die Messposition aufgrund von Verdriftungen des Schiffes zwischen 800 m und 1.000 m. Daten können nicht für eine statistische Evaluierung der Blasenschleier-Systemkonfiguration Lin. BBC 2 verwendet werden.

Nr	Fund.	Pfahl Wand- stärke [mm]	BBC-Typ	Einzelereignispegel SEL [dB]			L _{Peak} [dB]	Luft- menge	Kommentar
				90%	50%	5%			
								einem Ausfall auszugehen, daher vermutlich Referenz	
27	BW51	70	BBC 2	162,1	164,4	166,6	185,7	0,23 (?)	Teilweise Kompressor defekt Variation der Luftmenge
			BBC 2	161,6	163,7	168,3	189,8	0,14	
			BBC 2	160,8	163,0	165,0	185,2	0,07	
			BBC 2	167,0	170,4	171,4	194,7	0	
28	BW48	70	BBC 2	165,1	166,3	166,8	187,9	0,07	Variation der Luftmenge
			BBC 2	162,2	162,8	164,4	184,8	0,14	
			BBC 2	161,0	162,0	164,4	184,4	0,23	
			BBC 2	164,1	165,3	166,0	187,0	0,07	
			BBC 2	163,5	163,2	164,0	184,1	0,14	Zusatzmessposition 1
			BBC 2	162,0	162,6	163,2	181,8	0,23	
			BBC 2	165,1	167,2	167,6	188,8	0,07	Zusatzmessposition 2
			BBC 2	162,2	162,8	165,7	185,2	0,14	
BBC 2	162,4	162,2	161,2	182,8	0,23				
29	BW24	70	DBBC 2a	169,1	170,6	171,7	191,8	0	Messposition wird nur teilweise vom BBC abgeschirmt* ¹ Variation der Luftmenge
			DBBC 2a	169,4	169,5	169,6	190,2	0,23 (?)	
			DBBC 2a	167,3	168,5	169,9	191,7	0	
			DBBC 2a	167,9	169,0	171,7	194,0	0,23 (?)	
			DBBC 2a	153,7	154,9	157,8	179,3	0,32	
30	BW33	70	DBBC 2b	168,4	171,9	174,5	199,1	0,32	Messposition wird nur teilweise oder gar nicht vom BBC abgeschirmt. * ¹ Variation der Luftmenge
			DBBC 2b	168,2	170,6	172,5	196,8	0,32	
			DBBC 2b	153,7	156,0	157,9	184,0	0,32	
			DBBC 2b	154,4	155,7	159,9	183,9	0,32	
31	BW32	70	-	170,2	172,6	173,8	197,5		
32	BW31	70	-	172,3	174,2	176,3	202,0		
33	BW40	70	-	168,4	170,8	172,9	196,2		
34	BW36	70	-	169,1	171,9	173,0	194,6		
35	BW23	70	BBC 2	159,4	161,9	166,6	188,1	0,23 - 0,32	Anzahl der Kompressoren unklar, z. T. Ausfall einiger Kompressoren
36	BW13	50	BBC 2	158,6	161,2	164,2	186,4	0,23 - 0,32	
37	BW25	50	BBC 2	159,5	161,1	163,5	185,5	0,23 - 0,32	
38	BW02	50	BBC 2	157,5	159,3	162,5	185,7	0,32	
39	BW37	50	BBC 2	154,3	156,4	158,2	179,4	0,32	
40	BW04	50	BBC 2	157,3	158,7	160,9	180,2	0,32	

In Tab. 1.10 sind die 5%, 50% und 90% Perzentilwerte für den Einzelereignispegel (SEL) gemittelt über alle Fundamentstandorte mit gleicher Blasenschleier-Systemkonfiguration sowie getrennt nach getesteter Schallschutzkonfiguration bzw. Referenzmessung, zusammengefasst. Für den Spitzenpegel (L_{Peak}) wird der maximale Spitzenpegel pro Schallschutzkonfiguration bzw. Referenzmessung dargestellt. Sämtliche Messergebnisse sind nach der Mittelung auf ganze dB-Werte gerundet worden. Im Anhang (S. 211) befindet sich eine genaue Aufschlüsselung der verwendeten Einzelergebnisse zu der Tab. 1.10. Auf eine statistische Darstellung von Standardabweichungen, Median-Werten, Minimal und Maximalwerten wird aufgrund der geringen Fundamentanzahl im

vorliegenden Fall verzichtet. Im Kapitel D.8.1 wird jedoch der aufgespannte Merkmalsraum detailliert dargestellt und diskutiert.

Tab. 1.10: Zusammenfassung der gemittelten Einzelereignispegel (SEL) und des maximalen Spitzenpegels (L_{Peak}) in 750 m Entfernung für unterschiedliche Schallminderungskonfigurationen bzw. Referenzmessungen (genauere Aufschlüsselung: s. Anhang Tab. 7 & Tab. 8).

Nr.	BBC-Konfig.	Luftmenge [m ³ /(min*m)]	Fundamente	Wandstärke [mm]	SEL [dB]			L_{Peak} [dB]
					90% [dB]	50% [dB]	5% [dB]	
1	Referenz	0	BW46, BW35, BW41 ^{*1}	50	166	169	170	196
2			BW63, BW24, BW32, BW31, BW40, BW36	70	170	172	173	198 (202,0) ^{*2}
3			alle o.g.	50 & 70	168	171	172	198
5	BBC 1	0,32	BW15, BW12, BW26, BW49, BW42, BW53, BW61, BW44	50	159	161	163	188
6				70	Nicht getestet			
7	BBC 2	0,32	BW47, BW14, BW34, BW54, BW50, BW64, BW65, BW66, BW02, BW37, BW04	50	155	158	160	187
8			BW23 ^{*3}	70	159	162	167	188

*¹ Die Messergebnisse der Rammungen mit einem lin. Blasenschleier (BW01 und BW03) wurden aufgrund von möglichen Reflektionen am lin. Blasenschleier auf der gegenüberliegenden Seite des zu rammenden Pfahles, sowie der möglichen Verdriftung der Messposition während der Rammungen nicht zur Mittelwertbildung verwendet.

*² Einmalig wurde ein Spitzenpegel von 202 dB am Fundament BW 31 gemessen. Bei allen anderen fünf Fundamenten lagen die Spitzenpegel bei 195 dB bis 197,5 dB. Der Unterschied zwischen BW31 und den anderen Fundamenten ist nicht geklärt und könnte auf Störgeräuschen basieren, so dass im Folgenden 197,5 dB als maximaler Spitzenpegel verwendet wird.

*³ Es ist nicht eindeutig geklärt, ob bei BW23 die volle Luftleistung zur Verfügung stand.

Die Werte der Fundamente BW54 und BW51 wurden für die Referenzmessungen nicht verwendet, da die Abschaltungszeit zu gering war, um die im Wasser vorhandene Luftmenge vollständig aus dem Wasser austreten zu lassen.

Es zeigte sich, dass – unter der Voraussetzung eines funktionierenden Blasenschleiers mit konstanter maximaler Luftzufuhr von 0,32 m³/(min*m) unter Düsen Schlauchkonfiguration BBC 2 bei einer Wandstärke von 50 mm – die über alle vorliegenden Messungen gemittelten Einzelereignispegel den Schallschutzgrenzwert von 160 dB in 750 m bei allen dargestellten Perzentilwerten einhielten (Tab. 1.10). Der über alle vorliegenden Messungen gemittelte Spitzenpegel L_{Peak} unterschritt bei beiden Düsen Schlauchkonfigurationen (BBC 1 und BBC 2) mit einer Luftmenge von 0,32 m³/(min*m) den Schallschutzgrenzwert von 190 dB L_{Peak} in 750 m.

Tab. 1.11 zeigt eine Auflistung der Anzahl von Standorten/Messungen pro Schallschutzkonfiguration und gibt an, bei wie vielen Fundamentstandorten Variationen des eingesetzten Schallminderungssystems (z.B. der Luftmenge) durchgeführt wurden. Laut Messvorschrift des BSH ist für die Einhaltung des Schallschutzgrenzwertes von 160 dB $_{SEL}$ in 750 m der 5% Perzentilpegel des Einzelereignispegels zu verwenden. Sollte es zu Überschreitungen von 160 dB $_{SEL}$ kommen, so sind diese in geeigneter Weise zu dokumentieren (BSH 2011). Eine standardisierte Dokumentation der Überschreitung ist jedoch nicht beschrieben. In Tab. 1.12 und Tab. 1.13 ist angegeben, in wie vielen

Fällen (Rammungen an Fundamentstandorten) der 5%, 50% und 90% Perzentilwert des Einzelereignispegels (SEL) bzw. der Maximalwert des Spitzenpegels (L_{Peak}) bestimmte Pegel-Werte⁷ unterschritt. Diese Auflistung ist getrennt nach den beiden Düsen Schlauch-Konfigurationen BBC 1 und BBC 2 und jeweils nur für die Fundamentstandorte bzw. Rammperioden dargestellt, bei denen die maximale Luftmenge von $0,32 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$ verwendet wurde. Auf diese Weise wurde aufgezeigt, in welchen Pegelbereichen sich die gemessenen Einzelereignispegel und Spitzenpegel befanden. Zudem wurde die gemessene Varianz der akustischen Parameter dokumentiert.

Tab. 1.11: Anzahl der Fundamentstandorte mit Messungen pro Schallminderungskonfiguration (Gesamtanzahl: 38; da zwei Fundamente ohne Messungen).

Nr.1	BBC Konfiguration	Anzahl der Fundamente	Kommentar
1	Lin. BBC 1	1	
2	Lin. BBC 2	1	
3	BBC 2	18	Zusätzlich ein Fundament ohne Messwerte.
3.1	BBC 2	9	Volle Luftleistung ($0,32 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$), keine Variation der Luftmenge
3.2	BBC 2	5	Genauere Luftmenge nicht bekannt, da z.T. Kompressoren ausgefallen sind.
3.3	BBC 2	3	Variationen mit Luftmenge während der Versuchsdurchführung an diesen Fundamentstandorten
3.4	BBC 2	2	Ohne volle Luftleistung
4	BBC 1	8	Gesamt
4.1	BBC 1	6	Volle Luftleistung ($0,32 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$), keine Variation der Luftmenge
4.2	BBC 1	2	Variationen mit Luftmenge während der Versuchsdurchführung an diesen Fundamentstandorten
5	DBBC 2a/b	2	Jeweils einmal mit unterschiedlichen Abständen der Düsen schläuche zueinander.
6	Referenz	8	Ohne BBC, zusätzlich ein Fundament ohne Messwerte.

Tab. 1.12: Anteil der Fundamentstandorte, an denen bestimmte Pegelwerte bei Verwendung des Blasenschleiers BBC 2 mit voller Luftmenge ($0,32 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$) unterschritten wurden (Gesamtanzahl 11: neunmal Rammungen am gesamten Fundamentstandort, zweimal nur zwischenzeitliche Rammungen mit BBC 2 und maximaler Luftmenge).

Parameter	Einzelereignispegel (SEL)			
	$\leq 160 \text{ dB}$	$160 \text{ dB} < \text{SEL} \leq 163 \text{ dB}$	$163 \text{ dB} < \text{SEL} \leq 166 \text{ dB}$	$> 166 \text{ dB}$
SEL ₉₀	100 %	0 %	0 %	0 %
SEL ₅₀	91 %	9 %	0 %	0 %
SEL ₅	73 %	27 %	0 %	0 %
Parameter	Spitzenpegel (L_{Peak})			
	$\leq 190 \text{ dB}$	$190 \text{ dB} < L_{Peak} \leq 193 \text{ dB}$	$193 \text{ dB} < L_{Peak} \leq 196 \text{ dB}$	$> 196 \text{ dB}$
L_{Peak}	100 %	0 %	0 %	0 %

⁷ Ein Anstieg um 3 dB entspricht einer Verdopplung der akustischen Energie bzw. der akustischen Leistung.

Der 90% Perzentilpegel des Einzelereignispegels lag für jede Rammung mit dem BBC 2 und maximaler Luftmenge ($0,32 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$) unter $160 \text{ dB}_{\text{SEL}}$. Der 50% Perzentilpegel unterschritt – bis auf eine Ausnahme – ebenfalls den geforderten Schallschutzgrenzwert von $160 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ in 750 m Abstand. Der 5% Perzentilpegel lag in 73% aller Rammungen unterhalb der geforderten $160 \text{ dB}_{\text{SEL}}$, in 27% der Fälle zwischen $160 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ und $163 \text{ dB}_{\text{SEL}}$, niemals aber über $163 \text{ dB}_{\text{SEL}}$.

Tab. 1.13: Anteil der Fundamentstandorte, an denen bestimmte Pegelwerte bei Verwendung des Blasenschleiers BBC 1 mit voller Luftmenge ($0,32 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$) unterschritten wurden (Gesamtanzahl 8: sechsmal Rammungen am gesamten Fundamentstandort, zweimal zwischenzeitliche Rammungen mit BBC 1 und maximaler Luftmenge).

Parameter	Einzelereignispegel (SEL)			
	< 160 dB	$160 \text{ dB} \leq \text{SEL} \leq 163 \text{ dB}$	$163 \text{ dB} < \text{SEL} \leq 166 \text{ dB}$	> 166 dB
SEL ₉₀	87 %	13 %	0 %	0 %
SEL ₅₀	25 %	75 %	0 %	0 %
SEL ₅	0 %	38 %	62 %	0 %
Parameter	Spitzenpegel (L_{Peak})			
	$\leq 190 \text{ dB}$	$190 \text{ dB} < L_{\text{Peak}} \leq 193 \text{ dB}$	$193 \text{ dB} < L_{\text{Peak}} \leq 196 \text{ dB}$	> 196 dB
L_{Peak}	100 %	0 %	0 %	0 %

Der 90% Perzentilpegel des Einzelereignispegels unterschritt $160 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ in 87% aller Rammungen mit dem BBC 1 und maximaler Luftmenge. Jedoch war der 5% Perzentilpegel des Einzelereignispegels immer lauter als die geforderten $160 \text{ dB}_{\text{SEL}}$.

Für beide Blasenschleierkonfigurationen befand sich der Spitzenpegel immer unter $190 \text{ dB}_{L_{\text{Peak}}}$. Beim BBC 2 unterschritt der L_{Peak} sogar in neun von zwölf Fällen 184 dB , so dass im lautesten anzunehmenden Fall (worst case) auch der Parameter $L_{\text{Peak-to-Peak}}$ für den Spitzenpegel die $190 \text{ dB}_{L_{\text{Peak}}}$ nicht überschreiten würde. Beim BBC 1 lag der L_{Peak} in drei von sieben Fällen unter 184 dB , so dass im „worst case“ auch hier der Spitzenpegel $L_{\text{Peak-to-Peak}}$ die $190 \text{ dB}_{L_{\text{Peak}}}$ unterschreiten würde.

Hinsichtlich der dualen Schallschutzgrenzwert-Kriterien zeigte sich somit, dass bei Verwendung des Blasenschleiertyps BBC 2 mit der maximalen Luftmenge ($0,32 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$) der $160 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ -Wert in 73 % der Fälle und der $190 \text{ dB}_{L_{\text{Peak}}}$ -Wert in allen Fällen eingehalten werden konnte. Mit dem BBC 1 war der Lärmschutz geringfügig schlechter, aber immerhin konnte das 5%-Perzentil bei allen gemessenen Rammungen unter $166 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ bleiben und bei 38 % der Fundamente sogar unterhalb von $163 \text{ dB}_{\text{SEL}}$.

Für die Beurteilung der Rammungen aller Fundamente im Windpark Borkum West II sind in der nachfolgenden Tabelle die jeweils lautesten gemessenen Szenarien („worst case“) zusammengefasst. Im Fall, dass während der Rammung an einem Fundamentstandort Variationen der zugeführten Luftmenge durchgeführt wurden oder zwischenzeitlich Ausfälle des Blasenschleiers protokolliert wurden, wurde für die nachfolgende Tabelle jeweils die lauteste Kondition pro Fundamentstandort berücksichtigt („worst case“-Szenario). Diese Betrachtung macht in Bezug auf die Reaktionen von Schweinswalen Sinn, da davon auszugehen ist, dass das lauteste Rammintervall pro Fundamentstandort die stärkste Reaktion der Schweinswale bewirken sollte. Es ist hierbei zu berücksichtigen, dass im Forschungsvorhaben absichtlich verschiedene Luftdurchfluss-Variationen sowie komplette Abschaltungen (Referenzmessungen) des Blasenschleiers durchgeführt wurden. Für die Bewertung der Reaktion der Schweinswale wurde jeweils nur die „lauteste“ Kondition pro Fundamentstandort verwendet. An 12 Fundamentstandorten flossen somit Werte ganz ohne Schallschutz in die Auswertung ein (neunmal komplette Referenzmessungen, dreimal zeitweise Abschaltung des BBC). Die Angaben der nachfolgenden Tabelle erlauben in dem Sinne keine Beurteilung der erreichten Funktionsfähigkeit des Blasenschleiers.

Aufgrund der Prognose auf Basis eines in der itap GmbH entwickelten empirischen Prognosemodells von 172 dB für den Einzelereignispegel in 750 m Abstand zur Baustelle war zu erwarten, dass bei allen Referenzmessungen der Einzelereignispegel (alle Perzentilpegel) über 166 dB_{SEL} und der Spitzenpegel über 190 dB_{L_{Peak}} beträgt (11 von 38 Messungen = 29%).

Tab. 1.14: Anteil der Fundamentstandorte (Gesamtzahl: 38), an denen bestimmte Pegelwerte unterschritten wurden. (In 29% aller Fälle ist aufgrund von Referenzmessungen eine Überschreitung von 166 dB_{SEL} und 190 dB_{L_{Peak}} zu erwarten gewesen.)

Parameter	Einzelereignispegel (SEL)			
	≤ 160 dB	160 dB < SEL ≤ 163 dB	163 dB < SEL ≤ 166 dB	> 166 dB
SEL ₉₀	55 %	5 %	11 %	29 %
SEL ₅₀	29 %	26 %	5 %	40 %
SEL ₅	18 %	16 %	24 %	42 %
Parameter	Spitzenpegel (SEL)			
	≤ 190 dB	190 dB < L _{Peak} ≤ 193 dB	193 dB < L _{Peak} ≤ 196 dB	> 196 dB
L _{Peak}	63 %	11 %	11 %	15 %

D.3.3 Häufigkeitsverteilung der gemessenen akustischen Kenngrößen Einzelereignispegel und Spitzenpegel

In den nachfolgenden vier Abbildungen ist das Pegelhistogramm des Einzelereignispegels einer Messposition für unterschiedliche eingesetzte Schallschutzkonfigurationen exemplarisch dargestellt.

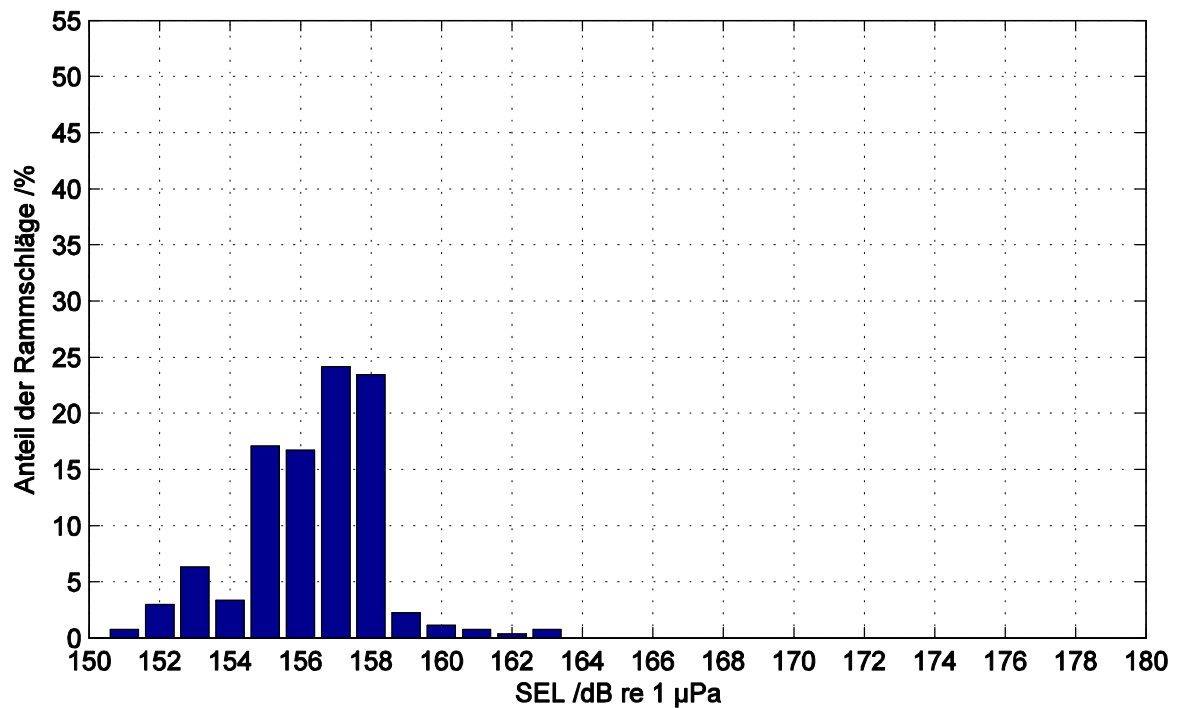
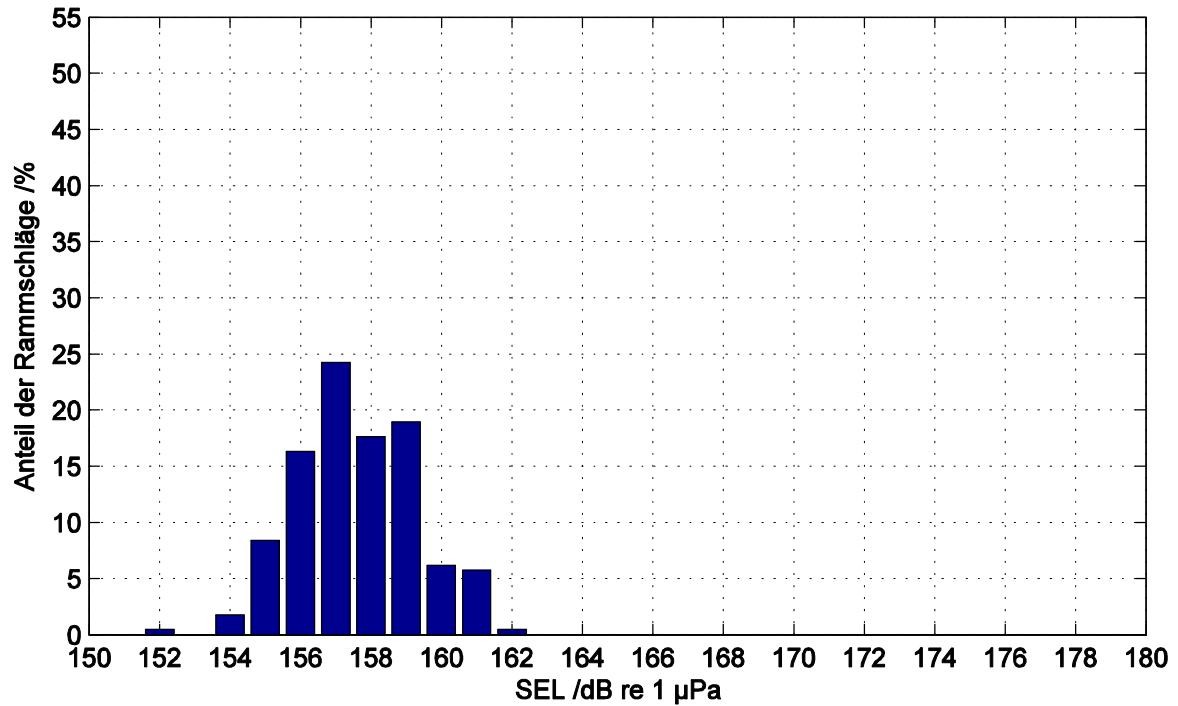


Abb. 1-30: Verteilung des Einzelereignispegels in ca. 750 m Entfernung während der Rammarbeiten mit einem Großen Blasenschleier mit max. Luftzufuhr von $0,32 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$. Oben: BBC 1 am Fundamentstandort BW42 in 1.504 m Entfernung; unten: BBC 2 am Fundamentstandort BW34 in 1.465 m Entfernung.

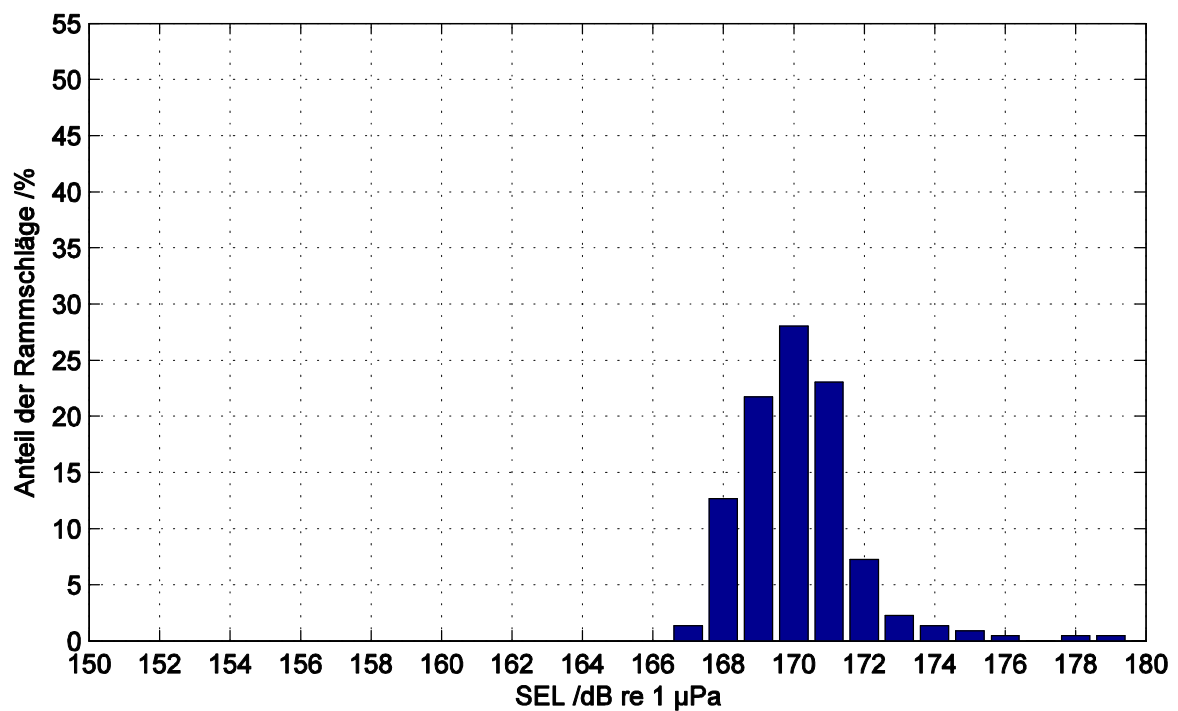
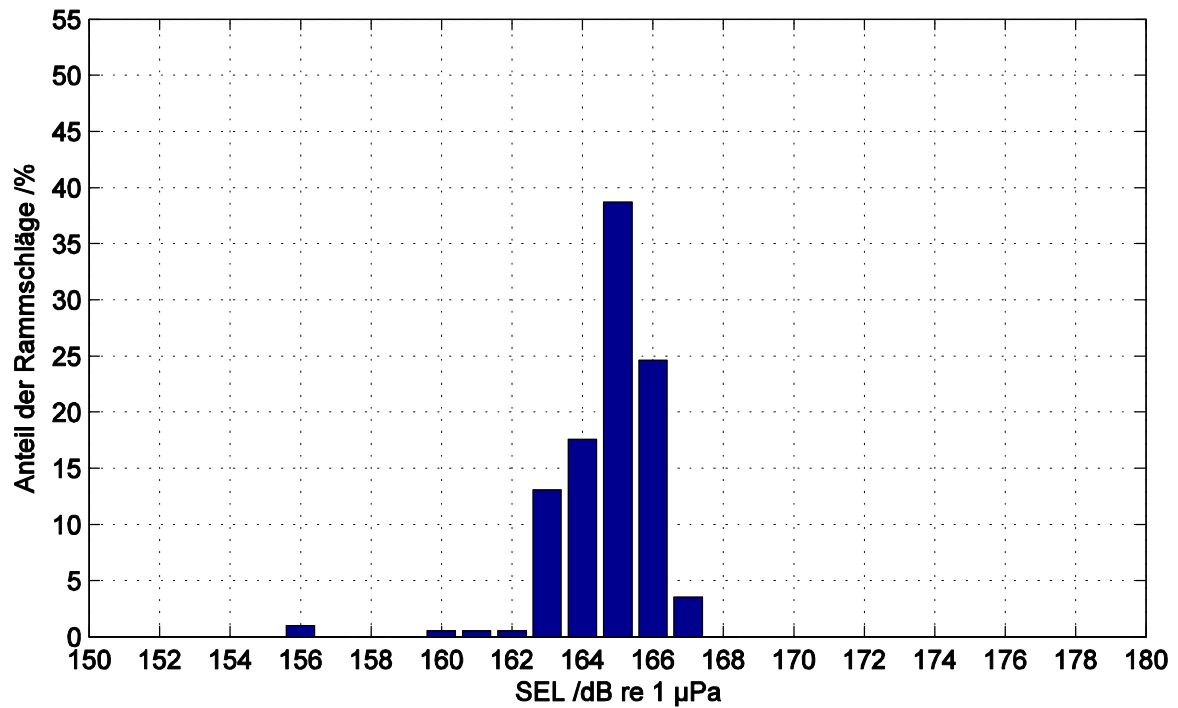


Abb. 1-31: Verteilung des Einzelereignispegels in ca. 1.500 m Entfernung während der Rammarbeiten ohne den Einsatz eines Schallschutzsystems. Oben: am Fundamentstandort BW35 in 1.477 m Entfernung und einem Pfahldurchmesser von 50 mm; unten: am Fundamentstandort BW31 in 1.483 m Entfernung und einem Pfahldurchmesser von 70 mm.

D.4 Direkte Einflussfaktoren auf die schallmindernde Wirkung des Großen Blasenschleiers

D.4.1 Halboffener (linearer) Blasenschleier (Lin. BBC)

Zur Verdeutlichung der schallmindernden Wirkung eines halboffenen (linearen) Blasenschleiers sind in Abb. 1-32 und Abb. 1-33 die zeitlichen Verläufe des breitbandigen Einzelereignispegels (SEL) an der Messposition „hinter“ dem Blasenschleier und auf der gegenüberliegenden Seite (ohne Blasenschleier) bei der Rammung des Fundaments BW01 mit der Düsen Schlauchkonfiguration BBC 2 (kleiner Lochabstand und kleine Löcher) dargestellt (vgl. Kapitel B.4.3, S. 47 ff).

Zwischenzeitlich wurde der lineare Blasenschleier (BBC 2) kurzzeitig abgeschaltet (22:05 Uhr bis 22:08 Uhr).

Eine quantitative Auswertung der Messdaten war aufgrund der Lage der Messpositionen (Schiffsmessungen mit Verdriftung) und der sehr kurzen Abschaltzeiten des Blasenschleiers nicht exakt möglich. Es zeigte sich jedoch qualitativ, dass der halboffene (lineare) Blasenschleier in der Düsen Schlauchkonfiguration BBC 2 mit einer Luftmenge von $0,32 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$ eine schallmindernde (breitbandige) Reduktion des Einzelereignispegels von 10 dB und mehr bewirkte. Bei einer An- oder Abschaltung des linearen Großen Blasenschleiers erhöhte sich der Einzelereignispegel auf der gegenüberliegenden Seite (ohne Blasenschleier, POD mobil 1) nicht, bzw. nicht wesentlich. Es ist also davon auszugehen, dass durch den linearen Blasenschleier, der nur auf einer Seite des zu rammenden Pfahles erzeugt wurde, die Auslegung eines linearen Blasenschleiers auf der einen Seite einer Offshore-Baustelle nicht ein Großteil der akustischen Energie durch Reflexion am linearen Blasenschleier in die gegenüberliegende Richtung (um-) gelenkt wurde. Allerdings konnte auf der Seite ohne Blasenschleier eine Reflexion des Hydroschalls in Form eines zeitversetzten Echos gemessen werden. Der Einzelereignispegel der Reflexion war jedoch um mindestens 10 dB bis 15 dB geringer als der Direktschall. Es ist davon auszugehen, dass bei der Interaktion zwischen Schallwelle und Blasenschleier der Schallwelle Energie entzogen wurde.

Die Schallreduktion nahm bei der Wiedereinschaltung des Blasenschleiers einige Minuten lang stetig zu. Dies lag daran, dass sich zunächst ein Blasenschleier Vorhang in der gesamten Wassersäule durch Aufstieg der Luftblasen ausbilden musste. Bei der Abschaltung eines Blasenschleiers benötigten die Luftbläschen im Wasser ebenfalls eine gewisse Zeit, um bis zur Wasseroberfläche aufzusteigen.

Abb. 1-34 zeigt exemplarisch Terzspektren des Rammschalls mit und ohne Blasenschleier am Fundament BW01. Dort wurde ein linearer Blasenschleier eingesetzt.

Das in Abb. 1-34 dargestellte Terzspektrum in dem Zeitraum ohne Luftzufuhr zeigt erhebliche Unterschiede zu dem Terzspektrum einer Referenzmessung (vgl. Abb. 1-27, S. 76). Das Energie maximum lag im Bereich um 630 Hz. Vermutlich dauerte die Abschaltung des Blasenschleiers nicht so lange, dass alle in der Wassersäule befindlichen Luftbläschen die Oberfläche erreichten. Bei eingeschaltetem Blasenschleier waren die Terzspektren ab einer Frequenz von ca. 80 Hz deutlich geringer als bei abgeschalteter Luftzufuhr.

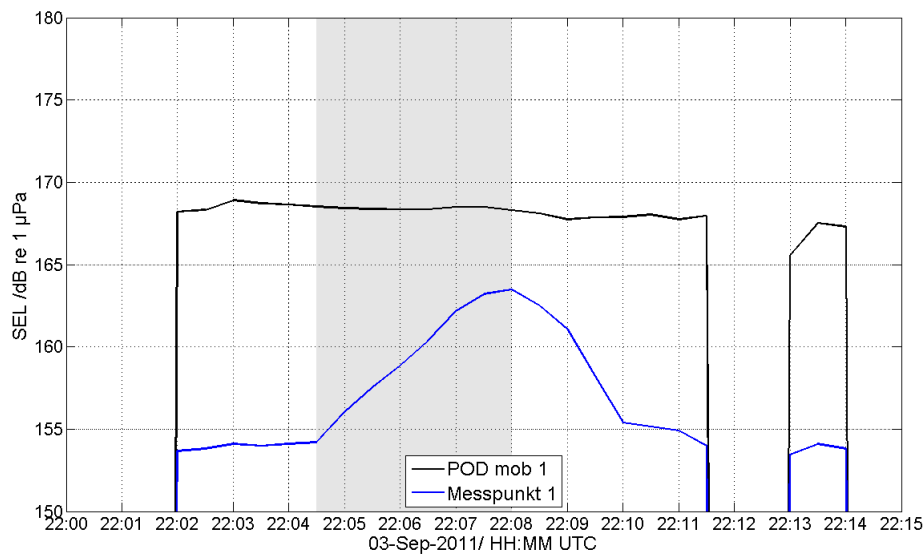


Abb. 1-32: Zeitlicher Verlauf des Einzelereignispegels (SEL) am westlichen Messpunkt (750 m Entfernung, POD mob 1, ohne dazwischen liegenden Blasenschleier – BBC 2) und am östlichen Messpunkt (Entfernung etwa 800 m bis 1.000 m, Messpunkt 1, mit dazwischen liegendem Blasenschleier) bei kurzzeitiger Abschaltung (grau) des Blasenschleiers am Fundament BW01.

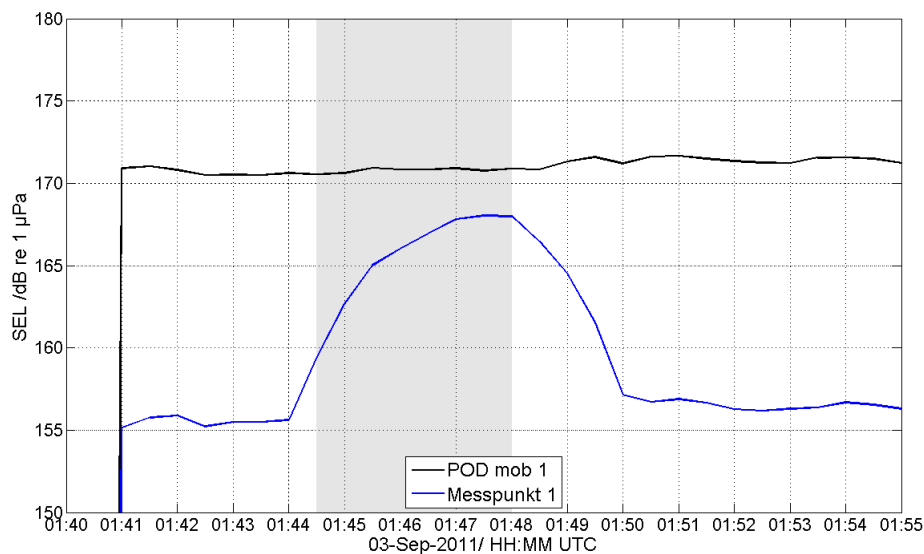


Abb. 1-33: Zeitlicher Verlauf des Einzelereignispegels (SEL) am westlichen Messpunkt (750 m Entfernung, POD mob 1, ohne dazwischen liegenden Blasenschleier – BBC 2) und am östlichen Messpunkt (Entfernung etwa 800 bis 1000 m, Messpunkt 1, mit dazwischen liegendem Blasenschleier) bei kurzzeitiger Abschaltung (grau) des Blasenschleiers am Fundament BW01.

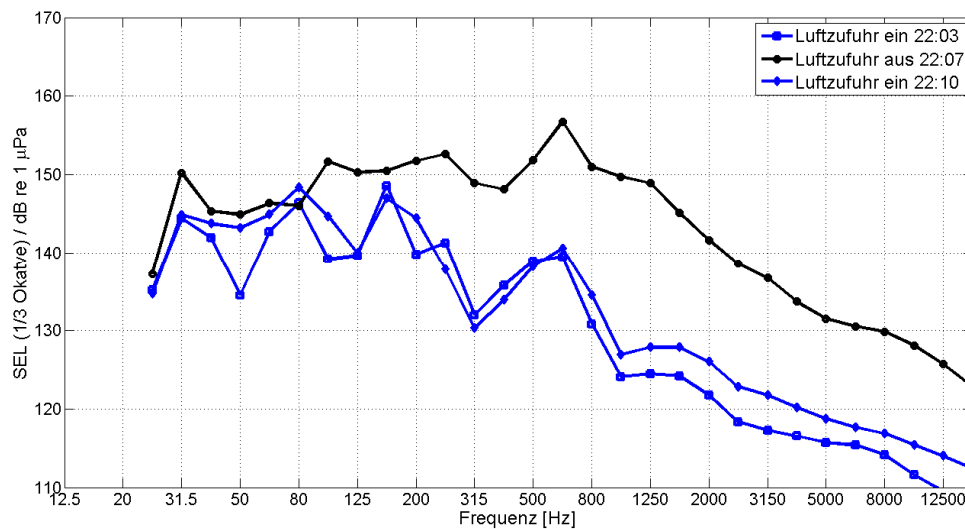


Abb. 1-34: 1/3-Oktav-Spektren(Terzspektren) des Einzelereignispegels (SEL_{50}) zu verschiedenen Zeitpunkten mit und ohne Blasenschleier an der Messposition „hinter“ dem Blasenschleier in einer Entfernung von ca. 800 m bei BW 01. Das 1/3 Oktavspektrum stellt die mittlere Schalleistung eines Rammschlages in Abhängigkeit von der Frequenz dar.

D.4.2 Verwendete Luftmenge

Für den Betrieb des Blasenschleiers standen vier Kompressoren mit einer Gesamtluftmenge von ca. $170 \text{ m}^3/\text{min}$ und einem Gesamtdruck von ca. 9,0 bar am Zuluftverteiler an Bord der *Noortruck* zur Verfügung (Tab. 1.1, S. 41). Diese Angaben beziehen sich laut Hersteller auf die angesaugte Luftmenge pro Zeiteinheit an den Kompressoren (FAD). Die Anzahl der Kompressoren ist jedoch keine geeignete Parametrisierung der verwendeten Luftmenge, da die Luftmenge pro Kompressor unter anderem abhängig vom Hersteller, Typ des Kompressors und dessen Drehzahl ist. In einem ersten Schritt zur objektiven Beschreibung der verwendeten Luftmenge war die laut Hersteller angesogene Luftmenge pro Zeiteinheit aller im Betrieb befindlichen Kompressoren durch die Länge des verwendeten Blasenschleierschlauches zu teilen (Rustemeier et al. 2012). Somit ergab sich als Maß für die verwendete Luftmenge die angesogene Luftmenge (m^3) pro Zeiteinheit (min) und verwendetem Meter Düsen-schlauch (m). Die Schlauchlänge betrug immer 560 m.

In der Abb. 1-35 ist qualitativ der Einfluss der zugeführten Luftmenge beim Betrieb des Großen Blasenschleiers vom Typ BBC 2 durch die zeitliche Darstellung des Einzelereignispegels über die Rammungen beim Fundamentstandort BW54 dargestellt.

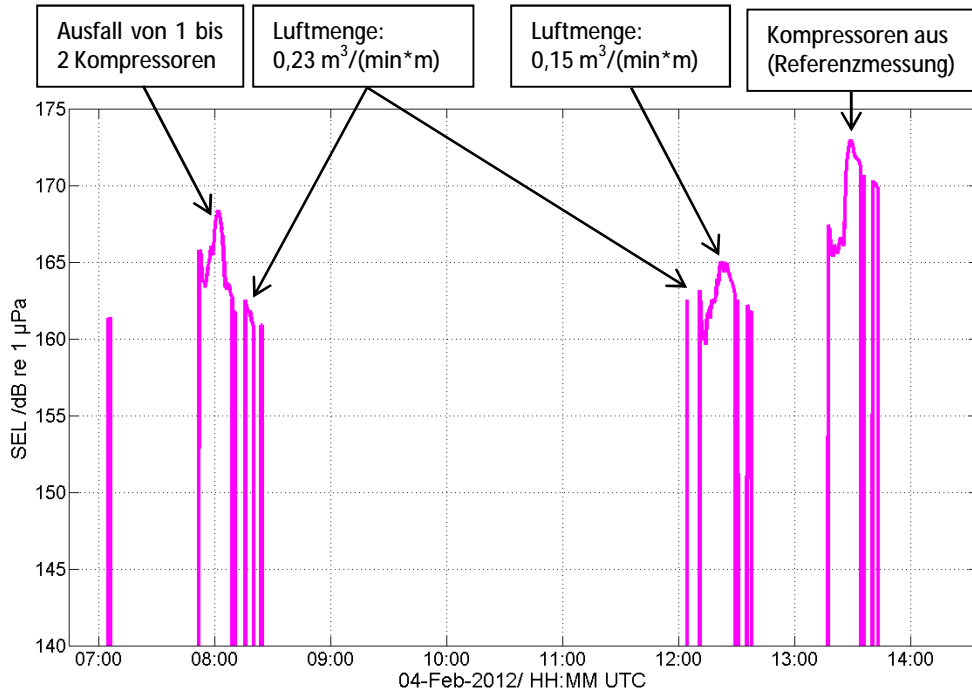


Abb. 1-35: Zeitlicher Verlauf des Einzelereignispegels (SEL) in einer Entfernung von 741 m bei Rammungen mit einem Großen Blasenschleier (BBC 2 am Fundamentstandort BW54). Zwischenzeitlich wurde die zugeführte (Druck-) Luftmenge variiert (z. T. durch technischen Ausfall von Kompressoren) und der Blasenschleier wurde zum Ende der Rammungen abgeschaltet (geplante Referenzmessung).

Der gemessene breitbandige Einzelereignispegel änderte sich bei Variierung der zugeführten Luftmenge (Referenz bis $0,23 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$) deutlich. Je größer die zugeführte Luftmenge, desto geringer war der Einzelereignispegel. Allerdings schwankte der Einzelereignispegel auch bei gleichbleibender Luftmenge im Bereich von mehreren dB (Kapitel D.3.1, S. 78 ff). Gerade bei Rammungen, bei denen sich die schallabstrahlende Mantelfläche änderte, war eine Mittelung über sehr viele Rammschläge und mehrere Fundamente notwendig, um den Einfluss der Luftmenge statistisch zu validieren.

In Abb. 1-36 ist die gemittelte spektrale Einfügungsdämpfung über alle vorhandenen Rammungen mit der Blasenschleier-Konfiguration BBC 2 und unterschiedlichen Luftmengen dargestellt.

Bei einem Wert von ca. $0,15 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$ (zwei Kompressoren) betrug die Schallreduktion bis ca. 80 Hz nahezu Null. Im Frequenzbereich von 100 Hz bis ca. 1.250 Hz nahm die Schallreduktion stetig bis ca. 20 dB zu. Zu höheren Frequenzen nahm die Schallreduktion erwartungsgemäß leicht ab. Bei Erhöhung der zugeführten Luftmenge von $0,15 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$ über $0,23 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$ auf $0,32 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$ nahm die Einfügungsdämpfung breitbandig deutlich zu. Bei der maximal verwendeten Luftmenge ($0,32 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$) erfolgte eine Schallreduktion von 5 dB bis 10 dB unterhalb von 100 Hz. Die Einfügungsdämpfung stieg stetig bis zu 27 dB bei 1.600 Hz an. Es sei darauf hingewiesen, dass Hydroschallmessungen, insbesondere bei Rammschall, im tieffrequenten Bereich höheren Schwankungen in der Amplitude unterliegen können. Zudem befindet sich beim Rammschall wenig akustische Energie bei tiefen Frequenzen im Wasser, sodass Werte um $\pm 2 \text{ dB}$ im Differenzspektrum bei tiefen Frequenzen (unter ca. 100 Hz) nicht immer eindeutig interpretiert bzw. dem Schallminderungssystem zugesprochen werden können.

Der Blasenschleier in der Düsen Schlauchkonfiguration BBC 2 wurde kurzzeitig mit nur einem Kompressor betrieben ($0,07 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$). In diesem Fall nahm die Schallminderung nochmals breitbandig ab. Es zeigte sich somit, dass die Schallreduktion des Großen Blasenschleiers abhängig von der verwendeten Luftmenge war. Je größer die Luftmenge pro Zeiteinheit und Düsen Schlauchlänge, desto größer war die erzielte Schallminderung. Jedoch reduzierte der Große

Blasenschleier nicht jede Frequenz im Schallspektrum gleichmäßig. Die größte Schallreduktion durch den eingesetzten Blasenschleier (BBC 2) ergab sich im Frequenzbereich von 630 Hz bis 12,5 kHz. Je größer die zugeführte Luftmenge war, desto tiefer war die Frequenz, ab der eine Schallreduktion durch den Blasenschleier erzielt wurde. Somit bewirkte eine Erhöhung der Luftmenge nicht nur eine (breitbandige) Steigerung der Schallminderung, sondern steigerte ebenfalls die Schallreduktion bei tieferen Frequenzen.

Für die Schlauchkonfiguration BBC 1 (großer Lochabstand, große Löcher) lagen nur sehr wenige Messdaten mit voller und reduzierter Luftmenge vor. Qualitativ ergaben sich bei dieser Düsen Schlauchkonfiguration ähnliche Abhängigkeiten der Schallreduktion von der verwendeten Luftmenge wie beim BBC 2.

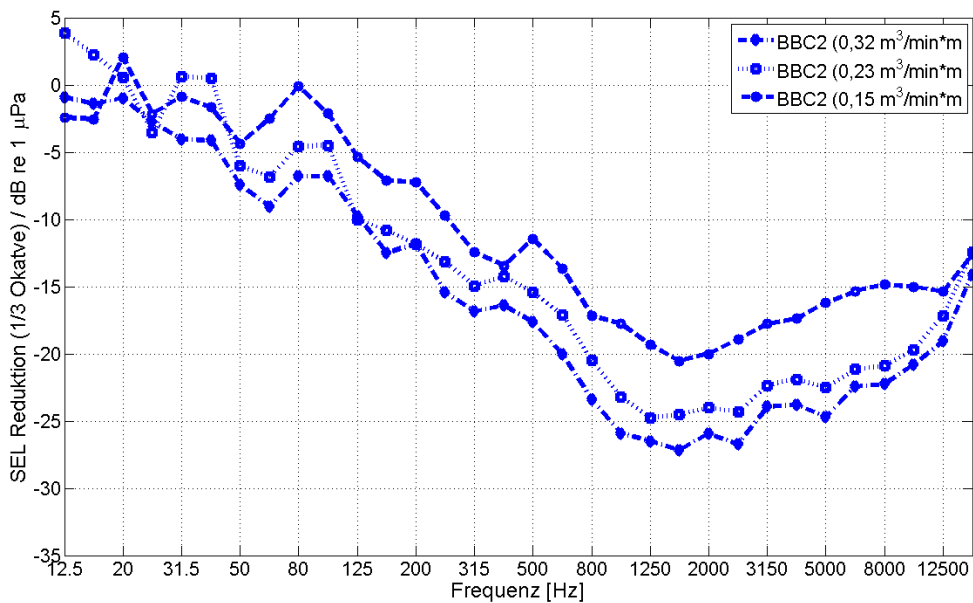


Abb. 1-36: Gemittelte Differenzspektren (Einfügungsdämpfung) des Einzelereignispegels (SEL₅₀) für die Konfiguration BBC 2 (kleiner Lochabstand, kleine Löcher) mit unterschiedlichen Luftmengen pro Minute und Meter BBC-Düsen Schlauch.

Tab. 1.15: Einfluss der verwendeten Luftmenge auf die mittlere Einfügungsdämpfung der beiden getesteten Schlauchkonfigurationen. Es wurden alle Messungen mit Wandstärken von 50 mm und 70 mm verwendet.

BBC- Schlauchtyp	Luftmenge [m ³ /(min*m)]	ΔSEL ₅₀ [dB]	ΔL _{Peak} [dB]
2	0,32	12	19
2	0,23	10	18
2	0,15	8	14
1	0,32	10	11
1	0,23	10	13
1	0,15	7	12

D.4.3 Düsenslauchkonfiguration (Größe und Abstand der Luftaustrittsöffnungen)

In Abb. 1-37 ist die gemittelte spektrale Einfügungsdämpfung für die Düsenslauchkonfiguration BBC 1 und BBC 2 im Vergleich dargestellt. Die spektralen Einfügungsdämpfungen für beide Konfigurationen wurden bei der größten Luftmenge von $0,32 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$ gemessen. Dargestellt sind die Mittelwerte über alle gemessenen Fundamentstandorte mit den o. g. Blasenschleier-Konfigurationen.

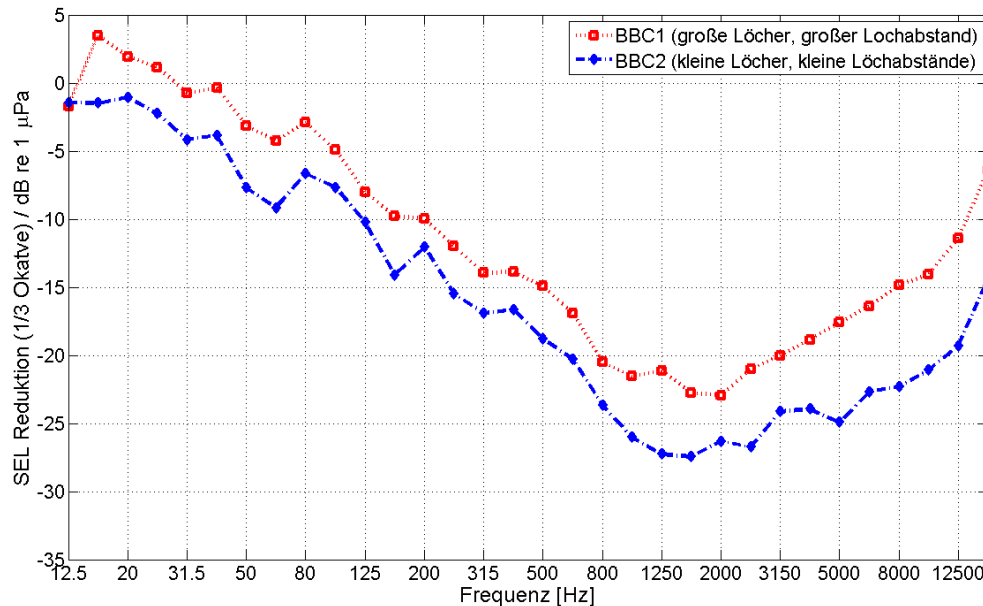


Abb. 1-37: Gemittelte Differenzspektren (Einfügungsdämpfung) des Einzelereignispegels (SEL₅₀) für beide verwendeten BBC-Düsen Schlauchkonfigurationen mit maximaler Luftmenge ($0,32 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$).

Schlauchkonfiguration BBC 2 bewirkte breitbandig eine um 2 dB bis 8 dB bessere Schallreduktion pro dargestellter (Mitten-) Frequenz als Schlauchkonfiguration BBC 1.

Es ist zu vermuten, dass die Luftmenge in der Wassersäule bei beiden getesteten Konfigurationen annähernd gleich war, da in beiden Fällen die gleiche Luftmenge (Luftstrom) in die Düsen schläuche abgegeben wurde. Somit hatten Lochgröße und Lochabstand ebenfalls einen Einfluss auf die Schallreduktion eines Großen Blasenschleiers (vgl. Kapitel D.8, S. 114).

D.4.4 Halboffener (linearer) doppelter Blasenschleier (DBBC 2)

An den Fundamenten BW24 und BW33 wurden zwei Experimente mit einem linearen (halbkreisförmigen) doppelten Blasenschleier der Düsen schlauchkonfiguration 2 (DBBC 2) durchgeführt (vgl. Kapitel B.4.3, S. 47 ff). Aufgrund der im Projekt nur begrenzt zur Verfügung stehenden Kompressorleistung war es nicht möglich, zwei vollständige Blasenschleier von jeweils mindestens 560 m (gesamt > 1.000 m) parallel zueinander auszulegen und mit einer angemessenen Luftmenge pro Zeiteinheit und Meter Düsen schlauch zu betreiben. Zeitliche Restriktionen machten zudem die Auslegung von zwei kompletten kreisförmigen Schläuchen unmöglich. Daher wurde ein bestehender Düsen schlauch (BBC 2) von 560 m Länge in der Mitte geteilt und die jeweils 280 m langen Teilschläuche parallel als doppelter linearer Blasenschleier mit maximaler Luftmenge von $0,32 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$ verlegt und betrieben (siehe Kapitel B.4.3, S. 47 ff).

Die beiden Experimente unterschieden sich in Bezug auf den Abstand der beiden Düsen schläuche am Meeresboden zueinander. Am Fundament BW24 betrug der Abstand zwischen den beiden BBC-Düsen schläuchen ca. 80 m (entsprach ca. der dreifachen Wassertiefe, im Folgenden DBBC 2a genannt). Mit dieser Konfiguration wurde sichergestellt, dass sich zwei vollständig getrennte

Blasenschleier in der Wassersäule und an der Wasseroberfläche ausbildeten (Sichtüberprüfung), d. h. der Hydroschall musste durch zwei „einzelne“ Blasenschleier hindurchtreten.

Am Fundament BW33 betrug der Abstand ca. 10 m bis 20 m (geringer als die Wassertiefe, DBBC 2b genannt, siehe Kapitel B.4.3). Bei dieser Konfiguration ergab eine Sichtprüfung, dass sich die beiden Blasenschleier an der Wasseroberfläche abschnittsweise miteinander vereinten, d. h. es bildete sich ein einfacher sehr breiter Blasenschleier zumindest an der Wasseroberfläche aus. Der Schall lief somit nicht komplett durch zwei separate Blasenschleier, sondern zur Wasseroberfläche hin durch einen sehr breiten „einfachen“ Blasenschleier.

In Abb. 1-38 ist die spektrale Einfügungsdämpfung für die beiden halboffenen (linearen) DBBC-Varianten im Vergleich dargestellt. Die spektrale Einfügungsdämpfung für beide Konfigurationen wurde mit einer maximalen Luftmenge von $0,32 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$ ermittelt. Als Vergleich diente das Differenzspektrum des einfachen Blasenschleiers der Konfiguration BBC 2 mit vergleichbarer Luftmenge (übernommen aus Abb. 1-37, S. 93).

Während dieser Versuche mit dem halboffenen doppelten Blasenschleier waren die Kompressoren teilweise durch technische Probleme in ihrer Leistung „unkontrolliert“ reduziert worden. Es konnte im Nachhinein nicht mehr eindeutig festgestellt werden, welche exakte Luftmenge zu welchem Zeitpunkt in die DüsenSchläuche geliefert wurde. Aufgrund von regelmäßigen Wartungsarbeiten in sehr kurzen Zeitabschnitten an den Kompressoren war aber davon auszugehen, dass eine Luftmenge von $0,32 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$ zumeist annähernd erreicht wurde.

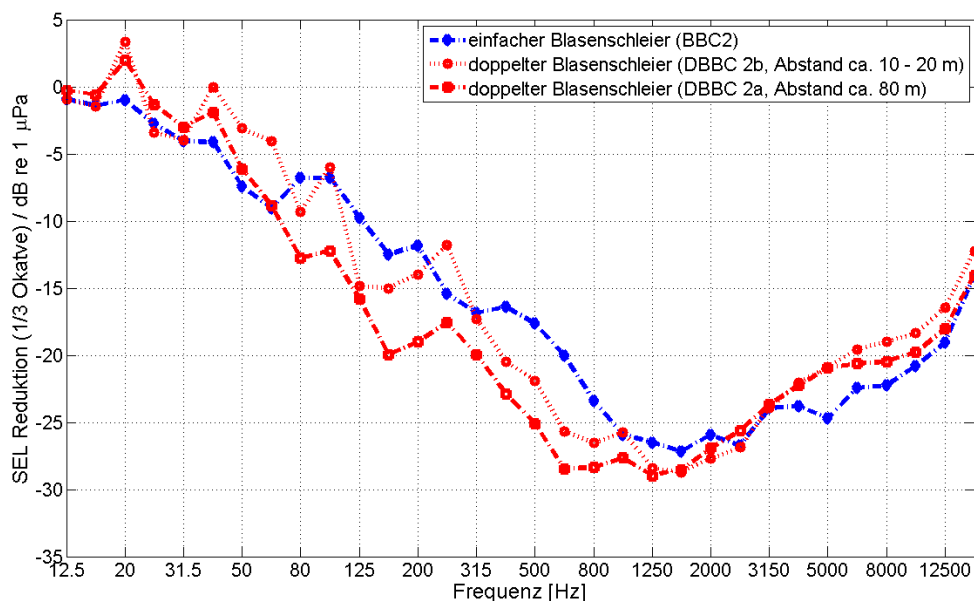


Abb. 1-38: Gemittelte Differenzspektren (Einfügungsdämpfung) des Einzelereignispegels (SEL₅₀) normiert auf eine Entfernung von 750 m für beide getesteten halboffenen (linearen) doppelten Blasenschleier-Konfigurationen im Vergleich zu einem einfachen Blasenschleier (BBC 2) mit vergleichbarer Luftmenge ($0,32 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$).

Bei dem linearen doppelten Blasenschleier (DBBC 2b) mit einem Abstand der Schläuche von ca. 10 m bis 20 m wies die spektrale Einfügungsdämpfung – im Gegensatz zu einem einfachen Blasenschleier (BBC 2) mit vergleichbarer Luftmenge – nur in einzelnen Frequenzbereichen eine leicht verbesserte Schallreduktion auf. Bei zwei getrennten Blasenschleiern (DBBC 2a) verbesserte sich die erzielte Schallminderung im Frequenzbereich ab 80 Hz bis ca. 1.000 Hz deutlich um bis zu 8 dB bei einzelnen (Mitten-) Frequenzen. Es ist jedoch festzuhalten, dass die Experimente mit einem doppelten (linearen) Blasenschleier pro gewählten Abstand nur zeitweise bei Rammungen an einem

Fundamentstandort durchgeführt wurden. Somit sind diese Ergebnisse zunächst nur als Hinweise zu verstehen und bedürfen einer wissenschaftlichen Bestätigung durch Messungen mit einem vollständig geschlossenen doppelten Blasenschleier.

D.5 Beurteilung der Wirksamkeit der getesteten BBC-Konfigurationen

In Tab. 1.16 sind die breitbandigen (einzahligen) Einfügungsdämpfungen des Einzelereignispegels (SEL) und des Spitzenpegels (L_{Peak}) zusammengefasst (Definition Kapitel D.2.5; vgl. auch Tab. 1.10, S. 82). Sämtliche Schallreduktionen sind auf ganze dB-Werte gerundet dargestellt. Im Anhang S. 211 befindet sich eine genaue Aufschlüsselung der verwendeten Einzelergebnisse zu der Tab. 1.16. Im Kapitel D.8.1 wird zudem der aufgespannte Ergebnisraum detailliert dargestellt und diskutiert.

Tab. 1.16: Zusammenfassung der erzielten Einfügungsdämpfungen für unterschiedliche Schallminderungskonditionen und -konfigurationen. Dargestellt sind die minimal, im Mittel (arithm. Mittelwert) und maximal erreichte Schallminderung (Definition Kapitel D.2.5, S. 75, Eingangsdaten siehe Tab. 1.10 und Anhang Tab. 1 und 2).

Nr.	Anzahl Ref.-Fundamente (Wandstärke)	BBC-Konfiguration	Luftmenge [m ³ /(min*m)](min*m)]	Δ SEL [dB]	Δ L _{Peak} [dB]
1	3 (50 mm)	BBC 1 (8 Fundamente)	0,32	5 ≤ 8 ≤ 10	7 ≤ 11 ≤ 13
2a	3 (50 mm)	BBC 2 (12 Fundamente, inkl. BW23)	0,32	8 ≤ 11 ≤ 13	8 ≤ 13 ≤ 17
2b	3 (50 mm)	BBC 2 (11 Fundamente, exkl. BW23)	0,32	9 ≤ 11 ≤ 13	10 ≤ 14 ≤ 17
3	9 (50 + 70 mm)	BBC 1 (8 Fundamente)	0,32	7 ≤ 10 ≤ 12	9 ≤ 12 ≤ 15
4	9 (50 + 70 mm)	BBC 2 (12 Fundamente, inkl. BW23)	0,32	10 ≤ 13 ≤ 15	9 ≤ 14 ≤ 18
5	6 (70 mm)	DBBC 2b ^{*1}	0,32	14 ≤ 16 ≤ 18	~ 18 ^{*3}
6	6 (70mm)	DBBC 2a ^{*2}	0,32	14 ≤ 17 ≤ 18	~ 22 ^{*3}

*¹ Abstand zwischen den beiden verlegten Blasenschleiererringen am Meeresboden 10 m bis 20 m.

*² Abstand zwischen den beiden verlegten Blasenschleiererringen am Meeresboden ca. 80 m.

*³ Lediglich eine Messung bzw. ein Messwert pro Konfiguration vorhanden.

Der breitbandige Wert für die Einfügungsdämpfung für den Spitzenpegel bei jeder dargestellten Blasenschleierkonfiguration lag etwas höher als beim Einzelereignispegel. Bei den Konfigurationen DBBC 2a und 2b gab es nur jeweils eine Rammung an einem Fundamentstandort. An diesen Fundamentstandorten waren zudem unterschiedliche Luftmengen getestet worden.

Die Düsen Schlauch-Konfiguration BBC 2 (kleiner Lochabstand, kleiner Lochdurchmesser) bewirkte eine deutlich bessere Schallreduktionen als die Konfiguration BBC 1 (großer Lochabstand, großer Lochdurchmesser, Tab. 1.16). Die erzielte Schallminderung betrug innerhalb der Konfiguration BBC 2 9 dB bis 13 dB beim Einzelereignispegel sowie 10 dB bis 17 dB beim Spitzenpegel (Nr. 2b in Tab. 1.16). Es ist bei der Konfiguration BBC 1 nicht auszuschließen, dass aufgrund des großen Lochabstandes z.T. Lücken bzw. Löcher in dem Blasenschleier auftraten, durch die der Schall nahezu ungehindert hindurchtreten konnte.

Die beiden Experimente mit dem halboffenen (linearen) doppelten Blasenschleier deuten darauf hin, dass die Einfügungsdämpfung eines doppelten Blasenschleiers in Bezug auf den Einzelereignispegel und den Spitzenpegel höher ausfällt als bei einem einfachen Blasenschleier mit gleicher Luftmenge. Die Höhe der Schallreduktion hängt jedoch von dem Abstand der beiden verlegten Düsen Schläuche

(Blasenschleier) am Meeresboden zueinander ab. Bei einem großen Abstand zwischen den Düsenröhren bilden sich zwei unabhängige Blasenschleier in der Wassersäule aus, was eine höhere Schallreduktion zumindest bezüglich des Spitzenpegels zur Folge hat (vgl. Kap. D.8).

Da die Unterschiede in den Messergebnissen der Referenzmessungen mit Wandstärken von 50 mm und 70 mm aufgrund der geringen Datenlage und der bestehenden Messvarianz nicht eindeutig auf die Wandstärke zurückzuführen sind, kann die Referenz der Mittelungen auch aus allen neun Fundamentstandorten, die ohne Schallschutz durchgeführt wurden, berechnet werden (Nr. 3 und 4 in Tab. 1.16). Für die Konfiguration BBC 2 ergibt sich dadurch eine höhere Schalldämpfung von 10 dB bis 15 dB für den Einzelereignispegel und 9 dB bis 18 dB für den Spitzenpegel. Für die Konfiguration BBC 1 erhöht sich die Schalldämpfung auf 7 dB bis 12 dB für den Einzelereignispegel und auf 9 dB bis 15 dB für den Spitzenpegel. Da jedoch der Zusammenhang zwischen Lautstärke und Wandstärke nicht sicher ist, wird sich Folgendes bei Wirkung des Blasenschleiers auf die miteinander vergleichbaren Wandstärken bezogen (Nr. 1 und Nr. 2b in Tab. 1.16).

D.6 Mögliche indirekte Einflussfaktoren auf die Schallabstrahlung und Schallausbreitung

D.6.1 Rammenergie

Es ist physikalisch sinnvoll, anzunehmen, dass die abgestrahlte Schallenergie eines zu rammenden Pfahles proportional zur eingesetzten mechanischen Energie (Schlagenergie) ist. Bei Verdopplung der Schlagenergie würde der Schallpegel also um 3 dB zunehmen, oder allgemein um

$$\Delta L = 10 \log (E_2/E_1) \text{ dB} \quad (\text{Gleichung 11})$$

wenn die Schlagenergie von E_1 auf E_2 erhöht wird. Wie in den folgenden Abbildungen (Abb. 1-39 und Abb. 1-40) zu erkennen ist, steigt die gemessene Schallintensität mit der Schlagenergie an. Eine Proportionalität, d. h. ein Anstieg des Pegels mit $10 \log E$, ist nur grob gegeben. Laut Abb. 1-39 ist der Anstieg über den ganzen gemessenen Energiebereich geringer als 3 dB pro Verdopplung der Energie. Bei Energien oberhalb von 700 kJ ergibt sich eine geringere Schallzunahme bei einer Erhöhung der Schlagenergie (Abb. 1-40). Andererseits gibt es in beiden Beispielen Bereiche, in denen die Zunahme des Pegels etwas stärker ausfällt, als nach obiger Gleichung zu erwarten wäre. Die Gründe für diese Verläufe sind im Detail nicht bekannt.

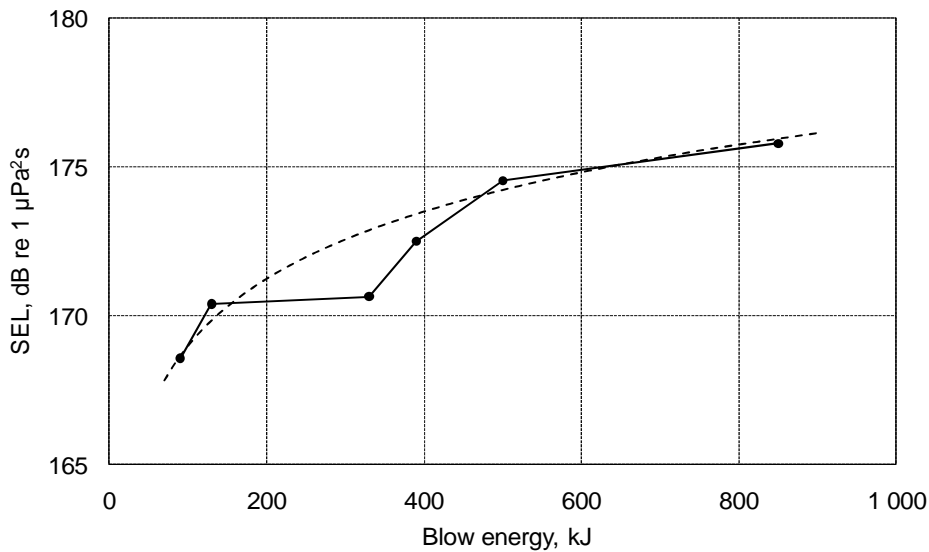


Abb. 1-39: Gemessene Zunahme des Einzelereignispegels (SEL_{50}) bei Erhöhung der Rammenergie beim Offshore Windpark Horns Rev 2 (Brandt et al. 2011). Die gestrichelte Näherungskurve hat die Gleichung $SEL = 7 \log(E) + 155$.

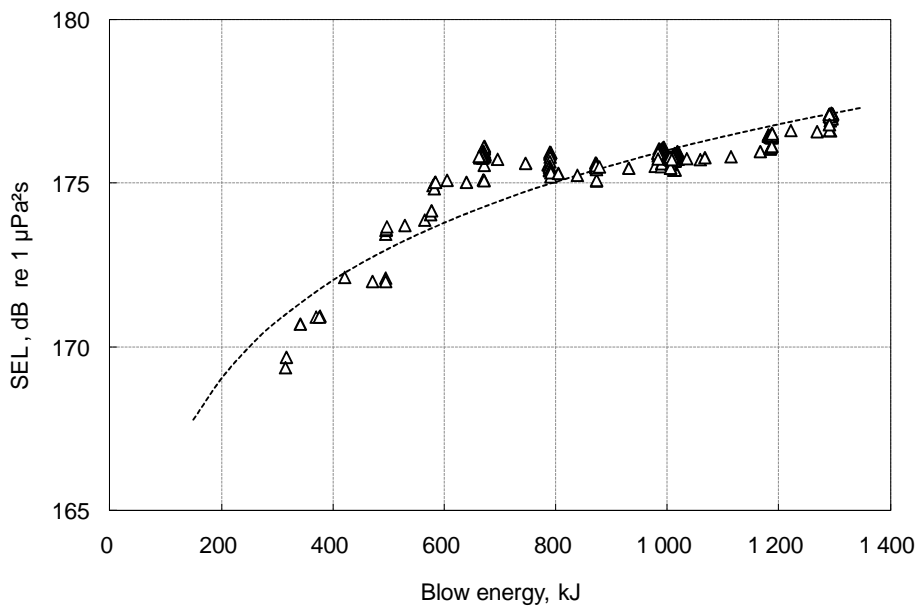


Abb. 1-40: Gemessene Zunahme des Einzelereignispegels (SEL_{50}) bei Erhöhung der Schlagenergie (Nehls & Betke 2011). Die Näherungskurve hat die Gleichung $SEL = 10 \log(E) + 146$.

Bei Messungen im Forschungsvorhaben ESRa (Wilke et al. 2012), im OWP alpha ventus⁸ (Rustemeier et al. 2010) und in weiteren Windparks (nicht veröffentlichte Messungen aus dem OWP Meerwind Süd/Ost aus dem Jahr 2012; Bellmann et al. 2013) stellte sich heraus, dass bei einer Verdopplung der Schlagenergie im (Energie-) Bereich, in dem ein Vorschub des zu rammenden Pfahles gewährleistet werden kann, die Schallenergie um 2 dB bis maximal 3 dB pro Verdopplung der Rammenergie

⁸ Alpha ventus: Erforschung der Schallminderungsmaßnahme „Gestuffer Blasenschleier (Little Bubble Curtain)“ im Testfeld alpha ventus („Schall alpha ventus“), BMU und PTJ gefördertes Projekt, FKZ 0325122A/B

anstieg. Bei geringen Rammenergien (z. B. Softstart), die ggfs. keinen oder nur sehr geringen Vorschub bewirkten, kam es mitunter zu höheren Anstiegen im Schallpegel, je nach verwendeter Schlagenergie.

In diesem Forschungsvorhaben wurde keine systematische Variation der Schlagenergie (Rammenergie) durchgeführt, sondern die Schlagenergie wurde beim Softstart (ca. 200 kJ) schrittweise auf eine maximale Energie von 1.000 kJ bis 1.200 kJ erhöht. Hierbei zeigte sich, dass der Einzelereignispegel (siehe Kapitel D.2.3, S. 73 f) über die erste Hälfte der Rammungen pro Pfahl insgesamt um ca. 3 dB bis 5 dB anstieg. Eine detaillierte Untersuchung der Rammenergie auf die Schallabstrahlung war jedoch im vorliegenden Fall nicht durchgeführt worden. Ein Grund war, dass die Pfähle „relativ“ kurz waren, bedingt durch die gewählte Gründungsstruktur (Tripod im pre-piling-Verfahren) und somit ein Großteil der Rammaktivitäten unter Wasser stattfand. Dies hatte zur Folge, dass sich die schallabstrahlende Mantelfläche mit zunehmender Rammung wesentlich verkleinerte. Rein qualitativ zeigte sich, dass der Einzelereignispegel mit kleiner werdender Mantelfläche im Wasser in der zweiten Hälfte der Rammungen eines Pfahles bei annähernd konstanter maximaler Rammenergie geringer wurde. Zudem lagen keine detaillierten Bodenprofile für die einzelnen Fundamentstandorte vor, so dass anhand der vorliegenden Datenbasis nicht eindeutig geklärt werden konnte, welchen Einfluss die Rammenergie, das Bodenprofil (eventuelle Bodenkopplungen) und die abstrahlende Mantelfläche auf die gemessenen Hydroschallimmissionen hatten.

D.6.2 Schallausbreitung im Wasser

Der Schall breitet sich im Meer nicht über alle Frequenzen hinweg gleich gut aus (z.B. Medwin 2005). Zu tiefen Frequenzen hin wird die Schallausbreitung durch eine geringe Wassertiefe und die Beschaffenheit des Meeresbodens und der Oberfläche beeinträchtigt. Das hängt damit zusammen, dass der Schall auf dem Weg von der Schallquelle zum Empfänger mehrfach am Boden und an der Wasseroberfläche reflektiert wird. Bei hohen Frequenzen macht sich zusätzlich zur geometrischen Ausbreitungsdämpfung die Schallabsorption im Wasser bemerkbar. Die Schallabsorption des Wassers macht sich laut Medwin (2005) theoretisch nur bei Frequenzen oberhalb von ca. 10 kHz bemerkbar (grober Richtwert), so dass der breitbandige Schallpegel von Rammgeräuschen, der durch Anteile unterhalb von 1 kHz wesentlich bestimmt wird, davon kaum beeinflusst wird. In der Literatur werden für eine Entfernung von 10 km frequenzabhängig Werte für die Absorption von Wasser von < 1 dB bei 1 kHz und 10 dB bei 10 kHz angegeben (Medwin 2005).

Zur Verdeutlichung der Absorption des Wassers bei großen Entfernungen sind die gemessenen Terzspektren eines Fundamentstandortes (BW32) in Abb. 1-41 an den Messpositionen POD mobil 2 (1.500 m Distanz zum Fundamentstandort BW32), bwf_1 (5.000 m) und bwf_6 (20.700 m) einer Rammung ohne Schallschutzmaßnahme (Referenzmessung) dargestellt.

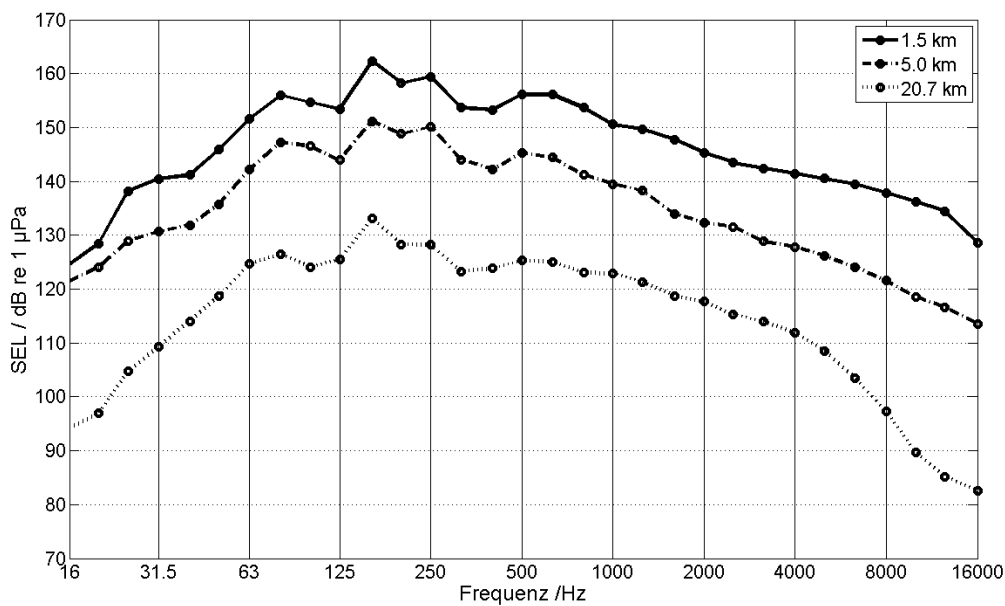


Abb. 1-41: 1/3-Oktav-Spektren (Terzspektren) des Einzelereignispegels (SEL_{50}) in verschiedenen Entfernungen zur Rammstelle am Fundamentstandort BW32 (mobil 2: 1,5 km, bwf_1: 5,0 km und bwf_6: 20,7 km). (Referenzmessung ohne Schallminderungssystem).

Die gemessenen Terzspektren einer Rammung ohne Schallschutzmaßnahme in mehreren Entfernungen (von 1,5 km bis zu 20,7 km) weisen eine sehr ähnliche Form und Feinstruktur im Frequenzbereich bis ca. 4 kHz auf (vgl. Abb. 1-41). Mit zunehmender Entfernung wurde der Pegel deutlich geringer. Auffällig war, dass in ca. 20 km Entfernung die Pegel im Frequenzbereich über 4 kHz deutlich abfielen. Dieser starke Abfall war bei den Messungen in wenigen Kilometern Entfernung nicht zu beobachten und vermutlich auf die hohe Absorption des Wassers über lange Distanzen zurückzuführen.

Zusätzlich zu Abb. 1-41 ist in Abb. 1-42 vergleichend das Terzspektrum mit und ohne den Einsatz eines Blasenschleiers in einer Entfernung von 20,7 km dargestellt. Für die Blasenschleierkonfiguration (BBC 2) wurden die Messdaten vom Fundamentstandort BW23 verwendet und es wurde mittels der halb-empirischen Ausbreitungsformel nach Thiele & Schellstede (1980; im vorliegenden Bericht: Gleichung 9, S. 70) auf einen Abstand von 20,7 km normiert.

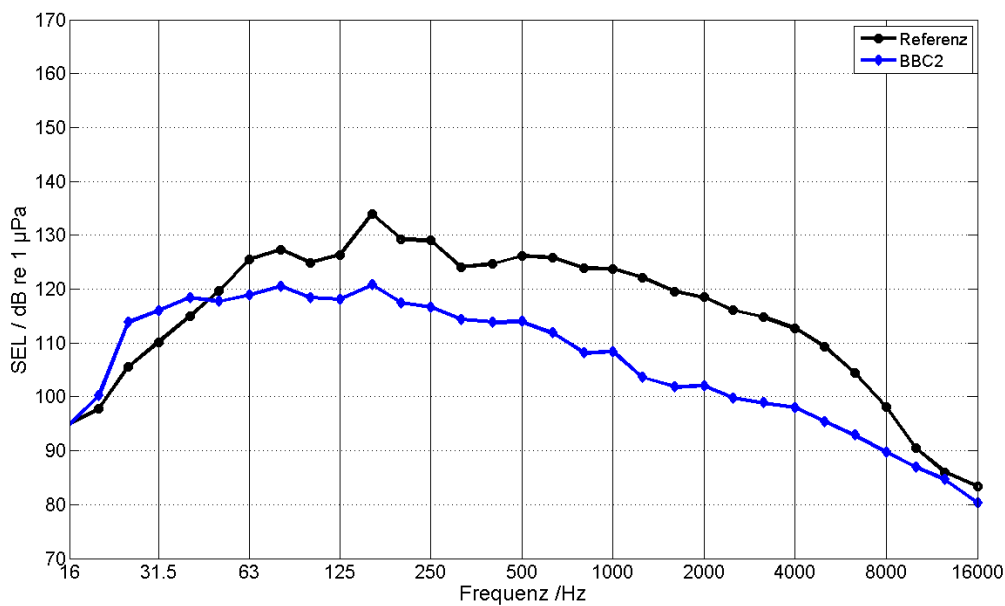


Abb. 1-42: 1/3-Oktav-Spektren (Terzspektren) des Einzelereignispegels (SEL_{50}) an der Messposition *bwf_6* (Entfernung ca. 20 km) mit (BW23) und ohne (BW32) Schallschutzsystem (BBC 2). Das Terzspektrum zum Fundament BW23 wurde mithilfe der Ausbreitungsdämpfung (nach Thiele & Schellstede 1980) auf denselben Abstand wie für das Fundament BW32 (20,7 km) skaliert.

Es wird deutlich, dass sich die Terzspektren zwischen dem Einsatz mit und ohne Blasenschleier in den tiefen Frequenzen bis ca. 63 Hz nur wenig unterschieden (Abb. 1-42). Zu höheren Frequenzen hin wurden dem gegenüber Unterschiede zwischen den Konfigurationen mit und ohne Blasenschleier von 5 dB bis 20 dB deutlich, dies bis zu einer Mittenfrequenz von ca. 4 kHz. Darüber hinaus fielen die Terzpegel bei der Referenzmessung deutlich stärker ab als beim Einsatz des BBCs. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass man sich bei Schalldruckpegeln von ca. 100 dB in einzelnen Frequenzbändern (Mittenfrequenzen) im Bereich des permanenten Hintergrundschalles befindet. Die dargestellten Terzspektren mit und ohne Blasenschleier in einer Entfernung von ca. 20 km lieferten deutlich unterschiedliche breitbandige Einzelereignispegel (Entfernung 20,7 km: BW63: $SEL_{50} = 137,9 \text{ dB}_{SEL}$; BW23: $SEL_{50} = 128,1 \text{ dB}_{SEL}$).

Im Vergleich dazu sind in der folgenden Abbildung (Abb. 1-43) die gemittelten Terzspektren mit und ohne Blasenschleier (BBC 2 mit maximaler Luftmenge) bei gleichem Einzelereignispegel⁹ ($SEL_{50} = 150 \text{ dB}_{SEL}$) dargestellt.

⁹ Gemessen in unterschiedlichen Entfernungen (Referenz in ca. 16,9 km; BBC 2 mit maximaler Luftmenge in ca. 2,5 km).

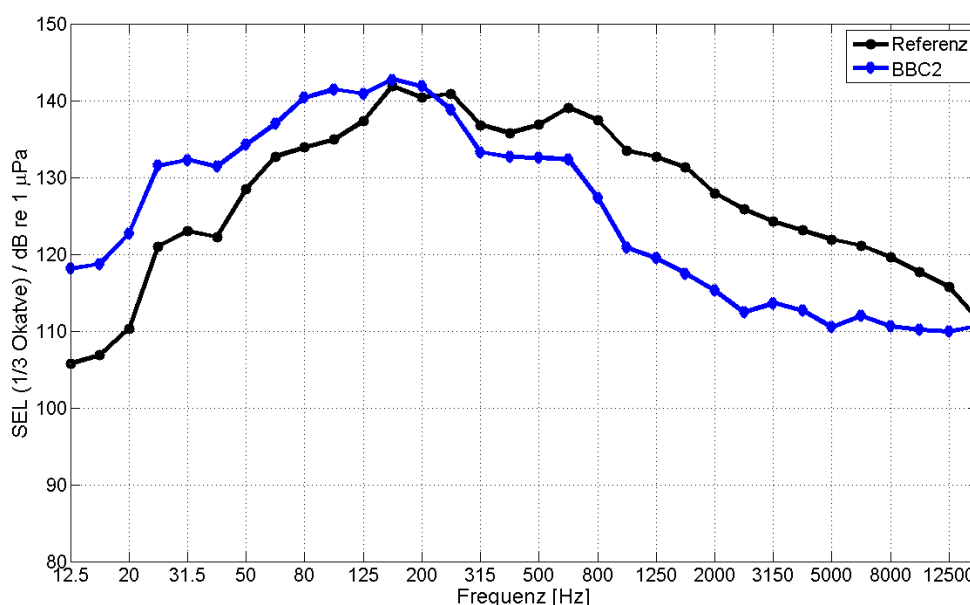


Abb. 1-43: *Terzspektren des gemittelten Einzelereignispegels (SEL_{50}) mit und ohne Schallminderungsmaßnahme (BBC 2 mit maximaler Luftmenge) mit dem Summenpegel von $SEL_{50} = 150$ dB. Die beiden Terzspektren wurden in unterschiedlichen Entfernungen gemessen (Referenz in ca. 16,9 km; BBC 2 mit maximaler Luftmenge in ca. 2,5 km).*

Ein Vergleich der beiden Spektren ergab, dass bei Einsatz eines Schallminderungssystems deutlich weniger Energie bei hohen Frequenzen (< 100 Hz) im Wasser war als im Falle einer Rammung ohne Schallminderungsmaßnahme. Bei Frequenzen unterhalb von 100 Hz kehrte sich dieses Verhältnis aufgrund der Abstandsunterschiede um. Die Spektren wurden in deutlich unterschiedlichen Entfernungen zum Rammort gemessen, um den gleichen Einzelereignispegel aufzuweisen (Referenz in ca. 16,9 km; BBC 2 mit maximaler Luftmenge in ca. 2,5 km).

Die Schallausbreitungsdämpfung von Schallereignissen über unterschiedliche Entfernungen hinweg kann mittels Verwendung von halb-empirischen Näherungsformeln berechnet werden. Von Thiele & Schellstede (1980) wurden Näherungsformeln für verschiedene Gebiete der Nordsee, für zwei Entfernungsbereiche (weniger und mehr als 10 km Abstand von der Schallquelle) sowie für „raue“ und „glatte“ See angegeben (vgl. Kapitel D.1.2, S. 70). Die üblicherweise benutzte Näherungsformel nach Thiele & Schellstede (1980) stellt eine Vereinfachung dar, welche die beiden Entfernungsbereiche in einer Gleichung zusammenfasst. In der Messvorschrift für Unterwasserschallmessungen des BSH (2011) wird für die Abschätzung der Schallausbreitung die geometrische Ausbreitungsdämpfung ($15 \log_{10} R$; R: Abstand) angegeben bzw. gefordert.

In Abb. 1-44 und Abb. 1-45 (S. 103 und S. 104) sind für zwei Rammungen die realen Messdaten (Einzelereignispegel SEL_{50}) in unterschiedlichen Entfernungen dargestellt. Dabei wurde jeweils eine Rammung mit und ohne Schallminderungssystem betrachtet: BW31 mit BBC 2 und BW26 ohne BBC (Referenzmessung). Zum Vergleich sind die prognostizierten Einzelereignispegel, bezogen auf 750 m Entfernung und berechnet mit

- der geometrischen Ausbreitungsdämpfung,
- der halb-empirischen Näherungsformel von Thiele & Schellstede (1980) sowie
- einer modifizierten Ausbreitungsdämpfungsformel, die auf realen Messungen der itap GmbH aus den Jahren 2008 bis 2010 (nicht veröffentlicht) basiert, dargestellt.

Die Absorption des Wassers war bei Abständen von mehr als 4 km vom Fundament zumeist deutlich höher (reale Messdaten) als es die geometrische Ausbreitungsformel $15 \cdot \log(\text{Abstand})$ und Näherungsformel nach Thiele & Schellstede (1980) prognostizierten. Die Unterschiede zwischen

Messungen und geometrischer Ausbreitungsdämpfung waren durch das Fehlen der Absorption des Wassers erklärbar. Die Ursache für die Unterschiede zwischen Messungen und der Näherungsformel von Thiele & Schellstede (1980) konnten hingegen nicht geklärt werden. Mögliche Gründe sind, dass die von Thiele & Schellstede (1980) hergeleitete Näherungsformel auf Messungen mit Sprengladungen, also punktförmigen Schallquellen, beruht; ferner lagen nur wenige Messungen von Thiele & Schellstede aus dem Bereich der deutschen Bucht vor, sodass die Formel für die Anwendung auf Rammschall bei großen Entfernungen angepasst werden müsste. Im laufenden Forschungsprojekt „BORA“ wird derzeit die Schallabstrahlung eines zu rammenden Pfahles modelliert, sodass zu einem späteren Zeitpunkt die Unterschiede zwischen einer Abstrahlung einer Punktquelle und einem Pfahl untersucht werden könnten. Die modifizierte Formel für die Ausbreitungsdämpfung, die auf Messdaten vom itap der letzten Jahre basiert, weist eine deutlich höhere Absorption bei größeren Abständen auf. Die Differenz zwischen den realen Messdaten und modifizierter Ausbreitungsdämpfungsformel nach itap zeigt die geringsten Unterschiede zwischen Berechnung und Messdaten auf.

Bei kurzen Entfernungen (Faktor 2 bis 4) waren die Unterschiede zwischen den drei dargestellten Berechnungsmethoden für die Ausbreitungsdämpfung hingegen sehr gering, d.h. der Fehler war bei Berechnungen innerhalb der doppelten oder vierfachen Distanz zwischen Messort und Zielort gering (vgl. Kapitel D.5, S. 95).

In den nachfolgenden Abbildungen sind die einzelnen Messdaten für jeden Fundamentstandort als Funktion des Abstandes für die Referenzmessungen und die Schallschutzkonfigurationen BBC 1 und BBC 2 (jeweils mit maximaler Luftmenge: $0,32 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$) im Vergleich zu den Ausbreitungsberechnungen mit der anhand von Feldmessdaten des itap modifizierten Ausbreitungsdämpfungsformel dargestellt.

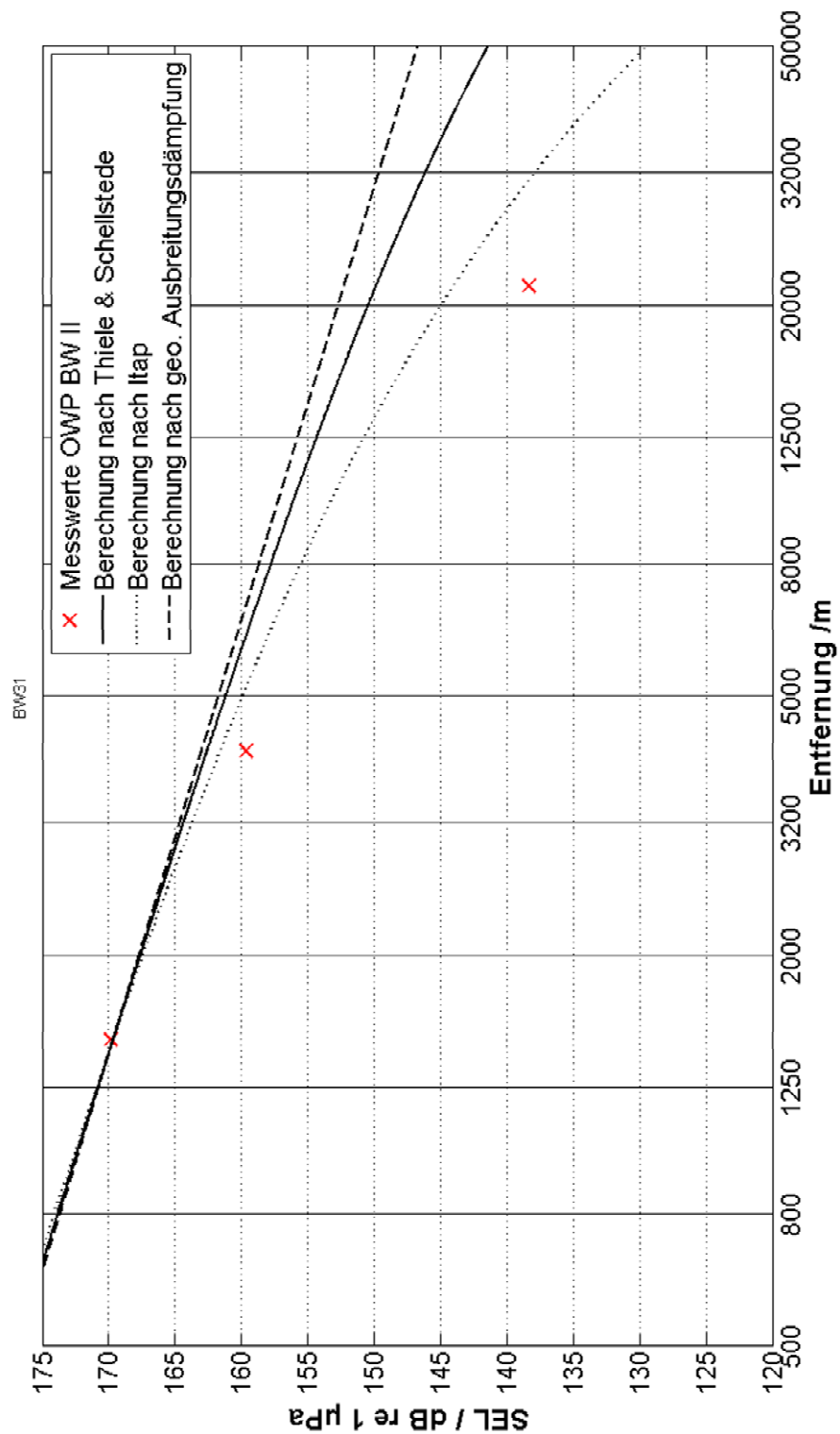


Abb. 1-44: Gemessener Einzelereignispegel (SEL_{50}) bei unterschiedlichen Entfernungen (Kreuze) für den Fundamentstandort BW31 ohne Verwendung eines Schallminderungssystems (Referenz). Zusätzlich sind die prognostizierten Einzelereignispegel (SEL_{50}) als Funktion des Abstandes mit unterschiedlichen Ausbreitungsfunktionen dargestellt.

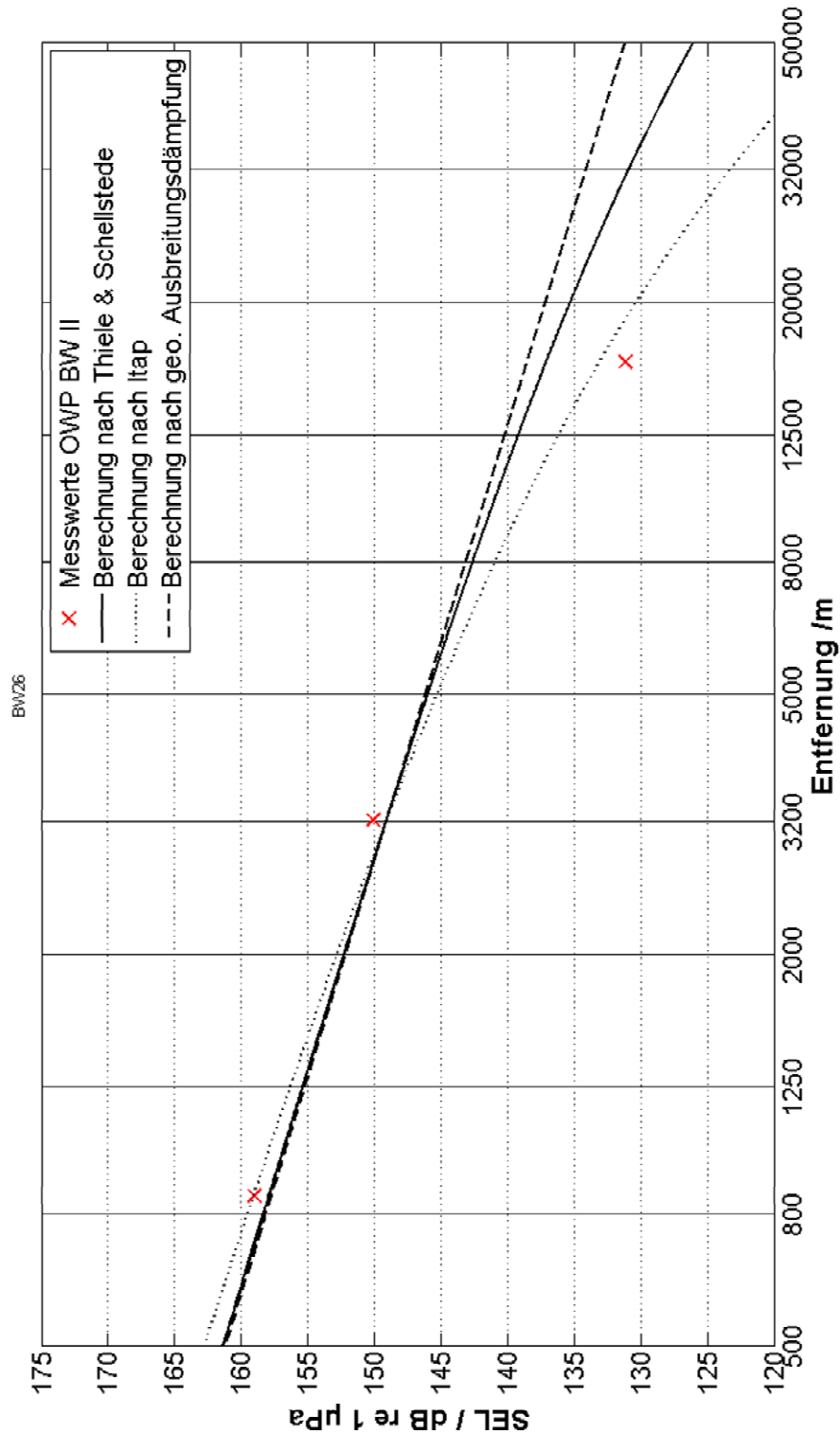


Abb. 1-45: Gemessener Einzelereignispegel (SEL_{50}) bei unterschiedlichen Entfernungen (Kreuze) für den Fundamentstandort BW26 mit Verwendung eines Schallminderungssystems (BBC 1). Zusätzlich sind die errechneten Einzelereignispegel als Funktion des Abstandes mit unterschiedlichen Ausbreitungsfunktionen dargestellt.

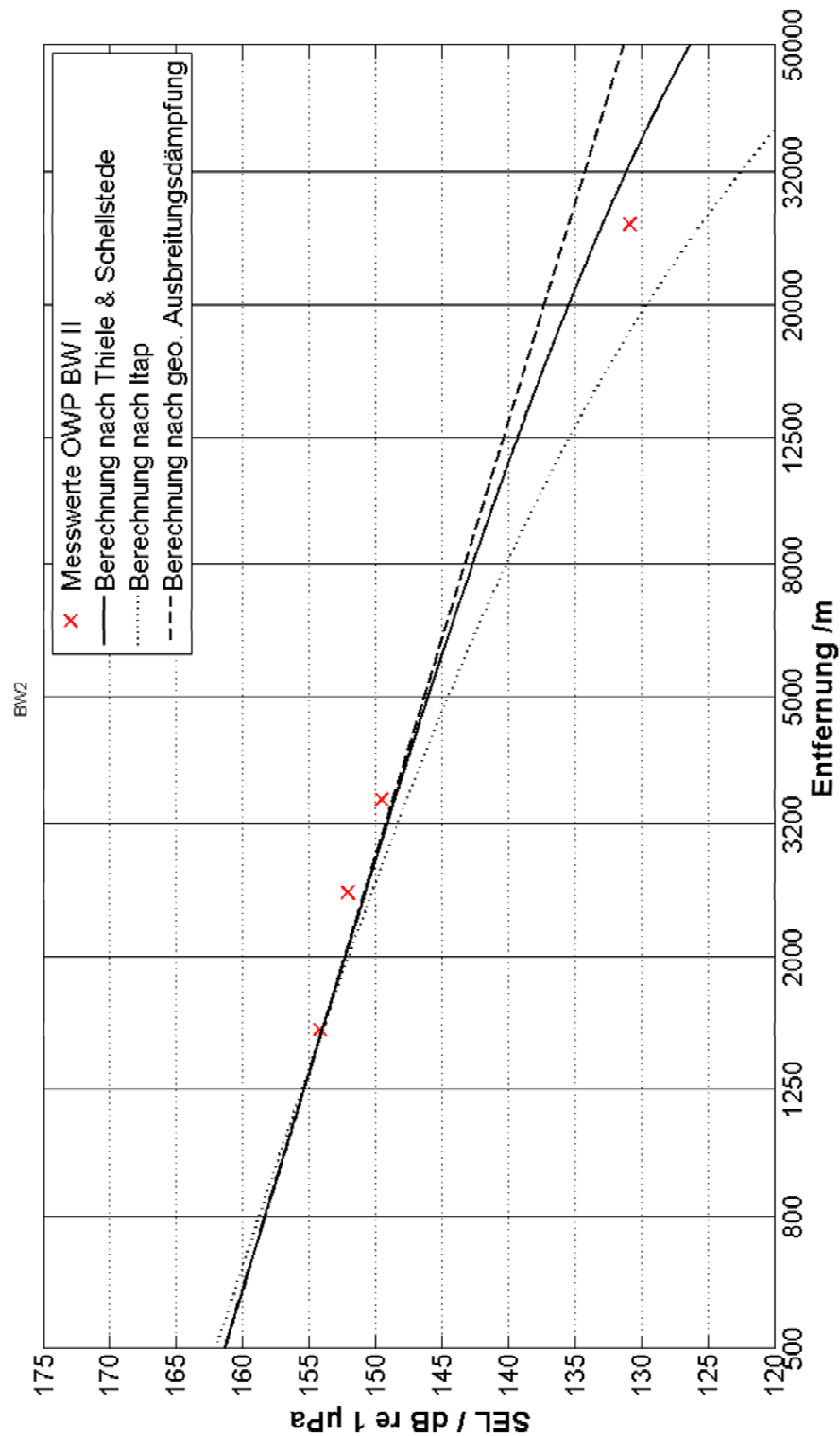


Abb. 1-46: Gemessener Einzelereignispegel (SEL_{50}) bei unterschiedlichen Entfernungen (Kreuze) für den Fundamentstandort BW02 mit Verwendung eines Schallminderungssystems (BBC 2). Zusätzlich sind die errechneten Einzelereignispegel als Funktion des Abstandes mit unterschiedlichen Ausbreitungsfunktionen dargestellt.

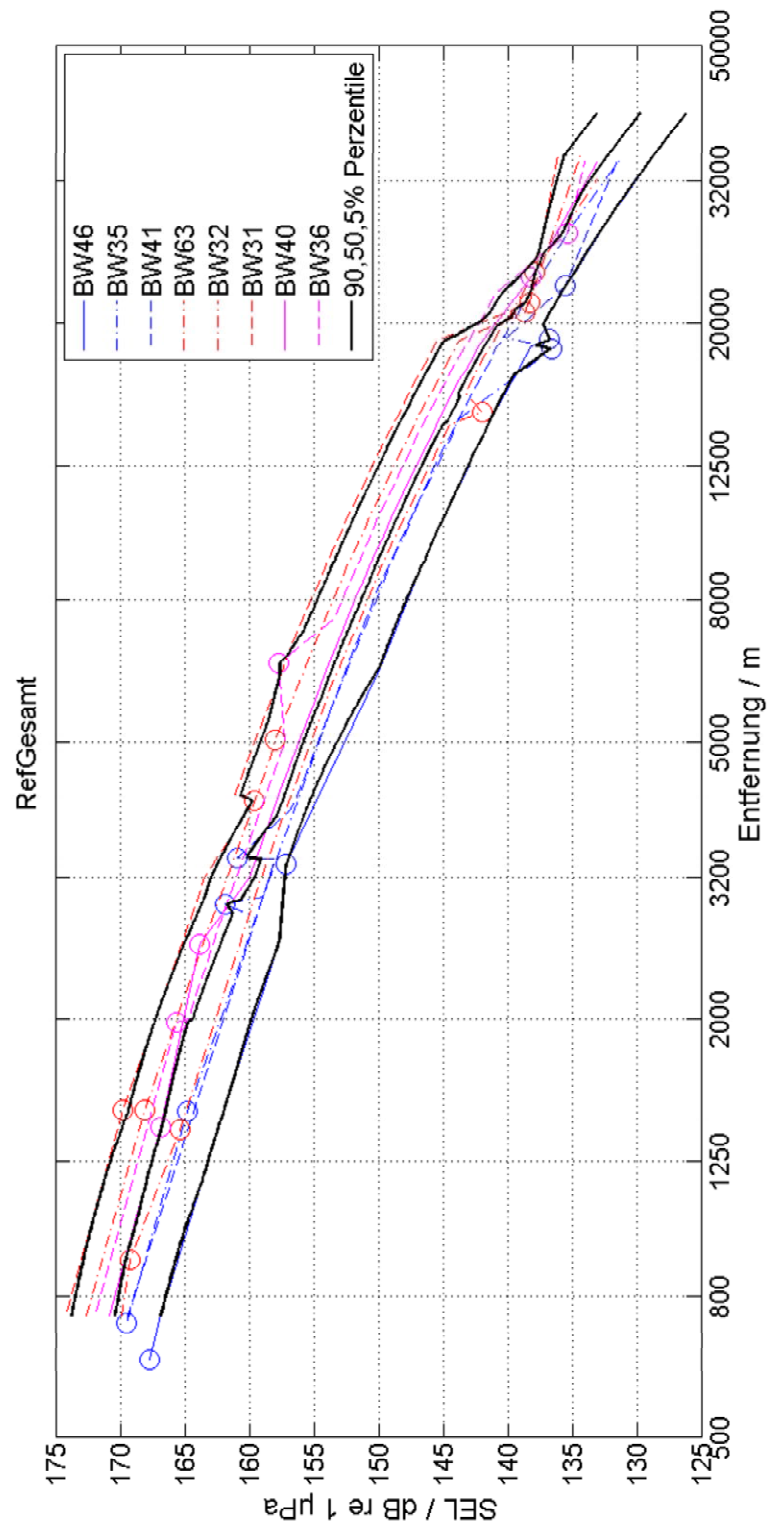


Abb. 1-47: Prognostizierte Einzelereignispegel (SEL_{50}) auf der Basis einer empirischen Näherungsformel der itap GmbH (farbige gestrichelte Linien) und reale Messdaten (Kreise) von Fundamentstandorten, an denen Rammarbeiten ohne Schallminderungssystem (Referenz) durchgeführt wurden. Zur Veranschaulichung der (Mess-) Varianz sind über alle dargestellten (Mess- und Prognose-) Daten an allen Fundamenten die gemittelten 90%, 50% und 5% Perzentil-Werte des Einzelereignispegels (SEL_{50}) über die Entfernung dargestellt (schwarze Linien).

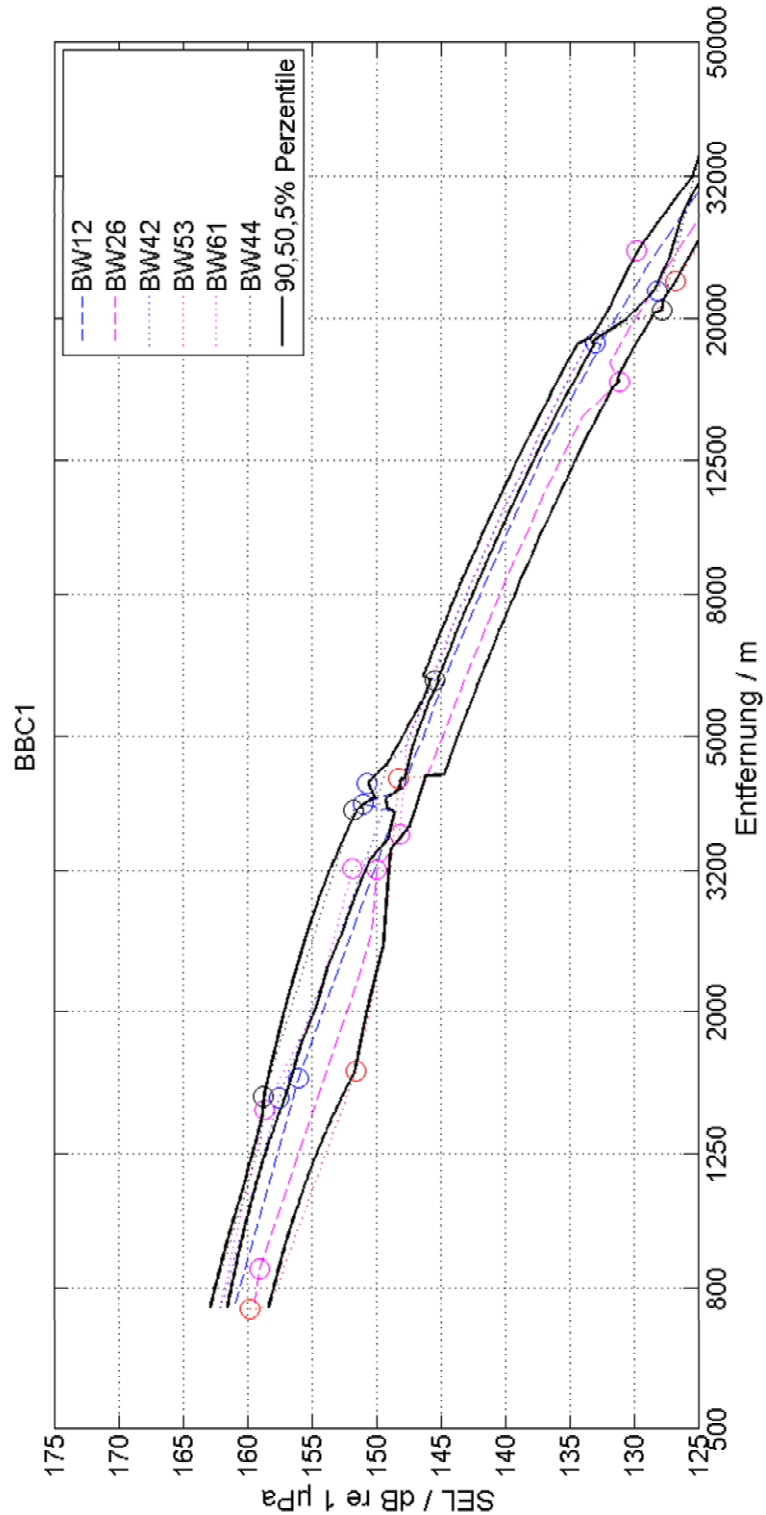


Abb. 1-48: Prognostizierte Einzelereignispegel (SEL_{50}) auf der Basis einer empirischen Näherungsformel der itap GmbH (farbige gestrichelte Linien) und reale Messdaten (Kreise) von Fundamentstandorten, an denen Rammarbeiten unter Anwendung eines Blasenschleiers (BBC 1 mit maximaler Luftmenge) durchgeführt wurden. Zur Veranschaulichung der (Mess-) Varianz sind über alle dargestellten (Mess- und Prognose-) Daten an allen Fundamenten die gemittelten 90%, 50% und 5% Perzentil-Werte des Einzelereignispegels (SEL_{50}) über die Entfernung dargestellt (schwarze Linien).

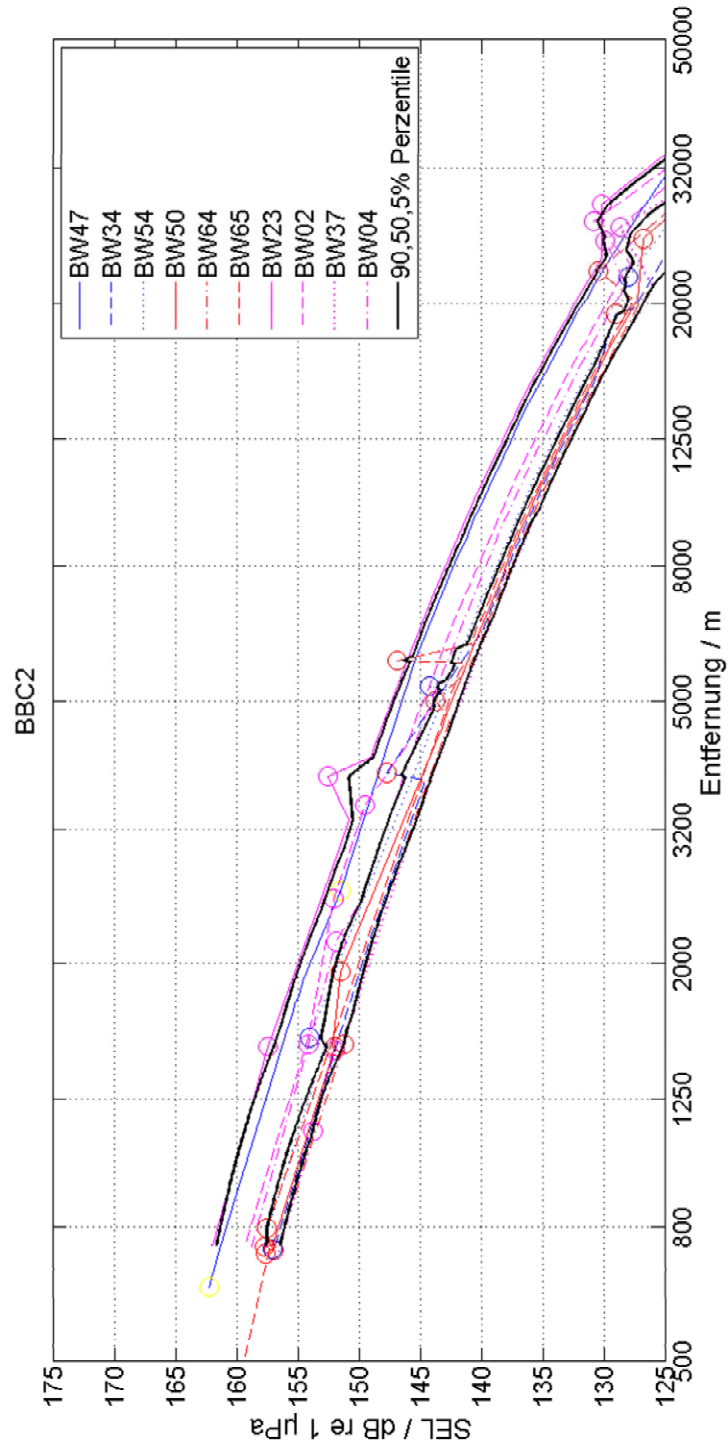


Abb. 1-49: Prognostizierte Einzelereignispegel (SEL_{50}) auf der Basis einer empirischen Näherungsformel der itap GmbH (farbige gestrichelte Linien) und reale Messdaten (Kreise) von Fundamentstandorten, an denen Rammarbeiten unter Anwendung eines Blasenschleiers (BBC 2 mit maximaler Luftmenge) durchgeführt wurden. Zur Veranschaulichung der (Mess-) Varianz sind über alle dargestellten (Mess- und Prognose-) Daten an allen Fundamenten die gemittelten 90%, 50% und 5% Perzentil-Werte des Einzelereignispegels (SEL_{50}) über die Entfernung dargestellt (schwarze Linien).

Die Unterschiede zwischen prognostizierten Daten und Messdaten vergrößerten sich mit zunehmender Entfernung. Dies war ein Hinweis, dass die Absorption des Wassers bei den Messungen etwas größer war als in der Näherungsformel derzeit berücksichtigt.

D.6.3 Zeitgleiche Rammaktivitäten in unterschiedlichen OWPs (kumulative Effekte)

Im Zeitraum September 2011 bis März 2012 wurden nicht nur am OWP Borkum West II Fundamentstrukturen mittels Impulsrammverfahren gegründet, sondern auch auf der ca. 40 km nördlich gelegenen Baustelle des Offshore-Windparks BARD Offshore 1 (BO 1). Bei der routinemäßigen Auswertung der Messdaten an der Messposition bwf_6 innerhalb der angeordneten Effizienzkontrolle erwies sich, dass beim Abgleich der Rammschläge pro 30-Sekundenintervall an einem Fundament (BW65) deutlich höhere Rammschlagzahlen an dieser Messposition aufgetreten waren als an den Messpositionen innerhalb des Baufeldes Borkum West II (mobil 1/2). In der Regel lag die Schlagzahl bei ca. 20 bis 25 Schlägen pro 30-Sekundenintervall, im FFH-Gebiet stieg die Anzahl beim Fundamentstandort BW65 auf deutlich über 40 Schläge an (vgl. Abb. 1-50, S. 110). Es wurden ebenfalls Rammschläge in Zeiträumen detektiert, in denen am Fundamentstandort BW65 bei Borkum West II nicht gerammt wurde (z. B. 20:00 Uhr).

Beim Anhören des Zeitsignalabschnitts 20:30 Uhr bis 21:00 Uhr konnten zwei unterschiedliche Rammschläge in z. T. unterschiedlicher Ausprägung kurz hintereinander wahrgenommen werden. Es wird vermutet, dass zeitgleich zur Gründung des Fundamentes an der Anlage BW65 bei Borkum West II ebenfalls auf der Baustelle BO 1 Rammaktivitäten stattfanden.

Aus Messungen im Offshore-Windpark BO 1 ist bekannt (Bellmann & Gerke 2012), dass die Rammungen in 750 m Entfernung ohne Schallschutzsystem Einzelereignispegel (SEL_{50}) von ca. 178 dB_{SEL} liefern. Im Baugebiet Borkum West II lag der Einzelereignispegel (SEL_{50}) ohne den Einsatz eines Schallschutzsystems bei ca. 169 dB_{SEL}. Bei der Anlage BW65 wurde zusätzlich ein Schallschutzsystem (BBC 2) betrieben, das den Schall um weitere ca. 12 dB reduzierte (SEL_{50} in 750 m ca. 157 dB). Der Offshore Windpark BO1 befindet sich deutlich weiter nördlich des FFH-Gebietes als der Windpark BW II (BW II Anlage BW65: Entfernung 22,4 km, BARD Offshore: >50 km). Zum Zeitpunkt der Berichterstellung lagen keine Rammprotokolle von BO 1 für den Zeitraum vor, in dem bei BW II das Fundament BW65 (19.11.2011) gerammt wurde, sodass eine weitergehende Auswertung, z. B. Berechnung von Einzelereignispegeln, nicht möglich war. In Abb. 1-50 ist daher zu qualitativen Zwecken der (energieäquivalente) Dauerschallpegel L_{eq} für die Rammaktivitäten am Standort BW65 dargestellt.

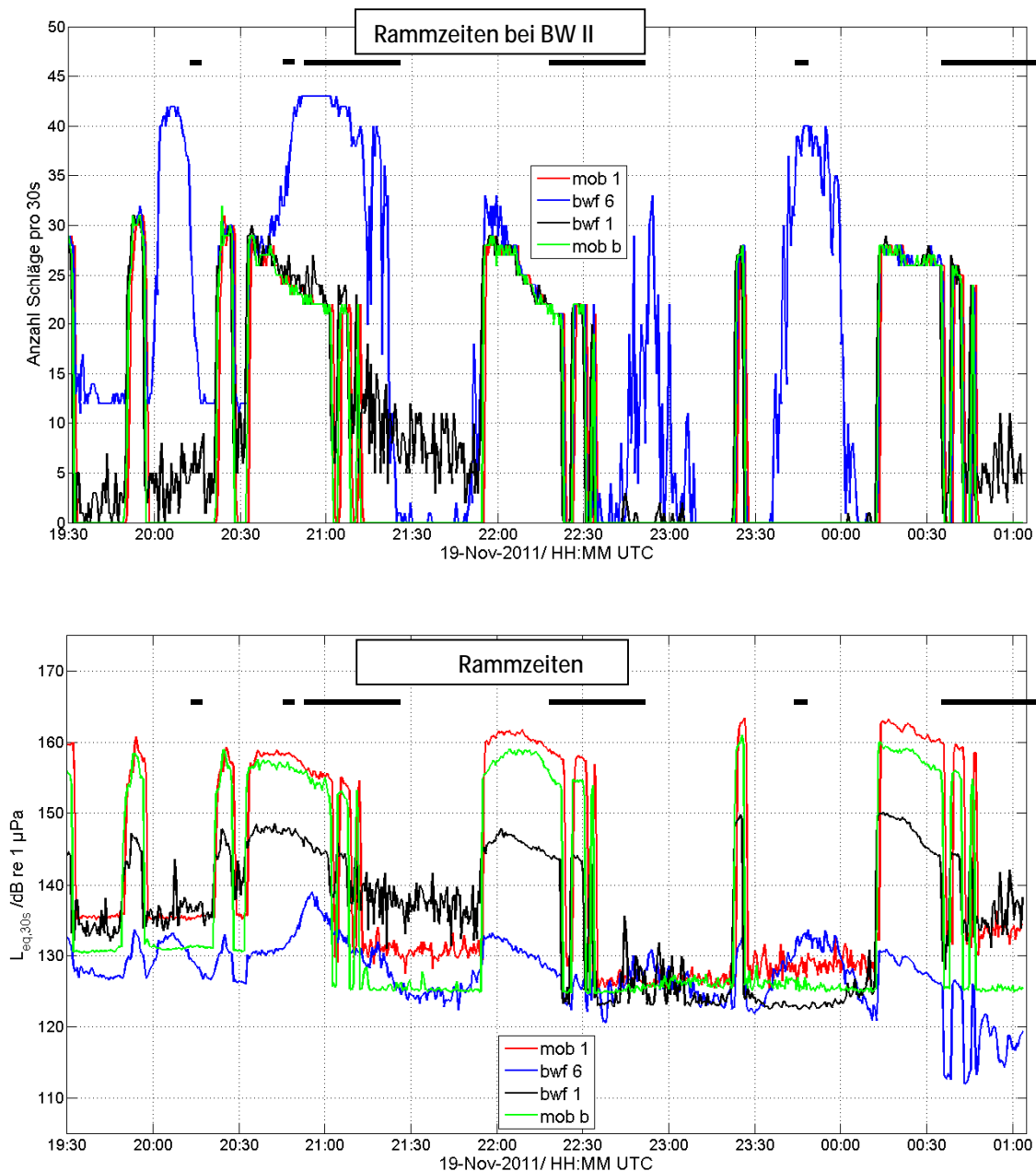


Abb. 1-50: Oben: Anzahl der (software-) detektierten Rammschläge bei der Rammung am Fundamentstandort BW65 an unterschiedlichen Messpositionen innerhalb und außerhalb des Baufeldes (Entfernung POD mob 1: 0,5 km, POD mob 2: 0,8 km, POD bwf_1: 5,7 km, POD bwf_6: 22,4 km). Mit schwarzen Linien sind die Zeitabschnitte der Rammarbeiten bei BW II am Standort BW65 gekennzeichnet. Unten: dazugehöriger Zeitverlauf des energieäquivalenten Dauerschallpegels L_{eq} .

Der energieäquivalente Dauerschallpegel L_{eq} stieg in solchen Zeiträumen signifikant an, in denen die an der Messposition bwf_6 im FFH-Gebiet registrierte Schlagzahl deutlich höher war als bei den anderen Messpositionen (z. B. im Zeitraum 20:30 Uhr bis 21:00 Uhr um bis zu 9 dB). Beim Abhören der Rohdaten hörte man zwei deutlich unterschiedliche Rammschläge. Dass dieser Effekt sich an den anderen Messpositionen nicht auf den gemessenen L_{eq} in Form einer Erhöhung auswirkte, lag daran, dass Rammschall von der Baustelle BW II bei diesen Messpositionen deutlich lauter als der Rammschall von der Baustelle BO 1 war (Pegeldifferenzen > 20 dB).

Eine Berechnung des Einzelereignispegels an der Messposition bwf_6 sollte einen Wert ergeben, der zwischen dem Einzelereignispegel der Baustelle BW II und BO 1 liegt. Der L_{eq} zeigte jedoch, dass der energieäquivalente (Dauer-) Schalldruckpegel aufgrund der zeitgleichen Einwirkung von unterschiedlichen Lärmquellen um bis zu 9 dB anstieg. Es würden sich somit erhebliche Unterschiede zwischen der Darstellung eines Einzelereignispegels und eines Dauerschallpegels bei hohen Störgeräuschanteilen (z.B. zeitgleiche Rammung auf einer anderen Baustelle) ergeben. Anders ausgedrückt bedeutet dies, dass der Einzelereignispegel bei einem Signal-zu-Rauschverhältnis von >20 dB unabhängig von der Anzahl der Schläge pro Auswertungszeitraum ist, wenn die Rammimpulse vergleichbare Amplituden besitzen, der zu messende Dauerschall (L_{eq}) pro Zeiteinheit (hier 30 s) jedoch sehr stark von der Anzahl der Rammschläge pro Zeiteinheit abhängt.

In Abb. 1-51 ist die an unterschiedlichen Messpositionen durch die Auswertungssoftware von itap registrierte Schlaganzahl für die Rammarbeiten am Fundamentstandort BW35 zum Vergleich zu Abb. 1-50 dargestellt. Es ergab sich eine sehr hohe Übereinstimmung der durch Software detektierten Schlagzahlen an unterschiedlichen Messpositionen innerhalb und außerhalb des Baufeldes.

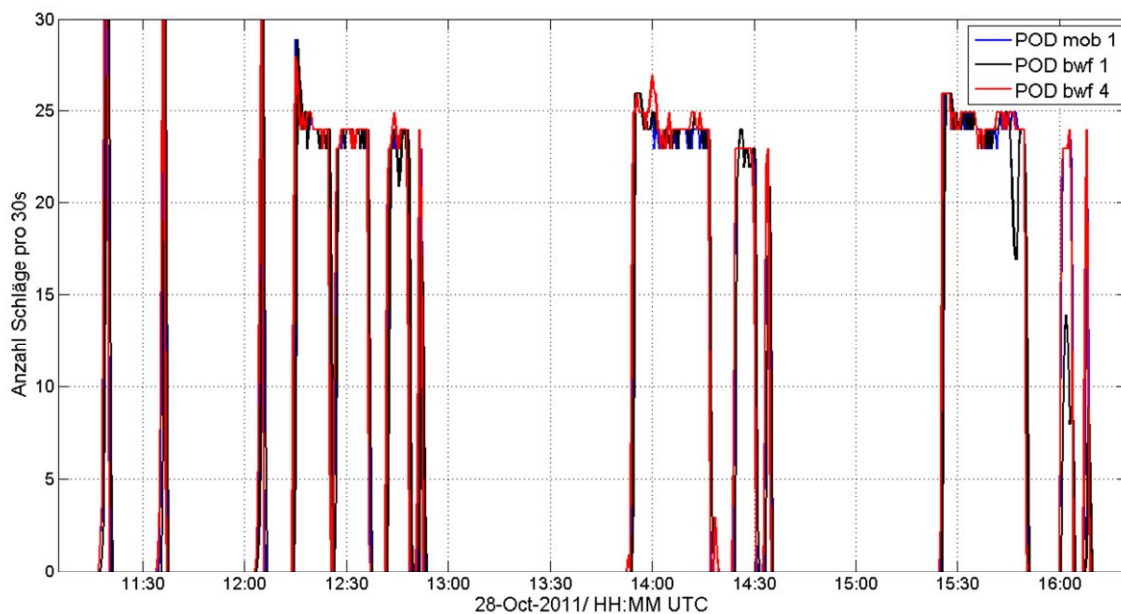


Abb. 1-51: Anzahl der detektierten Rammschläge am Fundamentstandort BW65 an unterschiedlichen Messpositionen im Baufeld und im FFH-Gebiet (Entfernung POD mob 1: 1.477 m, POD bwf_1: 2,9 km, POD bwf_4: 18,4 km).

In Abb. 1-52 ist ein Signalverlauf über einen ausgewählten Zeitverlauf der Rammaktivitäten an der Anlage BW65 bei BW II und zeitgleichen Rammungen bei BO 1, gemessen im FFH-Gebiet (bwf_6), dargestellt.

Im Zeitabschnitt 5 s bis 20 s wurden hier nur Rammimpulse von einer anderen Baustelle aufgezeichnet (vermutlich Offshore-Windpark BO 1). Nach ca. 25 s setzten die Rammarbeiten am Fundamentstandort BW65 ein. Zu diesem Zeitpunkt erfolgte eine sehr schnelle Abfolge von Rammschlägen. Dies spiegelte sich ebenfalls im L_{eq} deutlich wider (vgl. Abb. 1-50). Die Anzahl der Rammschläge pro Zeitintervall hatte einen erheblichen Einfluss auf den Dauerschallpegel (L_{eq}), jedoch nicht auf den Einzelereignispegel. Dabei war unerheblich, ob die erhöhte Anzahl an Schlägen von einem einzigen Rammort oder mehreren zeitgleichen Rammorten stammte. Diese Hinweise könnten ggfs. hilfreich bei einer Betrachtung der Auswirkungen zeitgleicher Rammaktivitäten auf die Reaktion von Schweinswalen sein. Eine detaillierte Auswertung war jedoch in diesem Projekt nicht möglich, da lediglich bei Rammungen an einem Fundamentstandort zeitgleiche Rammaktivitäten des benachbarten Offshore-Windparks BO 1 stattfanden.

Bei der Schallausbreitung über sehr große Entfernungen treten zwei wesentliche physikalische Phänomene auf: (1) eine frequenzabhängige Absorption des Wassers (vgl. Kapitel D.6, S. 97 ff) und (2) eine Dispersion. Das erste Phänomen ist in Kapitel D.6 hinreichend dargestellt. Das zweite Phänomen bewirkt, dass Schall unterschiedlicher Frequenzen sich unterschiedlich schnell im Wasser ausbreitet. In der Regel dauert ein Rammschlag in ca. 750 m Entfernung zum Rammort weniger als 100 ms. Derselbe Rammimpuls würde in einer Entfernung von mehreren Kilometern zeitlich deutlich verlängert zu messen sein, da sich tiefe Frequenzen etwas langsamer als schnelle Frequenzen im Wasser ausbreiten (vgl. Abb. 1-53).

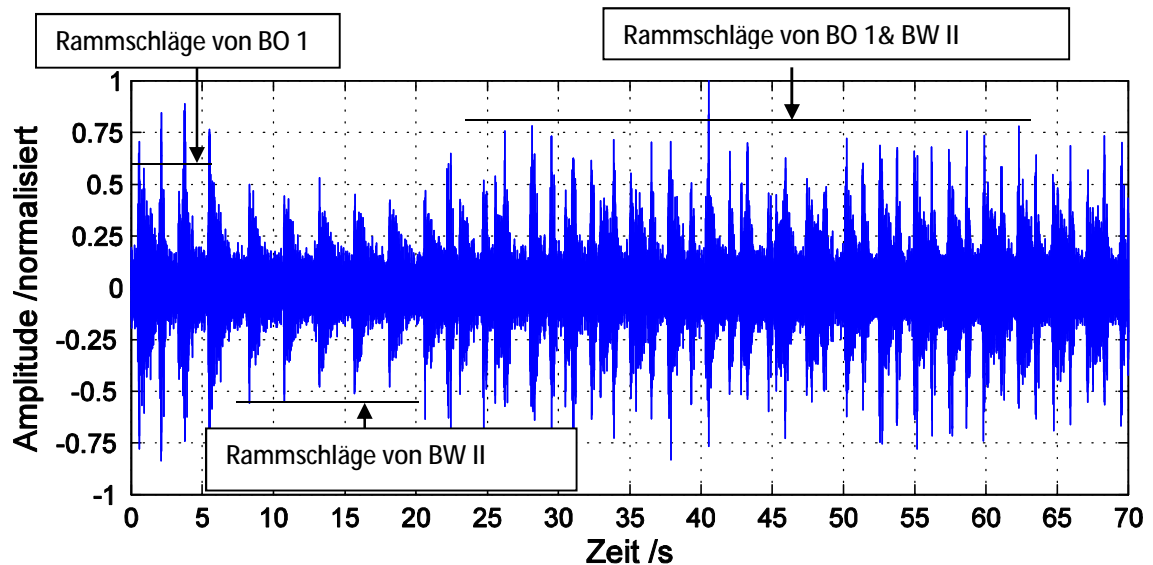


Abb. 1-52: Zeitsignal gemessen im FFH-Gebiet in ca. 22,4 km Entfernung vom Fundamentstandort BW65 (POD bwf_6) bei zeitgleichen Rammungen in den OVPs BW II und BO 1. Der Abstand zur Baustelle BARD Offshore 1 (BO 1) war größer als 50 km. Zur Verdeutlichung ist die maximale gemessene Amplitude auf einen Wert von 1 (Vollaussteuerung) normiert dargestellt.

Durch die Dispersion ändert sich die Wahrnehmung eines Rammchlages erheblich. Inwieweit dies einen Einfluss auf die Störwirkung von Schall auf Schweinswale haben könnte, muss jedoch vorerst offen bleiben.

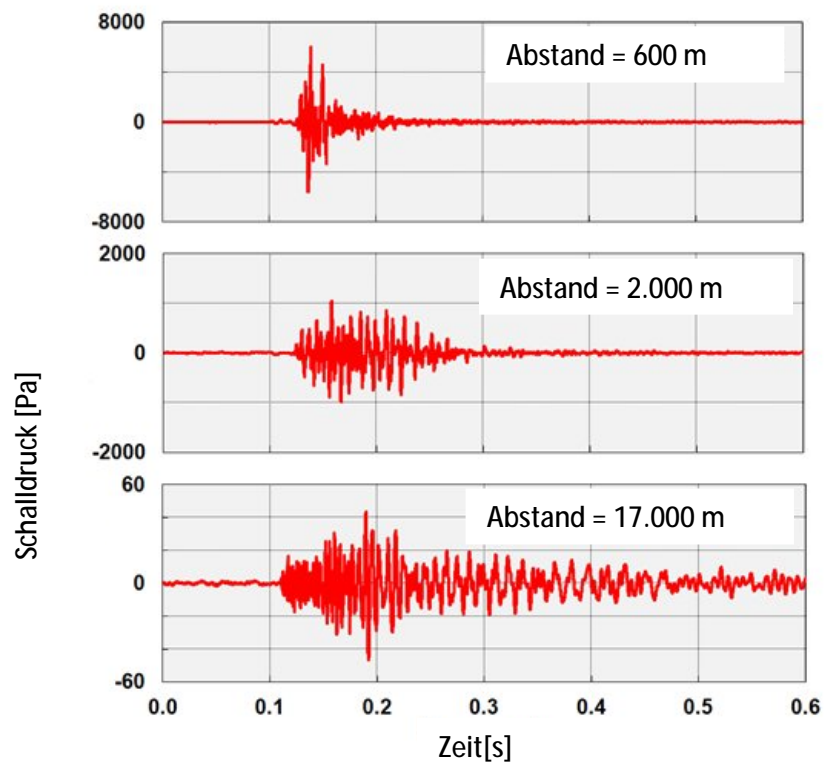


Abb. 1-53: Ein Rammimpuls gemessen in unterschiedlichen Entfernungen zu einem Rammort ohne den Einsatz eines Schallminderungssystems.

D.7 Akustische Parameter für weitergehende Analysen bezüglich des Verhaltens von Schweinswalen

Gemessene und prognostizierte akustische Kenngrößen

Die Reaktion von Schweinswalen auf Unterwasserschallereignisse (Hydroschallimmissionen) wurde über den Vergleich von Detektionsraten der Schweinswal-Klicklaute durch Schweinswal-klickdetektoren (C-PODs) mit den dazugehörigen akustischen Parametern bzw. Kenngrößen analysiert (siehe Abschnitt E). Für die Analyse der Schweinswalerfassung in Bezug auf die Schallimmissionen der Rammarbeiten mussten für jede Rammung und jeden POD-Standort die Empfangspegel der einzelnen Rammschläge vorhanden sein. Es wurden insgesamt 26 fest installierte C-POD Positionen genutzt, die zwischen 600 m und 37 km von einzelnen Fundamentstandorten entfernt lagen (vgl. Tab. 1.4). Im Gegensatz dazu wurden lediglich an vier Positionen zeitgleich die Hydroschallimmissionen aufgezeichnet. Für die weiteren Analysen wurden die akustischen Parameter Einzelereignispegel (SEL_5 , SEL_{50} und SEL_{90}) und Spitzenpegel (L_{Peak}) für alle 22 POD-Stationen, die nicht mit einem Hydroschallmessgerät ausgestattet waren, berechnet. Diese Berechnungen wurden mit der in Kapitel D.6.2 (S. 97 ff) dargestellten empirischen frequenz-abhängigen Formel für die Ausbreitungsdämpfung, die auf Messdaten der itap GmbH basieren, und den vorhandenen Daten der Hydroschallimmissionen (vgl. Kapitel D.3, S. 78 ff) durchgeführt. Dabei wurden zunächst die akustischen Kenngrößen für eine exakte Entfernung von 750 m (vgl. Tab. 1.9, S. 80) berechnet und von dieser Position aus mit der empirischen Ausbreitungsnäherung der itap GmbH auf unterschiedliche Entfernungen bis maximal 37 km prognostiziert. Die Prognoseunsicherheit ist für die BBC-Konfigurationen und die Referenzmessungen den Abb. 1-47 bis Abb. 1-49 (S. 106 ff) zu entnehmen und betrug wenige dB. Im Gegensatz dazu wurden die gemessenen Hydroschallimmissionen an den Messpositionen bwf_1 und bwf_4 bzw. bwf_6 verwendet.

D.8 Diskussion

D.8.1 Unterschiede zwischen den gemessenen akustischen Kenngrößen

Messvarianz der einzelnen akustischen Kenngrößen

In Kapitel E wird für die Untersuchung der Störwirkung von Schweinswalen durch Rammschall der 50% Perzentilpegel des Einzelereignispegels (SEL_{50}) als akustische Kenngröße verwendet. Tab. 1.17 liefert eine statistische Auswertung der Differenzen zwischen den gemessenen Einzelereignispegeln und den gemessenen Spitzenpegeln, sowie zwischen den unterschiedlichen Perzentilwerten des Einzelereignispegels. Hierfür wurden sämtliche akustische Kenngrößen aller vorhandenen Messungen herangezogen und jeweils die Differenzen zwischen unterschiedlichen akustischen Kenngrößen berechnet. Mit Hilfe dieser Tabelle können die Ergebnisse aus Kapitel E im Rahmen der statistischen Genauigkeit auf jede beliebige akustische Kenngröße skaliert werden. Dies ist insbesondere für den Einzelereignispegel relevant, da laut Messvorschrift des BSHs der 5% Perzentilpegel (SEL_5) mit dem Schallschutzgrenzwert von 160 dB_{SEL} zu vergleichen ist und nicht der Median (SEL_{50}).

Tab. 1.17: Differenzen zwischen verschiedenen gemessenen akustischen Kenngrößen (Pegeln). Die Differenzen wurden über sämtliche auswertbaren Rammschläge aller Messpositionen innerhalb des Baufeldes ohne Anwendung eines Schallschutzsystems ermittelt.

Nr.	Differenzen [dB]				
	$L_{\text{Peak}} - \text{SEL}_{90}$	$L_{\text{Peak}} - \text{SEL}_{50}$	$L_{\text{Peak}} - \text{SEL}_5$	$\text{SEL}_5 - \text{SEL}_{50}$	$\text{SEL}_5 - \text{SEL}_{90}$
Mittelwert	26,4	24,2	22,3	1,9	4,1
Standardabweichung	2,7	2,1	1,7	0,9	1,5
Median	26,6	24,4	22,2	1,9	4,1
Minimum	19,7	19,2	18,5	0,1	0,3
Maximum	32,1	29,4	27,1	4,9	7,2

Die gemessene Differenz zwischen dem Einzelereignispegel (SEL_5) und dem Spitzenpegel (L_{Peak}) betrug im Mittel etwa 22 dB mit einer Standardabweichung von ca. 2 dB. Geht man davon aus, dass der Einzelereignispegel $\text{SEL}_5 = 160 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ bei einer Rammung beträgt, so würde sich der Spitzenpegel L_{Peak} im Bereich von $182 \text{ dB} \pm 2 \text{ dB}$ bewegen. Würde man den Parameter L_{Peak} als Kenngröße mit dem 190 dB Wert vergleichen, so würde bei Unterschreitung des Einzelereignispegels von $160 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ durch den SEL_5 der L_{Peak} jedes Mal ebenfalls 190 dB unterschreiten. Dies gilt auch bei der o.g. maximalen Differenz. Dies würde eine Redundanz des dualen Schallschutzgrenzwertkriteriums bedeuten.

In der aktuellen Diskussion wird oftmals auch der Parameter $L_{\text{Peak-to-Peak}}$ für den Spitzenpegel genannt. I.d.R. liegt im lautesten anzunehmenden Fall (Unterdruck = Überdruck) der Unterschied zwischen dem L_{Peak} und $L_{\text{Peak-to-Peak}}$ bei 6 dB ($L_{\text{Peak-to-Peak}}$ ist max. 6 dB lauter als L_{Peak}). Unveröffentlichte Messungen der itap ergaben, dass der Unterschied in der Regel $< 6 \text{ dB}$ beträgt. Sollte man den $L_{\text{Peak-to-Peak}}$ Parameter für den Vergleich mit dem $190 \text{ dB}_{L_{\text{Peak}}}$ Wert verwenden, so wäre nicht in jedem Fall automatisch sichergestellt, dass bei Einhaltung des $160 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ Wertes durch den Einzelereignispegel (SEL_5) der $L_{\text{Peak-to-Peak}}$ Parameter die $190 \text{ dB}_{L_{\text{Peak}}}$ unterschreitet (vgl. Tab. 1.14).

Bei Verwendung eines Schallminderungssystems wird i.d.R. der Spitzenpegel deutlich stärker als der Einzelereignispegel reduziert, so dass man davon ausgehen kann, dass bei Einhaltung des $160 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ Wertes durch den SEL_5 das duale Schallschutzgrenzwertkriterium (Einzelereignispegel und Spitzenpegel) eingehalten wird (Vergleich von Tab. 1.9, Tab. 1.10 und Tab. 1.11). Dieser Sachverhalt ist jedoch bei anderen Schallminderungsarten noch zu überprüfen.

Die Differenz zwischen dem gemessenen 5% und 50% Perzentilpegel des Einzelereignispegels ($\text{SEL}_5 - \text{SEL}_{50}$) beträgt $2 \text{ dB} \pm 1 \text{ dB}$. Bei Bauvorhaben ab dem Jahr 2012 wurden für aufgelöste Fundamentstrukturen, wie z.B. Tripod, Tripiles oder Jacket, die Auswertungen nicht wie im vorliegenden Fall pro Fundament sondern pro Pfahl erstellt. Bei dieser Art der Auswertungen ergeben sich vergleichbare Differenzen in den akustischen Kenngrößen von Fundamentstandort zu Fundamentstandort sowie von Pfahl zu Pfahl pro Fundamentstandort (vgl. Tab. 1.17; unveröffentlichte Messergebnisse aus laufenden Bauvorhaben der itap GmbH). Somit ist i. d. R. der beurteilungsrelevante 5% Perzentilpegel des Ereignispegels im Mittel konstant um 1 dB bis 3 dB höher als der Median des Einzelereignispegels (SEL_{50}).

Diese Differenz der beiden verwendeten Perzentilwerte des Einzelereignispegels haben somit theoretisch auch einen Einfluss auf die Entfernungsberechnungen von Radien mit vorgegebenen konstanten Pegelwerten, wie in Kapitel D.6.2 (vgl. Abb. 1-47 bis Abb. 1-49). Andererseits weisen die dargestellten akustischen Kenngrößen bei einer gewählten Schallminderungs-Systemkonfiguration (z.B. BBC 2 mit voller Luftzufuhr) bereits Unterschiede von bis zu 5 dB bei konstantem Abstand auf. Im Falle der Anwendung von Blasenschleiersystemen ist dies eventuell auf die Varianz des eingesetzten Schallschutzsystems zurückzuführen, im Falle von ungedämmten Rammungen (Referenzmessungen) ist dies jedoch nicht der Fall. Es müssen somit weitere bisher noch nicht vollständig bekannte Einflussfaktoren existieren, die die Prädiktion von Abstandsraden mit vorgegebenen Schallpegelwerten mit einer Unsicherheit von bis zu 5 dB behaften.

Die Abb. 1-44 bis Abb. 1-46 zeigen zudem Unterschiede zwischen den gemessenen und berechneten Einzelereignispegeln Differenzen von deutlich > 5 dB je nach verwendeter Methode zur Berechnung der Ausbreitungsdämpfung bei Entfernungen von > 10 km vom Rammort. Vor diesem Hintergrund wird die Differenz zwischen dem 5% und 50% Perzentilwert des Einzelereignispegels ($SEL_5 - SEL_{50}$) von 1 dB bis 3 dB bei einer gegebenen Messvarianz von 5 dB und Unsicherheiten bei der Berechnung der Ausbreitungsdämpfung von > 5 dB derzeit adäquat mit der Darstellung des Medians (SEL_{50}) berücksichtigt.

Einfluss von unterschiedlichen Schallschutz-Systemkonfigurationen

In der Abb. 1-54. sind die gemessenen 5%, 50% und 90% Perzentilwerte des Einzelereignispegels (SEL) getrennt nach der Wandstärke (50 mm oder 70 mm) und der eingesetzten Schallschutz-Systemkonfiguration (beschränkt auf Blasenschleier Variationen mit maximaler Luftzufuhr von $0,32 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$) zusammengefasst. Mit dieser Darstellung der Messergebnisse wird der aufgespannte Merkmalsraum der Messdaten verdeutlicht.

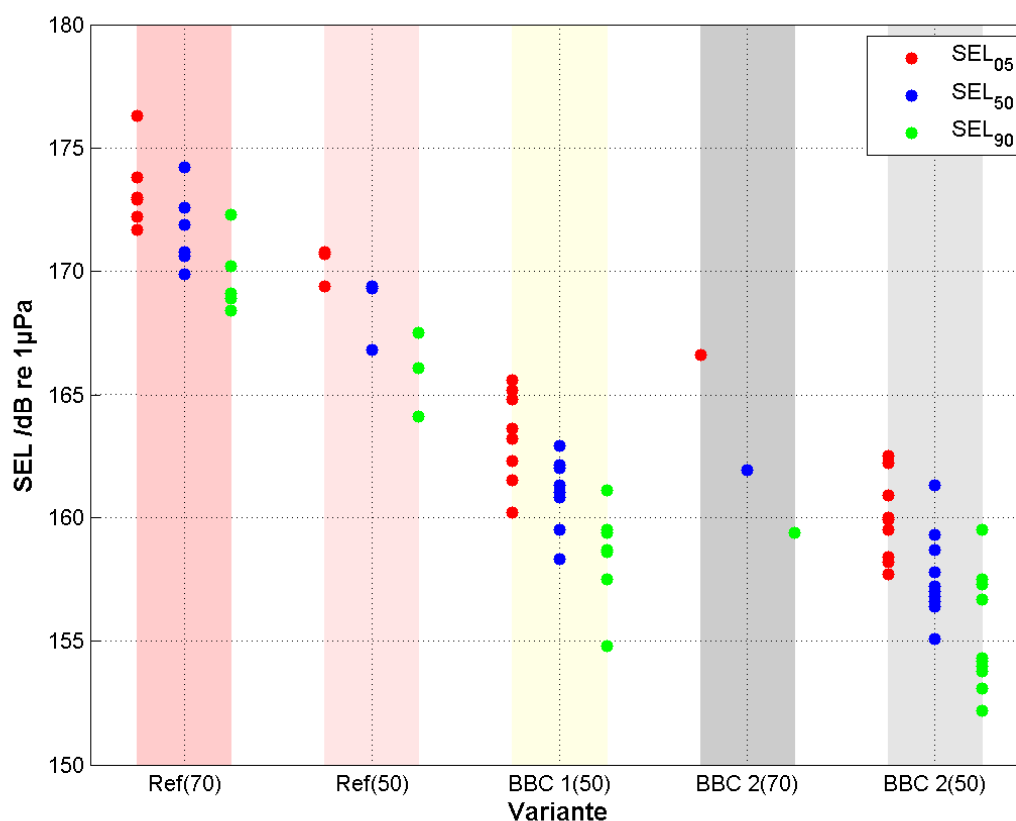


Abb. 1-54: Dargestellt sind die gemessenen Perzentilwerte des Einzelereignispegels ($SEL_{5,50,90}$) normiert auf eine Entfernung von 750 m zum Rammort getrennt nach der Wandstärke (50 mm oder 70 mm) und der eingesetzten Schallschutz-Systemkonfiguration (Ref: ohne Blasenschleier; BBC 1 und BBC 2: mit Blasenschleier und max. Luftzufuhr von $0,32 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$).

Es existiert einen deutlichen Unterschied im Pegel zwischen den dargestellten Einzelereignispegeln der Referenzmessungen (ohne Blasenschleier) und der Messungen mit Schallschutzsystem (BBC 1 und BBC 2) für alle Perzentilwerte. Diese Darstellung bestätigt nochmals, dass der eingesetzte Blasenschleier eine deutliche schallreduzierende Wirkung besitzt.

Es zeigt sich allerdings auch, dass eine geringe jedoch konstante Differenz zwischen den Referenzmessungen mit einer Wandstärke von 50 mm und 70 mm existiert. Aufgrund der geringen Datenbasis ist statistisch nicht eindeutig zu klären, ob die Wandstärke einen signifikanten Einfluss auf den resultierenden Einzelereignispegel besitzt.

Der Unterschied zwischen dem Einsatz des Blasenschleiers mit der Düsen Schlauchkonfiguration 1 (BBC 1) und 2 (BBC 2) mit maximaler Luftzufuhr ist ebenfalls deutlich zu erkennen. Es ergibt sich ebenfalls ein deutlich erkennbarer Unterschied bei Verwendung des Blasenschleiers (BBC 2) mit maximaler Luftzufuhr zwischen den Wandstärken mit 50 mm und 70 mm, der ggfs. jedoch auch durch die erhöhte verwendete maximale Rammenergie zumindestens teilweise zu erklären ist.

In der Abb. 1-55. ist zum Vergleich mit Abb. 1-54. der gemessene Spitzenpegel (L_{Peak}) dargestellt. Die Ergebnisse des Spitzenpegels bestätigen die o.g. Aussagen hinsichtlich des Einflusses der verwendeten Wandstärke und der Schallschutz-Systemkonfiguration auf die gemessenen Pegelwerte.

Es ist in weiteren Studien zu untersuchen, ob und in welcher Höhe die Messvarianzen der akustischen Kenngrößen in mehreren hundert Metern Entfernungen zum Rammort durch weitere Einflussfaktoren, wie z.B. verwendete Rammenergie, Wassertiefe, Bodenkopplungen etc. beeinflusst werden.

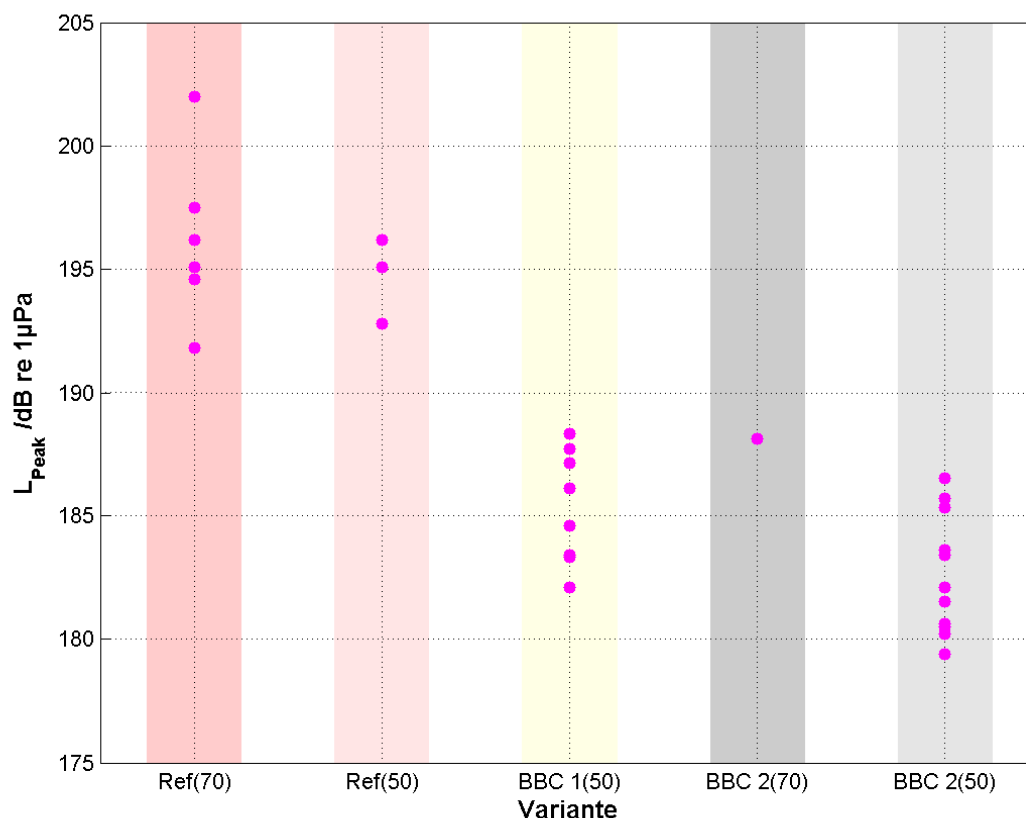


Abb. 1-55: Dargestellt sind die gemessenen Spitzenpegel (L_{Peak}) normiert auf eine Entfernung von 750 m zum Rammort getrennt nach der Wandstärke (50 mm oder 70 mm) und der eingesetzten Schallschutz-Systemkonfiguration (Ref – ohne Blasenschleier; BBC 1 und BBC 2 mit max. Luftzufuhr von $0,32 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$).

Einfluss der verwendeten akustischen Kenngröße auf die Schallminderung des eingesetzten Blasenschleiers

Die Tab. 1.16 zeigt, dass die erzielte Schallminderung bei wiederholter Anwendung eines Schallschutzsystems mit konstanter Systemkonfiguration Varianzen von mehreren dB unterliegt.

Aufgrund einer fehlenden Darstellungs- und Beurteilungsgrundlage der erzielten Schallminderung (Einfügungsdämpfung bzw. Einfügungsdämmmaß) in der bestehenden Messvorschrift für Unterwasserschall (BSH 2011) wurde in diesem Forschungsvorhaben eine derartige Methode entwickelt (vgl. Kapitel D.2.5). Auch in einer im Jahr 2013 veröffentlichten Messvorschrift für die quantitative Bestimmung der Wirksamkeit von Schalldämmmaßen (BSH 2013) wird keine Beurteilungsgrundlage für die gemessene Varianz der erzielten Einfügungsdämpfung unter Offshore-Bedingungen angegeben.

In der nachfolgenden Tab. 1.18. wird die mittlere erzielte Schallminderung der einzelnen Blasenschleier-Systemkonfigurationen auf der Basis unterschiedlicher Perzentilwerte für den Einzelereignispegel gegenüber gestellt (vgl. Tab. 1.16). Zur Verdeutlichung der dargestellten Differenzen sind die Ergebnisse auf eine Dezimalstelle gerundet dargestellt.

Tab. 1.18: Zusammenfassung der erzielten Einfügungsdämpfungen für unterschiedliche Schallminderungskonditionen und -konfigurationen basierend auf unterschiedlichen Perzentilwerten für den Einzeleignispegel ($SEL_{5,50,90}$) (vgl. Tab. 1.16).

Nr.	Anzahl Ref.- Fundamente (Wandstärke)	BBC- Konfiguration	$\Delta(\text{Ref}_{90} - \text{SEL}_{90})$ [dB]	$\Delta(\text{Ref}_{50} - \text{SEL}_{50})$ [dB]	$\Delta(\text{Ref}_5 - \text{SEL}_5)$ [dB]
1	3 (50 mm)	BBC 1 (8 Fundamente)	7,3	7,4	7,0
2a	3 (50 mm)	BBC 2 (12 Fundamente, inkl. BW23)	10,4	10,5	10,0
2b	3 (50 mm)	BBC 2 (11 Fundamente, exkl. BW23)	10,8	10,8	10,5
3	9 (50 + 70 mm)	BBC 1 (8 Fundamente)	9,8	9,6	9,0
4	9 (50 + 70 mm)	BBC 2 (12 Fundamente, inkl. BW23)	12,9	12,6	12,0

Es ergeben sich Unterschiede in der mittleren Schallminderung basierend auf unterschiedlichen Perzentilwerten für den Einzelereignispegel von <1 dB, d.h. die erzielte mittlere Schallreduktion ist unabhängig vom verwendeten Perzentilwert des Einzelereignispegels. Somit spiegeln die Ergebnisse aus Tab. 1.16 eine mittlere Schallminderung des eingesetzten Schallminderungssystems korrekt wieder und sind auch auf den SEL_5 anwendbar. Der Vorteil der Darstellung aus Tab. 1.16 im Gegensatz zu Tab. 1.18 ist, dass die vorhandene Varianz der erzielten Schallminderung über die Rammung eines Pfahles und über die Rammungen an verschiedenen Fundamentstandorten adäquat wiedergegeben wird. Es zeigte sich bei mehrfacher Anwendung eines Blasenschleiers mit konstanter Systemkonfiguration, dass die erzielte schallmindernde Wirkung von Anwendung zu Anwendung variieren konnte. Es ist derzeit nicht geklärt, welche Einflussfaktoren, wie Spezifikationen des jeweiligen Fundamentstandortes, z.B. Bodenkopplung, Rammenergie oder ähnliches, oder Systemvariationen des eingesetzten Blasenschleiers, z.B. Schwankungen der zugeführten Luftmenge, verwendete Lochkonfiguration entlang des Düsenschlauches oder Ähnliches, diese Varianzen erklären können.

D.8.2 Mögliche weitere Einflussfaktoren auf die schallmindernde Wirkung eines Großen Blasenschleiers

Die Untersuchung zeigte, dass bei gleichbleibendem Luftstrom bzw. Luftmenge pro Zeiteinheit und Meter Düsen Schlauch ein solcher mit kleinen Löchern und geringem Lochabstand eine bessere Schallreduktion bewirkte als ein Schlauch mit großen Löchern und großem Lochabstand (vgl. Kapitel D.4.3, S. 93).

Aus der Literatur (vgl. Kapitel B.1, S. 35 f) sind z. T. einige Einflussparameter bezüglich der Wirksamkeit von Luftblasen aus Laborstudien und theoretischen Überlegungen bekannt. Jedoch existieren z. B. für die Größe der Luftblasen z. T. unterschiedliche Aussagen (große Blasen sind notwendig aufgrund von Resonanz- und Streueffekten, kleine Luftblasen und damit große Oberflächen sind notwendig, um thermische Verluste/Reflexionen zu optimieren (vgl. Kapitel B.1, S. 35 f)). Vom ISD Hannover durchgeführte Labormessungen zeigen, dass ein Blasenschleier, der aus vielen kleinen Blasen aufgebaut ist, sehr gute Dämmwerte im gesamten Frequenzbereich erreicht. Im Forschungsprojekt „Schall3¹⁰“ (Rustemeier et al. 2012) wurden Versuche in der Hamburgischen Schiffbau-Versuchsanstalt und im Testsee der Firma Atlas Elektronik durchgeführt, die auf eine Optimierung der physikalischen Minderungswirkung und eine deutliche Verbesserung der Wirtschaftlichkeit zielten. Eingesetzt wurden einfache Düsenrohre sowie eine neu entwickelte Düsenrohrkonstruktion (Perlator), bei der eine Membran zur Erzeugung eines besonders dichten und feinblasigen (Luftblasen-) Schleiers getestet wurde. Eine experimentelle Bestätigung unter Offshore-Bedingungen ist jedoch nicht vorhanden, so dass diese Ergebnisse nicht mit den vorliegenden Messdaten verglichen werden können.

Aus technischer Sicht sind jedoch der Lochgröße und dem jeweiligen Lochabstand praktische und technische Grenzen gesetzt (Bohrung der Löcher, ausreichender Luftaustritt, Verschmutzung der Löcher durch Sediment etc.). Auf der Basis der durchgeführten Versuche in diesem Forschungsvorhaben mit lediglich zwei verschiedenen Düsen Schlauchkonfigurationen bzgl. Lochgröße und Lochabstand und auf der Basis der verfügbaren Literaturdaten kann abschließend nicht beurteilt werden, welche Düsen Schlauchkonfiguration hinsichtlich Lochgröße und Lochabstand eine optimale Schallminderung erzielt. Eine optimale Lochgrößen- und Lochabstand-Konfiguration wird sicherlich auch von weiteren technischen Parametern (u.a. Luftmenge pro Zeiteinheit, Düsen Schlauchdurchmesser) abhängig sein. Es ist aus technischen und praktischen Gründen (z. B. Wasserdruck und Lochgröße) zu vermuten, dass es einfacher sein sollte, viele kleine Luftblasen im Wasser zu produzieren als wenige sehr große Luftblasen. Jedoch ist naheliegend, dass der Herstellung von Luftblasen mit definierter Größe aus technischen, praktischen und auch physikalischen Gründen unter realen Offshore-Bedingungen Grenzen gesetzt sind. So ist auf Aufnahmen von Luftblasen mit einem ROV (Remotely Operated Underwater Vehicle) in diesem Projekt zu erkennen, dass die Blasengröße mit abnehmendem statischem Wasserdruck steigt und sich Luftblasen zum Teil beim Aufstieg teilen.

Verwendete Luftmenge

Die verwendete Luftmenge hatte bei beiden BBC-Konfigurationen einen deutlichen Einfluss auf die Schallminderung. Mit ansteigender Luftmenge ergab sich eine erhöhte Durchgangsdämpfung (Schallreduktion). Es konnte aufgrund der limitierten Anzahl von Kompressoren und des Platzangebots an Bord der *Noortruck* nicht abschließend geklärt werden, ob eine weitere Erhöhung der Luftmenge ($>0,32 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$) sich weiterhin positiv auf die Schallminderung ausgewirkt hätte.

¹⁰ Schall3: Konzeption, Erprobung, Realisierung und Überprüfung von lärmarmen Bauverfahren und Lärminderungsmaßnahmen bei der Gründung von Offshore-WEA (Schall3), BMU und PTJ gefördertes Projekt, FKZ 0327645

Hinweise, dass der zugeführten Luftmenge technische und physikalische Grenzen gesetzt sind, lieferte das Projekt „HYDROSCHALL OFF BO1“ (Bellmann & Gerke 2012), bei dem ein „Kleiner Blasenschleier (engl. Small Bubble Curtain) als Schallminderungssystem mit unterschiedlichen Luftmengen getestet wurde. Ab einer gewissen Luftmenge verringerte sich die erzielte Schallreduktion. Die Gründe für diese Abnahme der Schallreduktion bei Zunahme der Luftmenge wurden nicht geklärt, könnten jedoch ggfs. auf die verwendeten Querschnitte der Düsenrohre zurückzuführen sein.

Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass die physikalischen Phänomene der Schallreduktion eines Blasenschleiers nahe am Pfahl (Small Bubble Curtain) und weit entfernt (Großer Blasenschleier) nach derzeitigem Kenntnisstand nicht eindeutig vergleichbar sind. So zeigen sich alleine bei der Luftmenge pro Minute pro Meter verwendeten Düsen Schlauch bereits erhebliche Unterschiede bei nahezu identischen Schallminderungen (Small Bubble Curtain ca. $0,10 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$ bis $0,15 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$; BBC ca. $0,32 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$; Bellmann & Gerke 2013).

Weitere Hinweise, dass die verwendete Luftmenge bei einem Großen Blasenschleier einen entscheidenden Einfluss auf die erzielte Schallreduktion haben könnte, ergeben sich auch aus anderen Forschungsvorhaben, bei denen der Einfluss unterschiedlicher Blasengrößen und Luftmengen im Wasser auf die Schallreduktion theoretisch berechnet bzw. abgeschätzt wurde (z.B. Rustemeier et al. 2012). Auch bei aktuellen Anwendungen eines Großen Blasenschleiers beim Bau von diversen OWPs (unveröffentlichte Daten der itap GmbH aus Bauvorhaben in den Jahren 2012 und 2013 – z.B. OWP Meerwind Süd/Ost; Bellmann et al. 2013, Bellmann 2013) hat die verwendete Luftmenge einen wesentlichen Einfluss auf die erzielte Schallreduktion. Zur Bestimmung der physikalischen und technischen Grenzen des Parameters Luftmenge bezüglich eines Großen Blasenschleiers sind jedoch weitere Messungen mit ausreichender Luftmenge bei Kenntnis der Lochgrößen und Lochabstände unter realen Offshore-Bedingungen notwendig.

Für die verwendete Luftmenge wird in diesem Projekt und auch bei Projekten aus der Literatur (Schall FINO3¹¹, Griebmann et al. 2010) die Beschreibung Luftmenge pro Zeiteinheit und Meter Düsen Schlauch ($\text{m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$) der angesogenen Luftmenge verwendet. Ob dieser Beschreibungsparameter allein ausreichend für die Charakterisierung der verwendeten Luftmenge eines Großen Blasenschleiers ist, kann nicht abschließend geklärt werden. Es ist zu vermuten, dass die angesogene Luftmenge nicht die Luftmenge bzw. den Luftstrom im Düsen Schlauch am Meeresboden (Wassertiefe $>20 \text{ m}$, entspricht statischen Wasserdruck von $> 2 \text{ bar}$) widerspiegelt. Hierzu müssten zusätzlich der Düsen Schlauchquerschnitt und die einzelnen Löcher entlang des Schlauches berücksichtigt werden, die einen Einfluss auf die Druck- und Luftstromverteilung innerhalb des Düsen Schlauches besitzen (Annahme adiabatisches Gleichgewicht). Es ist eher zu vermuten, dass für eine objektive Beschreibung der verwendeten Luftmenge eine Fokussierung auf den Luftstrom bzw. Anteil der ausgetretenen Luftmenge pro Meter Düsen Schlauch bzw. pro umgebender Wassermenge hilfreich ist, z.B. prozentualer Luftanteil in der Wassersäule. Es existierte jedoch zum Zeitpunkt dieses Projektes keine geeignete Mess-Sensorik, mit der man die Druck- und Luftstromverteilung innerhalb eines Düsen Schlauches oder die Luftblasengröße und Luftblasenmenge in der Wassersäule unter realen Offshore-Bedingungen messen konnte. Derzeit wird vom itap ein Blasenschleiermessgerät für Laborbedingungen im Rahmen des Forschungsvorhabens BORA für die Uni Hannover (ISD) gebaut. Erste Tests mit diesem neuen Messgerät unter Laborbedingungen sind vielversprechend. Weitere mögliche Einflussfaktoren wie die Wassertiefe (statischer Druck auf den Düsen Schlauch) oder der Systemluftdruck der verwendeten Luftmenge im Düsen Rohr auf die austretende Luft sind bisher nicht untersucht worden; allerdings zeigen sich bei aktuellen OWP Rammarbeiten (nicht veröffentlichte Messdaten aus dem Ba monitoring diverser OWPs aus den Jahren 2012 und 2013 der itap GmbH, Bellmann 2013)

¹¹ Schall FINO3: Erforschung und Anwendung von Schallminimierungsmaßnahmen beim Rammendes FINO3 – Monopiles („Schall FINO3“), BMU und PTJ gefördertes Projekt, FKZ 0325023A, 0325077

Hinweise darauf, dass die Schallreduktion möglicherweise auch von diesen Parametern abhängen könnte.

Druck- und Luftstromverteilung

Aus technischer Sicht müsste die Druckverteilung und/oder der Durchfluss der Luft (Luftstrom) durch den Düsen Schlauchinnendurchmesser auf der gesamten Länge des „perforierten“ Düsen Schlauches in definierten Abstände gemessen werden, um einen Eindruck zu bekommen, wie sich diese physikalischen Größen über große Distanzen innerhalb der Schläuche verteilen. Eine Prognose dieser physikalischen Kenngrößen ist schwierig, da der Grad der Turbulenz durch die vorhandenen Löcher im Düsen Schlauch nur schwer abzuschätzen ist. Zusätzlich müsste das Verhältnis von Luftstrom, Schlauchlänge und verwendeter Gesamtlöchergröße pro Schlaucheinheit systematisch untersucht werden. Ferner wäre ggfs. durch Messungen oder Prognoseberechnungen (Model) zu klären, welche Verhältnisse von Luftmenge, Luftstrom (Durchflussmenge), Schlauchlänge und Lochöffnungen minimal, maximal und optimal verwendet werden müssten, damit die gesamte von den Kompressoren zur Verfügung gestellte (Druck-) Luft tatsächlich über das Düsen Schlauchrohr in die Wassersäule fließt und nicht zu einer Drosselung der Kompressorleistung (und somit zur Reduktion der zugeführten Luftmenge) führt. Dieser Sachverhalt wird bei derzeitigen Großen Blasenschleiern (unveröffentlichte Daten der Effizienzkontrolle der itap aus den Jahren 2012 und 2013) berichtet.

Düsen Schlauchlänge

Es ist ferner nicht geklärt, ob die Wirkungsweise eines Großen Blasenschleiers eine gleichbleibende Schallreduktion über die gesamte Länge des verwendeten Düsen Schlauches (hier 560 m) gewährleistet. Dies ist insofern ein wesentlicher Punkt, da bei zukünftigen Bauprojekten ggfs. deutlich größere Installationsschiffe zum Einsatz kommen werden und somit die Schlauchlänge sich wahrscheinlich deutlich vergrößern wird. Aus derzeitiger Sicht stehen außer einer Sichtüberprüfung oder einem ROV-Survey keine technischen Messmöglichkeiten zur Verfügung. Es ist zu vermuten, dass der Luftstrom und der Druck innerhalb eines Rohres mit der Länge abnehmen. Somit wird vermutlich auch die in die Wassersäule austretende Luft in einer gewissen Entfernung deutlich geringer werden. Die in der Wassersäule enthaltene Luftmenge ist jedoch ein entscheidender Parameter für die Schallreduktion. Es ist durch Messungen und ggfs. Prognosen festzustellen, welche praktischen Grenzen die Länge des zu verwendeten Düsen Schlauches hat. Im vorliegenden Forschungsvorhaben befanden sich die mobilen Messpositionen POD mobil 1/2 in unterschiedlichen Richtungen des ausgelegten Blasenschleiers. Zudem erfolgten bei zusätzlichen Messungen im Baufeld während der Forschungsphase 2 Messungen in unterschiedlichen Raumrichtungen zum Blasenschleier. Es ergaben sich keine erheblichen Unterschiede in den Messergebnissen, so dass davon auszugehen ist, dass bei dem verwendeten Blasenschleier mit einer Gesamtlänge von 560 m und einer Zuführung von Luft zu beiden Seiten in den Düsen Schlauch die Schlauchlänge noch keinen Einfluss auf die Schallreduktion besaß. Derzeitig werden jedoch Große Blasenschleier mit Schlauchlängen von mehr als 1 km geplant und angewendet, wo dieses sehr wohl der Fall sein könnte.

Mit den Ergebnissen aus dem Projekt HYDROSCHALL OFF BW II und den verfügbaren Angaben aus der Literatur lässt sich nicht ableiten, ob die gleiche Schallminderung bei vergleichbarer Luftmenge pro Meter Düsen Schlauch und Minute über sehr lange Schlauchlängen erreicht werden kann, oder ob sich mit einer Verlängerung der Schlauchlänge nicht auch weitere Düsen Schlauchparameter (wie z.B. der Querschnitt) verändern müssen.

Thermischer Effekt

Ein bisher noch wenig beachtetes physikalisches Phänomen könnte ebenfalls einen deutlichen Anteil an der erzielten Gesamtschallminderung bei Verwendung eines Blasenschleiers haben. Durch die

beim Rammvorgang entstehende (Schall-) Druckwelle werden die Luftblasen im Blasenschleier komprimiert (kompressibles Gas). Durch die Komprimierung steigt innerhalb der Luftblase die Temperatur (Annahme: adiabatische Änderung). Dadurch setzt ein Wärmefluss in das Wasser ein. Dieser ist proportional der Blasenoberfläche und der Temperaturdifferenz zwischen Luft in der Blase und dem umgebenden Wasser. Dieser Wärmefluss ist irreversibel, d. h. die aus der Luftblase ausgetretene Energie (die aus der Schallwelle stammt) kehrt bei der Dekomprimierung der Blase nicht wieder vollständig zurück. Diese (Wärme-) Energie wird somit der Schallwelle entzogen (thermischer Verlust).

Eine quantitative bzw. messtechnische Beschreibung jedes einzelnen physikalischen Effektes (Streuung, Reflexion und thermischer Verlust) ist nicht vorhanden. Durch gezielte Hydroschallmessungen an einem Blasenschleier könnten die einzelnen physikalischen Effekte messtechnisch detailliert erfasst werden und ggfs. eine Abschätzung des Einflusses auf die gesamte schallmindernde Wirkung ermöglichen. Diese Kenntnis könnte ebenfalls dazu dienen, eine Verbesserung der schallmindernden Wirkung zu erreichen, da man durch die unterschiedlichen physikalischen Wirkungsmechanismen gezielt die Blasengröße (Lochabstand und Lochgröße) des Blasenschleiers variieren könnte.

Wetter, Strömung und Tide

Weitere wesentliche Einflussgrößen bezüglich der schallmindernden Wirkung des Großen Blasenschleiers könnten das Wetter, die Tide und die ozeanographischen Gegebenheiten (Wellenhöhe, Strömungsrichtung etc.) sein. Aufgrund von Strömung, Wellenbedingungen und weiteren Parametern könnten die aus dem Düsen Schlauch austretenden Luftbläschen bei Ihrem Aufstieg zur Wasseroberfläche verdriftet werden, so dass sich der Abstand zwischen Blasenschleier und Fundamentstruktur veränderte und im ungünstigsten Fall auf Null reduzierte (z.B. Projekt alpha ventus mit dem Gestuften Blasenschleier; Rustemeier et al. 2012), d.h. die Luftblasen befänden sich nur auf einer Seite des zu rammenden Pfahls.

Bezüglich dieser Punkt wurde im vorliegenden Forschungsvorhaben auf zwei Arten vorgegangen. Zum einen wurde von dem Verlegeschiff des Blasenschleiers (*Noortruck*) die Ausbildung des Blasenschleiers visuell überprüft. Durch die visuelle Kontrolle des Blasenschleiers konnten auch eventuelle Ausfälle oder technischen Defekte (z. B. Abknicke des Düsen Schlauches) überprüft und dokumentiert werden. Durch Sichtprüfung ergab sich, dass die zu rammende Fundamentstruktur inkl. Errichterschiff (*Goliath*) zu jedem Zeitpunkt bei einem einwandfreien Betrieb des Blasenschleiers vollständig umhüllt war und der Abstand zwischen zu rammender Struktur und Blasenschleier an der Wasseroberfläche deutlich größer als 20 m war.

Zum anderen befindet sich in unmittelbarer Nähe zum OWP Borkum West II die Forschungsplattform FINO 1. Von der offiziellen Homepage dieser Forschungsplattform wurden sämtliche verfügbaren ozeanographischen und meteorologischen (gemessenen) Parameter für den gesamten Zeitraum der Bauarbeiten (September 2011 bis März 2012) zwecks einer Korrelation mit den gemessenen Hydroschalldaten heruntergeladen. Zur Verfügung standen folgende Daten:

- Signifikante Wellenhöhe
- Strömungsgeschwindigkeit
- Strömungsrichtung
- Wasserstand
- Wellenrichtung
- Windgeschwindigkeit
- Windrichtung

Leider zeigte sich, dass im Zeitraum September 2011 bis März 2012 die Aufzeichnungen einiger Parameter teilweise für den Zeitraum von mehreren Tagen und Wochen ausfielen, vermutlich aufgrund technischer Ausfälle, so dass nicht sämtliche Rammaktivitäten mit den o.g. Parametern korreliert werden konnten. In der nachfolgenden Tabelle sind die durchgeführten Rammaktivitäten

des OWPs Borkum West II und die verfügbaren Parameter der Forschungsplattform FINO1 gegenüber gestellt.

Tab. 1.19: Auflistung der Rammaktivitäten im OWP BW II und der für diese Zeitpunkte verfügbaren ozeanographischen Parameter der Forschungsplattform FINO1 (www.FINO1.de).

Standort	Datum	Blasenschleier (BBC)	Ozeanographische und meteorologische Parameter von FINO 1 verfügbar
BW01	03.09.'11	Ja	Alle o.g. Daten verfügbar
BW03	09.09.'11	Ja	
BW46	16.09.'11	Nein	
BW47	23.09.'11	Ja	Keine Strömungsgeschwindigkeit
BW15	28.09.'11	Ja	Keine Strömungsgeschwindigkeit
BW14	30.09.'11	Ja	Keine Strömungsgeschwindigkeit
BW12	01.10.'11	Ja	Alle o.g. Daten verfügbar
BW34	14.10.'11	Ja	
BW26	16.10.'11	Ja	
BW35	28.10.'11	Nein	
BW49	29.10.'11	Ja	
BW41	31.10.'11	Nein	
BW42	02.11.'11	Ja	
BW43	04.11.'11	Nein	
BW54	06.11.'11	Ja	Nur sig. Wellenhöhe und
BW53	09.11.'11	Ja	Alle o.g. Daten verfügbar
BW50	12.11.'11	Ja	
BW61	13.11.'11	Ja	
BW64	16.11.'11	Ja	
BW44	18.11.'11	Ja	
BW65	19.11.'11	Ja	
BW66	21.11.'11	Ja	Kein Wasserstand
BW55	21.11.'11	Ja	Keine Daten
BW52	28.01.'12	Ja	Alle
BW62	29.01.'12	Ja	Kein Wasserstand, keine Wellenrichtung
BW63	03.02.'12	Nein	
BW51	04.02.'12	Ja	
BW48	06.02.'12	Ja	
BW24	09.02.'12	Ja	
BW33	04.03.'12	Ja	
BW32	06.03.'12	Nein	
BW31	14.03.'12	Nein	
BW40	16.03.'12	Nein	
BW36	17.03.'12	Nein	
BW23	21.03.'12	Ja	Nur Windrichtung und Windgeschwindigkeit verfügbar
BW13	23.03.'12	Ja	
BW25	24.03.'12	Ja	
BW02	25.03.'12	Ja	
BW37	27.03.'12	Ja	
BW04	28.03.'12	Ja	

Für eine Korrelation bestimmter ozeanographischer und meteorologischer Parameter, wie z.B. Wellen-, Wind- und Strömungsrichtung, mit akustischen Parametern (Einzelereignispegel und Spitzenpegel) war die relative Lage zwischen Messposition und Rammort entscheidend. Aufgrund von z.T. fehlenden Koordinaten der Messpositionen innerhalb des Baufeldes wurden für die nachfolgenden Korrelationen nur die (Hydroschall-) Messungen an den Messpositionen im südwestlich des Baufeldes BW II gelegenen FFH-Gebiet (bwf_4 und bwf_6; Entfernung ca. 20 km bis 30 km) verwendet. Es wurden für die Korrelation nicht die exakten Richtungsvektoren zwischen Rammort (Fundamentstandort) und den Messpositionen berechnet, so dass die verwendete Richtungsinformation einer Unsicherheit von wenigen Grad unterlag. Zudem stammten die ozeanographischen Parameter nicht direkt aus dem Baufeld bzw. von den Messpositionen. Aus

diesen Gründen konnten die nachfolgenden Korrelationen lediglich als erste Hinweise einer möglichen Einflussnahme von ozeanographischen oder meteorologischen Parametern auf die Schallminderung des Großen Blasenschleiers angesehen werden.

Für die Korrelationen wurden jeweils die Einzelereignispegel (SEL_{50}) über einen Zeitraum von 30 s für jede verfügbare Rammung verwendet. Die Entfernung zwischen Rammort und Messposition wurde mit Hilfe der modifizierten Näherungsformel für die Ausbreitungsdämpfung der itap GmbH (Kapitel D.6, S. 97 ff) auf eine Entfernung von 20 km normiert. In der folgenden Tab. 1.20 sind die Korrelationskoeffizienten (Pearson) zusammengefasst. In Tab. 1.20 ist exemplarisch für die ozeanographischen Parameter die Strömungsgeschwindigkeit gegen den Einzelereignispegel (SEL_{50} , vgl. Kapitel D.2.3, S. 73) für Rammungen mit und ohne Schallminderungsmaßnahme aufgetragen.

Tab. 1.20: Korrelationskoeffizienten (Pearson) zwischen dem Einzelereignispegel (SEL_{50}) bei unterschiedlichen Blasenschleierkonfigurationen sowie Referenzmessungen und ozeanographischen bzw. meteorologischen Daten.

Parameter	Schallschutzsystem			
	Referenz (Wandstärke 50mm)	Referenz (gesamt)	BBC 1	BBC 2
Salzgehalt (25m)	0,01	0,01	0,06	-0,22
Signifikante Wellenhöhe (Boje)	-0,13	-0,13	0,19	-0,44
Strömungsgeschwindigkeit (30 m)	0,08	0,08	0,04	0,05
Strömungsrichtung (30 m)	-0,2	-0,2	-0,11	0,22
Wasserstand	0,1	0,1	0,03	0,15
Wellenrichtung (Boje)	0,19	0,19	-0,22	-0,13
Windgeschwindigkeit (40 m)	NaN	NaN	-0,2	-0,01
Windrichtung (40 m)	NaN	NaN	-0,24	-0,32

NaN = aufgrund der geringen Datenlage nicht berechenbar.

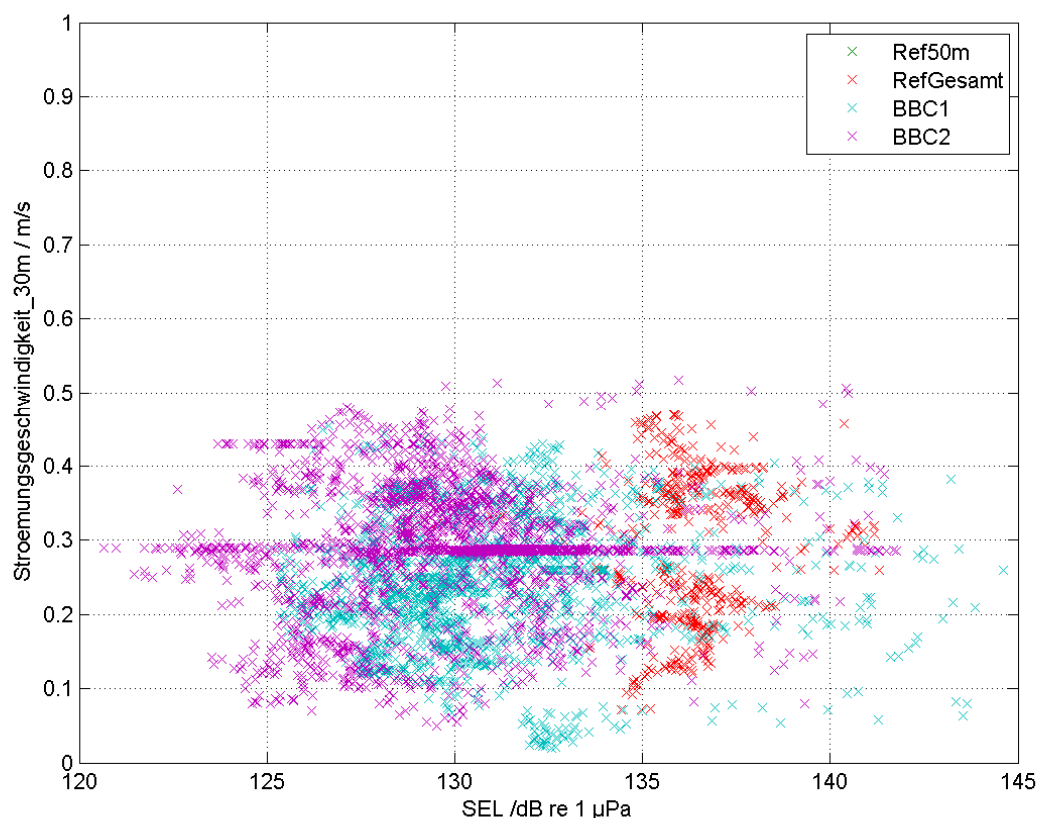


Abb. 1-56: *Strömungsgeschwindigkeit (gemessen an der Forschungsplattform FINO 1) aufgetragen gegen den Einzelereignispegel (SEL₅₀) bei Rammungen mit und ohne Schallminderungsmaßnahme im OWP BW II.*

Aus Tab. 1.20 und Abb. 1-56 lässt sich entnehmen, dass es keinen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen dem zeitlich aufgelösten Einzelereignispegel (SEL₅₀) und den vorhandenen ozeanographischen und meteorologischen Daten der Forschungsplattform FINO 1 gab. Dies ist jedoch zunächst nur als ein erster Hinweis zu werten, da für die Korrelation (i) nicht viele Daten zur Verfügung standen, (ii) in einem ersten Ansatz nur die akustischen Parameter aus weiter Entfernung (20 km) in einer Richtung zum Rammort verwendet wurden und (iii) die nicht-akustischen Daten nicht aus dem Baugebiet bzw. von der hydroakustischen Messposition stammten. Des Weiteren ist die Hauptströmungsrichtung im Bereich Borkum West II nicht die Nordost-Südwestrichtung, sondern eher die Ost-Westrichtung. Für eine wissenschaftlich fundierte Aussage bzgl. eines möglichen Einflusses ozeanographischer und meteorologischer Parameter auf die schallmindernde Wirkung eines Großen Blasenschleiers wären somit weitere Messungen notwendig. Hierfür sollten in unterschiedlichen Richtungen und Abständen (innerhalb eines Baugebietes, Entfernung < 3 km) zum Rammort (mit/gegen die Strömungsrichtung und orthogonal dazu) zeitgleiche hydroakustische Messungen erfolgen und diese mit den ozeanographischen und meteorologischen Daten aus dem jeweiligen Baugebiet korreliert werden. Erste praktische Umsetzungen hierzu werden derzeit bei den Effizienzkontrollen in bestehenden OWP-Bauvorhaben geprüft.

Es ist jedoch aus Messungen im Forschungsvorhaben HYDROSCHALL OFF BO1 (Bellmann & Gerke 2012) und der ersten Offshore-Messkampagne beim Forschungsprojekt BORA (Bellmann & Gerke 2013) mit einem „Small Bubble Curtain“ als Schallminderungssystem sowie aus aktuellen Effizienzkontrollen von verschiedenen eingesetzten Großen Blasenschleiersystemen (nicht veröffentlichte Daten der itap GmbH aus aktuellen Bauvorhaben) zu vermuten, dass bei einem „Blasenschleier“, der den zu rammenden Pfahl bzw. die zu rammende Fundamentstruktur vollständig

mit Luftbläschen umhüllt, keine statistisch signifikanten Einflüsse von ozeanographischen und meteorologischen Parametern auf die Schallminderung des eingesetzten Schallschutzsystems bzw. auf die Schallabstrahlung (Referenzmessung) vorliegen.

D.8.3 Vergleich der erzielten Schallminderung mit Literaturdaten

Aus der Literatur sind Messungen, sowie theoretische Abschätzungen und Studien über die Wirkungsweise von Blasenschleiern bzw. Luftblasen im Wasser bekannt (z. B. Würsig et al. 2000, Illingworth 2001, Reyff 2003, Vagle 2003, Petrie 2005, Rodkin et al. 2007). Jedoch ist festzuhalten, dass die meisten Messungen entweder unter Laborbedingungen oder ohne systematische Variationen einzelner Parameter erfolgten (z.B. Schultz von Glahn et al. 2006, ISD et al. 2007, Nehls et al. 2007, Nehls et al. 2009, Griebmann et al. 2010, Stoke et al. 2010).

Im Forschungsprojekt FINO3 (Griebmann et al. 2010) kam bei den Rammarbeiten der Forschungsplattform FINO3 ein Großer Blasenschleier mit einem Umfang von ca. 400 m zum Einsatz. Es wurden zwei unterschiedliche Luftmengen ($0,2 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$ und $0,4 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$) getestet. Es zeigten sich jedoch keine nennenswerten Unterschiede in der erzielten Schallminderung (weder im Einzelwert der Schallreduktion noch in der spektralen Durchgangsdämpfung). Diese Ergebnisse konnten von den Autoren nicht erklärt werden, da in demselben Forschungsvorhaben theoretische Modellrechnungen durchgeführt wurden, die darauf hinweisen, dass eine höhere Luftmenge (in dem getesteten Luftmengenbereich) zu höheren Schallreduktionen führen sollte. Diese Ergebnisse stehen in Widerspruch zu den Messungen dieses Forschungsvorhabens (vgl. Kapitel A.1, S. 25 ff), obwohl die Gesamtlänge des Düsen Schlauches und die verwendete Luftmenge vergleichbar sind.

Messungen von vergleichbaren Großen Blasenschleiersystemen mit ähnlichen Luftmengen pro Zeiteinheit und Meter Düsen Schlauch wie in diesem Forschungsvorhaben (nicht öffentliche Daten aus der Effizienzkontrolle vom OWP „Meerwind Süd/Ost“ der itap GmbH, Bellmann et al. 2013, Bellmann 2013) belegen ebenfalls, dass mit zunehmender Luftmenge bis zu einem Wert von $0,4 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$ die erzielte Schallminderung stetig steigt.

Die Düsen Schlauchkonfiguration (Innendurchmesser, Lochgröße und -abstand) könnte ursächlich dafür sein, dass im Forschungsvorhaben FINO3 eine erhöhte Luftmenge keine bessere Schallminderung bewirkte. In diversen Effizienzkontrollen von derzeitigen OWP-Baustellen (nicht öffentliche Messungen der itap GmbH) zeigte sich, dass der Querschnitt bzw. der Innendurchmesser des verwendeten Düsen Schlauches einen wesentlichen Einfluss auf den Luftstrom (Durchflussmenge) hat. Im Falle zu geringer Querschnitte der verwendeten Düsen Schlauche für die theoretisch verfügbare maximale Luftmenge konnte die Luftmenge nicht vollständig in die Düsen Schlauche abgeführt werden, was eine Drosselung der Kompressorleistung und damit Reduzierung der verfügbaren maximalen Luftmenge verursachte. Bei FINO3 war zudem kein Düsen Schlauch, sondern feste Rohrsegmente verwendet worden. Die Schallreduktion bei der Gründung dieser Forschungsplattform belief sich auf $7 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ bis $12 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ im Einzelereignispegel und bis zu 14 dB beim Spitzenpegel. Dies deutet ebenfalls darauf hin, dass bei dieser Rammung nicht die gesamte zur Verfügung stehende Luftmenge (von $0,4 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$) in das verwendete Düsenrohr geleitet werden konnte. Die Kompressorleistung wurde während der Rammung bei FINO3 zeitlich nicht dokumentiert.

Es ist jedoch festzuhalten, dass die erzielte Schallminderung im Forschungsvorhaben FINO3 vergleichbar zu Ergebnissen dieses Projektes bezüglich einer Luftmenge von $0,23 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$ ist.

In dem Forschungsvorhaben „ESRa“ (Wilke et al. 2012) wurden fünf unterschiedliche Schallminderungssysteme an einem Testpfahl in der Ostsee unter vergleichbaren Rahmenbedingungen getestet. Eines dieser Schallminderungssysteme war ein gestufter kleiner Blasenschleier, der im Umkreis von ca. 1 m um den Pfahl durch eine Metallvorrichtung gegen Verdriftung geschützt war. Es ergab sich für sämtliche getesteten Schallminderungssysteme eine breitbandige Reduktion im Einzelereignispegel und Spitzenpegel von deutlich unter 10 dB . Es zeigte sich jedoch, dass aufgrund der untypischen Pfahlanbindung im Sediment (Eindringtiefe 65 m, fest

gewachsener Pfahl) die Bodenkopplung einen Effekt von 2 dB bis 3 dB bei der Evaluation der Schallminderungssysteme besaß. Trotzdem blieben die Schallreduktionen bei unter 10 dB. Am Beispiel des eingesetzten Schallminderungssystems IHC NMS und Hydro Sound Damper von OffNoise-Solutions GmbH und der TU Braunschweig konnte die geringe schallmindernde Reduktion auf die technische Auslegung der Systemkomponenten (z. B. Wandstärken beim IHC System oder Ausmaße der Hydro Sound Damper Elemente) zurückgeführt werden (Bellmann 2011). Die verwendete Luftmenge beim eingesetzten Kleinen Blasenschleier war nicht exakt bekannt, belief sich aber auf deutlich unter $0,2 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$.

D.8.4 Vergleich von einfachem und doppeltem Blasenschleier

Erste Versuche mit einem linearen doppelten Blasenschleier haben gezeigt, dass sich die Schallreduktion mit dieser Art der Auslegung erhöhen lässt. Es liegen Hinweise vor, dass zwei getrennte Blasenschleier (großer Abstand zwischen den beiden Düsenschläuchen, hier ca. 80 m) eine etwas stärkere Reduktion des Schalls (zumindest hinsichtlich des Spitzenpegels von ca. 4 dB) bewirken als ein doppelter Blasenschleier, der sich aufgrund des geringen Abstandes der Düsenschläuche zueinander zur Wasseroberfläche hin zu einem breiten einfachen Blasenschleier vereint. Jedoch ist festzuhalten, dass in beiden Fällen lediglich Messungen an einem Standort und z.T. mit Variationen der verwendeten Luftmenge durchgeführt wurden. Zudem wurden jeweils nur halboffene (lineare) doppelte Blasenschleier ausgelegt und getestet. Somit ist auf der Basis dieser Messungen nicht abschließend zu beurteilen, in welcher Stärke ein doppelter Blasenschleier den Rammschall mindert. Messungen der Hydroschallimmissionen auf der gegenüberliegenden Fundamentseite weisen darauf hin, dass nur ein sehr geringer Anteil der akustischen Energie am halboffenen Blasenschleier reflektiert wird. Diese Schallkomponente ist mindestens 10 dB bis 15 dB leiser als der Direktschall und trägt somit nicht zu einer Erhöhung des gemessenen Einzelereignispegels oder Spitzenpegels bei.

Laut Theorie (z. B. Medwin 2005) ist davon auszugehen, dass sich mit zwei gleichartigen (getrennten) Blasenschleiern hintereinander der Laufweg des Rammschalls innerhalb des Luft-Wasser-Gemisches verdoppelt, und sich damit auch die Schallreduktion theoretisch verdoppeln sollte. In der ersten praktischen Anwendung im OWP BW II bestätigte sich eine Reduktion des Schalls bei Verwendung eines doppelten Blasenschleiers, der sich aufgrund seines geringen Abstandes zu einem breiten einfachen Blasenschleier vereinte, um 5 – 8 dB hinsichtlich des Einzelereignispegels. Zwei getrennte (doppelte) Blasenschleier konnten den Spitzenpegel nochmals um ca. 4 dB reduzieren. Messungen aus derzeitigen Bauvorhaben (nicht öffentliche Messdaten der itap GmbH aus dem OWP Meerwind Süd/Ost, Bellmann et al. 2013) bestätigen die Erhöhung der Schallreduktion eines doppelten Blasenschleiers im Gegensatz zu einem einfachen Blasenschleier ansatzweise, wobei die Schallminderung beim Spitzenpegel größer ausfällt als beim Einzelereignispegel. Dies weist darauf hin, dass mit einem doppelten (geschlossenen) Blasenschleier eine höhere Schallreduktion bei gleicher Luftmenge pro Minute pro Meter Düsenschlauch erreicht werden kann, jedoch nicht die theoretisch angenommenen doppelten Schallreduktionswerte für den Einzelereignispegel zu erwarten sind. Der Grund dafür ist derzeit nicht wissenschaftlich geklärt. Es ist anzunehmen, dass die physikalischen Phänomene bezüglich der Schallreduktion beim einfachen und beim doppelten Blasenschleier mit ähnlichen Luftmengen pro Zeiteinheit und Meter Düsenschlauch vergleichbar sind, nur dass bei einem doppelten getrennten Blasenschleier einerseits Mehrfachreflexionen (zwei Blasenschleier) auftreten und sich andererseits der Laufweg der Schallwellen innerhalb des Luft-Wasser-Gemisches verlängert. Die Laufwegvergrößerung tritt sowohl beim sich vereinenden doppelten Blasenschleier (DBBC 2b) als auch bei dem doppelten (getrennten) Blasenschleier (DBBC 2a) auf. Die Laufwegvergrößerung des Schalls scheint sich geringfügig auf den Einzelereignispegel auszuwirken. Durch die Mehrfachreflexion an zwei unabhängigen Blasenschleiern wird die Schallreduktion hinsichtlich des Einzelereignispegels ebenfalls leicht verbessert und im Fall des Spitzenpegels sogar deutlich erhöht. Für eine statistisch valide Evaluation der schallmindernden

Wirkung eines Doppelten Großen Blasenschleiers sind weitere Messungen mit vollständig geschlossenen Blasenschleiern und systematischen Variationen der Abstände zwischen den Düsenschläuchen notwendig.

D.8.5 Optimierungen und Verbesserungen am Großen Blasenschleier

Der eingesetzte Große Blasenschleier hat bei mehreren Fundamenten aufgrund von technischen Problemen und Ausfällen von Teilkomponenten (z.B. Kompressoren) keine oder nur eine geringfügige Schallminderung erzielt. Bei den Effizienzkontrollen in derzeitigen OWP Bauvorhaben mit einem Großen Blasenschleier (nicht öffentliche Daten der itap GmbH, Bellmann 2013) zeigte sich ebenfalls, dass eine verlässliche Schallreduktion derzeit noch nicht bei jeder Anwendung garantiert werden kann. Somit sind einerseits die Zuverlässigkeit des Einsatzes eines Blasenschleiers sowie die Verbesserung in der erzielten Schallminderung zu erhöhen.

Die Zuverlässigkeit der Einsatzfähigkeit des Großen Blasenschleiers lässt sich einerseits durch bessere Materialauswahl (z.B. druck- und reißfestere Düsenschläuche) und andererseits durch Training und der Wahl der Auslegungsmethode optimieren. So ist z.B. denkbar, dass der Düsen Schlauch unter Zugabe von Druckluft ausgelegt wird, um die Möglichkeit des Abknickens beim Verlegen zu minimieren.

Eine technische Optimierung bzw. Veränderung einzelner technischer Komponenten, z.B. Erhöhung der verwendeten Luftmenge oder Wahl des Düsen Schlauchmaterials geht zumeist mit einer Verbesserung der Schallminderung einher. Es lässt sich jedoch vermuten, dass jedem potenziellen Einflussparameter eine technische und ggfs. physikalische Grenze gesetzt ist. So ist z.B. die Erhöhung der Luftmenge i.d.R. an eine Erhöhung der Anzahl der Kompressoren an Deck des BBC-Betreiberschiffes gekoppelt. Hier existieren jedoch logistische Grenzen, die im Einzelfall zu prüfen sind. Andererseits könnten auch physikalische Grenzen auftreten, z.B. bezüglich der verwendeten Luftmenge. Wie bereits erwähnt, bewirkte beim „Small Bubble Curtain“ eine weitere Erhöhung der Luftmenge keine weitere Erhöhung der Schallreduktion, sondern im Gegenteil eine geringfügige Abnahme (Bellmann & Gerke 2012).

Bei einer möglichen Auslegung eines doppelten geschlossenen Blasenschleiers mit einem definierten Abstand von deutlich mehr als einer Wassertiefe würden sehr große Schlauchlängen für den inneren und äußeren Düsen Schlauch (Gesamtschlauchlänge mehr als 1.000 m) sowie eine sehr hohe Luftmenge pro Zeiteinheit vorgehalten werden müssen. Aus den Experimenten in diesem Forschungsvorhaben ist jedoch nicht vorhersagbar, welche möglichen technischen und oder physikalischen Grenzen hinsichtlich der verwendeten Gesamtschlauchlänge, des verwendeten Düsen Schlauchquerschnitts oder der Luftmenge existieren (vgl. Kapitel D.3.3). Dies gilt sicherlich auch für optionale indirekte Einflussparameter wie z. B. Wassertiefe und Abstand des Blasenschleiers zum Rammort. Für eine zielgerichtete Verbesserung der Schallminderung durch den Großen Blasenschleier wäre eine Kenntnis dieser technischen und physikalischen Grenzen bzw. Randbedingungen sicherlich hilfreich.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist eine objektive Beschreibungsmöglichkeit der wesentlichen technischen und physikalischen Einflussgrößen auf die schallmindernde Wirkung, so dass das System Großer Blasenschleier objektiv charakterisiert werden kann. Anhand einer objektiven Parametrisierung inkl. der technischen und physikalischen Grenzen könnte man das Schallminderungssystem Großer Blasenschleiers in unterschiedlichen Systemkonfigurationen (z.B. verwendete Luftmenge, Lochgröße, Lochabstand) unabhängig von Einsatzort und Hersteller beschreiben und vergleichen. Mit einer solchen Beschreibungsmöglichkeit hätte man vermutlich auch die Möglichkeit, die Auslegung technischer Teilkomponenten (z.B. Schlauchlänge und verwendete Luftmenge) für zukünftige Anwendungen in anderen Offshore-Windparks im Voraus zu konfigurieren bzw. anhand der möglichen Grenzen (z.B. hinsichtlich der vorhandenen Wassertiefe) von dem Einsatz dieses Schallminderungssystems abzuraten.

D.8.6 Ausbreitung von Schall im Wasser

In Kapitel D.6.2 wurde demonstriert, dass die geometrische Ausbreitungsdämpfung und die halbempirische Näherung der Ausbreitungsdämpfung nach Thiele & Schellstede (1980) die Schallimmissionen bei Rammtätigkeiten in Entfernungen von mehr als 10 Kilometern zum Rammort um 10 dB und mehr überschätzen (Vergleich der Abb. 1-44 und Abb. 1-45). Bei der Anwendung der geometrischen Ausbreitungsdämpfung war dies nicht verwunderlich, da die frequenzabhängige Absorption des Wassers dort nicht berücksichtigt wird.

Die Gründe für die großen Abweichungen zwischen Messdaten und der Abschätzung nach Thiele & Schellstede könnten darin liegen, dass diese halbempirische Formel auf Messungen von Sprengungen basiert und nur relativ wenige Messungen in der Deutschen Bucht durchgeführt wurden. Es ist zu vermuten, dass die Ausbreitung eines Rammimpulses sich deutlich von der Ausbreitung einer Sprengung hinsichtlich Amplitude und Frequenzbereich aufgrund der deutlich unterschiedlichen Anregungsmechanismen (Detonation und mechanischer Schlag auf Rohr) unterscheidet.

Die modifizierte empirische Näherungsformel für die Ausbreitungsdämpfung, basierend auf Messungen von Rammschallimpulsen der itap GmbH der letzten Jahre in der Nordsee, weist deutlich weniger Abweichungen zwischen den prognostizierten und gemessenen Werten in großer Entfernung auf. Anhand von Messungen bei Rammungen des Messmastes für den OWP Amrumbank West wurde ebenfalls eine empirische Näherungsformel entwickelt (Elmer et al. 2007), die anhand von Messungen bei den OWPs Horns Rev II, alpha ventus und BARD Offshore 1 verifiziert wurde (Betke 2008, Griebmann et al. 2010, Betke & Matuschek 2009). Beide empirische Näherungsformeln beinhalten eine deutlich höhere Absorption über längere Entfernungen. Jedoch ergeben sich auch bei diesen empirischen Näherungsformeln Unterschiede zu Messdaten im Bereich von mehreren dB. Zudem zeigen sich Unterschiede zwischen der Prognose mit und ohne Schallschutzmaßnahme, sodass die frequenzabhängige Ausbreitungsdämpfung dieser empirischen Näherung noch zu optimieren ist.

Es ist in weiteren Forschungsprojekten zu untersuchen, wie man eine Schallausbreitung und die damit verbundene Ausbreitungsdämpfung für Rammschall realistisch abschätzen kann und welche weiteren Einflussfaktoren (z.B. Wassertiefe) eine Rolle bei der Schallausbreitung spielen könnten. Hierzu gibt es grundsätzlich zwei Ansätze: die Generierung eines physikalischen Modells oder die Erstellung eines empirischen Modells. Bei einem physikalischen Modell müssten sämtliche Prozesse - Schallentstehung (Schallabstrahlung), Schalländerung durch z.B. ein Schallminderungssystem, Absorption des Wassers, Bodenkopplungen und die Topographie der Umgebung - genauestens abgebildet bzw. modelliert werden. Ein ähnliches Vorgehen wird derzeit im Forschungsvorhaben BORA entwickelt und anhand von realen Messdaten evaluiert. Bei der Erstellung eines (halb-) empirischen Modells würde man anhand von statistischen Methoden unter Zuhilfenahme von Randbedingungen, wie z.B. Topographie, Rammenergie, Pfahldesign etc. die Schallausbreitung anhand von Messungen parametrisieren bzw. modellieren. In jedem Fall sollte für die genaue Abschätzung der Ausbreitungsdämpfung ein spektral aufgelöstes Modell verwendet werden. Für überschlägige Abschätzungen reicht ggfs. eine breitbandige Vereinfachung eines Modells.

Im Fall des Vorliegens einer genauen Berechnungsvorschrift für die Ausbreitungsdämpfung von Rammschall ließe sich die Wirkung von Schallereignissen auf marine Säugetiere in einem sehr großen Gebiet (Fläche) ohne größeren technischen Messaufwand untersuchen, da man für die Hydroschallmessungen die Anzahl der Messpunkte deutlich verringern könnte. Dies gälte aber nur unter der Voraussetzung, dass keine weiteren Schallquellen in unterschiedlichen Raumrichtungen zum Rammort vorhanden wären (z.B. Schifffahrtswege oder weitere OWP-Baustellen mit Impulsrammung) und andererseits die Prognoseunsicherheit reduziert werden könnte. Zudem ließen sich anhand einer Prognose die Radien mit unterschiedlichen Amplituden von Schallbelastungen realitätsnah generieren (z. B. in einer Entfernung von x Kilometern zum Rammort beträgt der Einzelereignispegel y dB). Ein erster Ansatz wurde in diesem Forschungsvorhaben mit der Prognose des Einzelereignispegels und des Spitzenpegels für weitere 22 Positionen im Umkreis bis 37 km unter

Verwendung der empirischen Näherungsformel der itap GmbH (vgl. Kapitel D.7 (S. 114 ff)) unternommen, wobei die Prognoseunsicherheit im Bereich von ca. 5 dB bei großen Entfernungen (> 20 km) lag (vgl. Kapitel D.6, Abb. 1-48 ff).

D.8.7 Beschreibungsmöglichkeiten der Schallimmissionen hinsichtlich Beurteilung von Schädigungen und Störungen von Schweinswalen durch Schall

Für eine Beurteilung der Wirkung von Schallimmissionen auf marine Säugetiere ist grundsätzlich zwischen einer Schädigung und einer Störung zu unterscheiden (z. B. Southall et al. 2007, Nehls et al. 2009).

Schädigung

In einer Übersicht über die Wirkung von Unterwasserschall (Schallimmissionen) auf Meeressäugetiere geben Southall et al. (2007) Schädigungsschwellen für verschiedene Artengruppen¹² von Meeressäugetieren an. In Anlehnung an die spektrale C-Gewichtungskurve beim Menschen (für Beurteilungen von Hörschäden) wurde eine sogenannte spektrale M-Gewichtungsfunktion entwickelt, die alle Frequenzbereiche, in denen das (frequenz aufgelöste) Hörvermögen schlechter als 80 dB zur höchsten Hörsensitivität ist¹³, in der Amplitude reduziert. Die vorgeschlagene sog. M-Gewichtung berücksichtigt somit teilweise das spezifische Hörvermögen, wobei eine vorsichtige Korrektur vorgenommen wurde, um zu einer besseren Einschätzung im Hinblick auf Hörschäden zu kommen¹⁴. Dies bedeutet, dass Frequenzen unterhalb von 200 Hz und oberhalb von mehreren 10 kHz stark im Pegel reduziert werden. Der Frequenzbereich zwischen 200 Hz und mehreren kHz wird in der Amplitude (Pegel) nicht verändert. Dies bedeutet, dass im Bereich von 200 Hz bis mehreren kHz unabhängig von der genauen Frequenz eine schädigende Wirkung von Schall auf bestimmte Meeressäuger nicht auszuschließen ist. Bei Frequenzen, die nicht oder nur eingeschränkt hörbar sind, nimmt die schädigende Wirkung von Schall nach Southall et al. deutlich ab.

Die M-Gewichtung (nach Southall et al. 2007) hat vor allem die Funktion, die Wirkung von Schallereignissen mit unterschiedlichen Frequenzcharakteristiken (über einen sehr breiten Frequenzbereich) hinsichtlich ihrer schädigenden Wirkung miteinander vergleichen zu können. Diese Vorgehensweise kann im Hinblick auf Schalleinträge insbesondere dann sinnvoll sein, wenn das Frequenzspektrum der Schallimmission sich spektral sehr stark in einem breiten Frequenzbereich unterscheidet.

Bei Rammschall erfolgt i.d.R. der höchste Energieeintrag ins Wasser zwischen 100 Hz und 400 Hz, so dass es Unterschiede von ca. 3 dB bis maximal 5 dB zwischen den Berechnungen mit und ohne M-Gewichtung bei Verwendung des Spitzenpegels und des Einzelereignispegels (je nach spektraler Zusammensetzung des Rammschalls) geben sollte (Nehls et al. 2009). Rammschall bzw. impulshaltige Schallereignisse sowie das (individuelle) Hörvermögen von Schweinswalen standen jedoch nicht speziell im Fokus der Entwicklung der M-Gewichtung. Die untere Grenzfrequenz von 200 Hz müsste

¹² Unterscheidung in (i) tieffrequente (low-frequency), (ii) mittelfrequente (mid-frequency) und (iii) hochfrequente (high frequency) Walarten (cetaceans). Der Schweinswal gehört zur Gruppe der hochfrequenten Walarten.

¹³ Höchste Hörempfindlichkeit beim Schweinswal liegt im Bereich von 100 kHz.

¹⁴ Southall et al 2007 schreiben dazu: "The M-weighting functions were defined based on known or estimated auditory sensitivity at different frequencies rather than vocal characteristics per se. Owing to the paucity of relevant data, these auditory functions are intentionally precautionary (wide) and likely overestimate the functional bandwidth for most or all species. Their primary application is in predicting auditory damage rather than levels of detection or behavioral response. Consequently, it is more appropriate to use "flatter" functions than would be obtained by employing a simple inverse-audiogram function."

ggfs. für den Schweinswal zu tieferen Frequenzen hin angepasst werden (basierend auf Hörschwellenmessungen z. B. von Kastelein et al. 2007, Lucke et al. 2004, 2009).

Es ist zusammenfassend festzuhalten, dass für die Beurteilung der schädigenden Wirkung von Unterwasser (Schallimmissionen) auf marine Säugetiere in erster Linie die Stärke des Schallereignisses und nicht deren detaillierte spektrale Zusammensetzung maßgeblich ist. Es ist zu vermuten, dass die Berechnung des Einzelereignispegels und des Spitzenpegels mit und ohne spektrale M-Gewichtung keine wesentlichen Änderungen in der Beurteilung der schädigenden Wirkung durch Rammschall bewirken wird, solange das Schallsignal nicht sehr stark verändert wird.

Störung

Für die Beurteilung der Störwirkung auf marine Säugetiere durch Unterwasserschall ist die artenspezifische Wahrnehmung (Hörbarkeit) von Schallereignissen zu berücksichtigen. In der Regel kann man vermuten, dass ein Schallereignis, das nicht hörbar bzw. wahrnehmbar ist, auch zu keiner nennenswerten Störung führen wird. Durch die Berechnung eines spektral ungewichteten Einzelereignispegels, wie derzeit nach Maßgabe des BSH in Deutschland gefordert, wird keine schweinswalhörgerechte Vorverarbeitung der Schallimmissionen vorgenommen. Es ist fraglich, ob mit diesem akustischen Parameter der Störwirkung durch Rammschall auf Schweinswale adäquat Rechnung getragen werden kann, da die Wirksamkeit aller derzeit verfügbaren Schallminderungsmaßnahmen sehr stark frequenzabhängig ist.

In der Regel steigt die Schallminderung mit zunehmender Frequenz an. Mit dem Einsatz eines Schallminderungssystems werden die Rammschallereignisse somit Tiefpass-gefiltert, d. h. die Schallimmissionen enthalten i. d. R. nur noch Frequenzanteile bis ca. 1 kHz, die sich auch in mehreren Kilometern Entfernungen (>10 km) noch signifikant vom permanent vorhandenen Hintergrundschall unterscheiden. Durch die Absorption des Wassers werden bei einer Ausbreitung über mehrere Kilometer Entfernung die Schallanteile bei hohen Frequenzen (mehrere kHz) zusätzlich stärker in der Amplitude reduziert als tieffrequente Schallanteile.

Für die Berechnung eines hörgerechten objektiven Schallparameters wird z.B. beim Menschen das Spektrum eines Schallereignisses mit der invertierten Hörschwelle bzw. dem Hörvermögen gewichtet. Das bedeutet, dass in Frequenzbereichen, in denen der Mensch sehr gut hören kann (1 kHz bis 4 kHz, im Bereich der Sprachwahrnehmung) die akustische Energie mit einem Faktor 1 gewichtet wird; in Frequenzbereichen, in denen das Hörvermögen schlechter ist (z.B. Frequenzen <100 Hz) wird die akustische Energie mit einem Faktor deutlich kleiner 1 gewichtet (z. B. Zwicker & Fastl 1999). Bei der Bildung eines Einzahlwertes spielen die Frequenzbereiche mit der höchsten Sensitivität aufgrund der logarithmischen dB-Arithmetik die größte Rolle. Beim Menschen wird z.B. das Hörvermögen nahe der Hörschwelle als Bezugsgröße verwendet, um den A-gewichteten Schalldruckpegel (dB(A)) für moderate Schallereignisse (40 phon) zu ermitteln. In diversen Studien konnte gezeigt werden, dass die Wahrnehmung beim Menschen mit dem A-gewichteten Schalldruckpegel deutlich besser übereinstimmt als mit einem ungewichteten (linearen) Schalldruckpegel (dB) (z.B. Zwicker & Fastl 1999).

Ein ähnliches Vorgehen bei der Generierung von objektiven Beschreibungsparametern von Schallereignissen wird bei Vögeln durchgeführt. In der Literatur konnte vielfach gezeigt werden, dass die Verwendung der artspezifischen Hörvermögen bei der Berechnung von objektiven akustischen Parametern größere Korrelationen zu Reaktionen zeigte als eine reine frequenzunabhängige (lineare) Energiebetrachtung (z.B. Reck et al. 2001, Klump et al. 2001, Kifl 2005).

Das Hörvermögen der Schweinswale wird im hochfrequenten Bereich (>1 kHz) zunehmend besser (z.B. Kastelein et al. 2002; Lucke et al. 2007). Schallminderungsmaßnahmen und Ausbreitungseffekte wirken maßgeblich besser bei hohen und weniger bei tiefen Frequenzen (vgl. Kapitel D.3.3, S. 85), sodass Rammschallimmissionen von Schweinswalen subjektiv als leiser empfunden werden als Schallereignisse mit gleichem Ereignispegel (SEL) bei höher frequentem Schallanteil.

Somit reduziert sich die Schallimmission einerseits durch die Anwendung von Schallminderungsmaßnahmen und die bestehenden Ausbreitungseffekte (Absorption des Wassers) mit zunehmendem Abstand zum Rammort und andererseits durch das artspezifische Hörvermögen, da tiefe Frequenzen für Schweinswale deutlich schlechter hörbar sind als hochfrequente Geräuschanteile.

In Abb. 1-57 ist die vereinfachte invertierte (gemessene) Hörschwelle von Schweinswalen nach Kastelein et al (2010) als spektrale Gewichtungsfunktion, im Folgenden S-Gewichtung genannt, für Schallereignisse exemplarisch dargestellt. Bei Frequenzen von über 100 kHz ist der Schweinswal besonders sensitiv, da in diesem Frequenzbereich die Ortung von Hindernissen und Futter über akustische Klicklaute erfolgt. Diese Frequenzbereiche werden nicht oder nur sehr eingeschränkt in ihrer Amplitude (Pegel) für die Berechnung eines akustischen Parameters (z.B. Einzahlwertes) reduziert. Frequenzbereiche, in denen Schweinswale nicht besonders sensitiv sind, wie z.B. 100 Hz bis 400 Hz, werden entsprechend der gemessenen Hörschwellenstruktur in ihrer Amplitude stark abgesenkt.

Mit der Berechnung des S-gewichteten Einzelereignispegels wird im Rahmen dieses Forschungsvorhabens der Versuch unternommen, einen objektiven akustischen Parameter hinsichtlich Störwirkung durch Rammschall zu berechnen, der sinnesphysiologisch (hörgerecht) motiviert ist.

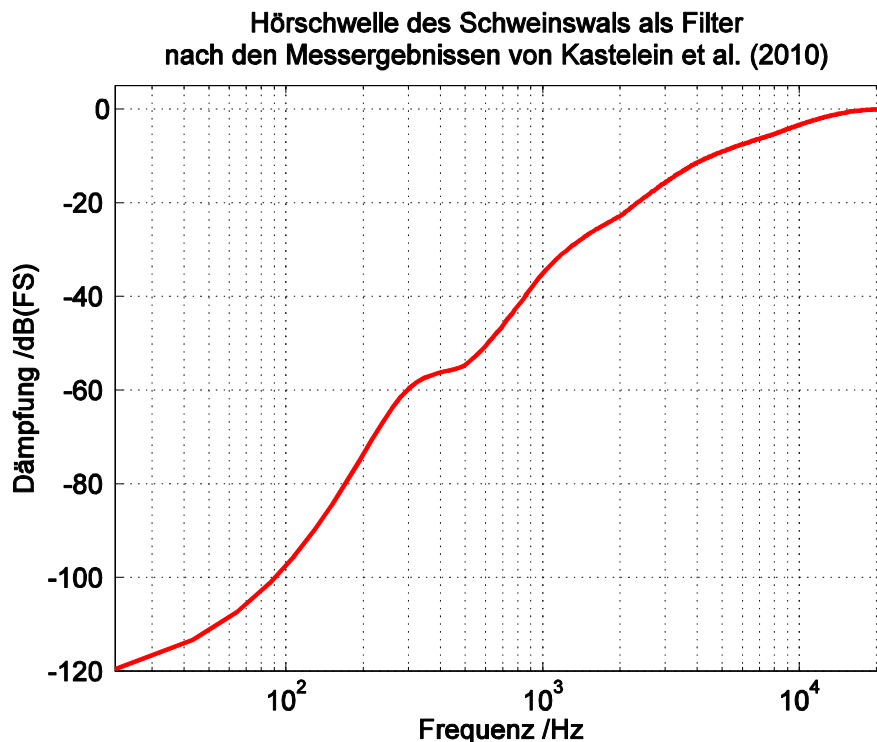


Abb. 1-57: *Invertierte Hörschwelle von Schweinswalen nach Kastelein et al. (2010) als spektrale Gewichtungsfunktion, S-Gewichtung genannt, für den Versuch einer Berechnung eines hörgerichteten akustischen Parameters hinsichtlich Störwirkung.*

Zur Veranschaulichung der spektralen Wirkung der o.g. S-Gewichtung sind in der Abb. 1-58 die Terzspektren des Einzelereignispegels (SEL_{50}) einer Rammung ohne Schallminderungsmaßnahme im OWP Borkum West II (Rammungen am Fundamentstandort BW32), gemessen in zwei Entfernungen (1,5 km und 20 km) mit und ohne spektraler S-Gewichtung dargestellt.

Die Frequenzbereiche mit hohen akustischen Energieeinträgen ins Wasser (100 Hz bis 400 Hz) wurden durch Rammschall bei der S-Gewichtung sehr stark in der Amplitude reduziert, hingegen wurden Frequenzbereiche um mehrere kHz wenig im Pegel reduziert. In diesem Frequenzbereich befindet sich aber wenig durch eine Rammung verursachte akustische Energie im Wasser. In einer

Entfernung von 20 km macht sich bei hohen Frequenzen (> 4 kHz) zudem die Absorption des Wassers deutlich bemerkbar.

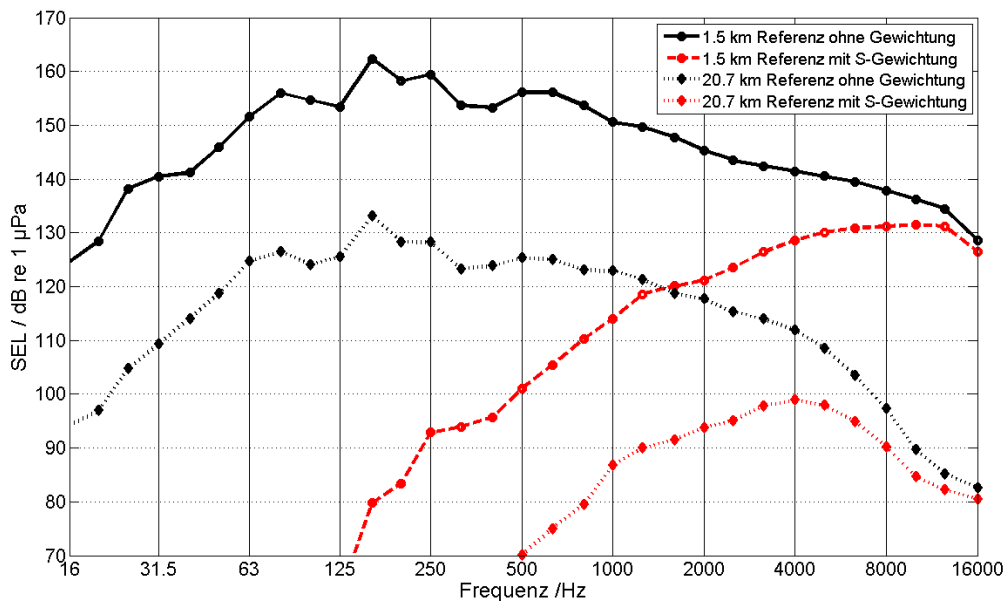


Abb. 1-58: Terzspektren des Einzelereignispegels (SEL) gemessen in zwei unterschiedlichen Entfernungen zur Rammbaustelle im OWP Borkum West II. Im Vergleich sind die Terzspektren mit einer schweinswalhörergerechten spektralen Gewichtung (S-Gewichtung, rot) und ohne spektrale Gewichtung (schwarz) dargestellt.

Zur qualitativen Veranschaulichung der in obiger Abbildung dargestellten schweinswalhörergerechten spektralen Gewichtung (S-Gewichtung) sind in der nachfolgenden Tabelle die Einzelereignispegel (SEL) sowie der energieäquivalente Dauerschallpegel (L_{eq}) mit und ohne S-Gewichtung für jeweils eine Rammung mit (BW04) und ohne (BW35) Blasenschleier zusammengefasst. Im Anhang (S. 215) sind die akustischen Kenngrößen für sämtliche Rammungen zusammengefasst.

Tab. 1.21: Einzelereignispegel (SEL_{50}) und energieäquivalenter Dauerschallpegel (L_{eq}) mit und ohne spektraler S-Gewichtung für jeweils eine Rammung mit und ohne Blasenschleier (BBC; Fundamentstandorte BW35 und BW04), gemessen in einer Entfernung von 750 m.

Schallschutz	Entfernung [m]	SEL_{50} [dB]	S- SEL_{50} [dB]	L_{eq} [dB]	$L_{S,eq}$ [dB]
Ohne BBC	750	169	140	169	139
Mit BBC	750	159	121	157	119

Die ausgewählten Rammungen verdeutlichen, dass es deutliche Unterschiede zwischen dem Einzelereignispegel (SEL) und dem energieäquivalente Dauerschallpegel (L_{eq}) geben kann. Der Grund liegt in der Anzahl der Rammschläge pro Zeiteinheit (hier 30 s). I.d.R. erfolgen in 30 s 20 bis 30 Rammschläge mit annähernd gleicher Rammenergie. In diesem Fall existiert kein Unterschied zwischen dem L_{eq} und dem SEL. Wenn jedoch die Rammschläge deutlich weniger als 10 pro 30 s betragen (z.B. beim Softstart) oder wenn die Rammschläge innerhalb von 30 s mit deutlich unterschiedlichen Rammenergien (z.B. bei schrittweiser Erhöhung der Rammenergie zu Beginn einer Rammung) erfolgen, so kann der Unterschied zwischen diesen beiden akustischen Parametern mehrere dB betragen. Im Falle, dass z.B. in einem Seegebiet bei mehreren Offshore-Baustellen zeitgleich Rammarbeiten durchgeführt werden, würde der berechnete SEL deutlich niedriger als der energieäquivalente Dauerschallpegel (L_{eq}) liegen (vgl. Kapitel D.6.3, S. 109). Dies gilt ebenfalls, wenn

anderweitiger Störschall (z.B. durch Schiffsverkehr) Amplituden aufweist, die nicht 15 dB geringer sind als der eigentliche Störschall (z. B. in FFH-Gebieten in 20 km Entfernung).

Der spektral gewichtete S-SEL ist aufgrund der hohen Dämpfung bei tiefen Frequenzen deutlich geringer als der ungewichtete Einzelereignispegel (SEL) oder Dauerschallpegel (L_{eq}). Weiterhin können die Unterschiede zwischen Rammorten mit und ohne Schallminderungsmaßnahmen beim S-SEL aufgrund der unterschiedlichen spektralen Zusammensetzung größer ausfallen als beim ungewichteten Einzelereignispegel.

In Abb. 1-58 ist die Abweichung des Einzelereignispegels (SEL) mit und ohne S-Gewichtung aufgetragen. Die Abweichung ist umso größer, je niedriger der ungewichtete Einzelereignispegel ist, also je stärker der Rammschall durch den Blasenschleier reduziert wird. Es ließe sich anhand des Vergleiches zwischen dem SEL und S-SEL vermuten, dass die effektive hörbezogene schallmindernde Wirkung eines Großen Blasenschleiers größer für Schweinswale ausfällt als die (einzahlige) Einfügungsdämpfung vermuten lässt. Dies wurde im Kapitel E über die Schweinswaluntersuchungen anhand der Hypothesen 2c, 2d und 2e (vgl. Kapitel E.3.3, S. 149 ff) überprüft, konnte dort jedoch nicht statistisch nachgewiesen werden (Kapitel E.4, S. 162 ff).

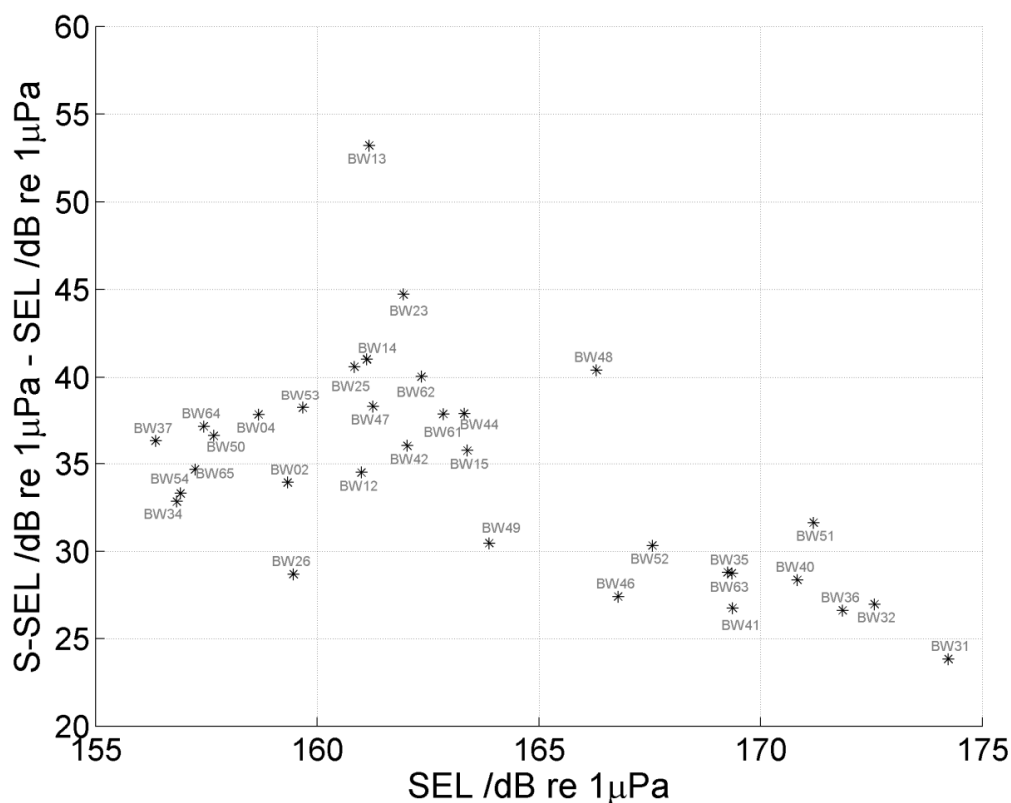


Abb. 1-59: Differenz zwischen dem frequenzgewichteten und ungewichteten Einzelereignispegels (SEL gegen S-SEL) als Funktion des Einzelereignispegels SEL.

D.8.8 Fazit

Bislang werden die spektrale Zusammensetzung des Schallereignisses und das artspezifische Hörvermögen noch nicht bei der Beurteilung einer Störung berücksichtigt. Für einen Wert, der zunächst vor physischer Schädigung schützen soll, ist das angemessen, da man davon ausgeht, dass hier die gesamte einwirkende Schallenergie, egal ob hörbar oder nicht, maßgeblich ist. Vorteilhaft ist, dass man mit einem "Einzahl-Wert" auskommt.

In Bereichen, in denen die Schallereignisse keine schädigende Wirkung mehr auf marine Säugetiere ausüben, müssen diese allerdings hörbar sein, um Störungen zu verursachen.

Sobald mehrere räumlich verteilte Quellen (z.B. Schiffsverkehrswege, mehrere OWP-Baustellen) Geräusche produzieren, wird man mit einem frequenzunabhängigen, energetisch gemittelten Summenpegel, wie z.B. dem Einzelereignispegel, die „kumulativen“ Effekte auf die Reaktionen von marinen Säugetieren nicht mehr adäquat bewerten können. Insbesondere wenn sich die spektralen Zusammensetzungen der einzelnen Schallereignisse stark voneinander unterscheiden (z.B. Rammschall aus unterschiedlichen Entfernungen; Rammschall und Schiffgeräusche) werden eine gehörgerechte Verarbeitung (spektrale Gewichtung) und eine energetische Summierung der Geräusche unerlässlich. Zusätzlich ist zu prüfen, ob die Berechnung eines Einzelereignispegels in mehreren Kilometern Entfernung zum Rammort eine objektive Beschreibungsmöglichkeit darstellt, da der Rammschall sich in 20 km Entfernung oftmals nicht mehr stark von den Hintergrundgeräuschen abhebt, bzw. durch andere Geräusche wie z.B. Schiffgeräusche wenigstens in einigen Frequenzbereichen überlagert werden kann. Insbesondere wenn unterschiedliche räumlich und zeitlich versetzte Schallereignisse auf ein Gebiet einwirken, ist die Berechnung eines Einzelereignispegels nicht zielführend (vgl. Kapitel D.6.3).

Für lang anhaltende Schallereignisse (z.B. Schiffsverkehr oder Vibrationsrammungen) ist eine Berechnung eines spektral gewichteten oder ungewichteten Einzelereignispegels grundsätzlich nicht zielführend. Eine Möglichkeit könnte die Berechnung des energieäquivalenten Dauerschallpegels L_{eq} (gemittelt über einen definierten Zeitabschnitt, z.B. 30 s) bei einer zeitgleichen Beschallung von räumlich getrennten Schallquellen sein. Zwar kann man theoretisch Frequenzspektren von gemessenen Geräuschen angeben, es ist aber schwierig, mit einem solchen Satz von Zahlen die Über- oder Unterschreitung eines möglichen Vorsorgewertes oder Schallschutzgrenzwertes zu spezifizieren. Praktischer wäre auch hier eine Einzahl-Angabe. Eine spektrale Gewichtung (z.B. sinnesphysiologisch motivierte spektrale Gewichtung auf der Basis des Hörvermögens: S-Gewichtung) ermöglicht nicht nur eine gehörgerechte Verarbeitung, sondern auch die Charakterisierung eines Schallereignisses durch einen Einzahlwert.

D.9 Zusammenfassung

Die Firma TRIANEL WINDKRAFTWERK BORKUM II errichtet einen Offshore Windpark mit derzeit 40 Windenergieanlagen (WEA) (weitere 40 geplant) sowie einer Umspannstation im Gebiet Borkum West II (BW II) ca. 45 km nördlich der Insel Borkum. Während der Gründung der Fundamente für die WEA (Tripod-Konstruktionen) wurden 40-mal drei Pfähle mittels Impulsrammung im Sediment verankert. Nach Auflage des BSH ist bei den schallintensiven Rammarbeiten ein Schallminderungssystem nach dem aktuell verfügbaren Kenntnisstand einzusetzen. Bis zum Bau dieses Offshore-Windparks wurde bisher noch nie ein Schallminderungssystem in einen realen Bauablauf eines kompletten Windparks integriert. Zudem gab es bei Baubeginn keinen anerkannten Stand der Technik in Bezug auf Schallminderungssysteme. Aus diesem Grund wurde in diesem Forschungsvorhaben ein Großer Blasenschleier (BBC) der Fa. HYDROTECHNIK Lübeck GmbH entwickelt und getestet (vgl. Abschnitt B).

Im Fokus dieses Forschungsvorhabens standen sowohl die Einbindung des Schallminderungssystems in den Errichterprozess (keine Zeitverzögerung durch das Schallminderungssystem) unter Offshore-Bedingungen als auch die erzielte Schallminderung dieses Schallschutzsystems. Die schallmindernde Wirkung durch den Blasenschleier und mögliche Einflussfaktoren bezüglich der Schallminderung standen dabei im Fokus der hydroakustischen Messungen.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde der Große Blasenschleier an 23 von 40 Fundamenten erprobt und wissenschaftlich evaluiert. Im Zuge der Baugenehmigung wurden zudem Hydroschallmessungen innerhalb und außerhalb des Baugebietes an 38 Fundamenten durchgeführt (Effizienzkontrolle nach StUK3). In Abstimmung mit allen Beteiligten wurden sämtliche verfügbaren Hydroschallmessungen aus diesem Forschungsvorhaben und der Effizienzkontrolle für die Auswertung hinsichtlich der Evaluation des Schallschutzsystems verwendet, so dass die verfügbare

Datenbasis erheblich vergrößert wurde und zudem die Schallminderung in sehr großen Entfernungen (> 20 km) untersucht werden konnte.

Es ergaben sich folgende Resultate aus dem Forschungsvorhaben:

Einsatz des Großen Blasenschleiers

- Es lagen für 38 von 40 Fundamenten Hydroschallmessungen in unterschiedlichen Abständen von wenigen hundert Metern bis mehr als 20 km Entfernung zum Rammort vor. Dabei wurde bei neun Fundamentstandorten kein Schallminderungssystem eingesetzt und bei 29 Fundamenten ein Großer Blasenschleier.
- Viermal wurden geplante Referenzmessungen (d.h. kein Großer Blasenschleier im Einsatz) durchgeführt. Fünfmal traten technische Ausfälle beim Großen Blasenschleier auf bzw. das System konnte aus zeitlichen Gründen nicht eingesetzt werden (vgl. Abschnitt B).
- Der eingesetzte Große Blasenschleier wurde unter drei verschiedenen Auslegungskonfigurationen (halboffener, ringförmiger und halboffener doppelter BBC), zwei unterschiedlichen Düsenschlauchkonfigurationen (Variation von Lochabstand und Lochgröße) sowie mit vier unterschiedlichen (Druck-) Luftmengen untersucht.
- An zwei Standorten wurde der Große Blasenschleier als halboffenes (lineares) Schallschutzsystem, an zwei Standorten in linearer doppelter Auslegung (nur mit der Düsenschlauchkonfiguration BBC 2) und an 27 Standorten in ringförmiger (geschlossener) Auslegung (achtmal in der Düsenschlauchkonfiguration BBC 1 und 19 Mal in der Düsenschlauchkonfiguration BBC 2) eingesetzt.
- Bei insgesamt acht der 29 Anwendungen des Großen Blasenschleiers wurden systematische Variationen der verwendeten Luftmenge (von keiner Luftzufuhr (= Referenzmessung) bis $0,32 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$) durchgeführt.

Erzielte Schallminderung und Einflussparameter des Großen Blasenschleiers

- Der Große Blasenschleier besitzt eine schallmindernde Wirkung bei der Rammung von Fundamentstrukturen im Impulsrammverfahren. Es konnte nachgewiesen werden, dass sowohl die Düsenschlauchkonfiguration (Lochgröße und Lochabstand) als auch die verwendete Luftmenge einen entscheidenden Einfluss auf die schallmindernde Wirkung des Großen Blasenschleiers hatte.
- Unter den praktikableren einfachen Blasenschleiern erzielte die Systemkonfiguration BBC 2 mit kleinen Lochgrößen und kleinen Lochabständen (Lochdurchmesser ca. 1,5 mm, Lochabstand ca. 30 cm) sowie der größten verwendeten Luftmenge pro Zeiteinheit und Meter Düsenschlauch ($0,32 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$) die größte Schallreduktion. Die erzielte Schallminderung beim Einzelereignispegel SEL₅₀ betrug hier $9 \text{ dB}_{\text{SEL}} - 13 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ sowie $10 \text{ dB}_{\text{LPeak}} - 17 \text{ dB}_{\text{LPeak}}$ beim Spitzenpegel (Nr. 2b in Tab. 1.16).
- Die Düsenschlauchkonfiguration BBC 2 erzielte breitbandig (50 Hz bis 16 kHz) eine etwas bessere Schallreduktion als die Düsenschlauchkonfiguration BBC 1 (Lochdurchmesser ca. 3,5 mm, Lochabstand ca. 150 cm) bei gleicher verwendeter Luftmenge.
- Durch eine Steigerung der zugeführten Luftmenge von $0,15 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$ auf maximal $0,32 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$ erhöhte sich die mittlere Schallreduktion um mehr als 4 dB beim Einzelereignispegel (ΔSEL_{50}) und Spitzenpegel.
- Es wurden zwei Versuche mit einem halboffenen doppelten Großen Blasenschleier durchgeführt. Im ersten Fall, bei dem der Abstand zwischen den beiden am Meeresboden befindlichen Düsenschläuchen 10 m bis 20 m betrug (DBBC 2b), ergaben sich für den Einzelereignispegel (SEL₅₀) bei maximaler Luftzufuhr von $0,32 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$ Schallminderungen von $14 \text{ dB}_{\text{SEL}} - 18 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ und für den Spitzenpegel von $18 \text{ dB}_{\text{LPeak}}$. Bei einem Abstand von ca. 80 m zwischen den Düsenschläuchen (DBBC 2a) ergaben sich bei

gleicher Luftzufuhr Schallminderungen für den Einzelereignispegel (SEL_{50}) von 14 dB_{SEL} – 18 dB_{SEL} , sowie 22 dB_{LPeak} für den Spitzenpegel (Nr. 5 und 6 in Tab. 1.16).

- Der Abstand zwischen den beiden Düsenschläuchen eines doppelten Blasenschleiers hatte maßgeblich Einfluss darauf, ob sich an der Wasseroberfläche beide Blasenschleier zu einem sehr breiten Gesamtschleier vereinten bzw. überlappten (DBBC 2b) oder ob sich zwei vollständig getrennte Blasenschleier in der Wassersäule ausbildeten (DBBC 2a). Im Fall, dass sich zwei vollständig separate Blasenschleier in der Wassersäule ausbreiteten, ergaben sich höhere Schallreduktionen für den Spitzenpegel als im Fall, dass sich die beiden Blasenschleier in der Wassersäule vereinten. Die notwendigen Abstände zur Ausbildung von zwei getrennten Blasenschleiern hängen von der Strömungsgeschwindigkeit und der vorhandenen Wassertiefe ab.
- Mit einem doppelten Großen Blasenschleier konnte die Schallminderung im Gegensatz zu einer einfachen (linearen oder ringförmigen) Auslegung erhöht werden.
- Sämtlich o.g. Einflussfaktoren konnten nur in einem begrenzten Parameterbereich variiert und untersucht werden, so dass derzeit keine technischen und physikalischen Grenzen der Einflussfaktoren Luftmenge, Lochgröße, Lochabstand und Abstand der beiden Blasenschleier bei einem doppelten Blasenschleier bekannt sind.

Vergleich der Hydroschallmessungen mit dem UBA/BSH-Schallschutzgrenzwert-Kriterium

- Unter Verwendung des BBC 2 lag der 5% Perzentilpegel des SEL bei 73% aller Rammungen unterhalb des in 750 m Entfernung geforderten Schallschutzgrenzwertes für den Einzelereignispegel von 160 dB_{SEL} , in 27% der Fälle zwischen 160 dB_{SEL} und 163 dB_{SEL} , niemals aber über 163 dB_{SEL} . Sowohl mit dem BBC 1 als auch dem BBC 2 unterschritt der Spitzenpegel immer die geforderten 190 dB_{LPeak} . Mit dem BBC 2 unterschritt der Spitzenpegel sogar in neun von zwölf Fällen 184 dB_{LPeak} .

Schallausbreitung im Wasser

- Durch die Messungen in Entfernungen zwischen wenigen hundert Metern bis hin zu 28,6 km zum Rammort zeigte sich, dass die derzeit verfügbaren und z.T. halbempirischen Näherungsformeln für die Ausbreitungsdämpfung (nach Thiele & Schellstede 1980; geometrische Ausbreitungsdämpfung) den Hydroschall durch Rammungen in Entfernungen von mehreren Kilometern ($> 10 \text{ km}$) um 10 dB deutlich überschätzen, d.h. der gemessene Schall um einen Wert von mindestens 10 dB geringer ausfällt als der prognostizierte Wert. Ein modifiziertes empirisches Ausbreitungsmodell der itap GmbH, basierend auf Rammschallmessungen der vergangenen Jahre, weist hingegen deutlich geringere Abweichungen zwischen den prognostizierten und gemessenen Daten auf (ca. $< 5 \text{ dB}$). Es zeigen sich bei dieser modifizierten empirischen Näherungsformel jedoch z.T. erhebliche Unterschiede zwischen den Messdaten und den prognostizierten Daten bei der Schallausbreitung mit und ohne Großen Blasenschleier (Frequenzabhängigkeit). Hierbei ist anzumerken, dass die Ausbreitungsformel der itap GmbH auf Rammschall ohne Einsatz von Schallminderungsmaßnahmen basiert.

Zeitgleiche Rammungen an zwei unterschiedlichen Standorten

- Bei einer Messung im ca. 20 km entfernten FFH-Gebiet Borkum Riffgrund (bwf_6) konnten die zeitgleichen Rammaktivitäten von zwei unterschiedlichen Offshore-Windparks (Borkum West II und BARD Offshore 1) erfasst werden.
- Aufgrund der unterschiedlichen Entfernungen der beiden o.g. Rammorte und der unterschiedlichen Hydroschallemissionen (unterschiedliche Pfähle, Rammenergien, unterschiedliche Entfernungen etc.) ergaben sich vergleichbare Einzelereignispegel bei der Messposition bwf_6. Im Gegensatz dazu stieg bei zeitgleicher Rammung der energieäquivalente Dauerschallpegel (L_{eq}) um bis zu 9 dB an.

Objektive Beschreibung der Schallimmissionen zur Beurteilung von Schädigungen und Störungen von Schweinswalen durch Schall

- Für sämtliche hydroakustischen Messungen wurden in Anlehnung an das Messkonzept für Unterwassermessungen der Einzelereignispegel (SEL_{90} , SEL_{50} und SEL_5) und der Spitzenpegel (L_{peak}) berechnet.
- Zusätzlich wurden die o.g. Parameter auch für einen exakten Abstand von 750 m sowie für weitere Abstände von wenigen hundert Metern bis zu 37 km Entfernung für bestehende C-POD-Positionen ohne Hydroschallmessungen mit der auf Messungen basierenden Ausbreitungsnäherung des itap berechnet worden, so dass diese Parameter mit den Reaktionen der Schweinswale korreliert werden können (vgl. Abschnitt E).
- Auf der Basis des experimentell bestimmten Hörvermögens von Schweinswalen (Kastelein et al. 2010) wurden sämtliche hydroakustischen Messungen schweinswalhörigerecht spektral gewichtet bzw. berechnet, S-Gewichtung genannt. Es zeigte sich, dass die frequenzabhängige Schallausbreitung im Wasser, die frequenzabhängige Schallreduktion durch den Großen Blasenschleier und das frequenz aufgelöste Hörvermögen der Schweinswale einen entscheidenden Einfluss auf die Hörbarkeit von Rammimpulsen in größeren Entfernungen im Wasser hat.

E UNTERSUCHUNG DER ZEITLICHEN UND RÄUMLICHEN REAKTION VON SCHWEINSWALEN

E.1 Schweinswale im Bereich von Borkum West II

Schweinswale (*Phocoena phocoena*) bewohnen die küstennahen Gewässer der nördlichen Hemisphäre, einschließlich der Nord- und Ostsee. In der Nordsee ist der Schweinswal die am weitesten verbreitete Walart, im Bereich der südöstlichen Deutschen Bucht ist es die einzige sich reproduzierende Walart. Die Tiere können ein Alter von bis zu 24 Jahren erreichen, werden in freier Wildbahn jedoch selten älter als 12 Jahre (Lockyer et al. 2003). Schweinswale ernähren sich vorwiegend von Fischen, die sowohl in der Wassersäule als auch am Meeresboden gejagt werden. In der Nahrungswahl ist der Schweinswal wenig spezialisiert, es werden die Arten gefressen, die in entsprechender Zahl zur Verfügung stehen. In der Nordsee sind dies v.a. Sandaal, Wittling und Dorsch, aber auch Plattfische und Grundeln sind als Hauptnahrung nachgewiesen (Gilles 2008, Santos & Pierce 2003).

Die Gefährdungssituation von Meeressäugtieren wird durch die Roten Listen und die Einstufung in die Anhänge internationaler Schutzabkommen beschrieben. Durch eine hohe Schutzbedürftigkeit wird in der Regel einer besonderen Gefährdungssituation Rechnung getragen. Der Schweinswal ist im Anhang II der FFH-Richtlinie aufgeführt, für die spezielle Schutzgebiete ausgewiesen werden müssen. Weiterhin ist er in Anhang IV (Arten von Gemeinschaftsinteresse, die eines strikten Schutzes bedürfen) gelistet. Weitere internationale Schutzabkommen, in denen der Schweinswal gelistet ist, sind die Berner Konvention (Anhang II) und die Bonner Konvention (Anhang II). Fasst man die Informationen aus den genannten Abkommen zusammen, wird für den Schweinswal eine mittlere Gefährdung festgestellt.

Der Schweinswalbestand der Nordsee und umgebender Gewässer wurde im Projekt SCANS I im Jahr 1995 (Hammond et al. 1995) auf etwa 341.000 Tiere geschätzt 95% (Konfidenzintervall (KI): 260.000 – 449.000, Hammond et al. 2002). Nach den SCANS II-Untersuchungen in 2005 (SCANS II 2008) haben sich die Schweinswalbestände der Nordsee innerhalb von 10 Jahren in ihrer Anzahl nicht verändert (335.000 Individuen), sehr wohl aber in ihrer räumlichen Verteilung (Hammond 2006). So wurde bei SCANS II im südlichen Teil der Nordsee ein deutlicher Anstieg der Bestandsdichte gegenüber 1994 festgestellt, während insbesondere die Dichten vor der schottischen Ostküste, aber auch rund um die jütländische Halbinsel, abgenommen haben (Hammond 2006).

Mit einem hohen Flugerfassungsaufwand wurden seit 2002 Schweinswale im Rahmen verschiedener durch den Bund geförderter Projekte (MINOS, MINOSplus, Emson) im Hochseebereich der Nord- und Ostsee erfasst. Die Ergebnisse zeigen, dass die Verteilung der Schweinswale in der AWZ sehr heterogen ist, wobei die Tiere klare Präferenzen für einige Gebiete zeigen, welche daher als wichtige Gebiete zur Nahrungssuche angesehen werden können. Für die deutschen Natura 2000 Schutzgebiete Borkum Riffgrund und Sylter Außenriff und das dänische Natura 2000 Schutzgebiet Sydlige Nordsø wurde daher der Schweinswal als wertgebende Art genannt, da diese Gebiete mit zeitweise hohen Dichten im Jahresverlauf als wichtige Nahrungsgründe und/oder Aufzuchtgebiete gewertet werden (Scheidat et al. 2004, Gilles et al. 2008a, Gilles et al. 2009). Der deutsche Nordseebestand des Schweinswals weist ebenfalls relativ stabile Zahlen auf bei einer hohen Schwankungsbreite und wird aktuell für das Jahr 2009 mit 54.227 Tieren (95% KI: 30.079 – 104.186) angegeben (Gilles & Siebert 2010).

Zum Vorkommen von Schweinswalen im Seegebiet um den Windpark Borkum West II zeigen die Ergebnisse der Flugzeugzählungen, die seit 2008 im Rahmen des bau- und betriebsbegleitenden Monitorings (StUK3-Monitoring) zum Offshore-Testfeld alpha ventus durchgeführt wurden (Diederichs et al. 2008, 2009, 2010, Höschle et al. 2011, Hansen et al. 2012), sowie die im Rahmen der StUKplus-Untersuchung im gleichen Gebiet durchgeführten Flugzeufferfassungen (Siebert et al.

2011) eine hohe Variabilität der Abundanz. Ein einheitliches und über mehrere Jahre hinweg konstantes saisonales Muster konnte nicht erkannt werden. Diese Ergebnisse ähneln deutlich denen von Thomsen et al. (2007) aus einem Seegebiet in der zentralen Deutschen Bucht, das sich direkt nördlich an das hier vorgestellte Untersuchungsgebiet anschließt. Die Autoren konnten ebenfalls kein einheitliches saisonales Muster nachweisen, sondern ein eher sporadisches Auftreten von hohen Schweinswaldichten.

Dagegen zeigt die räumliche Verteilung der Sichtungen aus dem Flugzeug jedoch ein über die Jahre hinweg stabiles Muster: Der Bereich südwestlich des Testfelds alpha ventus inklusive des Schutzgebietes Borkum Riffgrund wird von Schweinswalen wesentlich intensiver genutzt. Das Vorhabensgebiet Borkum West II liegt im Randbereich dieses verstärkten Vorkommens (siehe auch Abb. 1-3, S. 28). Außer im Herbst wurden in diesem Bereich mehr Schweinswale gesichtet als in dem östlich davon gelegenen Bereich. Das verstärkte Vorkommen im Bereich Borkum Riffgrund kann auch anhand von Schiffserfassungen im Rahmen der StUK3-Untersuchungen zum Windpark alpha ventus bestätigt werden.

Untersuchungen mit Hilfe des Passiven Akustischen Monitorings (PAM) mit PODs (vgl. S. 144) im Rahmen des StUK3-Monitorings bestätigen für das Gebiet Borkum Riffgrund mit im Mittel über 30% PP10M/Tag eine kontinuierlich hohe Detektionsrate über das gesamte Jahr, ohne dass ein deutliches saisonales Muster zu erkennen ist. Im Gegensatz zum Schutzgebiet Borkum Riffgrund konnten östlich des Schutzgebietes um den Windpark alpha ventus mit POD-Untersuchungen deutliche saisonale Muster im Vorkommen von Schweinswalen nachgewiesen werden. Konstant über vier Untersuchungsjahre hinweg waren nur geringe Detektionsraten im Frühjahr/Frühsummer (April bis Juli) registriert worden, wohingegen sowohl im zeitigen Frühjahr (März) als auch im Sommer/Herbst hohe Detektionsraten gemessen wurden. Trotz teilweise geringer Detektionsraten konnten nahezu täglich an allen POD-Messpositionen Schweinswalsignale aufgezeichnet werden, so dass davon ausgegangen werden kann, dass Schweinswale kontinuierlich im Seegebiet um Borkum West II und alpha ventus anwesend sind.

Das Seegebiet Borkum Riffgrund wird von Gilles et al. 2006 als ein Gebiet mit zeitweise hohen Schweinswaldichten von mehr als 1 Ind./km² beschrieben bei einem konstanten saisonalen Muster mit Maximalwerten im Frühjahr (März bis Mai). Gilles et al. (2011) berechnen auf dieser Basis mit Hilfe eines Generalisierten Additiven Modells (GAM) ein density surface model unter Berücksichtigung von verschiedenen statischen und dynamischen ozeanographischen Variablen und definieren als Resultat das Schutzgebiet Borkum Riffgrund als ein wichtiges Konzentrationsgebiet (high density area) von Schweinswalen im Frühjahr.

Im Unterschied dazu stellen spätere Studien (Diederichs et al. 2009, 2010, Höschle et al. 2011 und Hansen et al. 2012) für das Gebiet westlich des Testfelds alpha ventus, welches auch die Randlagen des Vorhabensgebietes Borkum West II umfasst, kein ausgeprägtes saisonales Muster, sondern eine hohe Variabilität in den Abundanzwerten fest, wobei hohe Dichten in allen Monaten auftreten können.

Der Unterschied zwischen den Untersuchungen kann möglicherweise auf grundsätzliche Veränderungen in der Abundanz von Schweinswalen in der südlichen Nordsee zurückgeführt werden, wie sie bei den SCANS-Untersuchungen registriert werden konnten (s.o.). So zeigt sich im Nordseebereich von den Niederlanden, Belgien und Nordfrankreich seit einigen Jahren ein stetiger Anstieg an Schweinswalsichtungen und -strandungen (Camphuysen 2004, Kiszka et al. 2004, Scheidat & Verdaat 2009, Geelhoed et al. 2011).

Im Rahmen des StUK3-Monitorings zum Windpark alpha ventus wurden Schweinswalkälber während der Flüge von Ende Mai bis Anfang Oktober mit einem Maximum in Juni und Juli gesichtet. Die maximale Sichtungsrate betrug 22 % am 5. Juni. Dies liegt in derselben Größenordnung wie auch die Kälberanteile, über die aus dem Schutzgebiet Sylter Außenriff berichtet wird (Gilles et al. 2009, Grünkorn et al. 2004).

E.2 Aufgabenstellung

Nach dem Stand der Technik werden Offshore-Windenergieanlagen überwiegend auf Fundamenten installiert, die mit Stahlpfählen im Meeresboden verankert werden. Durch das Rammen der Gründungspfähle werden hohe Schalleinträge in den Wasserkörper verursacht. Verschiedene Projekte konnten eine deutliche Meidereaktion von Schweinswalen auf Rammarbeiten nachweisen (Tougaard et al. 2009, Diederichs et al. 2010, Brandt et al. 2011). Bei der Errichtung des Offshore-Windparks Borkum West II (BW II) wurde im Rahmen dieses Forschungsprojektes erstmalig serienmäßig ein Großer Blasenschleier zur Reduktion der Schallimmissionswerte eingesetzt. Unter der Voraussetzung, dass der Große Blasenschleier eine Reduzierung des Schalleintrags in die Meeresumwelt herbeizuführen vermag, so ist auch eine geringere Störwirkung auf Schweinswale zu erwarten. Ziel dieses Teilvorhabens ist es, diese Hypothese in verschiedenen Teilaspekten zu prüfen. Da sowohl verschiedene Schlauchkonfigurationen getestet wurden als auch die Luftzufuhr variiert wurde und ein kontinuierlicher Einsatz bei allen Fundamenten nicht garantiert werden konnte, bestand die Aufgabe darin, die Reaktion von Schweinswalen auf Schallimmissionen unterschiedlicher Lautstärke zu untersuchen.

Als Maß für die Störung von Schweinswalen werden in diesem Projekt das Ausmaß und die Dauer in der Abnahme der Detektionsraten von Schweinswallauten in Bezug auf Schallimmissionen, die bei der Errichtung eines Fundaments entstehen, gemessen. Die Untersuchung erfolgte mittels akustischer Erfassungen der Echoortungslaute der Schweinswale mit Hilfe sogenannter Schweinswal-Klick-Detektoren (C-PODs, siehe S. 144). Diese Geräte zeichnen kontinuierlich Unterwassergeräusche auf und können mit Hilfe eines nachgeschalteten Algorithmus Schweinswalsignale herausfiltern.

Die Untersuchung der Reaktion der im Seegebiet anwesenden Schweinswale auf gedämmten und ungedämmten Rammschall erfolgte parallel zur Entwicklung und Erprobung eines technisch und physikalisch optimierten Großen Blasenschleiers. Da Entwicklung und Anwendung des Blasenschleiers die wichtigsten Ziele des Forschungsvorhabens waren, konnte bei der Untersuchung der Reaktion der Schweinswale kein Analyseansatz gewählt werden, bei dem eine zuvor definierte Anzahl Referenzmessungen ohne Schallminderung mit einer definierten Anzahl Messungen mit vorgegebener und konstanter Schallminderung verglichen wurde. Für die Auswertung der erhobenen Daten wurden daher folgende zwei Hauptansätze verfolgt:

- Analyse der Reaktion von Schweinswalen in Abhängigkeit zu der Stärke der verursachten Schallimmission.
- Vergleich der An- und Abwesenheitsmuster von Schweinswalen bei Rammungen mit und ohne Blasenschleier.

Während im ersten Ansatz geprüft wird, ob eine Beziehung zwischen der Reaktion der Schweinswale während der Rammung und der Stärke der Schallimmissionen besteht, soll im zweiten Ansatz über einen direkten Vergleich zwischen gedämmter und ungedämmter Rammung untersucht werden, ob mit der Minderung der Schallimmissionen beim Bau des Windparks Borkum West II tatsächlich eine Verminderung der Störung von Schweinswalen erreicht wurde, die mit einer weniger starken Verringerung der Schweinswal-Detektionsraten einher ging. Beide Ansätze dienen weiterhin dazu, eine belastbare Prognose der Auswirkungen von schallreduzierten Rammarbeiten auf Schweinswale zu entwickeln.

E.3 Methodik

E.3.1 Begriffe und Definitionen

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden die folgenden drei Maße für die Nutzung eines Gebietes durch Schweinswale zur Beantwortung der Fragenkomplexe aus Kapitel E.3.3 aus den POD-Daten extrahiert:

Schweinswalpositive 10-Minuten pro Tag (Porpoise Positive 10 Minutes per day, PP10M/day) zeigt an, wie viele der 144 10-Minutenblöcke eines 24-Stunden-Tages mindestens eine Schweinswal-Registrierung enthielten. An Tagen, an denen die Geräte ausgetauscht wurden, fehlten drei bis sechs Stunden des entsprechenden Tages, so dass die Bezugsgröße entsprechend kleiner als 144 war. Dieser Parameter wurde bei Fragenkomplex 1 verwendet.

Schweinswalpositive Minuten pro Stunde (Porpoise Positive Minutes per hour, PPM/h) zeigt an, wie viele der 60 Minuten einer Stunde mindestens eine Schweinswal-Registrierung aufwies. Die Auflösung nach Stunden erwies sich als hinreichend genau, um die Schweinswal-Detektionsraten in zeitlicher Abhängigkeit zu Rammereignissen zu beschreiben. Dieser Parameter wurde bei Fragenkomplex 2 verwendet und zur Variablen δ PPM/h standardisiert (siehe unten).

Wartezeit (waiting time) ist die Zeit, die zwischen zwei Schweinswalereignissen liegt. Ein Schweinswalereignis (Encounter) ist eine Serie von Schweinswalklicks, die in einem theoretisch unbegrenzt langen Zeitintervall registriert wurden. Ein Encounter wird von Zeitabschnitten mit mehr als 10 Minuten ohne Schweinswalaktivität eingegrenzt (Abb. 1-60), sogenannten Wartezeiten. Hinsichtlich der Wartezeit bleiben gemäß der vorstehenden Encounter-Definition Zeitintervalle ohne registrierte Schweinswalaktivität mit einer Länge < 10 Minuten unberücksichtigt. Dieser Parameter wurde bei Fragestellung 3 verwendet.

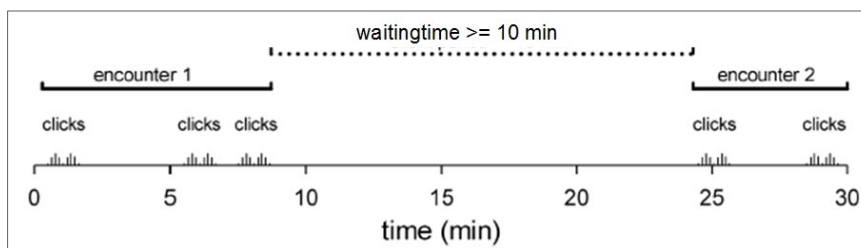


Abb. 1-60: Zusammenhang zwischen Schweinswalereignissen (Encounter) und Wartezeit (Waiting time).

Weitere wichtige Definitionen

- | | |
|--------------|--|
| 1. Wartezeit | Definiert als die erste Wartezeit nach Ende einer Rammphase. Die 1. Wartezeit ist die Zeitspanne zwischen dem letzten registrierten Schweinswalklick vor Ende der Rammarbeiten und dem ersten registrierten Schweinswalklick nach Ende der Rammarbeiten. |
| AIC | Akaike Information Criterion. Beschreibt die Erklärungskraft eines Modells. Ein niedrigerer AIC-Wert entspricht einem besseren Modell. |
| dB_{SEL} | Sound Exposure Level (SEL; identisch mit dem Einzelereignispegel LE), in dB gemessen. Hier SEL_{50} : 30-Sekunden Perzentilpegel, der von 50% der Messwerte im betrachteten Zeitintervall überschritten wird. |
| Encounter | Schweinswalereignis (vgl. Abb. 1-60). |

Kontrollwartezeit	Die Kontrollwartezeiten dienten bei Fragestellung 3 (vgl. Kapitel E.3.3, Fragenkomplex 3) dem Vergleich mit den 1. Wartezeiten nach Rammende. Die Kontrollwartezeit entstammte dabei dem Datensatz des C-PODs, der die 1. Wartezeit registriert hatte. Die Kontrollwartezeiten wurden aus einem für den Vergleich herangezogenen Kontrollzeitraum mittels Zufallsstichprobe aus der Grundgesamtheit der Daten ausgewählt. Der Datenzeitraum wurde dabei auf den Monat beschränkt, in dem auch die 1. Wartezeiten registriert wurden; allerdings wurden die Rammphasen sowie die 1. Wartezeit ausgeschlossen.
LME	Linear Mixed-Effects Model.
Nettorammzeit	Zeit, in der tatsächlich gerammt wurde (Zeit der Rammphase abzüglich der Unterbrechungen (= ohne Pausen und Vergrämungszeiten).
PPM.s	Mittelwert der registrierten PPM/h eines von Rammarbeiten unbeeinflussten definierten Kontrollzeitraums vor den Rammphasen (vgl. Kapitel E.3.3, Fragenkomplex 2).
Rammende	Als Rammende wurde die Stunde definiert, in der der letzte Rammschlag bei der jeweiligen Rammbaustelle durchgeführt wurde oder – falls eine Unterbrechung bei einer Rammphase mehr als 10 Stunden betrug – die Stunde mit dem letzten Rammschlag vor dieser Unterbrechung. Für Fragenkomplex 2 (vgl. Kapitel E.3.3, Fragenkomplex 2) wurde die darauf folgende Stunde als Stunde 1 nach Rammende definiert.
Rammphase	Zeitraum vom Start der Vergrämungsmaßnahmen (Einschalten des Pingers) bis zum Ende der Rammarbeiten (letzter Hammerschlag) an einem Standort, wobei der Beginn einer Unterbrechung von mehr als 10 Stunden Dauer als das Ende einer Rammphase bestimmt wurde (vgl. Kapitel E.3.2). Die Wiederaufnahme der Rammung an einem Fundamentstandort nach einer mehr als 10-stündigen Unterbrechung wurde als eine neue Rammphase definiert. In den Auswertungen gab es daher mehr Rammphasen als Rammbaustellen. Für Fragenkomplex 2 (vgl. Kapitel E.3.3, Fragenkomplex 2) wurde die gesamte Rammphase inklusive der letzten vollen Stunde, in der Rammarbeiten stattfanden, als Stunde 0 in Bezug auf eine Rammung definiert.
Rammtag	Kalendertag, an dem eine Rammung durchgeführt wurde. Für Fragenkomplex 1 (vgl. Kapitel E.3.3, Fragenkomplex 1) wurden nur solche Tage als Rammtage eingestuft, bei denen bereits um Mitternacht gerammt wurde, so dass es an einem solchen Tag keine rammungsfreie Stunde vor dem Rammereignis gab. Die genaue Vorgehensweise wird in Kapitel E.3.3 (Fragenkomplex 1) erläutert.
Rammzeit	Entspricht der Rammphase.
Schallklasse	Zur Untersuchung der schallinduzierten räumlich-zeitlichen Störwirkung der Schallemission auf Schweinswale wurden die C-POD-Daten in 5 dB- und 2dB-Schallklassen unterteilt (vgl. Kapitel E.3.3, Fragenkomplex 2).
Tag 1 n. Rammg.	1. Kalendertag nach einem Rammtag (vgl. Kapitel E.3.3, Fragenkomplex 1).
Tag 2 n. Rammg.	2. Kalendertag nach einem Rammtag (vgl. Kapitel E.3.3, Fragenkomplex 1).

Tag vor der Rammung	Als Tag vor der Rammung wurden bestimmte Kalendertage gewertet, die vor einem Rammtag lagen. Die genaue Vorgehensweise wird in Kapitel E.3.3 (Fragenkomplex 1) erläutert.
Vergrämung	Der Rammung waren zumeist Vergrämungsmaßnahmen vorgeschaltet. Da die Effekte von Vergrämung und Rammung auf die Schweinswale nicht zu trennen waren, umfasste eine Rammphase den Zeitraum vom Start der Vergrämungsmaßnahmen (Einschalten des Pingers) bis zum Rammende.
Zeitklasse	Die POD-Daten wurden für die Fragestellungen 2b, 2d und 2e (vgl. Kapitel E.3.3, Fragenkomplex 2) in sechs Zeitklassen nach Rammende unterteilt, welche die ersten 24 Stunden nach einer Rammphase umfassten (1.-4. Std, 5.-8. Std, 9.-12. Std, 13.-16. Std, 17.-20. Std und 21.-24. Std).
Zero-Inflation	Übersteigt die Anzahl der beobachteten Nullen für die Zähldaten die gemäß einer positiven Ursprungsverteilung (z. B. Poissonverteilung) erwartbare Anzahl, so liegt ein sogenannter Nullwertüberschuss vor. Für die Berücksichtigung dieses Problems sind entweder kombinierte Modelle erforderlich, bei denen für das Ereignis Null und die positiven Ereignisse unterschiedliche Verteilungen zugrunde gelegt werden, oder aber die Daten müssen in geeigneter Weise standardisiert werden.
δ PPM/h	Um dem Problem der Zero-Inflation im Datensatz zu begegnen, wurde der POD-Datensatz für Fragenkomplex 2 standardisiert (vgl. Kapitel E.3.3, Fragenkomplex 2). Synonym wird die verkürzte Form δ PPM verwendet.

E.3.2 Technische Methodik

Technische Beschreibung des C-PODs

C-PODs (Chelonia Ltd., UK) sind autonome Aufnahmegeräte (data logger), die hochfrequente Lautereignisse registrieren. Sie bestehen aus einer 80 cm langen Plastikröhre, an deren einem Ende sich ein Hydrophon befindet. Direkt darunter befinden sich ein Verstärker und ein elektronischer Filter. Das Hydrophon zeichnet omnidirektional alle Lautereignisse in einem Frequenzbereich von 20 bis 150 kHz auf. Hauptfrequenz, Frequenzverlauf, Lautdauer, Intensität (in 8 bit-Schritten), Bandbreite und Hüllkurve des Frequenzspektrums werden für jeden einzelnen Klick abgespeichert. Insgesamt zehn 1,5 Volt D-Batterien versorgen das Gerät mit ausreichender Spannung für mindestens sechs Wochen. Die Daten werden auf SD-Karten (max. 4 GB) gespeichert.



Abb. 1-61: Foto eines C-PODs (<http://www.chelonia.co.uk/index.html>).

Die Geräte sind vom Hersteller auf der Hauptfrequenz von Schweinswalclicks (130 kHz) kalibriert und auf einen gleichen Hörschwellenwert eingestellt (± 2 dB).

Mit Hilfe der vom Hersteller bereitgestellten Software CPOD.exe (siehe www.chelonia.co.uk/index.html) und des darin enthaltenen Algorithmus können aus den gespeicherten Rohdaten die Variablen „NBHF“ (Narrow band high frequency: Frequenzbereich Schweinswalartige), „other cet“ (andere Zahnwale: Delfinartige) und „Sonar“ (Bootssonare) herausgefiltert und von dem Hintergrundrauschen getrennt werden. Zusätzlich werden diese Herkunftsvariablen in vier verschiedene Qualitätsparameter unterteilt, die bestimmen, bis zu welchem Wahrscheinlichkeitsgrad die identifizierten Klickabfolgen tatsächlich der jeweiligen Variable („NBHF“, „other cet“ oder „Sonar“) zugeordnet werden können. Zur weiteren Auswertung wurden nur „NBHF“ (Schweinswalartige)-Klickabfolgen der beiden oberen Qualitätsparameter („Hi“ und „Mod“) herangezogen. Damit wurde ausgeschlossen, dass Daten, die fälschlicherweise als Schweinswal-Laute klassifiziert wurden, in die Auswertung einfließen. Die Datenanalysen wurden ausschließlich mit der Version CPODv2.031.exe vom 24.03.2012 durchgeführt.

Lage der POD-Messpositionen

Um eine Aussage über den räumlichen und zeitlichen Effekt einer schallinduzierten Störung auf Schweinswale treffen zu können, wurden im Rahmen des Projektes Borkum West II die Daten von insgesamt 26 fixen POD-Messpositionen (vgl. Abb. 1-62) ausgewertet, die in verschiedenen Entfernungen zum Baugebiet Borkum West II ausgebracht waren.

Die Daten folgender Stationen standen der Analyse zur Verfügung:

- 6 Messpositionen im Rahmen des Forschungsprojektes: „bwf_1“ bis „bwf_6“
- 12 Messpositionen aus dem Projekt StUK3-Monitoring alpha ventus (von der Stiftung Offshore Windenergie zur Verfügung gestellt)
- 6 Messpositionen aus dem Projekt StUKplus (vom ITAW zur Verfügung gestellt)
- Eine Messposition aus dem StUK3-Monitoring zu Borkum West II (BSH-POD-Station „BW2“)
- Eine Messposition aus dem StUK3-Monitoring zu MEG1 (BSH-POD-Station „MEG1“)

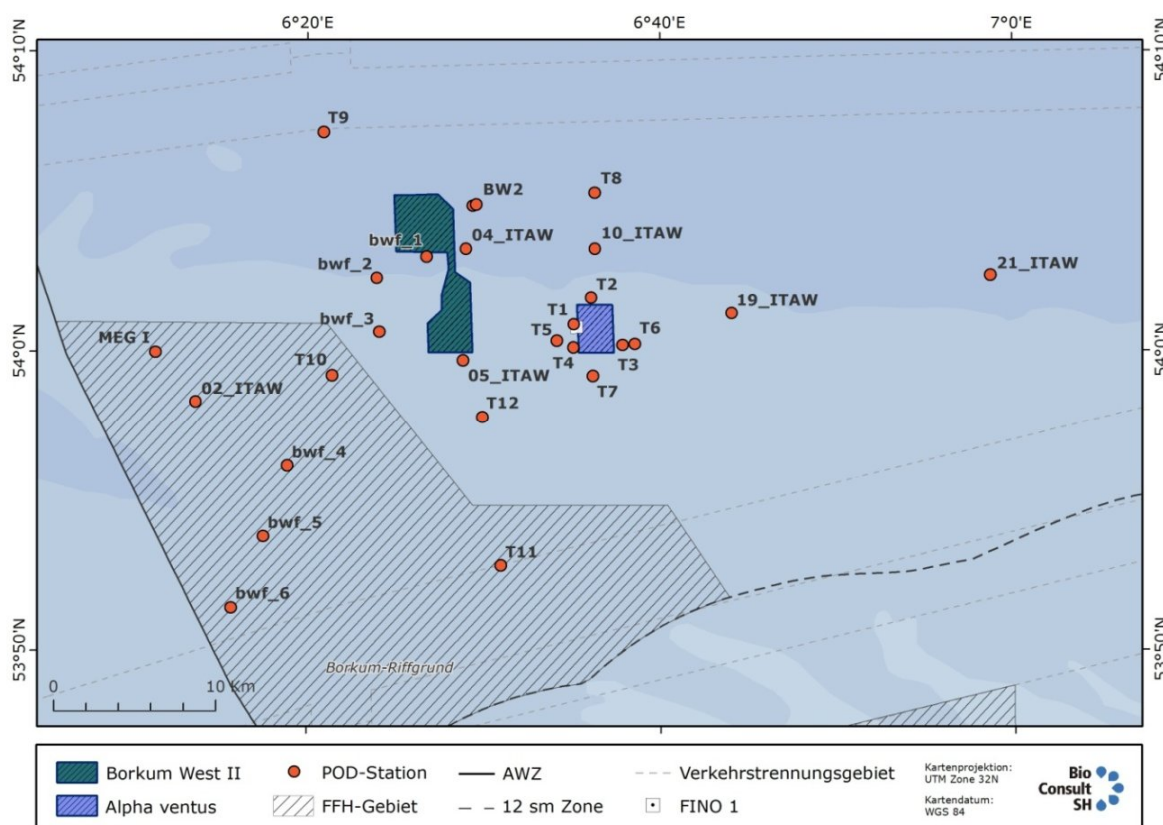


Abb. 1-62: Lage der POD-Messpositionen, deren Daten in die Auswertung einfließen.

Rammarbeiten bei Borkum West II

Für den hier betrachteten Offshore-Windpark Borkum West II werden im ersten Bauabschnitt 40 Windenergieanlagen errichtet. Die Gründungsstruktur ist ein Tripod (siehe Abb. 1-5, S. 30), so dass für jedes Fundament je drei Stahlpfähle mit dem Durchmesser von 2,44 m mit einer Impulsramme bis zu 30 m tief in den Seeboden getrieben wurden. Bei der Rammung der drei Gründungspfähle ist ein mehrfaches Umsetzen des Rammhammers erforderlich. Daraus ergibt sich eine errichtungstechnisch bedingte Unterbrechung bei den Rammarbeiten. In der Regel dauerten diese Unterbrechungen wenige Stunden.

Für die folgenden Auswertungen wurde eine Rammphase als die Zeitphase definiert, in der Rammschläge mit einer zeitlichen Unterbrechung von maximal 10 Stunden stattfanden. Dadurch wurden bei den 40 Fundamenten insgesamt 44 Rammphasen mit einer mittleren Rammdauer von 6:55 Stunden (0:25 bis 16:28 Stunden) unterschieden, wobei die Zeit der Vergrämung inbegriffen ist. Nur bei fünf Rammphasen betrug die Rammdauer länger als 10 Stunden (maximal 16:28 Stunden bei Fundament BW15).

Die Nettorammezeit (Minuten mit Rammereignissen) sowie die Anzahl Rammschläge war bei allen Fundamenten relativ ähnlich und lag im Mittel bei 2:02 Stunden (0:02 bis 3:02 Stunden) bzw. 4.555 Schlägen pro Rammphase.

Das Minimum der Nettorammezeit von 0:02 Stunden betraf abschließende Rammschläge auf einem Pfahl am Fundamentstandort BW12, der schon (fast) bis zu seiner Endtiefe eingerammt war. Diese letzten Schläge wurden aber erst nach einer längeren Unterbrechung (> 11 Stunden) durchgeführt (vgl. Tab. 1.22).

Tab. 1.22: Rammphasen und Rammbaustellen. Dargestellt sind die Vergrämungs-, Ramm- und Unterbrechungszeiten der verschiedenen Rammphasen, sowie die Konfiguration des BBC. Die Konfiguration „Luftmengenversuche“ benennt die Rammphasen, bei denen der BBC mit wechselnder Kompressorenanzahl betrieben wurde. Grau unterlegt sind Fundamentstandorte, an denen die Rammarbeiten in mehreren Rammphasen stattfanden.

Rammphase	WEA	Vergrämung		Rammarbeiten		Pausen / Unterbrechungen		Großer Blasenschleier (BBC)	
		Start	Ende	Start	Ende	Gesamtdauer	Maximum	Konfiguration	Typ
1	BW01	03.09.2011 15:05	03.09.2011 17:55	03.09.2011 17:16	04.09.2011 07:19	2 h 53 min	3 h 08 min	Luftmengenversuche	Linienförmiger BBC
2	BW03	09.09.2011 14:20	09.09.2011 15:30	09.09.2011 15:11	09.09.2011 23:29	2 h 55 min	1 h 01 min	Luftmengenversuche	Linienförmiger BBC
3	BW46	16.09.2011 15:30	16.09.2011 15:55	16.09.2011 15:46	17.09.2011 02:44	2 h 02 min	4 h 40 min	Referenz	-
4	BW47	23.09.2011 20:05	23.09.2011 21:15	23.09.2011 21:09	24.09.2011 00:47	0 h 46 min	0 h 57 min	BBC2	ringförmiger BBC
5	BW47	26.09.2011 17:30	26.09.2011 18:05	26.09.2011 17:58	26.09.2011 21:08	1 h 57 min	64 h 43 min	BBC2	ringförmiger BBC
6	BW15	28.09.2011 23:00	28.09.2011 23:25	28.09.2011 23:17	29.09.2011 15:28	2 h 22 min	8 h 26 min	Luftmengenversuche	ringförmiger BBC
7	BW14	30.09.2011 00:50	30.09.2011 01:20	30.09.2011 01:14	30.09.2011 09:21	2 h 53 min	0 h 57 min	Luftmengenversuche	ringförmiger BBC
8	BW12	01.10.2011 11:34	01.10.2011 12:05	01.10.2011 11:56	01.10.2011 20:18	2 h 18 min	1 h 54 min	BBC1	ringförmiger BBC
9	BW12	02.10.2011 08:00	02.10.2011 08:28	02.10.2011 08:24	02.10.2011 08:25	0 h 02 min	11 h 42 min	BBC1	ringförmiger BBC
10	BW34	14.10.2011 20:45	14.10.2011 22:10	14.10.2011 21:54	15.10.2011 06:50	2 h 29 min	1 h 35 min	BBC2	ringförmiger BBC
11	BW26	16.10.2011 20:30	16.10.2011 20:53	16.10.2011 20:47	17.10.2011 04:55	2 h 04 min	1 h 21 min	BBC1	ringförmiger BBC
12	BW35	28.10.2011 10:55	28.10.2011 11:20	28.10.2011 11:14	28.10.2011 16:07	1 h 50 min	0 h 55 min	Referenz	-
13	BW49	29.10.2011 11:25	29.10.2011 11:47	29.10.2011 11:41	29.10.2011 15:24	1 h 29 min	0 h 43 min	Luftmengenversuche	ringförmiger BBC
14	BW41	31.10.2011 20:26	31.10.2011 20:55	31.10.2011 20:46	01.11.2011 02:51	2 h 09 min	0 h 57 min	Referenz	-
15	BW42	02.11.2011 05:07	02.11.2011 05:33	02.11.2011 05:25	02.11.2011 10:20	2 h 17 min	0 h 45 min	BBC1	ringförmiger BBC
16	BW43	04.11.2011 21:00	04.11.2011 22:00	04.11.2011 21:42	05.11.2011 05:37	2 h 12 min	1 h 28 min	Referenz	-
17	BW54	06.11.2011 06:35	06.11.2011 07:47	06.11.2011 07:31	06.11.2011 12:20	2 h 06 min	0 h 50 min	BBC2	ringförmiger BBC
18	BW53	09.11.2011 06:19	09.11.2011 07:18	09.11.2011 07:05	09.11.2011 11:52	1 h 56 min	0 h 52 min	BBC1	ringförmiger BBC
19	BW50	12.11.2011 14:54	12.11.2011 15:27	12.11.2011 15:19	12.11.2011 21:22	2 h 43 min	0 h 59 min	BBC2	ringförmiger BBC
20	BW61	13.11.2011 13:50	13.11.2011 14:51	13.11.2011 14:38	14.11.2011 04:48	2 h 51 min	7 h 37 min	BBC1	ringförmiger BBC
21	BW64	16.11.2011 16:31	16.11.2011 17:41	16.11.2011 17:20	17.11.2011 00:09	2 h 41 min	0 h 56 min	BBC2	ringförmiger BBC
22	BW44	18.11.2011 18:05	18.11.2011 19:11	18.11.2011 18:51	19.11.2011 01:03	2 h 17 min	1 h 19 min	BBC1	ringförmiger BBC
23	BW65	19.11.2011 18:40	19.11.2011 19:32	19.11.2011 19:24	20.11.2011 00:46	2 h 14 min	0 h 49 min	BBC2	ringförmiger BBC
24	BW66	20.11.2011 23:40	21.11.2011 00:32	21.11.2011 00:24	21.11.2011 04:38	2 h 01 min	0 h 47 min	Luftmengenversuche	ringförmiger BBC
25	BW55	21.11.2011 19:11	21.11.2011 20:22	21.11.2011 20:05	22.11.2011 01:03	2 h 06 min	0 h 52 min	BBC2	ringförmiger BBC
26	BW52	28.01.2012 07:05	28.01.2012 09:26	28.01.2012 09:20	28.01.2012 15:03	2 h 13 min	1 h 38 min	Luftmengenversuche	ringförmiger BBC
27	BW62	29.01.2012 16:10	29.01.2012 17:15	29.01.2012 17:09	30.01.2012 00:21	2 h 13 min	2 h 42 min	Luftmengenversuche	ringförmiger BBC
28	BW63	03.02.2012 03:30	03.02.2012 04:35	03.02.2012 04:31	03.02.2012 09:28	1 h 37 min	1 h 33 min	Referenz	-
29	BW51	04.02.2012 05:40	04.02.2012 07:05	04.02.2012 06:59	04.02.2012 13:46	1 h 34 min	3 h 38 min	Luftmengenversuche	ringförmiger BBC
30	BW48	06.02.2012 09:05	06.02.2012 10:15	06.02.2012 10:10	06.02.2012 15:00	1 h 22 min	1 h 40 min	Luftmengenversuche	ringförmiger BBC
31	BW24	09.02.2012 04:00	09.02.2012 05:02	09.02.2012 04:57	09.02.2012 08:25	1 h 38 min	0 h 40 min	Luftmengenversuche	doppelter BBC
32	BW24	10.02.2012 09:00	10.02.2012 09:37	10.02.2012 09:32	10.02.2012 11:09	0 h 50 min	24 h 35 min	Luftmengenversuche	doppelter BBC
33	BW33	04.03.2012 17:40	04.03.2012 18:50	04.03.2012 18:44	05.03.2012 00:11	2 h 15 min	1 h 08 min	Luftmengenversuche	doppelter BBC
34	BW32	06.03.2012 08:00	06.03.2012 08:55	06.03.2012 08:49	06.03.2012 14:02	1 h 42 min	1 h 23 min	Referenz	-
35	BW31	14.03.2012 11:17	14.03.2012 12:27	14.03.2012 12:21	14.03.2012 16:59	2 h 16 min	0 h 40 min	Referenz	-
36	BW40	16.03.2012 00:10	16.03.2012 01:22	16.03.2012 01:14	16.03.2012 07:03	2 h 45 min	0 h 56 min	Referenz	-
37	BW36	17.03.2012 21:45	17.03.2012 22:37	17.03.2012 22:30	18.03.2012 04:53	2 h 25 min	0 h 53 min	Referenz	-
38	BW23	21.03.2012 18:15	21.03.2012 19:40	21.03.2012 19:33	22.03.2012 00:52	3 h 02 min	1 h 17 min	BBC2	ringförmiger BBC
39	BW13	23.03.2012 00:00	23.03.2012 00:55	23.03.2012 00:48	23.03.2012 07:16	3 h 07 min	0 h 50 min	Luftmengenversuche	ringförmiger BBC
40	BW25	24.03.2012 01:00	24.03.2012 02:00	24.03.2012 01:50	24.03.2012 07:33	2 h 48 min	1 h 15 min	Luftmengenversuche	ringförmiger BBC
41	BW02	25.03.2012 09:45	25.03.2012 10:48	25.03.2012 10:38	25.03.2012 15:48	1 h 05 min	2 h 40 min	BBC2	ringförmiger BBC
42	BW02	26.03.2012 12:00	26.03.2012 12:50	26.03.2012 12:41	26.03.2012 13:04	0 h 20 min	20 h 12 min	BBC2	ringförmiger BBC
43	BW37	27.03.2012 06:00	27.03.2012 07:05	27.03.2012 06:58	27.03.2012 10:41	1 h 51 min	0 h 26 min	BBC2	ringförmiger BBC
44	BW04	28.03.2012 06:00	28.03.2012 06:55	28.03.2012 06:46	28.03.2012 12:35	1 h 45 min	0 h 49 min	BBC2	ringförmiger BBC

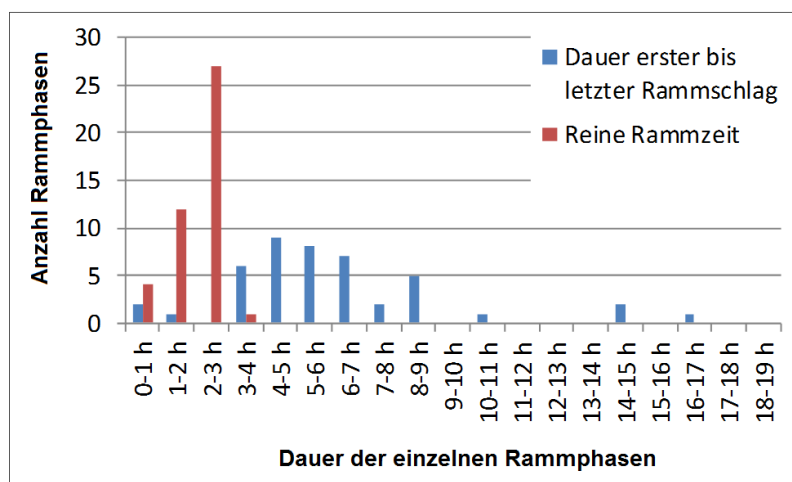


Abb. 1-63: Häufigkeitsverteilung der zeitlichen Dauer der einzelnen Rammphasen sowie der Nettorammszeit je Rammphase.

Von den 44 Rammphasen fanden neun Phasen (neun Fundamente) ohne einen Schallschutz statt (vgl. Tab. 1.3, S. 51). Bei sieben Rammphasen (sechs Fundamente, hier wurde ein Fundament aufgrund langer Unterbrechung als zwei Rammphasen betrachtet) wurde kontinuierlich ein Blasenschleier des Typs BBC 1 eingesetzt und während 13 Rammphasen (11 Fundamente) war kontinuierlich ein Blasenschleier des Typs BBC 2 im Einsatz. Bei den restlichen 15 Rammphasen (14 Fundamente) wurde zwar ein Blasenschleier betrieben, jedoch wurde dieser aufgrund von Luftmengenexperimenten nicht mit einer kontinuierlich gleichen Anzahl von Kompressoren betrieben oder der BBC war nicht vollständig geschlossen, d.h. hier wurde ein linearer oder doppelt linearer BBC eingesetzt (vgl. Tab. 1.3, S. 51).

Die Pausen, die zwischen zwei Rammereignissen an verschiedenen Fundamentstandorten lagen, waren zumeist länger als errichtungstechnisch bedingte Unterbrechungen der Rammung innerhalb der einzelnen Rammphasen. Die Pausen zwischen einzelnen Rammereignissen variierten zwischen zehn Stunden und maximal neun Wochen und vier Stunden. Diese lange Unterbrechung erklärt sich durch eine zuvor geplante Baupause im Winter, wurde aber durch eine Schlechtwetterperiode und Reparaturen an der *Goliath* noch verlängert. Die zweite längere Unterbrechung (drei Wochen, zwei Tage und etwa sieben Stunden) war durch schlechtes Wetter bedingt. Im Mittel lag der Zeitraum zwischen zwei Rammphasen bei vier Tagen und 13 Stunden (vgl. Anhang Abb: 11, Anhang S. 225). Wenn man aber diese beiden extrem langen Unterbrechungen außer Acht lässt, reduziert sich der mittlere Zeitraum zwischen zwei Rammphasen auf zwei Tage und etwa 14 Stunden.

Durch die planmäßige Verlagerung der Installationsarbeiten (Baufortschritt) im Baugebiet BW II veränderten sich die Distanzen der an fixen Positionen ausgebrachten PODs zu den jeweiligen Rammorten. Die minimale Entfernung einer POD-Station zu einem Rammort lag dabei bei etwa 600 m (Pos05_ITAW bei Rammung von BW55 am 21.11.2011), die maximale Entfernung betrug 37 km (Pos21_ITAW bei Rammung von BW01 am 03.09.2011). Die einzelnen Entfernungen der POD-Messpositionen zu den jeweiligen Rammorten können im Anhang Tab. 10 bis Anhang Tab. 20 (Anhang, S. 236 ff) entnommen werden.

Zum Schutz von Meeressäugern vor (zu) hohen Schallbelastungen wurden vor Beginn der Rammarbeiten Vergrämungsmaßnahmen durchgeführt. Hierbei wurden zwei Pinger (Aquamark 100), sowie ein Seal-Scarer (Lofitech) eingesetzt, um marine Säugetiere aus dem Nahbereich der Rammbaustelle zu vertreiben. Die Pinger senden akustische Signale von 200 bis 300 ms Länge im Frequenzbereich von 20 bis 160 kHz und erreichen einen Quellpegel von 145 dB re 1µPa. Der Seal-Scarer arbeitet bei einer Frequenz von 13,5 bis 15 kHz. Die Signale werden in unregelmäßigen Folgen mit maximal 90 Sekunden langen Pausen ausgesendet. Der Quellpegel des Signals beträgt nach Herstellerangaben etwa 189 dB re 1µPa. Untersuchungen von Brandt et al. (2013) zeigen, dass

Schweinswale bis in eine Entfernung von 7 km aversiv auf diese Geräte reagieren. Der Bereich von 1 km bis 2 km wird von Schweinswalen stark gemieden.

Um eine optimale Vergrämungswirkung zu erzielen, wurden die Pinger 40 Minuten vor Beginn der Rammung auf halber Wassertiefe (ca. 14 m) eingesetzt. Zehn Minuten nach Beginn der Vergrämung mit den Pingen wurde dann zusätzlich der Seal-Scarer in Betrieb genommen. Auch der Seal-Scarer wurde in ca. 14 m Wassertiefe eingesetzt. Nachdem der Seal-Scarer 30 Minuten in Betrieb war, wurde der Große Blasenschleier aktiviert. Sobald dieser ordnungsgemäß arbeitete, wurde mit den Rammarbeiten begonnen.

Die Vergrämer blieben nach Beginn der Rammarbeiten weitere fünf Minuten eingeschaltet, danach wurden alle drei Geräte aus dem Wasser genommen. Während dieser fünf Minuten befanden sich die drei Geräte innerhalb des Großen Blasenschleiers.

E.3.3 Statistische Methodik

Fragenkomplexe und statistische Hypothesen-Formulierung

Drei Fragenkomplexe wurden im Zuge der vorliegenden Studie genauer analysiert (Erläuterung von Begriffen und Parametern in Kapitel E.3.1).

- 1) Können abhängig vom Einsatz des Blasenschleiers auf der zeitlichen Skala von Tagen Unterschiede in den Schweinswal-Detektionsraten zwischen Tagen vor, während und nach Rammarbeiten festgestellt werden? Zu erwarten wäre eine geringere Detektionsrate am Ramntag.
 - a) Ohne Einsatz eines Blasenschleiers:
 - I. Nullhypothese: Die Schweinswal-Detektionsraten unterscheiden sich zwischen vier Tagesklassen in Bezug zum Zeitpunkt der Rammung (Tag vor Rammung, Ramntag, Tag 1 nach Rammung, Tag 2 nach Rammung) bei Rammbaustellen, bei denen keine Schallschutzmaßnahme eingesetzt wurde, insgesamt nicht signifikant voneinander.
 - II. Alternativhypothese: Wie oben, aber mit signifikantem Unterschied.
 - b) Mit Einsatz eines Blasenschleiers:
 - I. Nullhypothese: Die Schweinswal-Detektionsraten unterscheiden sich zwischen den vier Tagesklassen bei Rammbaustellen, bei denen ein Blasenschleier eingesetzt wurde, insgesamt nicht signifikant voneinander.
 - II. Alternativhypothese: Wie oben, aber mit signifikantem Unterschied.
- 2) Welchen Einfluss haben die Rammschallimmissionen auf die Anwesenheit von Schweinswalen in verschiedenen Schallklassen (= relative Entfernung zur Schallquelle) und Zeiten relativ zum Rammereignis? Zu erwarten wären geringere Detektionsraten bei höheren Lautstärken bzw. größerer zeitlicher Nähe zum Rammereignis.
 - a) Bis zu welcher Schallimmission kann eine Störung (geringere Detektionsrate) nachgewiesen werden und wie stark ist diese Störung in Abhängigkeit von der jeweiligen Lautstärke an den POD-Positionen? Dazu wird die Detektionsrate während der jeweiligen Rammphasen (unterteilt nach Schallklassen) mit der Detektionsrate eines Vergleichszeitraums vor Beginn der jeweiligen Rammung verglichen.
 - I. Nullhypothese: Die Schweinswal-Detektionsrate definierter Schallklassen unterscheidet sich während der Rammungen nicht signifikant von der mittleren Detektionsrate im Vergleichszeitraum.
 - II. Alternativhypothese: Wie oben, aber mit signifikantem Unterschied.

- b) Falls die Tiere aufgrund des Rammschalls vertrieben werden: Wie lange dauert es, bis sie wieder zurückgekehrt sind? Dazu wird untersucht, ob sich die Detektionsrate in verschiedenen Zeiträumen nach dem Ende einer Rammphase von der Detektionsrate eines Vergleichszeitraums vor Beginn der jeweiligen Rammung in Abhängigkeit von der jeweiligen Lautstärke an den POD-Positionen unterscheidet.
- I. Nullhypothese: Die Schweinswal-Detektionsrate definierter Schallklassen und Zeitklassen nach Ende einer Rammphase unterscheidet sich nicht signifikant von der mittleren Detektionsrate im Vergleichszeitraum.
 - II. Alternativhypothese: Wie oben, aber mit signifikantem Unterschied.

In den folgenden Fragestellungen 2c bis 2e werden die gleichen Ansätze wie unter 2a) und 2b) verfolgt. Jedoch wurde der Datensatz aufgeteilt, um den spezifischen Eigenschaften des bei Borkum West II eingesetzten Blasenschleiers Rechnung zu tragen und die Frage zu beantworten, ob der wirksamste Blasenschleiertyp (BBC 2) im Vergleich zu Rammungen gänzlich ohne Schallschutz auch zu einer nachweisbar geringeren Störwirkung auf Schweinswale geführt hat. Ein weiterer Grund für die Aufteilung des Datensatzes in Rammungen ohne Schallschutz (Referenz) und Rammungen mit dem Blasenschleier BBC 2 lag darin, dass der Blasenschleier nicht über das gesamte Frequenzspektrum gleichmäßig den Schall absorbiert, sondern bei höheren Frequenzen eine stärkere Schallreduktion stattfindet (siehe auch Kap. D.6.2). Dadurch, dass Schweinswale ihre beste Hörfähigkeit im hochfrequenten Bereich haben, kann die Hypothese aufgestellt werden, dass die Störwirkung eines Schallsignals gleicher Lautstärke auf Basis des breitbandigen Einzelereignispegels SEL bei Rammungen mit Blasenschleiereinsatz geringer ist. Es ergeben sich daraus folgende statistische Ansätze:

- c) Zeigt die Schweinswal-Detektionsrate bei gleicher Lautstärke einer Schallimmission bei Rammphasen mit Blasenschleier geringere Unterschiede zur Referenz als bei Rammbaustellen, bei denen keine Schallschutzmaßnahme eingesetzt wurde?
- I. Nullhypothese: Das Verhältnis zwischen der mittleren Schweinswal-Detektionsrate im Referenzzeitraum und der Detektionsrate während der Rammungen unterscheidet sich bei definierten Schallklassen und Blasenschleier-Zuständen nicht signifikant voneinander.
 - II. Alternativhypothese: Wie oben, aber mit signifikantem Unterschied.
- d) Falls die Tiere aufgrund des Rammschalls vertrieben werden: Wie lange dauert es, bis sie wieder zurückgekehrt sind, abhängig davon, ob ein Blasenschleier (BBC 2) eingesetzt wurde oder nicht? Dazu wird untersucht, wie viele Stunden es dauert, bis nach dem Ende einer Rammphase kein Unterschied mehr zum Referenzzeitraum festgestellt werden kann, dies getrennt nach einem Datensatz, der nur Rammungen mit Blasenschleier (BBC 2) enthält, und einem Datensatz, der nur Rammungen ohne Schallschutz enthält.
- I. Nullhypothese: Das Verhältnis zwischen der mittleren Schweinswal-Detektionsrate im Referenzzeitraum und der Detektionsrate nach dem Ende einer Rammphase unterscheidet sich bei definierten Zeitklassen, Schallklassen und Blasenschleier-Zuständen nicht signifikant voneinander.
 - II. Alternativhypothese: Wie oben, aber mit signifikantem Unterschied.
- e) Unterscheidet sich die zeitliche Rückkehrzeit der Schweinswale zwischen Rammungen mit Blasenschleier vom Typ BBC 2 von Rammungen ohne Schallschutz in Abhängigkeit von der jeweiligen Schallklasse in signifikanter Weise? Hier werden die jeweiligen Detektionsraten für Rammungen mit und ohne Blasenschleier (BBC 2) –getrennt nach Zeit- und Schallklassen – direkt miteinander verglichen (und nicht mit der Detektionsrate im Referenzzeitraum wie bei 2a bis 2d).
- I. Nullhypothese: Ein Vergleich der von Modellen aus den Fragestellungen 2c und 2d geschätzten Detektionsraten, unterteilt nach zeitlicher Distanz zum Rammereignis

- sowie nach Schallklasse, ergibt keinen signifikanten Unterschied zwischen Rammungen mit Blasenschleier vom Typ BBC 2 und ohne Blasenschleier.
- II. Alternativhypothese: Wie oben, aber mit signifikantem Unterschied.
- 3) Während sich die unter 2) dargestellten Untersuchungen auf die Detektionsrate – gemessen in PPM/h – bezogen, soll in einer dritten Analyse der Parameter Wartezeit herangezogen werden, um einen Störungseffekt der Rammarbeiten auf Schweinswale zu überprüfen. Die hier zu bearbeitende Frage lautet: Dauert es nach dem Ende einer Rammphase länger bis zur nächsten Erfassung von Schweinswalen, als dies unter Referenzbedingungen ohne Rammarbeiten zu erwarten wäre?
- I. Nullhypothese: Die Länge der 1. Wartezeit nach Rammende unterscheidet sich nicht signifikant von der Länge zufällig gewählter 1. Wartezeiten eines Referenzzeitraums.
- II. Alternativhypothese: Wie oben, aber mit signifikantem Unterschied.

Statistische Methodik zur Untersuchung der Fragenkomplexe

Allgemeines

Zur statistischen Analyse der C-POD-Daten wurden skriptbasierte Berechnungen mit der Software R (Version 2.15.2, R Development Core Team 2012) durchgeführt. Es wurden die Zusatzpakete „effects“ (Rigby & Stasinopoulos 2010) zur Erstellung von Effects-Plots für Mixed Effects Models, „gdata“ (Warnes 2013) zur Datenaufbereitung, „multcomp“ (Hothorn et al. 2011) für Tests multipler geplanter Kontraste, „nlme“ (Pinheiro 2010) zur Erstellung von Mixed Effects Models und „plyr“ (Wickham 2013) zur weiteren Datenaufbereitung verwendet. Als Signifikanzniveau für Tests wurde $\alpha = 5\%$ gewählt.

Nicht an allen 26 POD-Positionen konnten die Geräte einen kontinuierlichen Datensatz für den gesamten Zeitraum zwischen der ersten Rammung am 3.9.2011 und der letzten Rammung am 28.3.2012 liefern (vgl. Abb. 1-64). Da zwischen dem 21.11.2011 und dem 28.1.2012 keine Gründungsarbeiten stattfanden, wurden die PODs an den Positionen BWF_1 bis BWF_6 in dieser Zeit geborgen, so dass für diese Geräte Daten für maximal 172 Untersuchungstage zur Verfügung standen. Die BSH-POD-Messposition MEG1 wurde erst am 9.11.2011 eingerichtet, so dass hier erst ab diesem Tag Daten zur Verfügung standen. An den POD-Messpositionen T1 bis T12 (StUK3-Monitoring bei alpha ventus) traten mehrere Datenverluste durch Gerätedefekte und/oder Verluste der gesamten Stationen auf. Diese Datenlücken betrafen jedoch überwiegend die Zeitperiode zwischen den beiden Rammperioden. Insgesamt konnten für jede Rammphase von mindestens 21 POD-Positionen Daten zur Auswertung herangezogen werden.

Bezüglich des Parameters PP10M/day stand insgesamt ein Datensatz aus 4.611 POD-Tagen zur Verfügung, von denen 1.009 POD-Tage in die Auswertungen zum Fragenkomplex 1 (vgl. Kapitel E.3.3, Fragenkomplex 1) einfließen.

Hinsichtlich des Parameters PPM/h wurde der 113.498 PPM/h-Messwerte umfassende Datensatz bei Auswertungen zum Fragenkomplex 2 auf einen definierten Zeitraum vor Beginn der Rammphase (vgl. Kapitel E.3.3, Fragenkomplex 2), die Rammstunden selbst und einen definierten Zeitraum nach dem Ende einer Rammung begrenzt und damit auf weniger als 15.000 PPM/h-Messwerte reduziert.

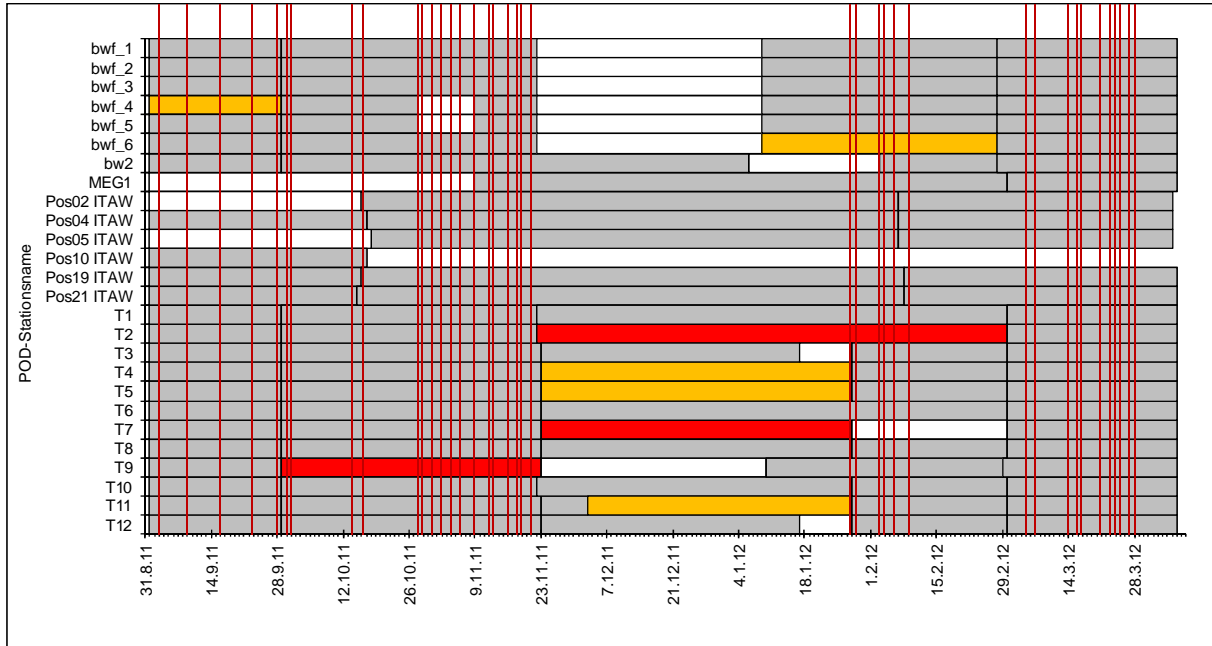


Abb. 1-64: C-POD-Datenlage im Rahmen des Forschungsprojektes. Grau = auswertbare Daten; weiß = kein Gerät im Wasser, rot = Geräteverlust; gelb = Daten nicht auswertbar. Die senkrechten roten Linien zeigen Tage mit Rammaktivität und schwarze Linien einen Geräte-Wechsel an.

Da sich Schweinswale nicht kontinuierlich im Erfassungsradius der PODs befanden, lag insbesondere beim zeitlich hochaufgelösten Parameter PPM/h ein hoher Anteil an Einzeldatensätzen vor, in denen kein Schweinswal aufgezeichnet wurde. Der Anteil an Nullwerten betrug über den gesamten Datensatz 48 %, was zu einer linksschiefen Verteilung der PPM/h-Daten führte (Abb. 1-65). Diese sogenannte Zero-Inflation (vgl. Kapitel E.3.1) wurde im Rahmen der statistischen Verfahren berücksichtigt, indem die PPM/h-Werte standardisiert wurden, was zu einer erheblichen Verringerung der Nullwerte führte (Vorgehensweise: siehe Fragenkomplex 2).

Bei den Analysen der C-POD-Daten wurde als wichtigste erklärende Variable die Schallbelastung SEL_{50} (in dB) an der jeweiligen POD-Position betrachtet. Andere Schallpegelgrößen (wie z.B. Leq) wurden nicht in die Analyse einbezogen, weil aus den Daten hervorging, dass zwischen dem Pegel SEL_{50} und dem Pegel Leq eine deutlich positive, fast lineare Korrelation bestand (Abb. 1-66). Nach Messvorschrift für Unterwasserschallmessungen des BSH (BSH 2011) soll für die Einhaltung des 160 dB-Schallschutzgrenzwertes der SEL_5 herangezogen werden. Der SEL_{50} liegt bei den Rammungen von Borkum West II im Mittel 1,9 dB unter dem SEL_5 (Tab. 1.18).

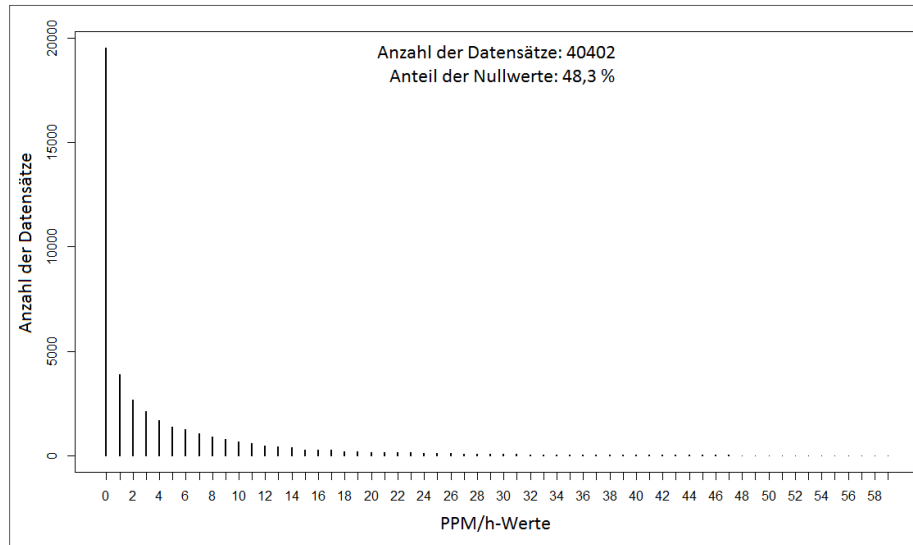


Abb. 1-65: Anzahl der Datensätze pro PPM/h-Werteklasse (0 bis maximal 59 Minuten).

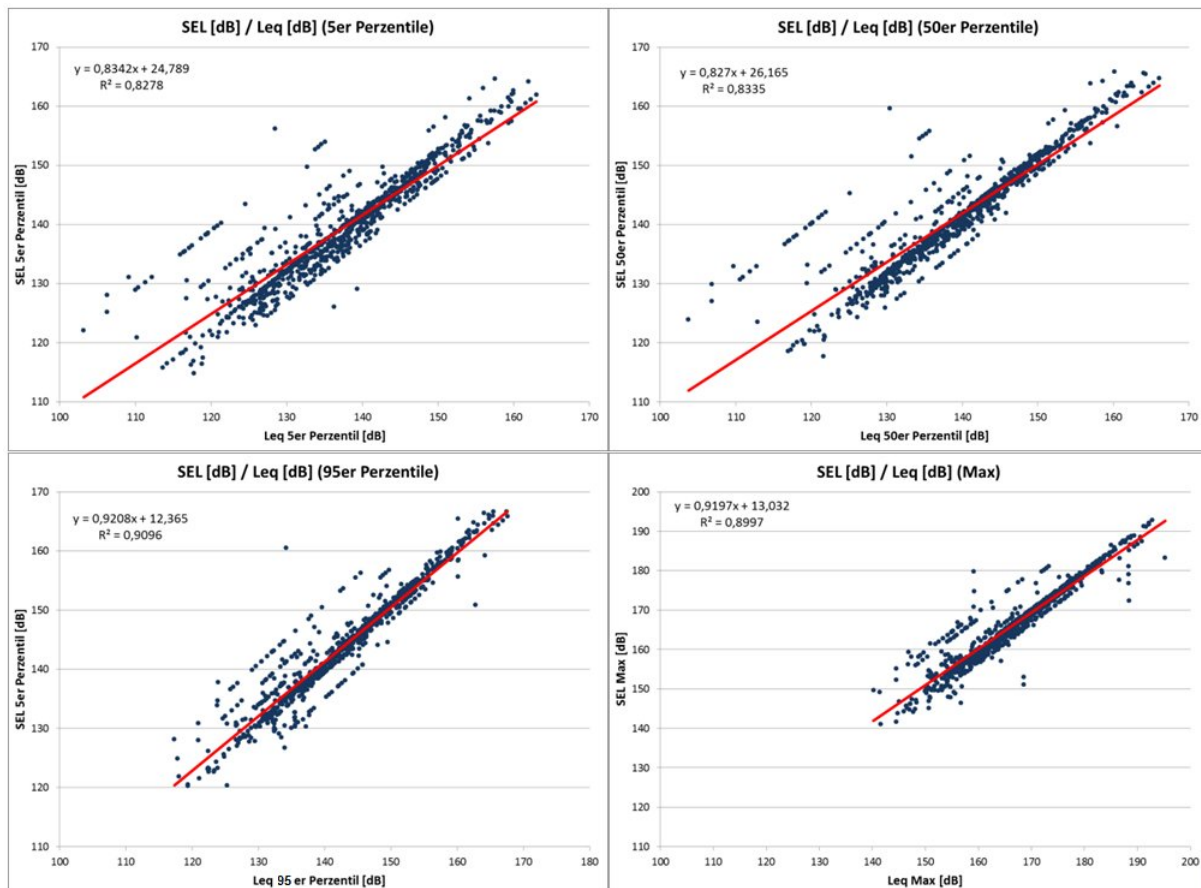


Abb. 1-66: Korrelation zwischen den Schallgrößen SEL und Leq.

Fragenkomplex 1)

Im ersten Schritt der statistischen Analyse wurde untersucht, inwieweit sich die Schweinswal-Detektionsraten an Tagen ohne Rammarbeiten von Tagen mit Rammarbeiten unterschieden. Dabei wurden folgende Tage klassifiziert und analysiert (vgl. Kapitel E.3.1):

- i. Tag vor den Rammarbeiten,
- ii. Rammtag,
- iii. Tag 1 nach Rammung,
- iv. Tag 2 nach Rammung.

Es wurden jeweils Kalendertage (0:00 bis 24:00 Uhr UTC) unterschieden und der Parameter PP10M/day (vgl. Kapitel E.3.1) als abhängige Variable gewählt. Insgesamt stand ein Datensatz von 1.009 POD-Tagen zur Verfügung.

Da zur Analyse Kalendertage herangezogen wurden, sollten als „Rammtag“ nur solche Tage eingestuft werden, bei denen über den gesamten Zeitraum des Tages ein (potentiell störender) Einfluss der Rammarbeiten wahrscheinlich war. Dieses wäre beispielsweise für einen Tag, an dem die Rammarbeiten erst im Tagesverlauf begonnen hätten, nicht zutreffend gewesen, da der ganze vorangegangene Zeitraum desselben Kalendertages nicht unter dem Einfluss von Rammarbeiten gestanden hätte. Daher wurden nur solche Kalendertage als Rammtag definiert, an denen bereits um 0:00 Uhr aktiv gerammt wurde, unabhängig davon, wie lange sich diese Rammarbeiten dann noch in den weiteren Tag erstreckten (Abb. 1-67).

Der Tag vor einem so definierten „Rammtag“ wurde nicht als „Tag vor der Rammung“ eingestuft, da hier ja bereits Rammarbeiten abliefen. Der „Tag vor der Rammung“ war der erste Kalendertag ohne Rammarbeiten vor dem als „Rammtag“ definierten Tag, also meistens der Tag, der kalendermäßig zwei Tage vor dem als „Rammtag“ eingestuften Tag lag. „Tag 1 nach Rammung“ und „Tag 2 nach Rammung“ waren dagegen die beiden Tage, die direkt auf den als „Rammtag“ eingestuften Tag folgten.

Sofern zwischen zwei als „Rammtag“ definierten Tagen ein Zeitraum von maximal drei Kalendertagen lag, wurden die Tage nach dem ersten der beiden Rammtage nicht als „Tag vor der Rammung“ eingestuft, sondern wurden als „Tag 1 nach Rammung“ bzw. „Tag 2 nach Rammung“ definiert. Erst ab einem Zeitraum von vier Tagen zwischen zwei Rammtagen konnte in dieser Periode auch ein „Tag vor der Rammung“ definiert werden (Abb. 1-68).

Ziel dieser Auswertung war es, eine potenzielle Störung der Schweinswale durch Rammschall zu evaluieren. Da der Störreiz durch Rammschall auf Schweinswale umso höher sein sollte, je lauter der Schall wahrgenommen wird und damit je kürzer die Distanz zur Schallquelle ist, wurden für diese Auswertung nur Daten von POD-Messpositionen ausgewählt, die im Umkreis von fünf Kilometern zum jeweiligen Rammort lagen. Falls bis in diese Distanz ein sehr deutlicher Störeffekt festgestellt würde, sollten in einem nächsten Schritt weiter entfernte PODs in die Auswertung einbezogen werden.

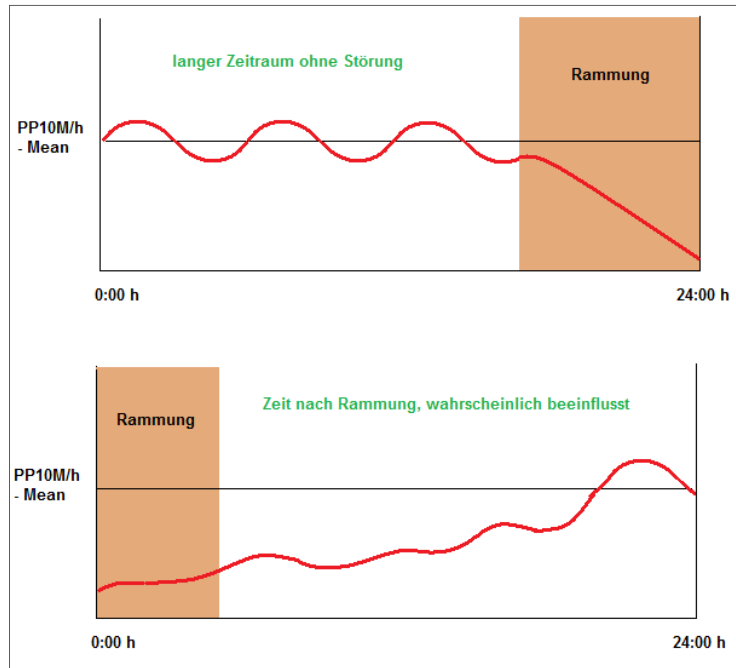


Abb. 1-67: Beispielhafte Darstellung zweier Tage, an denen gerammt wurde. Als „Rammtag“ würde hier nur der zweite Tag (untere Abbildung) definiert, da sich dort ein möglicher Einfluss der Rammarbeiten auf die Variable PP10M/day offensichtlich stärker abbilden sollte, als dieses bei dem ersten Tag (obere Abbildung) der Fall wäre. Der untere Tag würde gemäß der Definition im Text als „Rammtag“ eingestuft, der obere Tag hingegen ganz aus den Analysen heraus fallen, da er weder als „Rammtag“ noch als „Tag vor der Rammung“ eingestuft werden könnte.

Kalendertag 1	Kalendertag 2	Kalendertag 3	Kalendertag 4	Kalendertag 5	Kalendertag 6	Kalendertag 7	Kalendertag 8
Tag vor Rammung		Rammtag	Tag 1 nach Rammung	Tag 2 nach Rammung	Tag vor Rammung		Rammtag

Kalendertag 1	Kalendertag 2	Kalendertag 3	Kalendertag 4	Kalendertag 5	Kalendertag 6	Kalendertag 7	Kalendertag 8
Tag vor Rammung		Rammtag	Tag 1 nach Rammung	kein Rammtag			

Kalendertag 1	Kalendertag 2	Kalendertag 3	Kalendertag 4	Kalendertag 5	Kalendertag 6	Kalendertag 7	Kalendertag 8
	Rammtag				Tag vor Rammung		Rammtag

Abb. 1-68: Oben: Bei diesem Beispiel wären die Kalendertage 3 und 8 „Rammtage“, die Tage 1 und 6 würden als „Tag vor der Rammung“ eingestuft. Die Tage 4 und 5 wären „Tag 1 nach Rammung“ und „Tag 2 nach Rammung“. Mitte: Hier würde Tag 3 als „Rammtag“ eingestuft, Tag 5 aber nicht. Tag 1 würde hier als „Tag vor der Rammung“ eingestuft, Tag 4 wäre „Tag 1 nach Rammung“. Unten: Hier würden Tag 2 und Tag 8 als „Rammtag“ eingestuft, Tag 3 nicht. In der Folge würde Tag 6 als „Tag vor der Rammung“ definiert. Dadurch, dass an Tag 3 Rammarbeiten stattfanden, wären Tage nach einer Rammung hier nicht definiert.

Die beiden Hypothesen des Fragenkomplexes 1 wurden unter Verwendung eines H-Tests geprüft. Darüber hinaus wurde im Ergebnisteil zu diesem Komplex die Ausprägung der PP10M/day der untersuchten Tage für Rammungen, die mit und ohne BBC ausgeführt wurden, explorativ anhand von Boxplots verglichen sowie die Gesamtdatenstruktur entlang der Zeitachse visuell überprüft.

Fragenkomplex 2:

In diesem Teil der Datenanalyse wurde bei einer zeitlichen Auflösung von Stunden die Korrelation zwischen i) den an den POD-Messpositionen aufgezeichneten Schweinswal-Detektionsraten und ii) den für die betreffenden Messpositionen rechnerisch ermittelten Immissionspegeln (dB_{SEL}) betrachtet. Um die Störeffekte der Rammarbeiten in Abhängigkeit von der jeweiligen Schallstärke besser abschätzen zu können, wurde für die Fragestellungen 2a bis 2d ein Verfahren gewählt, welches sich an den klassischen BACI-Ansatz (Before-After Control-Impact) anlehnt. Dazu wurde ein Zeitraum vor Beginn der Rammarbeiten definiert, für den keine schallinduzierte Störung angenommen wurde. Die Detektionsrate dieser Zeit wurde mit den Stunden während der Rammphasen (Fragestellung 2a und 2c) bzw. in bestimmten zeitlichen Abständen nach Beendigung der Rammphasen (Fragestellung 2b und 2d) verglichen. Bezüglich Fragestellung 2e zum direkten Vergleich der mit und ohne Schallschutz erfassten Detektionsraten wurden modellierte Daten aus den Analysen zu 2c und 2d miteinander verglichen und auf Unterschiedlichkeit getestet.

Für die Fragestellungen 2a und 2b wurde der gesamte zur Verfügung stehende Datensatz mit allen Rammungen verwendet, zu denen eine Berechnung von Schallpegeln an den jeweiligen POD-Positionen möglich war (Tab. 1.23; Kontrolle für 2a [Zeitklasse „-10 - -2 (R.)“] Unterdatensatz von Kontrolle für 2b, s.u.). Rammungen, an denen nur ein linearer (oder doppelt linearer) Blasenschleier verwendet wurde (nur einseitige Schallminderung) oder bei denen keine Schallmessungen aufgrund von Gerätedefekten o. Ä. vorlagen, wurden von der Analyse ausgeschlossen. Für die Fragestellungen 2c, 2d und 2e wurden aus dem Gesamtdatensatz zwei Unterdatensätze analysiert (Tab. 1.23; Kontrolle für 2c [Zeitklasse „-10 - -2 (n.R.)“] Unterdatensatz von Kontrolle für 2d, s.u.): 1) Daten der Rammungen mit kontinuierlichem Einsatz des Blasenschleiers vom Typ BBC 2; 2) Daten von Rambaustellen, bei denen kein Schallschutzsystem angewendet wurde (Referenz).

Tab. 1.23 ist zu entnehmen, welche Datensätze für die jeweiligen Analysen verwendet wurden. Von den Analysen wurden die Daten der Rambaustellen BW01, BW03, BW24, BW33, BW43, BW55 und BW65 aus den o.e. Gründen ausgeschlossen.

Die ausgewerteten Daten wurden für die Fragestellungen 2a und 2c auf solche Rammereignisse beschränkt, bei denen der Zeitraum zwischen der Beendigung einer Rammphase und dem Beginn der nächsten Rammphase mindestens 32 Stunden betrug. Dieser Zeitraum wurde gewählt, um sicher zu stellen, dass 22 Stunden nach dem Ende einer Rammphase noch mindestens 10 Stunden vor Beginn der nächsten Rammphase vorlagen, ein Zeitraum, innerhalb dessen ein vom Rammschall unbeeinflusstes Verhalten der Schweinswale angenommen werden konnte. In die Festlegung des Zeitraums flossen Ergebnisse des Fragenkomplexes 1 ein (Vergleich von Ramntag, Tag vor den Rammungen und Tagen nach den Rammungen; vgl. Fragenkomplex 1), anhand derer davon ausgegangen werden konnte, dass einen Tag nach Ende der Rammaktivitäten kein negativer Effekt auf die Tiere mehr vorlag.

Aufgrund der linksschiefen Verteilung der PPM/h-Werte (vgl. Abb. 1-65) wurde für diesen Fragenkomplex der neue Parameter $\delta PPM/h$ als abhängige Variable erstellt. Diese Variable wurde aus dem PPM/h-Wert (vgl. Kapitel E.3.1) errechnet, um dem Problem der Zero-Inflation (vgl. Kapitel E.3.1) beim Parameter PPM/h durch Standardisierung zu begegnen. Durch folgende Rechenschritte brauchte die statistische Berechnung nicht speziell an Verteilungen für Datensätze mit Zero-Inflation angepasst werden:

Zunächst wurde die mittlere PPM/h-Detektionsrate innerhalb eines definierten Zeitraums von neun Stunden Länge vor Beginn der Rammphase berechnet (ganze Stunden T_{0-10} bis T_{0-2} ; letztere endete eine Stunde vor Beginn einer Rammphase) und als PPM.s definiert. Der PPM.s-Wert wurde als unbeeinflusst von Rammarbeiten gewertet.

Der Wert $\delta PPM/h$ ergab sich anschließend aus der Differenz zwischen dem PPM.s-Kontrollwert und den PPM/h-Werten aus Zeiten während und nach Rammungen ($\delta PPM/h = PPM/h - PPM.s$).

- $\delta\text{PPM/h} = 0$: Detektionsrate (PPM/h) in dieser Stunde war genauso groß wie der PPM.s-Kontrollwert.
- $\delta\text{PPM/h} < 0$: Detektionsrate in dieser Stunde war geringer als der PPM.s-Wert.
- $\delta\text{PPM/h} > 0$: Detektionsrate in dieser Stunde war höher als der PPM.s-Wert.

Das Ergebnis der Standardisierung ist in Abb. 1-69 exemplarisch für eine Berechnung gemäß Fragestellung 2b bzw. 2d bei Distanzklasse 4 (10 bis 14 km Entfernung zum Rammort) an dem Fundamentstandort BW04 dargestellt: Die schwarze horizontale Linie der unteren Grafik entspricht dem Mittelwert der Detektionsrate des Zeitraumes $T_0 = -10$ bis $T_0 = -2$ vor Beginn der Rammarbeiten in dieser Distanzklasse (= PPM.s). Dieser Wert wurde von den jeweiligen PPM/h-Werten, die diese POD-Station registriert hatte, subtrahiert (= $\delta\text{PPM/h}$). Lag der $\delta\text{PPM/h}$ Wert unter 0, so war die Detektionsrate in dieser Stunde geringer als der Mittelwert der Detektionen dieses PODs vor Beginn der Rammarbeiten. Lag der $\delta\text{PPM/h}$ -Wert hingegen über 0, so war die Schweinswal-Detektionsrate in diesem Stundenzeitraum höher als vor Beginn der Rammarbeiten.

Die Daten wurden für die Fragestellungen 2a bis 2e in sieben 5dB_{SEL} -Schallklassen unterteilt. Jeder Datensatz konnte exakt einer der Schallklassen zugeordnet werden (Tab. 1.23).

Methodisch wurden die erhobenen Daten den ohne Blasenschleier ausgeführten Rammungen (Referenzmessungen), den Experimenten mit den Blasenschleier-Konfigurationen BBC 1 und BBC 2 und den Experimenten mit einer anderen Blasenschleier-Konfiguration (hier nur BBC 2 mit variabler Luftzufuhr) zugeordnet (Tab. 1.23: „Referenz“, „BBC 1“, „BBC 2“, „Other“). Für die Fragestellungen 2a und 2b wurden alle vier Unterdatensätze verwendet, für 2c und 2d hingegen nur die Datensätze „BBC 2“ und „Referenz“.

Zusätzlich wurde für Fragestellung 2a eine feinere Auftrennung in 2dB_{SEL} -Schallklassen vorgenommen (Tab. 1.27), um bezüglich der Auswirkungen der Schallstärke auf das Schweinswalverhalten genauere Aussagen treffen zu können.

Für die Fragestellungen 2b, 2d und 2e wurden die Daten zusätzlich bestimmten Zeitklassen bezüglich der Stunden nach Ende der Rammung zugeordnet. Hierbei wurde eine Unterteilung in 4-Stunden-Klassen vorgenommen. Betrachtet wurden nur die ersten 24 Stunden nach Rammende, so dass insgesamt sechs Zeitklassen vorlagen (Tab. 1.23; zusätzlich zum dort aufgelisteten Vergleichszeitraum vor der Rammung ($T_0 = -10$ bis $T_0 = -2$)).

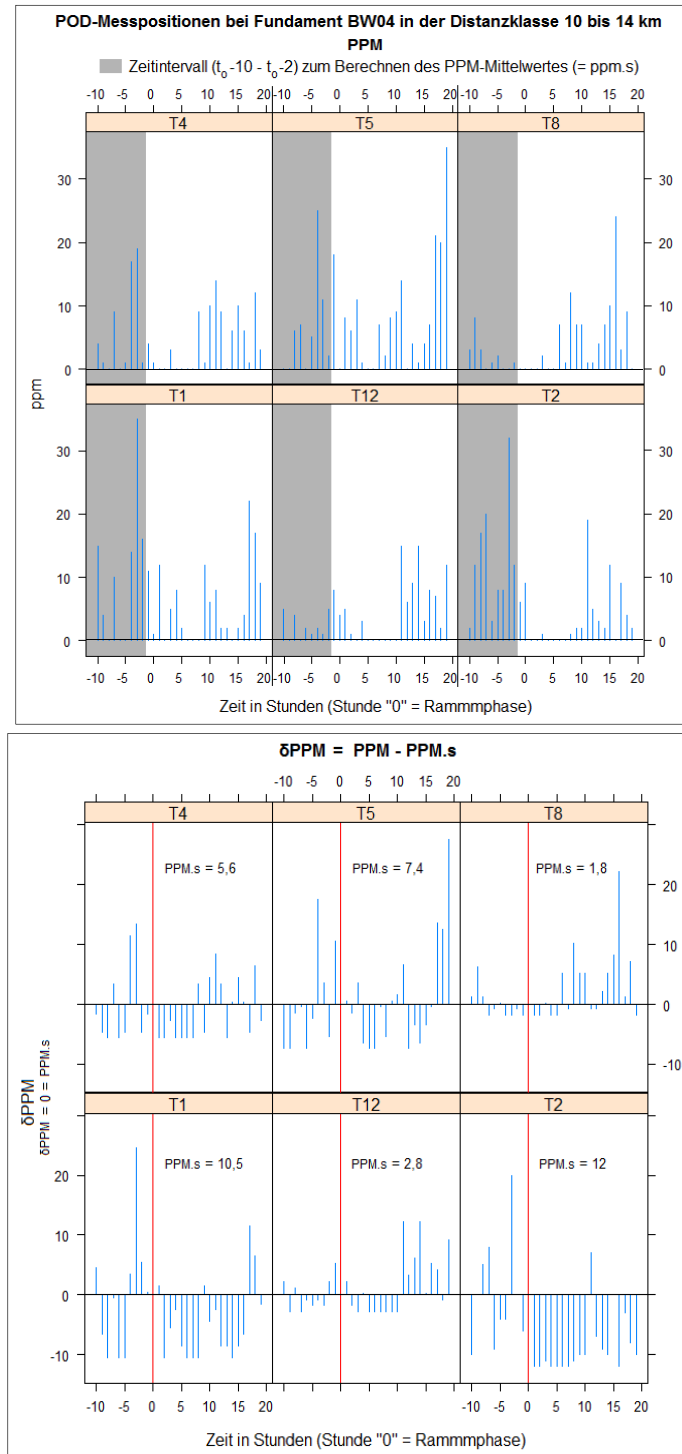


Abb. 1-69: PPM/h-Werte (oben) sowie die daraus errechneten $\delta PPM/h$ -Werte (unten) der POD-Messpositionen T1, T2, T4, T5, T8 und T12 bei der Rammbaustelle BW04. Die POD-Messpositionen lagen in einer Entfernung von 10 bis 14 km zum Rammort. Die POD-Messpositionen lagen in einer Entfernung von 10 bis 14 km zum Rammort. Die rote Linie (untere Abbildung) entspricht der „Stunde 0“, welche den gesamten Zeitraum der Rammphase umfasst (oft länger als eine Stunde). Die PPM.s-Werte sind der PPM-Mittelwert des in der oberen Abbildung grau unterlegten Zeitfensters und werden in der unteren Abbildung auf der Y-Achse durch die $\delta PPM/h$ -Nulllinie (schwarze horizontale Linie in der unteren Grafik) dargestellt.

Tab. 1.23: Anzahl der PPM/h-Datensätze in vier Unterdatensätzen unterschiedlicher Schallschutz-Konfiguration (mit WEA-Fundamentnummern), unterteilt nach 5dB-Schallklassen und Zeitklassen (Zeitklasse „-10--2“ diente der Kontrolle, wo bei für Fragestellungen 2b und 2d Kontrolldatensatz „n.R.“ (= Zeitklassen nach Rammungen), für Fragestellungen 2a und 2c Kontrolldatensatz „R.“ (= Zeitklasse „0“) verwendet wurde' (Gesamtsummen über das jeweils höhere N der beiden Kontrolldatensätze); Zeitklasse „0“ umfasste Stunden, in denen Rammarbeiten stattfanden [Fragestellungen 2a und 2c]; übrige Zeitklassen für Fragestellungen 2b, 2d und 2e).

Konfiguration/ WEA-Fundam.	Zeitklassen (Stunden)	Schallklassen (5dB _{SEL} -Schritte)							Summe
		<135	135-40	140-45	145-50	150-55	155-60	>160	
Referenz: (kein Blasen- schleier) R. & n.R.: BW31, BW35, BW36, BW41, BW46, BW63 Nur n.R.: BW32, BW40	-10 - -2 (n.R.)	74	82	267	384	296	173	95	1371
	-10 - -2 (R.)	72	81	261	342	260	144	90	1250
	0	60	57	195	237	147	92	57	845
	1-4	30	28	108	162	126	75	39	568
	5-8	40	36	144	216	166	100	52	754
	9-12	32	33	112	184	150	91	46	648
	13-16	28	32	92	168	140	84	44	588
	17-20	25	29	83	153	122	72	41	525
	21-24	36	35	121	212	157	97	50	708
	Referenz	325	332	1122	1716	1304	784	424	6007
BBC 1: R. & n.R.: BW26, BW44, BW53 Nur n.R.: BW12, BW42, BW61	-10 - -2 (n.R.)	144	160	128	80	16	16	0	544
	-10 - -2 (R.)	162	180	144	90	18	18	0	612
	0	120	118	84	58	12	14	0	406
	1-4	54	57	48	29	6	6	0	200
	5-8	68	71	56	35	7	7	0	244
	9-12	56	56	32	20	4	4	0	172
	13-16	56	56	32	20	4	4	0	172
	17-20	56	56	32	20	4	4	0	172
	21-24	70	70	40	25	5	5	0	215
	BBC 1	642	664	468	297	60	62	0	2193
BBC 2: R. & n.R.: BW23, BW34, BW47, BW50, BW64 Nur n.R.: BW02, BW04, BW15, BW37, BW54	-10 - -2 (n.R.)	416	336	232	56	56	16	0	1112
	-10 - -2 (R.)	468	378	261	63	63	18	0	1251
	0	266	206	135	33	31	6	0	677
	1-4	156	126	87	21	21	6	0	417
	5-8	188	150	108	28	24	8	0	506
	9-12	168	134	100	28	20	8	0	458
	13-16	152	114	94	24	16	8	0	408
	17-20	136	92	88	20	12	8	0	356
	21-24	170	115	110	25	15	10	0	445
	BBC 2	1704	1315	983	242	202	72	0	4518
Other: (BBC 1 und BBC 2 mit variabler Luftzufuhr) R. & n.R.: BW14, BW48, BW52 Nur n.R.: BW13, BW15, BW25, BW49, BW51, BW62, BW66	-10 - -2 (n.R.)	62	118	72	84	26	34	8	404
	-10 - -2 (R.)	72	136	82	96	30	39	9	464
	0	83	130	57	76	26	28	5	405
	1-4	30	54	30	36	12	15	3	180
	5-8	40	72	40	48	16	20	4	240
	9-12	40	72	40	48	16	20	4	240
	13-16	40	71	40	48	16	20	4	239
	17-20	4	17	24	23	4	8	4	84
	21-24	5	25	30	30	5	10	4	109
	Other	314	577	343	405	125	160	37	1961
Summe		2985	2888	2916	2660	1691	1078	461	14679

Tab. 1.24: Anzahl der PPM/h-Datensätze in den für Fragestellung 2a verwendeten 2dB-Schallklassen; hierfür wurden alle verfügbaren Daten über verschiedene Schallschutz-Konfigurationen gepoolt; Zeitklasse „-10--2“ diente der Kontrolle; Zeitklasse „0“ umfasste Stunden, in denen Rammarbeiten stattfanden.

Zeitkl. (Std.)	Schallklassen (2dB _{SEL} -Schritte)															
	<134	134-36	136-38	138-40	140-42	142-44	144-46	146-48	148-50	150-52	152-54	154-56	156-58	158-60	>160	S
-10 - -2	670	255	364	260	358	275	257	230	219	188	149	77	104	72	99	3577
0	441	190	244	165	195	198	170	168	144	110	86	42	75	43	62	2333
Summe	1111	445	608	425	553	473	427	398	363	298	235	119	179	115	161	5910

Aufgrund spezieller Eigenschaften der Datensätze (mögliche zeitliche und räumliche Autokorrelation, hierarchisches Design) wurden in diesem Fragenkomplex Lineare Gemischte-Effekte-Modelle (LME, Linear Mixed-Effects Models) berechnet. Ein LME ist ein statistisches Modell, das sowohl „Fixed Effects“, als auch „Random Effects“ enthält, also gemischte Effekte. Die in die hier berechneten Modelle eingeflossenen Daten hatten die Form einer hierarchischen Struktur. Unter einem hierarchischen Design bzw. Nested Design versteht man eine Datenstruktur, bei der nicht sämtliche Stufen aller Einfluss-Faktoren auf die abhängige Variable miteinander kombiniert werden können: Im vorliegenden Fall waren beispielsweise die jeweiligen Rammphasen über sechs Monate verteilt; der Faktor Rammphase war somit im Faktor Monat „genestet“. Der Faktor Rammphase stand hierarchisch wiederum über der POD-Station, da nicht bei jeder Rammung alle POD-Messpositionen betrieben wurden. Die POD-Messpositionen wurden ihrerseits mit verschiedenen C-POD-Geräten betrieben, so dass der Faktor POD-Station hierarchisch über dem Faktor C-POD-Gerätenummer stand. Einem solchen hierarchischen Aufbau der Daten konnte durch Einbindung dieser Parameter als Random Effects in die Modelle Rechnung getragen werden und somit der für unsere Fragestellung nicht gewünschte Einfluss dieser Faktoren auf die abhängige Variable herausgerechnet werden.

Je nach Fragestellung des Fragenkomplexes 2 wurde ein separates finales LME-Modell zugrunde gelegt, das sich unter zahlreichen jeweils getesteten Modellen als dasjenige mit der besten Erklärungskraft gemäß AIC (vgl. Kapitel E.3.1) herausstellte.

Die endgültigen LME-Modelle beinhalteten als Fixed Effects entweder die „Schallklasse“ (2a und 2c) oder eine Interaktion der Parameter „Zeit nach Rammung“ und „Schallklasse“ (2b und 2d). Bei den Modellen wurden die Parameter „Monat“, „Fundamentstandort“, „POD-Station“ und „C-POD-Gerätenummer“, welche wie oben beschrieben hierarchisch verschachtelt waren, als Random Effects berücksichtigt (Tab. 1.25).

Tab. 1.25: In den LME-Modellen berücksichtigte Parameter.

Fragestellung	Fixed Effects	Random Effects
2b, 2d (auch Basis für 2e)	Schallklasse (5dB _{SEL}) Zeitklasse (4h)	Monat Fundamentstandort POD-Station C-POD-Gerätenummer
2a, 2c (auch Basis für 2e)	Schallklasse (5dB _{SEL}) Schallklasse (2dB _{SEL}) (nur 2a)	Monat Fundamentstandort POD-Station C-POD-Gerätenummer

Um gegen die zeitliche Autokorrelation der Residuen zu korrigieren, wurde eine angepasste Korrelationsstruktur (CorARMA) in den Modellen berücksichtigt und mittels Ansicht einer Korrelogrammfunktion überprüft. Das Verfahren ARMA (Autoregressive-Moving Average) stammt

aus der Zeitreihen-Statistik und wird verwendet, um aus den Residuen über ein definiertes Intervall bei Mittelung bis zu einem definierten Nachbarwert ein Muster zu ermitteln. Die optimalen Intervall- und Nachbarwerte wurden über eine Evaluierung des AIC-Wertes empirisch ermittelt.

Die aus den Modellen errechneten δ PPM/h-Schätzwerte (Spalte „ δ PPM-Wert“ in den Auswertungstabellen Tab. 1.26 bis Tab. 1.32, Kapitel E.4.1) für die jeweiligen Schall- und/oder Zeitklassen wurden gegen die Schätzwerte von Datensätzen aus Zeiten vor Rammungen getestet. Da die durchgeführten multiplen Vergleiche a priori geplant waren, handelte es sich gemäß statistischer Terminologie um „geplante Kontraste“. Die Summe der paarweisen Kontrastvergleiche in den verwendeten Kontrastmatrizen betrug dabei jeweils immer Null. Somit waren alle durchgeführten geplanten Kontraste statistisch valide und das Signifikanzniveau brauchte nicht hinsichtlich multipler Tests angepasst zu werden.

Um für Fragestellung 2e die aus den Modellen zu den Fragestellungen 2c und 2d errechneten Schätzwerte der Unterdatensätze „BBC 2“ und „Referenz“ (Tab. 1.23) hinsichtlich der einzelnen Zeit- und Schallklassen auf Unterschiede zu testen, wurde ein Wilcoxon-Mann-Whitney-Rangsummentest (zweiseitig, $\alpha = 5\%$) durchgeführt.

Fragestellung 3:

Im letzten Schritt der statistischen Analyse wurde untersucht, ob es nach dem Ende einer Rammphase länger bis zur nächsten Erfassung von Schweinswalen dauerte als dies unter Referenzbedingungen ohne Rammarbeiten der Fall war. Dieses wurde für unterschiedliche Distanz- und Schallklassen getestet.

Bei der Analyse wurde die „Dauer der 1. Wartezeit“ (vgl. Kapitel E.3.1) als abhängige Variable ausgewählt. Diese 1. Wartezeit nach einer Rammung konnte allerdings nicht – wie man es als normale Vorgehensweise erwarten würde – mit dem Mittelwert aller Wartezeiten aus von Rammungen unbeeinflussten Zeiten verglichen werden, da für den Datensatz das sogenannte Bus-Paradoxon zum Tragen kam (Ito et al. 2003, Tougaard et al. 2009). Dieses besagt, dass zufällig auf einem Zeitstrahl gesetzte Punkte mit höherer Wahrscheinlichkeit in einer langen Wartezeit liegen als in einer kurzen Wartezeit. Deshalb wurden die 1. Wartezeiten nach dem Ende einer Rammphase mit zufällig ausgewählten Kontrollwartezeiten aus Perioden ohne Rammtätigkeit verglichen. Da ja der Zeitpunkt des letzten Rammschlags und damit auch der Zeitpunkt der 1. Wartezeit zufällig auf dem Zeitstrahl lag, unterlag sowohl die 1. Wartezeit als auch jede zufällig gesetzte Kontrollwartezeit in einem für den Vergleich herangezogenen Kontrollzeitraum (gleicher Monat und gleiche POD-Station) diesem Paradoxon, was zu einer Eliminierung eines einseitigen Effekts führte. 1. Wartezeit und Kontrollwartezeit konnten also miteinander verglichen werden.

Die Daten wurden für die Analysen verschiedenen Distanzklassen (0-4 km, 4-6 km, 6-8 km, 8-10 km, 10-12 km, 12-14 km, 14-18 km und >18 km) sowie 5dB-Schallklassen (vgl. Tab. 1.23) zugeordnet.

Zur Überprüfung der Nullhypothese wurde ein nicht-parametrischer Wilcoxon-Mann-Whitney-Rangsummentest (zweiseitig, $\alpha = 5\%$) mit Bonferroni-Korrektur angewandt. Dieser Test wurde getrennt nach den oben angegebenen Distanz- und Schallklassen durchgeführt.

E.4 Ergebnisse

E.4.1 Darstellung der Ergebnisse

Die Darstellung der Ergebnisse orientiert sich an der Reihenfolge der Fragenkomplexe, wie sie im Kapitel E.3.3 vorgestellt wurde.

Fragenkomplex 1: Schweinswal-Detektionsraten an Tagen mit Rammarbeiten im Vergleich zu Tagen ohne Rammarbeiten auf Basis von PP10M/day

Von den im Rahmen dieser Untersuchung erhobenen 4.611 POD-Tagen waren nur 24 POD-Tage ohne Schweinswal-Registrierungen. Damit lag der Anteil sogenannter „Schweinswalpositiver Tage“ bei 99,5 %. Unabhängig von anthropogenen Einflüssen wie z.B. Rammarbeiten konnten Schweinswale täglich an fast allen Stationen aufgezeichnet werden. Damit lag ein guter Datensatz vor, um potenzielle Auswirkungen von Rammarbeiten beurteilen zu können. In den Abb. 1-70 und Abb. 1-71 sind beispielhaft die Schweinswal-Detektionsraten in PP10M/day an den jeweiligen Stationen BW_F1 und Pos21_ITAW über den oben genannten Untersuchungszeitraum dargestellt. Die PP10M/day sind in Prozent der maximal möglichen Anzahl an PP10M/day (100% = 144 PP10M/day) angegeben. Die Abbildungen der anderen untersuchten Stationen sind im Anhang aufgeführt (S. 229 bis S. 234). Um Bautätigkeiten zu kennzeichnen, wurden in den Abbildungen die Tage, an denen Rammungen stattfanden, als vertikale Linien dargestellt. Dabei wurde zwischen folgenden drei unterschiedlichen Schallschutzanwendungen unterschieden:

- Rammtage, an denen kein Blasenschleier zum Einsatz kam (schwarze vertikale Linie),
- Rammtage, an denen mit einem Blasenschleier mit verschiedenen Luftmengen gearbeitet wurde (rote vertikale Linie),
- sowie Rammtage, bei denen ein Blasenschleier zum Einsatz kam, bei dem während der gesamten Rammung konstant die gleiche Anzahl Kompressoren (= Luftmenge) verwendet wurde (grüne vertikale Linie).

Grundsätzlich zeigte sich über alle POD-Messpositionen eine kontinuierlich hohe Detektionsrate von Schweinswalen. Obwohl einzelne Stationen über den Datenerfassungszeitraum hinweg deutliche Änderungen in der Detektionsrate aufwiesen (z. B. BWF1: mit maximalen Werten im Februar), so konnte im Mittel über alle Stationen hinweg kein deutlicher Trend erkannt werden (Abb. 1-72, S. 165). Bei mittleren Detektionsraten zwischen 10 % und 40 % PP10M/day über alle Stationen ergab sich eine hohe Erfassungsrate von Schweinswalen zwischen September und März in diesem Gebiet.

Der grafische Vergleich der Detektionsraten von POD-Station BWF1 (Abb. 1-70, S. 163) mit im Mittel 3,5 km Abstand zum jeweiligen Rammort und POD-Station 21_ITAW mit im Mittel 34,3 km Abstand zum jeweiligen Rammort offenbarte keinen augenscheinlich negativen Effekt der Rammarbeiten. Bemerkenswert war, dass der erste deutliche Anstieg der Detektionsrate im Nahbereich von Rammarbeiten an der Position BWF_1 Werte von über 50 % PP10M/day erreichte (16.11.2011, Abb. 1-70). Dies bedeutete, dass an diesem Tag in jedem zweiten 10-Minuten-Intervall mindestens ein Schweinswalsignal registriert wurde. Dieser Anstieg der Detektionsrate fand in einer Phase statt, in der auch mindestens an 8 Tagen gerammt wurde, wobei hier fast ausschließlich ein kontinuierlicher Blasenschleier zum Einsatz kam. Da eine Zunahme der Detektionsraten bei allen POD-Positionen unabhängig von ihrer Distanz zum jeweiligen Rammort zu beobachten war (siehe Abb. 1-70), konnte angenommen werden, dass es in dieser Zeit zu einer Einwanderung von Schweinswalen in das gesamte Seegebiet gekommen war.

Auch im März 2012, als mit 12 Rammungen eine zweite Konzentrationsphase an Rammungen stattfand, konnte in der grafischen Auftragung kein negativer Effekt auf den Faktor PP10M/day erkannt werden (siehe z.B. Abb. 1-72, S 165). Im Mittel über alle Stationen wurden in dieser Zeit sogar die höchsten Detektionsraten mit mehr als 30 % PP10M/day registriert.

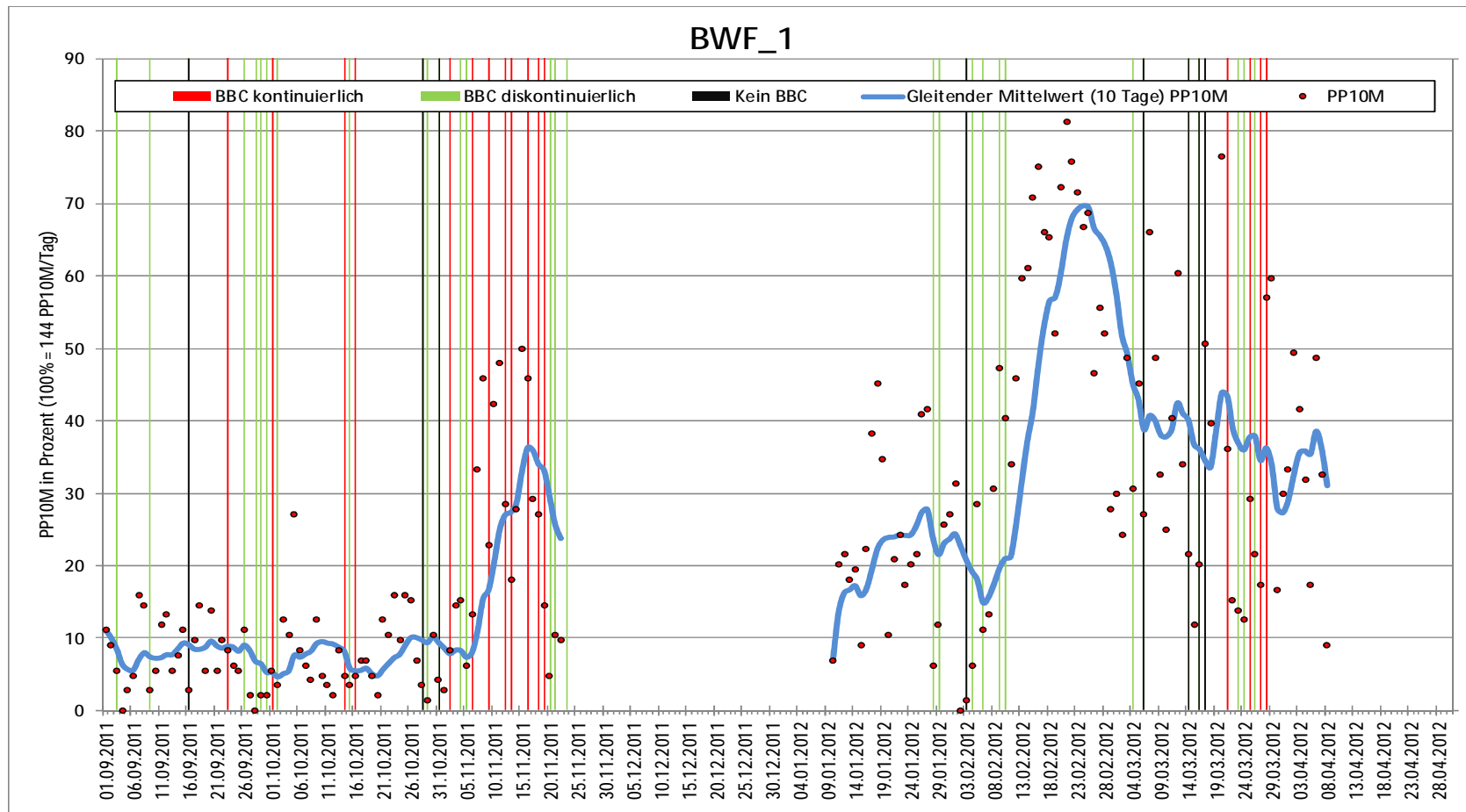


Abb. 1-70: PP10M/day (in Prozent des Tagesmaximums; rote Punkte) der POD Station BWF_1 sowie der gleitende Mittelwert über 10 Tage (blaue Linie). Die jeweilige Bautätigkeit an den einzelnen Tagen ist über vertikale Linien dargestellt. Dabei wurde unterschieden zwischen Blasenschleier aus, Blasenschleier kontinuierlich an und Blasenschleier teilweise an. Im Mittel lag die Station 3,5 km vom jeweiligen Rammort entfernt, die minimale Distanz betrug 0,9 km, die maximale 6,6 km.

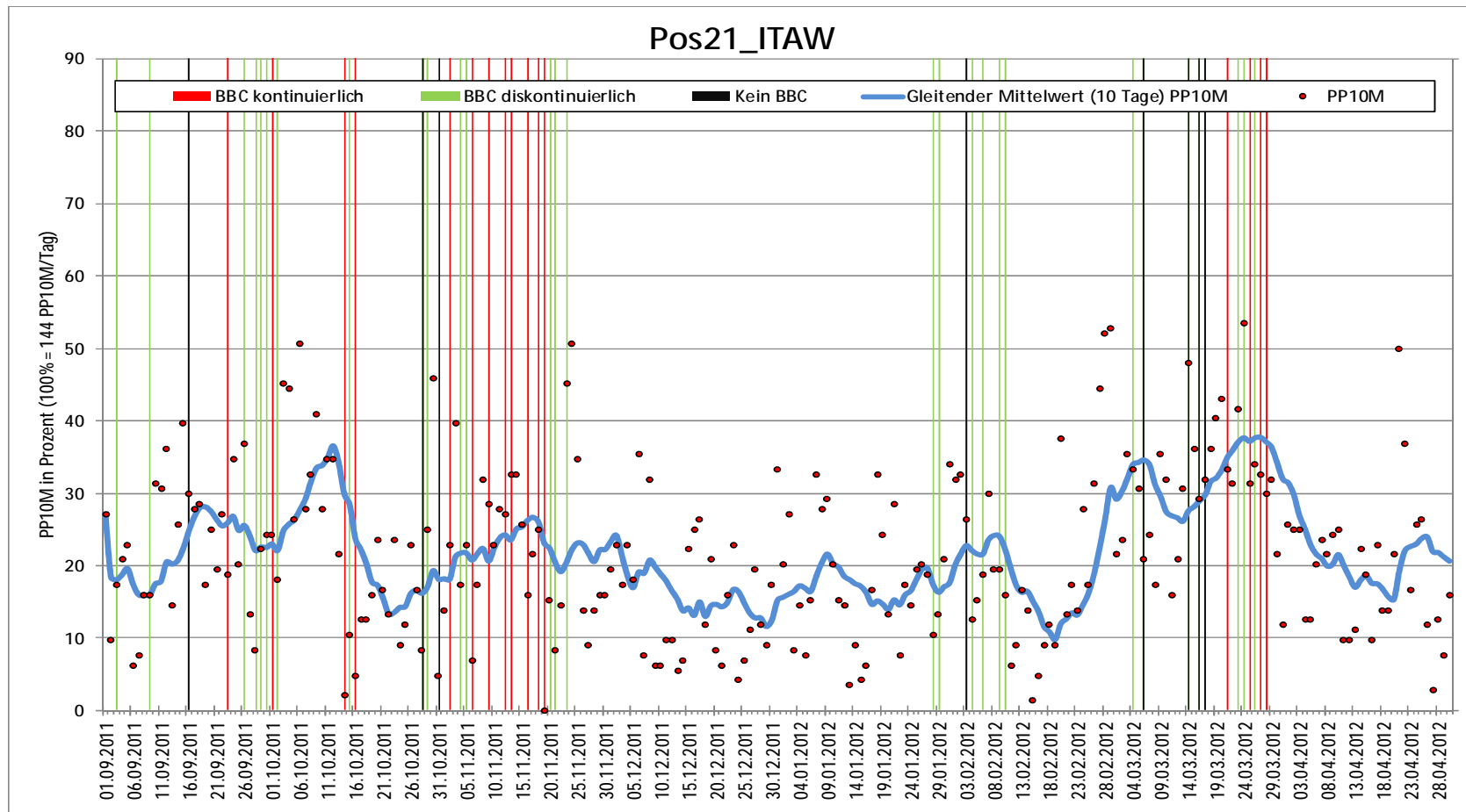


Abb. 1-71: PP10M/day (in Prozent des Tagesmaximums; rote Punkte) der POD Station 21_ITAW sowie der gleitende Mittelwert über 10 Tage (blaue Linie). Die jeweilige Bautätigkeit an den einzelnen Tagen ist über vertikale Linien dargestellt. Dabei wurde unterschieden zwischen Blasenschleier aus, Blasenschleier kontinuierlich an und Blasenschleier teilweise an. Im Mittel lag die Station 34,3 km vom jeweiligen Rammort entfernt, die minimale Distanz betrug 32,2 km, die maximale 37,2 km.

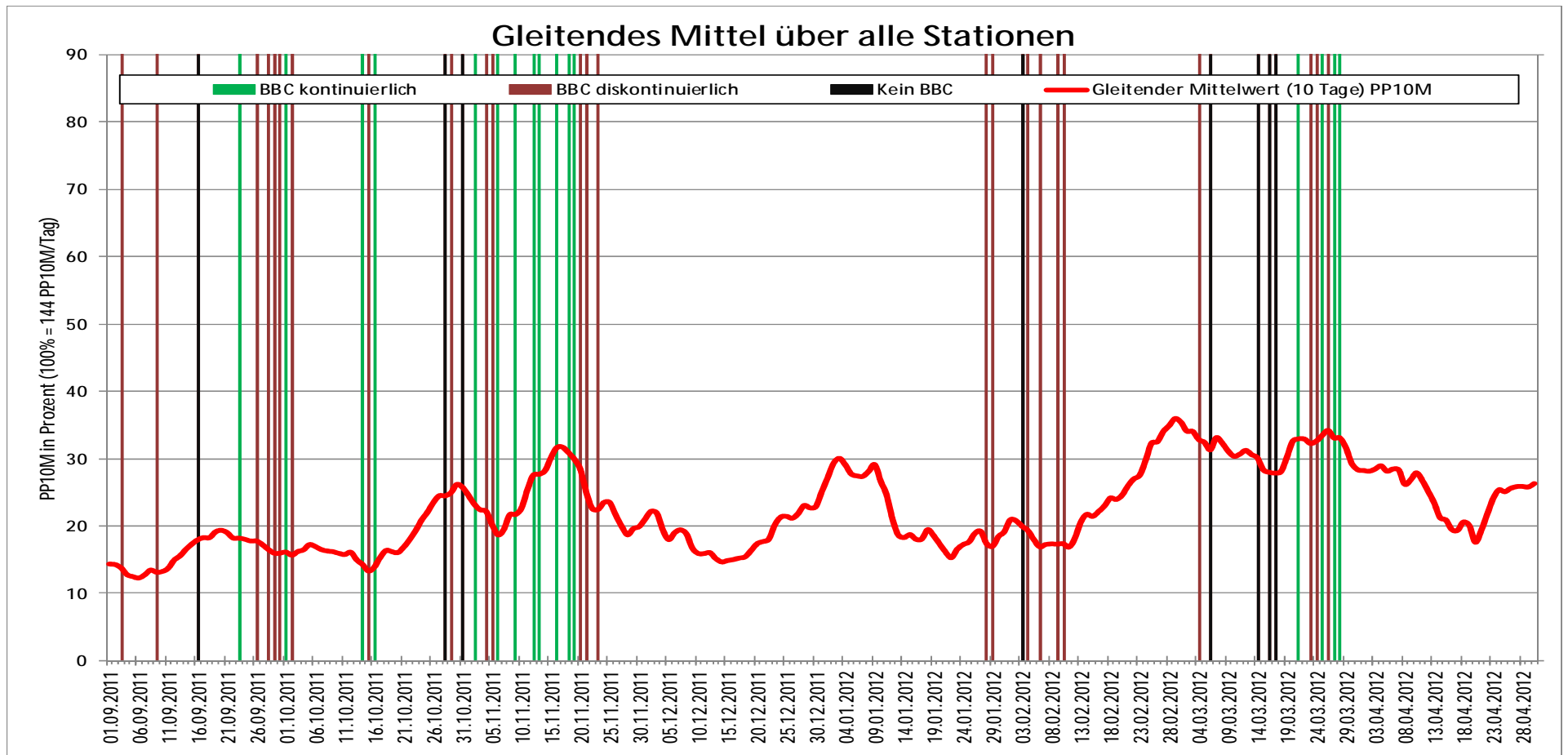


Abb. 1-72: *Gleitendes Mittel in PP10M/day über 10 Tage von allen 26 POD-Messpositionen, deren Daten in die Auswertung dieser Studie einfließen. Die jeweilige Bautätigkeit an den einzelnen Tagen ist über vertikale Linien dargestellt. Dabei wurde unterschieden zwischen Blasenschleier aus, Blasenschleier kontinuierlich an und Blasenschleier teilweise an.*

Zunächst wurde hinsichtlich Fragestellung 1a die Alternativhypothese, welche besagt, dass die Rammarbeiten die täglichen Detektionsraten verminderten, gegen die Nullhypothese eines fehlenden Einflusses der Rammarbeiten getestet.

Dazu wurden in einem ersten Schritt Daten der POD-Messpositionen, die näher als 5 km zu den jeweiligen Rammorten lagen, zusammengefasst und die Detektionsraten für den „Tag vor Rammung“, den „Rammtag“ sowie für „Tag 1 nach Rammung“ und „Tag 2 nach Rammung“ gemittelt und – unterteilt nach i) Rammungen, die ohne Schallschutzmaßnahme durchgeführt wurden und ii) Rammungen, bei denen ein BBC mit konstant maximaler Luftmenge eingesetzt wurde – über Boxplots miteinander verglichen (Abb. 1-73 und Abb. 1-74).

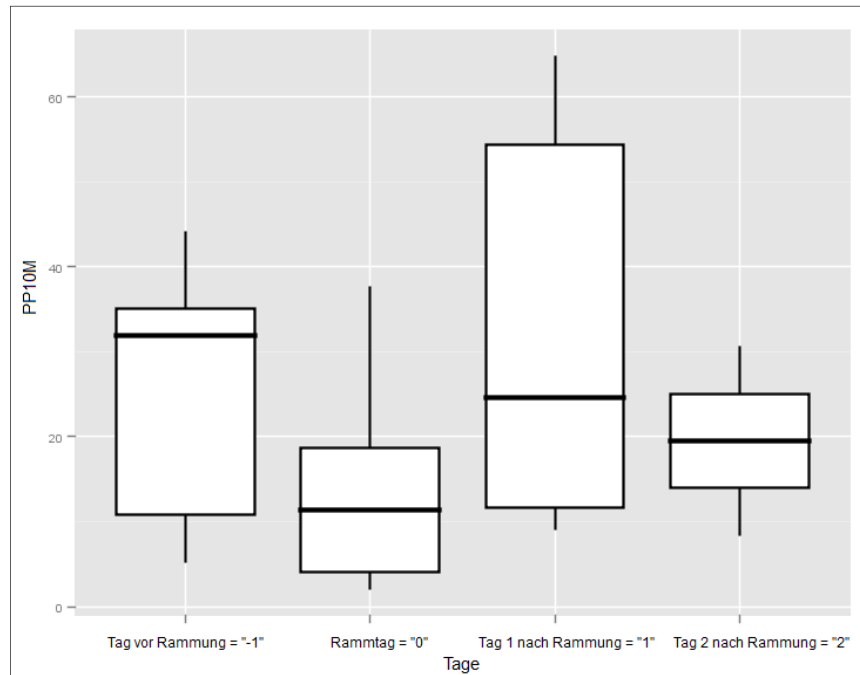


Abb. 1-73: Boxplots der PP10M/day-Werte der POD-Messpositionen innerhalb einer Distanz von 5 km zum jeweiligen Rammort für Rammbaustellen ohne Schallschutzmaßnahme in vier definierten Tages-Klassen.

Bei Baustellen ohne Blasenschleier waren im Mittel die Detektionsraten am „Rammtag“ im Vergleich zum „Tag vor Rammung“, „Tag 1 nach Rammung“ und „Tag 2 nach Rammung“ zwar geringer, jedoch war kein signifikanter Unterschied über alle vier Klassen hinweg feststellbar (H-Test; $\chi^2=1,99$, $df=3$, $p=0,59$). Dies bedeutet, dass auf der Basis täglicher Detektionsraten (PP10M/day) im Nahbereich von unter 5 km zur Baustelle kein statistisch signifikanter Vertreibungseffekt von Schweinswalen während der schallintensiven Rammarbeiten ohne Schallschutz festgestellt werden konnte.

Daher wurde die Nullhypothese der Fragestellung 1a beibehalten, welche besagt, dass kein signifikanter Einfluss von Rammarbeiten ohne Blasenschleier auf die täglichen Schweinswal-Detektionsraten (PP10M/day) vorliegt.

Bei Baustellen mit konstantem Blasenschleier mit maximaler Luftmenge waren die Detektionsraten in PP10M/day zwar auch am „Rammtag“ im Mittel am geringsten (Abb. 1-79), jedoch war kaum ein Unterschied zu den anderen definierten Tagen („Tag vor Rammarbeiten“, „Tag 1 nach Rammung“ sowie „Tag 2 nach Rammung“) erkennbar. Statistisch konnten hier ebenfalls keine Unterschiede zwischen den vier Klassen hinsichtlich der täglichen Detektionsrate nachgewiesen werden (H-Test; $\chi^2=2,24$, $df=3$, $p=0,52$).

Somit wurde die Nullhypothese der Fragestellung 1b beibehalten, welche besagt, dass kein signifikanter Einfluss von Rammarbeiten mit Blasenschleier auf die täglichen Schweinswal-Detektionsraten (PP10M/day) vorliegt.

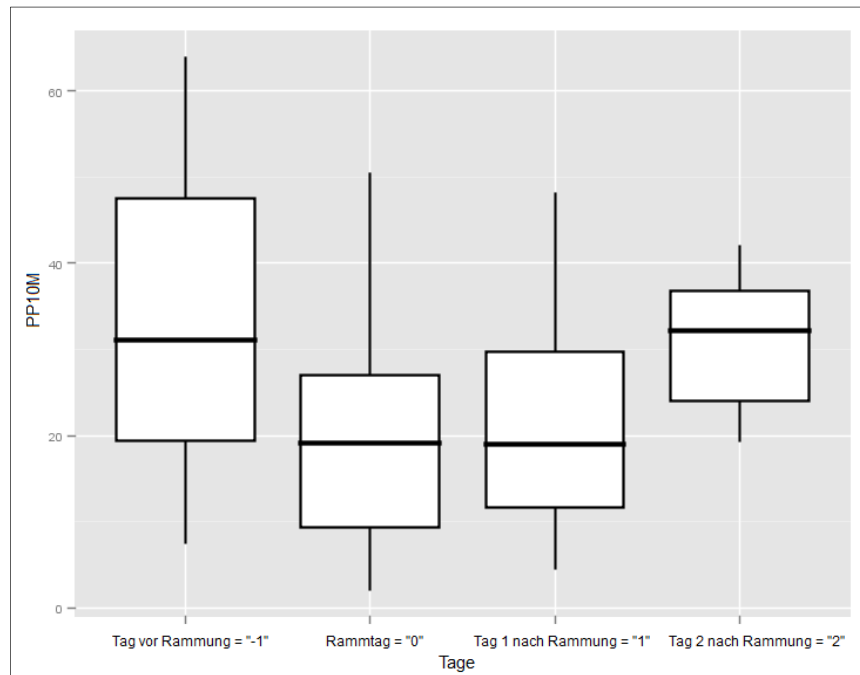


Abb. 1-74: *Boxplots der PP10M/day-Werte der POD-Messpositionen innerhalb einer Distanz von 5 km zu Baustellen mit Blasenschleier mit konstant maximaler Luftmenge in vier definierten Tages-Klassen.*

Unter der Einschränkung, dass im Rahmen dieser Analyse keine weiteren Faktoren betrachtet wurden, die das Vorkommen von Schweinswalen und die Detektionswahrscheinlichkeit hätten bestimmen können (z.B. Saisonalität, POD-spezifische Unterschiede in der Sensitivität), waren auf einer zeitlichen Skala von Tagen mögliche Verteilungseffekte von Schweinswalen durch Rammarbeiten in dieser Studie nicht feststellbar, wobei aber auch die theoretische Möglichkeit bestand, dass ein tatsächlicher Effekt durch nicht gemessene Faktoren ausgeglichen wurde. Falls es Verteilungseffekte gab, so hatten die Tiere nach 24 Stunden das Gebiet wieder in ähnlicher Präsenz genutzt wie am Tag vor den Rammarbeiten.

Fragestellung 2a: Einfluss der Rammschallimmissionen auf die Anwesenheit von Schweinswalen während der Rammung (gesamter Datensatz).

Um mittels eines ausreichend großen Datensatzes Aussagen über einen möglichen Störeffekt von Impulsschall auf Schweinswale treffen zu können, wurden in diesem Ansatz zunächst die Daten von Fundamenten mit geschlossenem und konstant betriebem Blasenschleier, von weiteren geschlossenen nicht kontinuierlich betriebenen Blasenschleierkonfigurationen und von sechs Fundamenten ohne Schallminderung berücksichtigt (Tab. 1.23) in Schallklassen von 5 dB_{SEL} und 2 dB_{SEL} Klassenweite (SEL₅₀) unterteilt und jeweils mit einer mittleren Detektionsrate vor Beginn der Rammarbeiten verglichen. Der untersuchte Parameter war der δ PPM/h-Wert.

Hinsichtlich der 5 dB_{SEL}-Schallklassen ergaben die LME-basierten Berechnungen signifikant geringere Schweinswal-Detektionsraten während der Rammungen im Vergleich zur Detektionsrate vor Beginn der Rammarbeiten für die Schallklassen von >160 dB_{SEL} bis hinab zu 145-150 dB_{SEL} (vgl. Tab. 1.26 sowie Abb. 1-75). Erst die Schallklasse 140-145 dB_{SEL} unterschied sich

nicht mehr signifikant von der Detektionsrate vor Beginn der Bauarbeiten. Insgesamt war im Wertebereich zwischen den Schallklassen $<135 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ und $>160 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ eine negative Korrelation zwischen Schallpegel (Lautstärke) und den $\delta\text{PPM}/\text{h}$ -Werten zu erkennen. Hierbei folgte die Stärke eines Vertreibungseffektes bei Zunahme der Störwirkung (d.h. je lauter der entsprechende Rammerschall war) einem schwach sigmoiden Verlauf. Dies war insofern plausibel, als es sowohl einen Bereich geben sollte, in dem keine Störreaktion ausgelöst worden wäre, als auch einen Bereich, in dem keine weitere Zunahme der Störreaktion mehr zu beobachten gewesen wäre. Im Wertebereich zwischen $135\text{-}140 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ und $150\text{-}155 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ war dabei die Abnahme der $\delta\text{PPM}/\text{h}$ -Werte am stärksten. Hier schien ein nahezu linearer Zusammenhang zu bestehen, was vor dem Hintergrund der logarithmischen dB-Skala einer exponentiellen Zunahme des Schalldrucks entsprach. Der stärkste Vertreibungseffekt konnte bei Schallwerten von über $160 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ festgestellt werden.

Tab. 1.26: $\delta\text{PPM}/\text{h}$ -Werte während der Rammstunden in verschiedenen Schallklassen. Angegeben sind Anzahl der Datensätze (N), Standardfehler (Std.Fehler), Freiheitsgrade (DF), die Werte eines t-Tests (t-Wert) und die dazu gehörigen Wahrscheinlichkeiten eines signifikanten Unterschiedes (p-Werte). Es sind alle Daten, d.h. Baustellen ohne und mit Blasenschleier (BBC 1, BBC 2 und Other) berücksichtigt. Einstufung der Signifikanzen: - = nicht signifikant, * = signifikant, ** = hoch signifikant und *** = höchst signifikant.

Schallklasse (dB_{SEL})	N	δPPM -Wert	Std. Fehler	DF	t-Wert	p-Wert	Sign.
<135	529	0,308393	0,8116807	381	0,379943	0,7042	-
135-140	511	-0,087516	0,8032668	381	-0,10895	0,9133	-
140-145	471	-1,266326	0,8034774	381	-1,576057	0,1158	-
145-150	404	-2,516564	0,8214662	381	-3,063503	0,0023	**
150-155	216	-3,735598	0,930686	381	-4,013811	0,0001	***
155-160	140	-4,126707	1,050132	381	-3,929703	0,0001	***
>160	62	-4,85539	1,4123131	381	-3,437899	0,0007	***

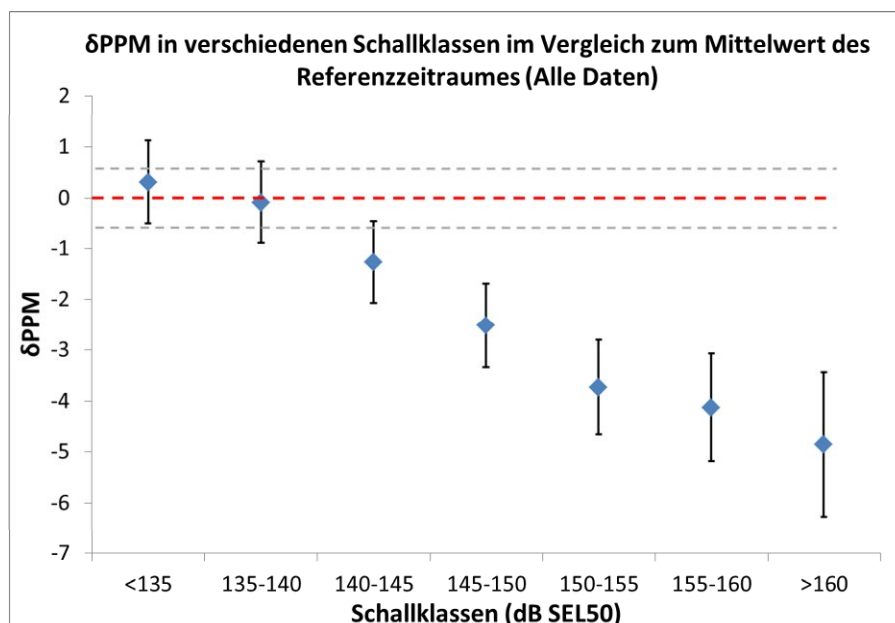


Abb. 1-75: Schallabhängigkeit der Detektionsrate während Rammungen ($\delta\text{PPM}/\text{h}$) im Vergleich zur Detektionsrate vor Beginn von Rammungen. in 5 dB-Klassen. Dargestellt sind die $\delta\text{PPM}/\text{h}$ -Werte und Standardfehler gegen die mittlere Detektionsrate des Vergleichszeitraums (rote gestrichelte Null-Linie) und deren Standardfehler (graue gestrichelte Linien).

Für die 5 dB_{SEL}-Schallklassen unterschied sich die Schweinswal-Detektionsrate der höchsten vier Schallklassen (ab 145 dB_{SEL}) nicht signifikant von der mittleren Detektionsrate des Vergleichszeitraums. Über alle Rammungen hinweg war die Schweinswal-Detektionsrate ab einer Schallimmission von 145 dB_{SEL} signifikant niedriger im Vergleich zur mittleren Rate, die in einem Zeitraum vor dem jeweiligen Rammbeginn ermittelt wurde.

Um die Grenze, ab wann kein signifikanter Vertreibungseffekt mehr erkannt werden konnte, genauer definieren zu können, wurde der Gesamtdatensatz in einem nächsten Schritt in 2 dB_{SEL}-Klassen eingeteilt und das gleiche Modell berechnet (Tab. 1.27, Abb. 1-76). Es bestätigte sich hier die sigmoid abnehmende Störungsintensität mit abnehmendem Schallpegel. Für die lautesten neun Schallklassen bis >160 dB_{SEL} war die Detektionsrate signifikant niedriger als die Durchschnittsrate im Vergleichszeitraum. Die letzte Schallklasse davor, die sich noch nicht signifikant in ihrer Detektionsrate vom Vergleichszeitraum vor Beginn der Rammung unterschied, lag bei 142-144 dB_{SEL}. Ab dieser Schallklasse konnte demnach statistisch ein Vertreibungseffekt (reduzierte Häufigkeit) nachgewiesen werden.

Tab. 1.27: δ PPM/h-Werte während der Rammstunden in verschiedenen Schallklassen (2 dB_{SEL}-Schritte). Angegeben sind u.a. Anzahl der Datensätze (N), Standardfehler sowie die p-Werte. Hier sind alle Daten, d.h. Baustellen ohne und mit Blasenschleier (BBC 1, BBC 2 und Other) berücksichtigt. Einstufung der Signifikanzen: - = nicht signifikant, * = signifikant, ** = hoch signifikant und *** = höchst signifikant.

Schallklasse	N	δ PPM-Wert	Std. Fehler	DF	t-Wert	p-Wert	Sign.
<134	441	0,397529	0,758	353	0,52417	0,6005	-
134-136	190	0,305499	0,935	353	-0,0984	0,9217	-
136-138	244	-0,130701	0,886	353	-0,5964	0,5513	-
138-140	165	-0,194869	0,965	353	-0,6138	0,5397	-
140-142	195	-0,665459	0,914	353	-1,1636	0,2454	-
142-144	198	-0,556823	0,926	353	-1,0303	0,3036	-
144-146	170	-1,848264	0,965	353	-2,3264	0,0206	*
146-148	168	-2,596151	0,988	353	-3,0292	0,0026	**
148-150	144	-3,220052	1,006	353	-3,5962	0,0004	***
150-152	110	-3,171216	1,135	353	-3,1455	0,0018	**
152-154	86	-4,218632	1,222	353	-3,7772	0,0002	***
154-156	42	-3,963723	1,629	353	-2,6766	0,0078	**
156-158	75	-3,995374	1,324	353	-3,3186	0,001	***
158-160	43	-4,25753	1,599	353	-2,9109	0,0038	**
>160	62	-4,766103	1,407	353	-3,6703	0,0003	***

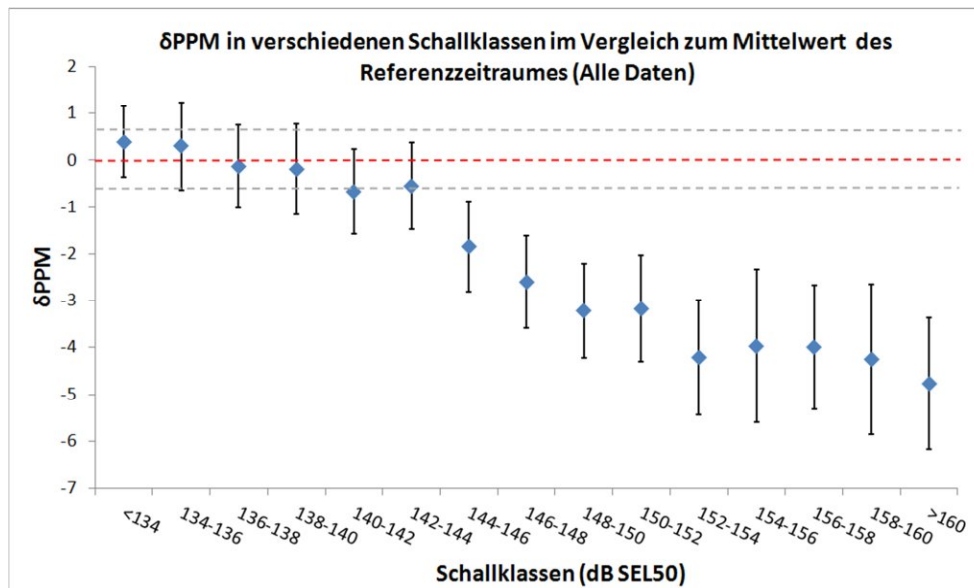


Abb. 1-76: Schallabhängigkeit der Detektionsrate während Rammungen ($\delta\text{PPM/h}$) im Vergleich zur Detektionsrate vor Beginn von Rammungen in 2 dB-Klassen. Dargestellt sind die $\delta\text{PPM/h}$ -Werte inklusive Standardfehler gegen den mittlere Detektionsrate des Vergleichszeitraums (rote gestrichelte Null-Linie) und deren Standardfehler (graue gestrichelte Linien).

Fragestellung 2b: Unterscheiden sich die Detektionsraten nach den Rammarbeiten von den Detektionsraten des Vergleichszeitraums vor der Rammung (gesamter Datensatz)? Abb. 1-77 zeigt die Ergebnisse der Detektionsraten in den verschiedenen Zeit- und Schallklassen im Vergleich zur Detektionsrate im Vergleichszeitraum vor Beginn der jeweiligen Rammung für den gesamten Datensatz (Baustellen mit und ohne Blasenschleier).

In den leisesten drei Schallklassen ($<135 \text{ dB}_{\text{SEL}}$, $135-140 \text{ dB}_{\text{SEL}}$, $140-145 \text{ dB}_{\text{SEL}}$) waren die zeitlichen Muster heterogen und schwer interpretierbar. Vermutlich kam es zur Überlagerung verschiedener schwächerer Effekte: i) wanderungs- oder phänologiebedingte Zu- bzw. Abnahme der Detektionsraten im Zeitraum von Tagen, welche zu allgemein leicht unterschiedlichen Raten zwischen $\delta\text{PPM/h}$ - und Referenzwerten führten; ii) ungleichmäßige Verteilung der Rammdaten – und damit der phänologischen Effekte – hinsichtlich der Schallklassen; iii) Zufallseffekte. So machte es beispielsweise für die Schallklasse $<135 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ wenig Sinn, signifikante Unterschiede in der ersten Zeitklasse (1-4 Stunden) mit Rammschalleffekten zu erklären, wenn solche gleichermaßen in der letzten Zeitklasse (21-24 Stunden), aber nicht dazwischen vorlagen, und wenn zudem in der Schallklasse von $135-140 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ in der ersten Zeitklasse keine signifikanten Unterschiede vorlagen.

Jedoch bildete sich ab der Schallklasse von $145-150 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ ein stärker werdendes, konsistentes Muster heraus, welches mit großer Wahrscheinlichkeit auf zunehmende Rammschalleffekte zurückzuführen war. Gegenüber diesen traten die für die leiseren Schallklassen genannten schwächeren Effekte i-iii immer mehr in den Hintergrund.

Bei den drei lautesten Schallklassen ($>160 \text{ dB}_{\text{SEL}}$, $155-160 \text{ dB}_{\text{SEL}}$, $150-155 \text{ dB}_{\text{SEL}}$) schließlich nahm die Detektionsrate pro Zeitklasse graduell mindestens bis zur Zeitklasse 17-20 Stunden nach Ende einer Rammphase zu, wobei sich die Detektionsraten der Zeitklasse 13-16 Stunden nicht mehr signifikant vom Vergleichszeitraum unterschieden. In diesen drei höchsten Schallklassen konnte in der letzten Zeitklasse (21-24 Stunden) sogar eine signifikant höhere Detektionsrate im Vergleich zum Zeitraum vor Beginn der Rammung festgestellt werden. Bei der lautesten Schallklasse von $>160 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ lagen in den Stunden 1-4 nach Rammungen mit weniger als $-7 \delta\text{PPM/h}$ die mit Abstand geringsten Detektionsraten vor, gleichbedeutend mit einer fast völligen Abwesenheit von Schweinswalen.

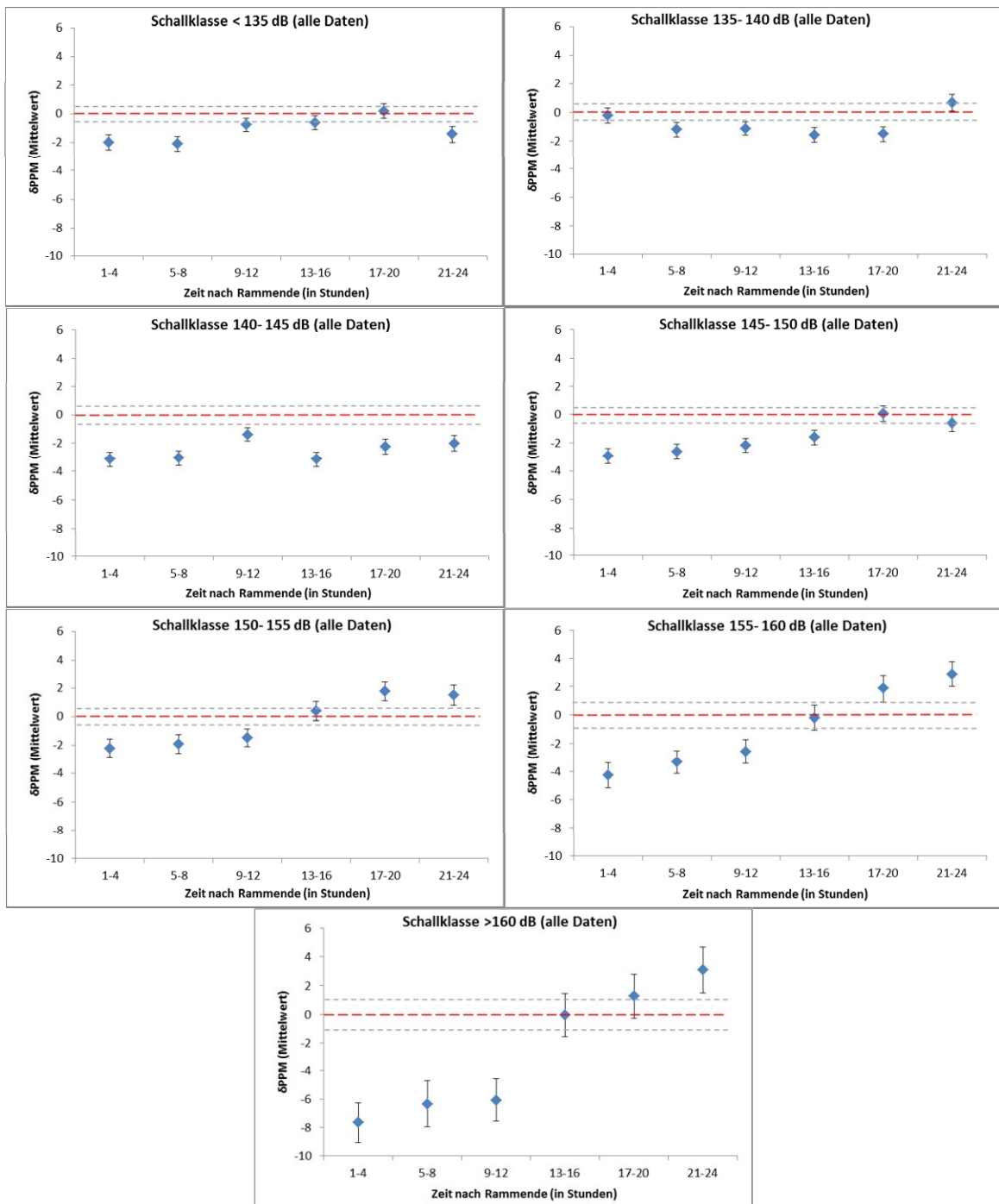


Abb. 1-77: Darstellung der $\delta PPM/h$ -Werte (inklusive Standardfehler) in den Stunden nach Rammende in den einzelnen Schallklassen (alle Datensätze). Zusätzlich aufgetragen ist der δPPM -Mittelwert aus dem Vergleichszeitraum (rote Null-Linie) und dessen Standardfehler (gestrichelte graue Linien).

Tab. 1.28: Vergleich der δ PPM/h-Werte aus den einzelnen Schallklassen und Zeitklassen nach Rammende mit dem Wert des Vergleichszeitraums. Hierfür wurden alle Datensätze verwendet (Baustellen mit und ohne Blasenschleier). Teststatistik ist der z-Wert; angegeben ist hierfür die Wahrscheinlichkeit, dass die Nullhypothese beibehalten werden kann ($Pr(>|z|)$). Einstufung der Signifikanzen: - = nicht signifikant, * = signifikant, ** = hoch signifikant und *** = höchst signifikant.

Schallklasse (5dB _{SEL})	Vergleich	N	δ PPM-Wert	Std. Fehler	z_Wert	Pr(> z)	Sign.
<135	Stunde 1-4 mit Referenzzeit	270	-2,0023	0,50628	-3,955	7,66E-05	***
	Stunde 5-8 mit Referenzzeit	336	-2,09585	0,46782	-4,48	7,46E-06	***
	Stunde 9-12 mit Referenzzeit	296	-0,76831	0,49153	-1,563	0,118029	-
	Stunde 13-16 mit Referenzzeit	276	-0,62369	0,50668	-1,231	0,218352	-
	Stunde 17-20 mit Referenzzeit	221	0,19516	0,54952	0,355	0,722478	-
	Stunde 21-24 mit Referenzzeit	281	-1,43288	0,50694	-2,827	0,004706	**
135-140	Stunde 1-4 mit Referenzzeit	265	-0,21771	0,50723	-0,429	0,667759	-
	Stunde 5-8 mit Referenzzeit	329	-1,20777	0,47116	-2,563	0,010366	*
	Stunde 9-12 mit Referenzzeit	295	-1,14122	0,49667	-2,298	0,021577	*
	Stunde 13-16 mit Referenzzeit	273	-1,58063	0,5126	-3,084	0,002045	**
	Stunde 17-20 mit Referenzzeit	194	-1,52345	0,58518	-2,603	0,00923	**
	Stunde 21-24 mit Referenzzeit	245	0,65113	0,5416	1,202	0,229273	-
140-145	Stunde 1-4 mit Referenzzeit	273	-3,15976	0,51163	-6,176	6,58E-10	***
	Stunde 5-8 mit Referenzzeit	348	-3,06525	0,47031	-6,518	7,15E-11	***
	Stunde 9-12 mit Referenzzeit	284	-1,3988	0,51017	-2,742	0,006109	**
	Stunde 13-16 mit Referenzzeit	258	-3,16511	0,53286	-5,94	2,85E-09	***
	Stunde 17-20 mit Referenzzeit	227	-2,24774	0,56025	-4,012	6,02E-05	***
	Stunde 21-24 mit Referenzzeit	301	-2,0143	0,5132	-3,925	8,67E-05	***
145-150	Stunde 1-4 mit Referenzzeit	248	-2,92716	0,53763	-5,445	5,19E-08	***
	Stunde 5-8 mit Referenzzeit	327	-2,62483	0,49198	-5,335	9,54E-08	***
	Stunde 9-12 mit Referenzzeit	280	-2,18732	0,52504	-4,166	3,10E-05	***
	Stunde 13-16 mit Referenzzeit	260	-1,61922	0,54566	-2,967	0,003003	**
	Stunde 17-20 mit Referenzzeit	216	0,04583	0,58134	0,079	0,937166	-
	Stunde 21-24 mit Referenzzeit	292	-0,63362	0,52782	-1,2	0,229963	-
150-155	Stunde 1-4 mit Referenzzeit	165	-2,20019	0,67618	-3,254	0,001139	**
	Stunde 5-8 mit Referenzzeit	213	-1,89871	0,62247	-3,05	0,002286	**
	Stunde 9-12 mit Referenzzeit	190	-1,46933	0,65248	-2,252	0,024327	*
	Stunde 13-16 mit Referenzzeit	176	0,39429	0,67706	0,582	0,560326	-
	Stunde 17-20 mit Referenzzeit	142	1,79354	0,72309	2,48	0,013124	*
	Stunde 21-24 mit Referenzzeit	182	1,50383	0,68128	2,207	0,027288	*
155-160	Stunde 1-4 mit Referenzzeit	102	-4,2742	0,89215	-4,791	1,66E-06	***
	Stunde 5-8 mit Referenzzeit	135	-3,35713	0,8172	-4,108	3,99E-05	***
	Stunde 9-12 mit Referenzzeit	123	-2,58098	0,84748	-3,045	0,002323	**
	Stunde 13-16 mit Referenzzeit	116	-0,20761	0,87698	-0,237	0,812862	-
	Stunde 17-20 mit Referenzzeit	92	1,87032	0,95816	1,952	0,050938	-
	Stunde 21-24 mit Referenzzeit	122	2,90517	0,87874	3,306	0,000946	***
>160	Stunde 1-4 mit Referenzzeit	42	-7,66653	1,61361	-4,751	2,02E-06	***
	Stunde 5-8 mit Referenzzeit	56	-6,34884	1,48291	-4,281	1,86E-05	***
	Stunde 9-12 mit Referenzzeit	50	-6,0902	1,51976	-4,007	6,14E-05	***
	Stunde 13-16 mit Referenzzeit	48	-0,0674	1,54355	-0,044	0,965169	-
	Stunde 17-20 mit Referenzzeit	45	1,24818	1,58435	0,788	0,430805	-
	Stunde 21-24 mit Referenzzeit	54	3,07817	1,53981	1,999	0,045602	*

Die Schweinswal-Detektionsraten waren in den frühesten drei Zeitklassen (1.-12. Stunde nach Rammende) bei nahezu allen Schallklassen (außer 135-140 dB_{SEL}, Stunde 1-4) signifikant geringer als die Raten im Vergleichszeitraum. Ab der 13. Stunde ergab sich ein heterogeneres Bild mit z.T. sogar signifikant höheren Detektionsraten in den lautesten beiden Schallklassen. Über alle sieben Schallklassen hinweg wurde das Ausgangsniveau der Detektionsrate im Mittel (Median) ab der 13. Stunde nach Rammende erreicht.

Fragestellung 2c: Einfluss des Rammschalls auf die Anwesenheit von Schweinswalen während Rammung ohne Schallschutz versus Rammungen mit Blasenschleier BBC 2?

Baustellen ohne Schallschutz

Die Berechnung mittels LME zeigte bei Baustellen, bei denen kein Großer Blasenschleier eingesetzt wurde, ab der Schallklasse 145-150 dB_{SEL} eine signifikant niedrigere Schweinswal-Detektionsrate während der Rammungen im Vergleich zur Detektionsrate vor Beginn der Rammarbeiten (vgl. Tab. 1.29 sowie Abb. 1-78).

Die Schweinswal-Detektionsrate der Schallklasse 140-145 dB_{SEL} war nicht signifikant verschieden von der Detektionsrate vor Beginn der Bauarbeiten. Von Schallklasse 135-140 dB_{SEL} bis Klasse 145-150 dB_{SEL} war ein fast linear abnehmender Gradient zu beobachten (Abb. 1-78), der in den folgenden Schallklassen etwas abflachte. Der stärkste Effekt konnte bei Schallwerten von >160 dB_{SEL} festgestellt werden.

*Tab. 1.29: δ PPM/h-Werte während der Rammstunden in verschiedenen Schallklassen. Angegeben sind u.a. Anzahl der Datensätze (N), Standardfehler sowie die p-Werte. Hier sind die Daten der Baustellen ohne Blasenschleier dargestellt. Einstufung der Signifikanzen: - = nicht signifikant, * = signifikant, ** = hoch signifikant und *** = höchst signifikant.*

Schallklasse	N	δ PPM-Wert	Std. Fehler	DF	t-Wert	p-Wert	Sign.
<135	60	0,151118	1,492608	145	0,101244	0,9195	-
135-140	57	2,403001	1,4792	145	1,624528	0,1064	-
140-145	195	-0,731156	1,161641	145	-0,629416	0,5301	-
145-150	237	-2,957521	1,119487	145	-2,641854	0,0092	**
150-155	147	-3,656664	1,177573	145	-3,105255	0,0023	**
155-160	92	-4,264752	1,281656	145	-3,327533	0,0011	**
>160	57	-4,975929	1,458047	145	-3,412736	0,0008	***

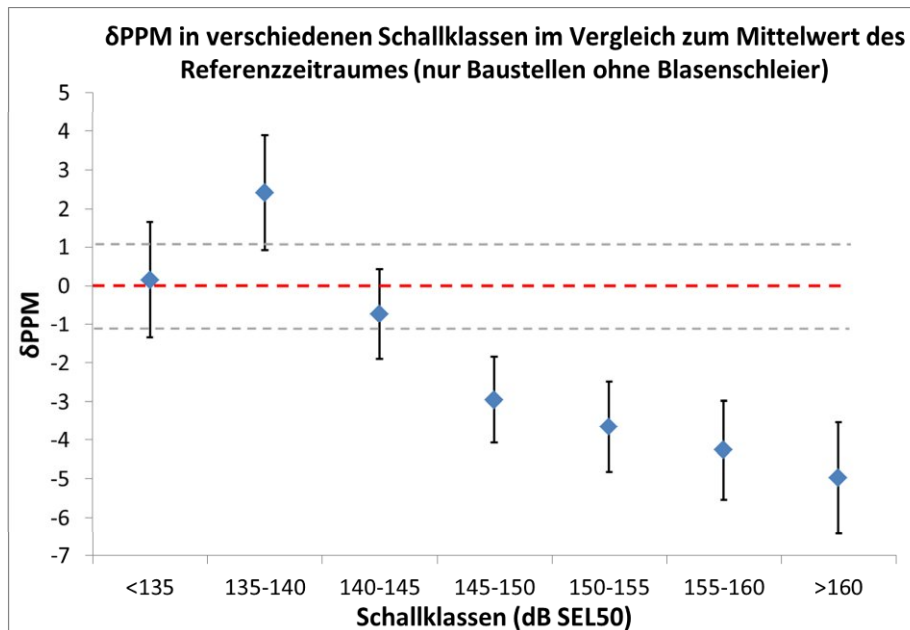


Abb. 1-78: Schallabhängigkeit der Detektionsrate während Rammungen ($\delta\text{PPM}/h$) im Vergleich zur Detektionsrate vor Beginn von Rammungen in 5 dB-Klassen. Dargestellt sind die $\delta\text{PPM}/h$ -Werte inklusive Standardfehler gegen die mittlere Detektionsrate des Vergleichszeitraums (rote gestrichelte Linie) und deren Standardfehler (graue gestrichelte Linien).

Bei Baustellen ohne Blasenschleier war die Schweinswalddichte ab einer Schallimmission von 145 dB_{SEL} signifikant niedriger als im Vergleich zur mittleren Dichte, die in einem Zeitraum vor Rammbeginn ermittelt wurde.

Baustellen mit BBC 2

Bei Baustellen, um die herum der Große Blasenschleier mit der Konfiguration BBC 2 eingesetzt wurde, zeigte nur die Schallklasse 150-155 dB_{SEL} eine signifikant niedrigere Schweinswalddetektionsrate während der Rammungen im Vergleich zur Detektionsrate vor Beginn der Ramarbeiten (vgl. Tab. 1.30 sowie Abb. 1-79). Allerdings waren aufgrund der effektiven Schalldämmung durch den Blasenschleier in der Schallklasse 155-160 dB_{SEL} nur wenige Datensätze ($N = 6$) und in der Schallklasse $> 160 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ gar keine Daten mehr vorhanden. Aus diesem Grund lassen sich auch keine Aussagen über diese beiden Schallklassen machen.

Die Detektionsrate in der Schallklasse 145-150 dB_{SEL} unterschied sich nicht signifikant von der vor Beginn der Bauarbeiten. Von Schallklasse 140-145 dB_{SEL} bis Klasse 150-155 dB_{SEL} war ein abnehmender Trend zu beobachten (Abb. 1-79), der aber aufgrund der weiten Fehlerbalken nur schwach begründet war.

Tab. 1.30: $\delta\text{PPM}/h$ -Werte während der Rammstunden in verschiedenen Schallklassen. Angegeben sind u.a. Anzahl der Datensätze (N), Standardfehler sowie die p -Werte. Hier sind die Daten der Baustellen mit Blasenschleier (BBC 2) dargestellt. Einstufung der Signifikanzen: - = nicht signifikant, * = signifikant, ** = hoch signifikant und *** = höchst signifikant.

Schallklasse	N	δPPM -Wert	Std. Fehler	DF	t-Wert	p-Wert	Sign.
<135	266	-0,442848	1,458651	107	-0,3036011	0,762	-
135-140	206	-0,882333	1,507547	107	-0,585277	0,5596	-
140-145	135	-1,099999	1,629528	107	-0,6750417	0,5011	-
145-150	33	-2,812063	2,283715	107	-1,2313546	0,2209	-
150-155	31	-4,888006	2,320998	107	-2,1059927	0,0375	*
155-160	6	-3,918752	4,778587	107	-0,820065	0,414	-
>160	0	-	-	-	-	-	-

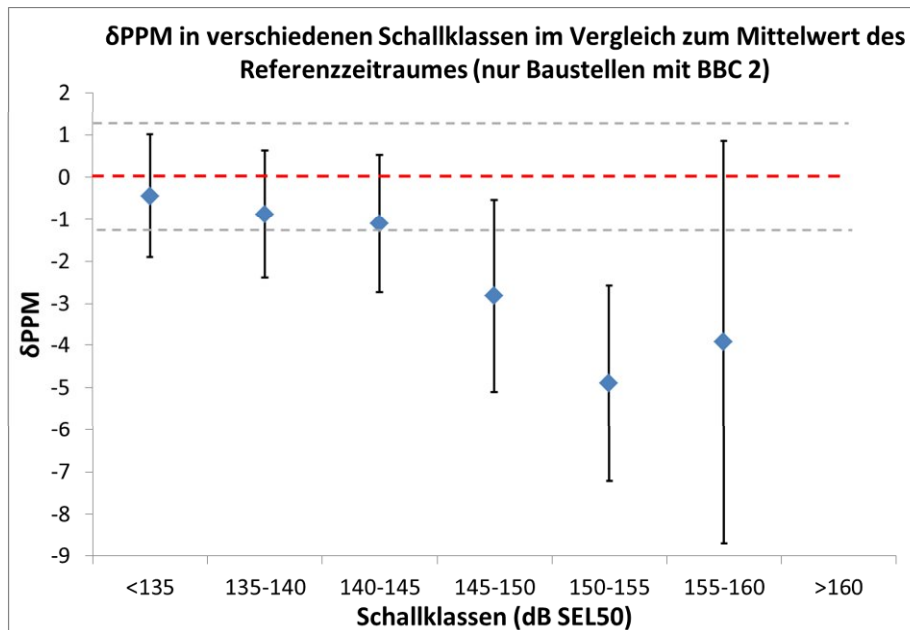


Abb. 1-79: Schallabhängigkeit der Detektionsrate während Rammungen ($\delta\text{PPM}/h$) im Vergleich zur Detektionsrate vor Beginn von Rammungen in 5 dB-Klassen. Dargestellt sind die $\delta\text{PPM}/h$ -Werte inklusive Standardfehler gegen die mittlere Detektionsrate des Vergleichszeitraums (rote gestrichelte Null-Linie) und deren Standardfehler (graue gestrichelte Linien).

Nur bei Schallklasse 150-155 dB_{SEL} unterschied sich die Detektionsrate während Rammarbeiten bei Baustellen mit Blasenschleier vom BBC 2 signifikant von der im Vergleichszeitraum. Allerdings lagen für die beiden lautesten Schallklassen nur wenige bzw. gar keine Daten vor, so dass über diese keine Aussage gemacht werden konnte.

Fragestellung 2d: Unterscheiden sich die Detektionsraten nach den Rammarbeiten von den Detektionsraten vor einer Rammung ohne Schallschutz versus Rammungen mit Blasenschleier BBC 2?

Baustellen ohne Blasenschleier

Die Untersuchung der Daten der Baustellen ohne Blasenschleier sind in Abb. 1-80 dargestellt (Signifikanzniveaus in Tab. 1.31) und ergeben ein sehr ähnliches Bild zum Gesamtdatensatz (Abb. 1-76). In den drei lautesten Schallklassen konnten für den Zeitraum bis 12 Stunden nach Beendigung der Rammungen signifikant niedrigere Detektionsraten im Vergleich zum Zeitraum vor Beginn der Rammarbeiten festgestellt werden. In diesen drei Schallklassen konnte auch jeweils in der letzten Zeitklasse (21-24 Stunden nach Ende der Rammphase) eine signifikant höhere Detektionsrate erkannt werden.

Die Schallklasse 145-150 dB_{SEL} zeigte zwar den gleichen Gradienten mit niedrigster Detektionsrate direkt nach dem Ende der Rammung und dann graduell ansteigende Detektionsraten mit fortschreitender Dauer, jedoch blieb hier die Detektionsrate bis zur Zeitklasse 13-16 Stunden nach Ende der Rammung (schwach) signifikant geringer als im Vergleichszeitraum. Die Schallklasse 140-145 dB_{SEL} stellte auch hier wieder eine Ausnahme dar: Hier lagen die Detektionsraten nach Rammende bis zur 20. Stunde nach Rammende signifikant niedriger.

Bei der Schallklasse 135-140 dB_{SEL} waren in den ersten 12 Stunden nach Rammende keine signifikanten Unterschiede zu verzeichnen. Erst in den beiden Zeitklassen 13-16 und 17-20

Stunden nach Rammende war die Detektionsrate signifikant niedriger. In der leisesten Schallklasse <135 dB_{SEL} konnte zu keiner Zeit eine signifikant zum Vergleichszeitraum abweichende Detektionsrate festgestellt werden.

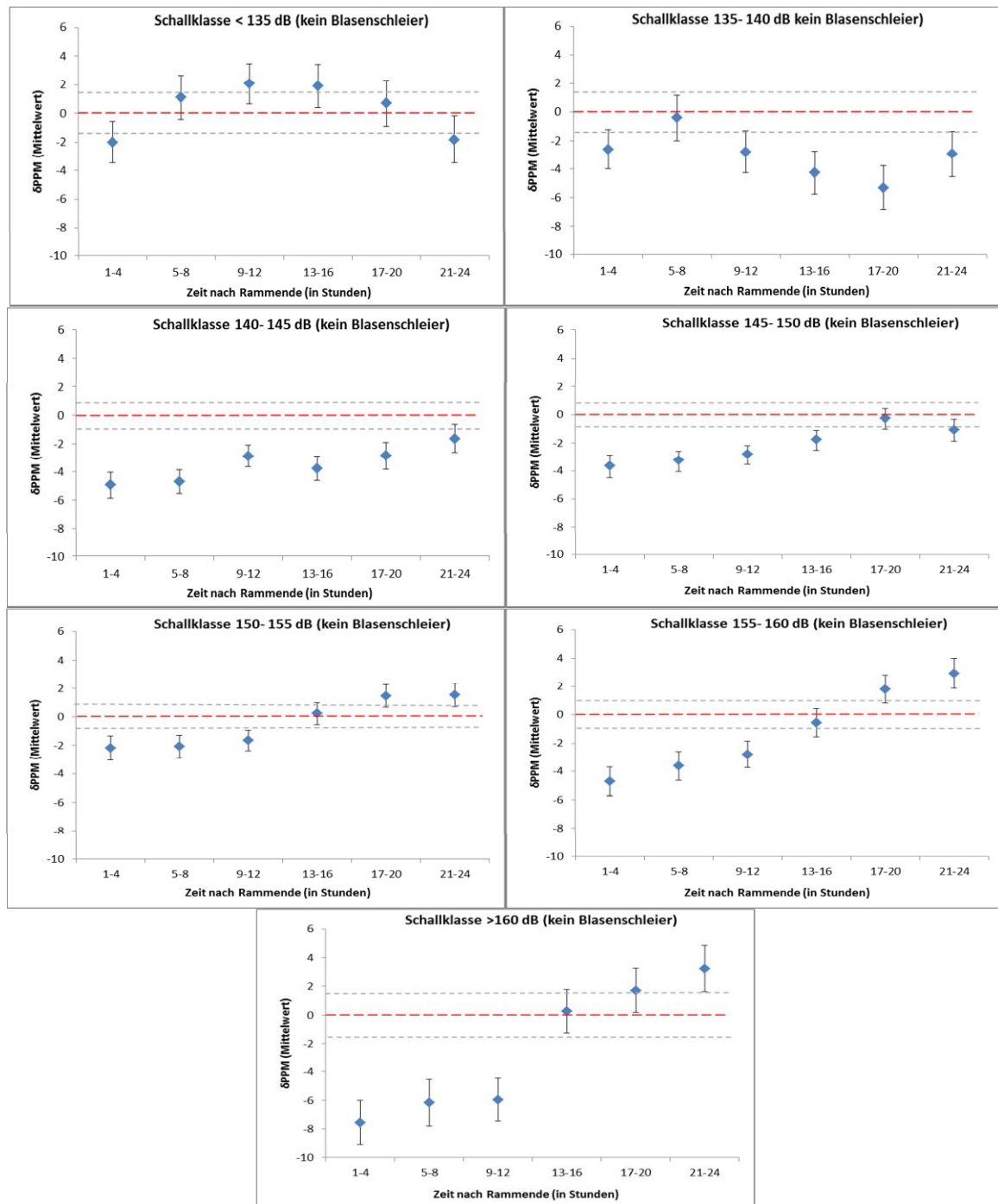


Abb. 1-80: Darstellung der $\delta PPM/h$ -Werte (inklusive Standardfehler) in den Stunden nach Rammende in verschiedenen Schallklassen bei Baustellen ohne Blasenschleier. Zusätzlich aufgetragen ist der δPPM -Mittelwert aus dem Vergleichszeitraum (rote Null-Linie) und dessen Standardfehler (gestrichelte graue Linien).

Tab. 1.31: Vergleich der δ PPM/h-Werte aus den einzelnen Schallklassen und Zeitklassen nach Rammende mit dem Wert des Vergleichszeitraums. Ausgewertet wurden hier nur Baustellen ohne Blasenschleier. Beschriftung s. Tab. 1.28.

Schallklasse (dB _{SEL})	Vergleich	N	δ PPM-Wert	Std. Fehler	z_Wert	Pr(> z)	Sign.
<135	Stunde 1-4 mit Referenzzeit	30	-2,0117	1,5278	-1,317	0,187917	-
	Stunde 5-8 mit Referenzzeit	40	1,1189	1,395	0,802	0,422503	-
	Stunde 9-12 mit Referenzzeit	32	2,0782	1,5088	1,377	0,168385	-
	Stunde 13-16 mit Referenzzeit	28	1,9167	1,6007	1,197	0,231121	-
	Stunde 17-20 mit Referenzzeit	25	0,7023	1,6508	0,425	0,670516	-
	Stunde 21-24 mit Referenzzeit	36	-1,8321	1,498	-1,223	0,221314	-
135-140	Stunde 1-4 mit Referenzzeit	28	-2,6081	1,5649	-1,667	0,095593	-
	Stunde 5-8 mit Referenzzeit	36	-0,4132	1,471	-0,281	0,778771	-
	Stunde 9-12 mit Referenzzeit	33	-2,7826	1,5101	-1,843	0,065388	-
	Stunde 13-16 mit Referenzzeit	32	-4,2452	1,5284	-2,778	0,005477	**
	Stunde 17-20 mit Referenzzeit	29	-5,3015	1,5706	-3,375	0,000737	***
	Stunde 21-24 mit Referenzzeit	35	-2,94	1,5153	-1,94	0,052359	-
140-145	Stunde 1-4 mit Referenzzeit	108	-4,9469	0,8497	-5,822	5,81E-09	***
	Stunde 5-8 mit Referenzzeit	144	-4,6997	0,7786	-6,036	1,58E-09	***
	Stunde 9-12 mit Referenzzeit	112	-2,8768	0,8601	-3,345	0,000823	***
	Stunde 13-16 mit Referenzzeit	92	-3,7647	0,9519	-3,955	7,65E-05	***
	Stunde 17-20 mit Referenzzeit	83	-2,8591	0,9873	-2,896	0,003783	**
	Stunde 21-24 mit Referenzzeit	121	-1,6448	0,8856	-1,857	0,063265	-
145-150	Stunde 1-4 mit Referenzzeit	162	-3,6619	0,6654	-5,503	3,73E-08	***
	Stunde 5-8 mit Referenzzeit	216	-3,2597	0,6134	-5,314	1,07E-07	***
	Stunde 9-12 mit Referenzzeit	184	-2,8115	0,6545	-4,295	1,74E-05	***
	Stunde 13-16 mit Referenzzeit	168	-1,7577	0,6893	-2,55	0,010768	*
	Stunde 17-20 mit Referenzzeit	153	-0,2475	0,717	-0,345	0,729989	-
	Stunde 21-24 mit Referenzzeit	212	-1,0676	0,6473	-1,649	0,099096	-
150-155	Stunde 1-4 mit Referenzzeit	126	-2,1986	0,7885	-2,788	0,005296	**
	Stunde 5-8 mit Referenzzeit	166	-2,0781	0,7192	-2,889	0,003861	**
	Stunde 9-12 mit Referenzzeit	150	-1,6437	0,7527	-2,184	0,028976	*
	Stunde 13-16 mit Referenzzeit	140	0,23	0,7849	0,293	0,76945	-
	Stunde 17-20 mit Referenzzeit	122	1,4667	0,8243	1,779	0,075171	-
	Stunde 21-24 mit Referenzzeit	157	1,5417	0,7791	1,979	0,047845	*
155-160	Stunde 1-4 mit Referenzzeit	75	-4,6915	1,019	-4,604	4,14E-06	***
	Stunde 5-8 mit Referenzzeit	100	-3,5984	0,9274	-3,88	0,000104	***
	Stunde 9-12 mit Referenzzeit	91	-2,773	0,9622	-2,882	0,003951	**
	Stunde 13-16 mit Referenzzeit	84	-0,5404	1,0019	-0,539	0,589653	-
	Stunde 17-20 mit Referenzzeit	72	1,8144	1,0503	1,727	0,084083	-
	Stunde 21-24 mit Referenzzeit	97	2,9502	0,9692	3,044	0,002334	**
>160	Stunde 1-4 mit Referenzzeit	39	-7,5549	1,635	-4,621	3,82E-06	***
	Stunde 5-8 mit Referenzzeit	52	-6,1529	1,5004	-4,101	4,12E-05	***
	Stunde 9-12 mit Referenzzeit	46	-5,9675	1,5312	-3,897	9,73E-05	***
	Stunde 13-16 mit Referenzzeit	44	0,2603	1,5449	0,169	0,866185	-
	Stunde 17-20 mit Referenzzeit	41	1,7129	1,6148	1,061	0,28878	-
	Stunde 21-24 mit Referenzzeit	50	3,2257	1,5584	2,07	0,03847	*

Die Nullhypothese, dass sich die Schweinswal-Detektionsraten in definierten Schallklassen sowie Zeitklassen nach Rammende bei Baustellen ohne Blasenschleier nicht von der mittleren Detektionsrate des Vergleichszeitraums unterscheiden, musste bezüglich der frühesten drei Zeitklassen (1.-12. Stunde nach Rammende) für alle Schallklassen ab 140 dB_{SEL} aufwärts abgelehnt werden. Hier sowie bei einzelnen höheren Zeitklassen in den Schallklassen 135-140 dB_{SEL}, 145-150 dB_{SEL} und 150-155 dB_{SEL} lagen die Werte jeweils signifikant niedriger als im Vergleichszeitraum. Signifikant erhöhte Werte ergaben sich dagegen ab der 21. Stunde für die lautesten beiden Schallklassen (ab 155 dB_{SEL}). Insgesamt war das Bild also tendenziell ähnlich dem des Gesamtdatensatzes (Fragestellung 2b), jedoch etwas weniger einheitlich. Über alle sieben Schallklassen hinweg wurde das Ausgangsniveau der Detektionsrate im Mittel (Median) ab der 13. Stunde nach Rammende erreicht.

Baustellen mit BBC 2

Aufgrund der effektiven Schalldämmung durch den Blasenschleier vom Typ BBC 2 wiesen bei diesem Unterdatensatz die beiden lautesten Schallklassen (155-160 dB_{SEL} und >160 dB_{SEL}) keine Daten mehr auf (vgl. Abb. 1-81 und Tab. 1.32).

Die Untersuchung der Daten der Baustellen mit Blasenschleier ergab für den Zeitraum nach Beendigung der Rammungen nur für die Schallklasse 150-155 dB_{SEL} das Bild, dass in der ersten Zeitklasse (1-4 Stunden) die niedrigste Detektionsrate festgestellt wurde, die dann graduell in den folgenden Zeitklassen anstieg. Allerdings unterschied sich bereits in dieser Schallklasse keine der untersuchten Zeiträume signifikant von der Detektionsrate des Vergleichszeitraums. In der Schallklasse 145-150 dB_{SEL} zeigte sich in den ersten acht Stunden nach dem Ende der Rammung zunächst kein signifikanter Unterschied in der Detektionsrate. Jedoch wiesen die beiden Zeitklassen 9-12 und 13-16 Stunden signifikant geringere Detektionsraten auf. Die Schallklasse 140-145 dB_{SEL} wies vergleichbar zum Gesamtdatensatz sowie zur Untersuchung ohne Schallschutz eine insgesamt abweichende Entwicklung der Detektionsrate nach dem Ende der Rammung auf: In dieser Klasse waren die Detektionsraten im gesamten Zeitraum bis zur 24. Stunde nach Beendigung der Rammarbeiten signifikant niedriger als im Vergleichszeitraum. Die beiden leisesten Schallklassen zeigten ein indifferentes Bild, bei dem sich signifikant niedrigere Detektionsraten bis maximal 16 Stunden nach Rammende nachweisen ließen. Bei 135-140 dB_{SEL} war in den ersten acht Stunden kein signifikanter Unterschied nachweisbar, jedoch war zwischen 9 und 16 Stunden nach dem Ende der Rammung eine (schwach) signifikant geringere Detektionsrate erkennbar. In der leisesten Schallklasse <135 dB_{SEL} zeigte sich wiederum in den ersten drei Zeitklassen eine signifikant geringere Detektionsrate, bevor ab der 13. Stunde kein Unterschied zum Vergleichszeitraum mehr feststellbar war.

Bei allen Zeitklassen der Schallklasse 140-145 dB_{SEL}, den ersten drei Zeitklassen der Schallklasse <135 dB_{SEL50} sowie den mittleren beiden Zeitklassen der Schallklassen 135-140 dB_{SEL} und 145-150 dB_{SEL} unterschieden sich die Schweinswal-Detektionsraten bei Baustellen mit Blasenschleier vom Typ BBC 2 signifikant von der mittleren Detektionsrate des Vergleichszeitraums. Interessanterweise gab es bei der lautesten hier zur Verfügung stehenden Schallklasse 150-155 dB_{SEL} keinen signifikanten Unterschied zum Vergleichszeitraum. Für eine Medianberechnung über alle Schallklassen hinweg lagen zu wenige Daten vor.

Ob ein signifikanter Unterschied zwischen den Ergebnissen der Analysen mit BBC 2 und der vorherigen ohne Blasenschleier aus Fragestellung 2c bzw. 2d vorlag, wurde in der folgenden Fragestellung 2e überprüft.

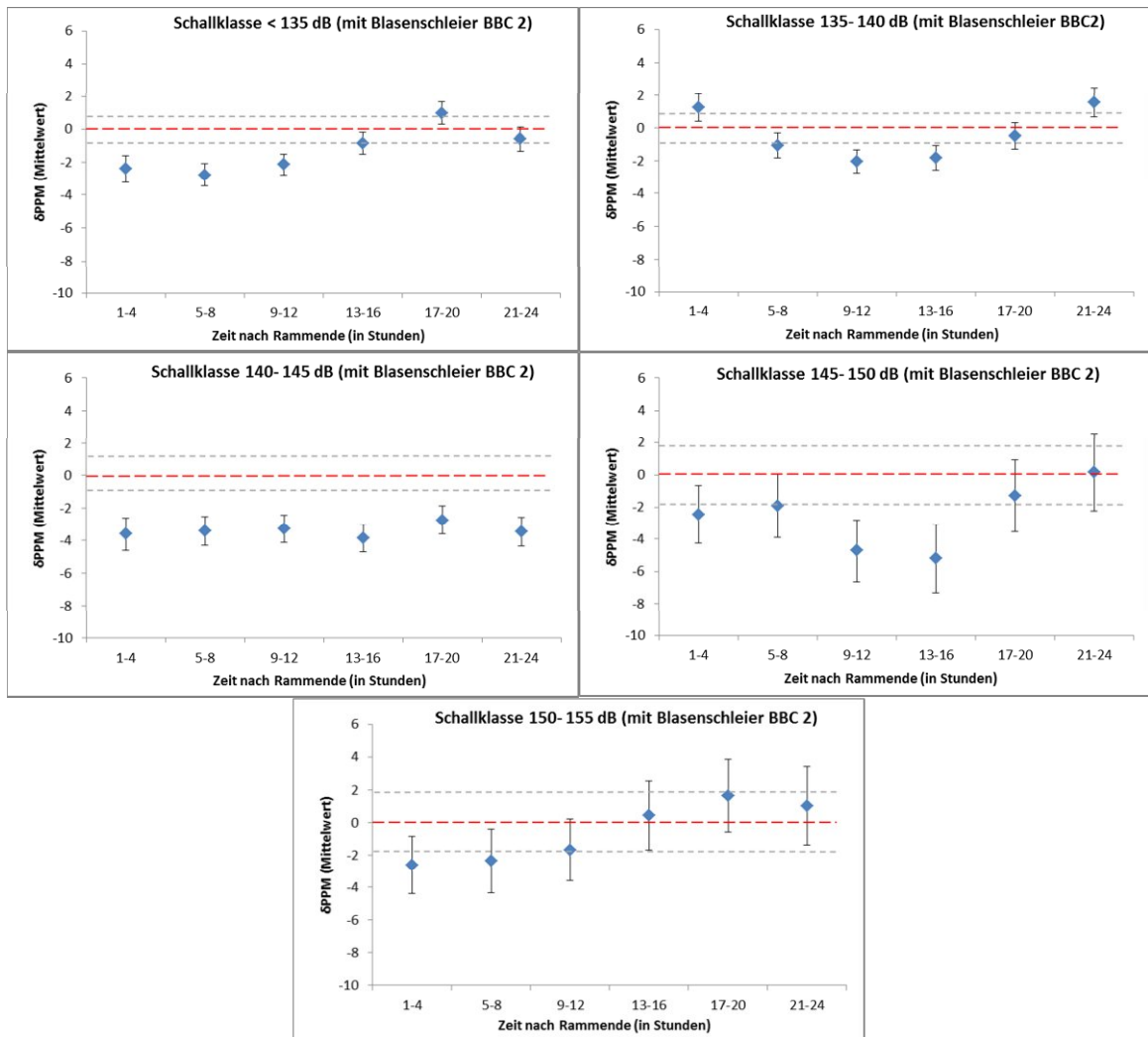


Abb. 1-81: Darstellung der $\delta PPM/h$ -Werte (inklusive Standardfehler) in den Stunden nach Rammende in verschiedenen Schallklassen bei Baustellen mit Blasenschleier vom Typ BBC 2. Zusätzlich aufgetragen ist der δPPM -Mittelwert aus dem Vergleichszeitraum (rote Null-Linie) und dessen Standardfehler (gestrichelte graue Linien). Für die Schallklassen 155-160 dB und >160 dB waren bei Baustellen mit BBC 2 aufgrund der Schalldämmung nicht ausreichend viele bzw. keine Daten vorhanden.

Tab. 1.32: Vergleich der δ PPM/h-Werte aus den einzelnen Schallklassen und Zeitklassen nach Rammende mit dem Wert des Vergleichszeitraums. Herangezogen wurde hier nur der BBC 2-Datensatz. Für die Schallklassen 155-160 dB und >160 dB waren bei Baustellen mit BBC 2 aufgrund der Schalldämmung zu wenige bzw. keine Daten vorhande. Beschriftung s. Tab. 1.28.

Schallklasse (dB _{SEL})	Vergleich	N	δ PPM-Wert	Std. Fehler	z_Wert	Pr(> z)	Sign.
<135	Stunde 1-4 mit Referenzzeit	156	-2,4088	0,689	-3,496	0,000472	***
	Stunde 5-8 mit Referenzzeit	188	-2,785	0,6443	-4,322	1,54E-05	***
	Stunde 9-12 mit Referenzzeit	168	-2,1332	0,6763	-3,154	0,001611	**
	Stunde 13-16 mit Referenzzeit	152	-0,8411	0,7003	-1,201	0,229695	-
	Stunde 17-20 mit Referenzzeit	136	0,9998	0,7296	1,37	0,170603	-
	Stunde 21-24 mit Referenzzeit	170	-0,5829	0,6754	-0,863	0,388117	-
135-140	Stunde 1-4 mit Referenzzeit	126	1,2429	0,7525	1,652	0,098618	-
	Stunde 5-8 mit Referenzzeit	150	-1,0494	0,7075	-1,483	0,137997	-
	Stunde 9-12 mit Referenzzeit	134	-2,0596	0,7469	-2,757	0,005827	**
	Stunde 13-16 mit Referenzzeit	114	-1,8304	0,7937	-2,306	0,021104	*
	Stunde 17-20 mit Referenzzeit	92	-0,4957	0,875	-0,567	0,57102	-
	Stunde 21-24 mit Referenzzeit	115	1,5391	0,8096	1,901	0,057293	-
140-145	Stunde 1-4 mit Referenzzeit	87	-3,6119	0,9047	-3,992	6,54E-05	***
	Stunde 5-8 mit Referenzzeit	108	-3,4136	0,8353	-4,087	4,37E-05	***
	Stunde 9-12 mit Referenzzeit	100	-3,2755	0,8583	-3,816	0,000135	***
	Stunde 13-16 mit Referenzzeit	94	-3,8621	0,8784	-4,397	1,10E-05	***
	Stunde 17-20 mit Referenzzeit	88	-2,7308	0,9052	-3,017	0,002555	**
	Stunde 21-24 mit Referenzzeit	110	-3,4592	0,8385	-4,126	3,70E-05	***
145-150	Stunde 1-4 mit Referenzzeit	21	-2,4583	1,9642	-1,252	0,210737	-
	Stunde 5-8 mit Referenzzeit	28	-1,9094	1,7648	-1,082	0,279272	-
	Stunde 9-12 mit Referenzzeit	28	-4,7137	1,7635	-2,673	0,007518	**
	Stunde 13-16 mit Referenzzeit	24	-5,192	1,9267	-2,695	0,007042	**
	Stunde 17-20 mit Referenzzeit	20	-1,2996	2,0894	-0,622	0,533961	-
	Stunde 21-24 mit Referenzzeit	25	0,1768	1,9239	0,092	0,926781	-
150-155	Stunde 1-4 mit Referenzzeit	21	-2,6135	1,9728	-1,325	0,185248	-
	Stunde 5-8 mit Referenzzeit	24	-2,3565	1,9069	-1,236	0,216541	-
	Stunde 9-12 mit Referenzzeit	20	-1,6708	2,1086	-0,792	0,428147	-
	Stunde 13-16 mit Referenzzeit	16	0,4252	2,2246	0,191	0,848437	-
	Stunde 17-20 mit Referenzzeit	12	1,6309	2,3907	0,682	0,495117	-
	Stunde 21-24 mit Referenzzeit	15	1,0106	2,1602	0,468	0,639906	-

Fragestellung 2e: Unterscheiden sich die Detektionsraten während und nach den Rammarbeiten mit Blasenschleier BBC 2 und Rammungen ohne Schallschutz (direkter Vergleich)?

Ein direkter Vergleich der δ PPM-Werte aus Fragestellung 2c (während Rammereignis; vgl. Tab. 1.29 und Tab. 1.30) über einen Wilcoxon-Mann-Whitney-Rangsummentest (zweiseitig, $\alpha = 5\%$) ergab für keine der definierten Zeit- und Schallklassen signifikante Unterschiede (Tab. 1.33).

Folglich musste die Nullhypothese, welche besagt, dass ein Vergleich der von Modellen aus Fragestellung 2c geschätzten Detektionsraten während Rammungen mit Blasenschleier vom Typ BBC 2 und ohne Blasenschleier in definierten Schallklassen keinen signifikanten Unterschied ergibt, in allen Fällen beibehalten werden.

Tab. 1.33: *Ergebnisse der Wilcoxon-Mann-Whitney-Rangsummentests (zweiseitig, $\alpha = 5\%$) zum Vergleich der δ PPM-Werte aus Tab. 1.29 und Tab. 1.30 (Fragestellung 2c). Für die Schallklasse >160 dB waren bei Baustellen mit BBC 2 aufgrund der Schalldämmung keine Daten vorhanden; diese fehlte somit auch für einen Vergleich; p-value: Wahrscheinlichkeit aufgrund des Wertes der Prüfgröße w , dass die Nullhypothese beibehalten werden kann. Einstufung der Signifikanzen: - = nicht signifikant, * = signifikant, ** = hoch signifikant und *** = höchst signifikant.*

Schallklasse (dB _{SEL})	Prüfgröße w	p-value
<135	6000	0,9987
135-140	4247	0,9993
140-145	9465	1,0000
145-150	4264	0,1987
150-155	1733	0,9827
155-160	180	0,9274
>160	Keine Daten bei BBC 2	

Ein direkter Vergleich der δ PPM-Werte aus Fragestellung 2d (Stunden nach Rammereignis; Tab. 1.31 und Tab. 1.32) über einen Wilcoxon-Mann-Whitney-Rangsummentest (zweiseitig, $\alpha = 5\%$) ergab nur für sehr wenige verstreute Zeit- und Schallklassen ein signifikantes Ergebnis (Tab. 1.34). Ein Trend ließ sich nicht erkennen.

Hier musste die Nullhypothese, welche besagt, dass ein Vergleich der von Modellen aus Fragestellung 2d geschätzten Detektionsraten von Rammungen mit Blasenschleier vom Typ BBC 2 und ohne Blasenschleier in definierten Schall- und Zeitklassen nach der Rammung keinen signifikanten Unterschied ergibt, bis auf wenige Ausnahmen beibehalten werden.

Es zeigte sich in beiden Fällen, dass der wesentliche Faktor, der die Detektionsrate in Bezug auf das Rammereignis bestimmte, der breitbandige Einzelereignispegel SEL₅₀ war. Auf Basis des vorliegenden Datensatzes gab es nur geringe Indizien, dass ein Schallsignal gleicher Lautstärke bezogen auf den SEL₅₀ für die Schweinswale unterschiedlich wahrgenommen wurde. Nur sporadisch konnten Unterschiede in der jeweiligen Detektionsrate in den einzelnen Zeitklassen zwischen BBC 2 und Rammungen ohne Schallschutz nachgewiesen werden. Es muss aber darauf hingewiesen werden, dass der Datensatz eine relativ hohe Variabilität aufwies und insbesondere in den lauten Schallpegelbereichen über 150 dB_{SEL} gerade bei Rammarbeiten mit dem BBC 2 nur wenige Datensätze vorlagen, um eine belastbare Aussage treffen zu können.

Tab. 1.34: Ergebnisse der Wilcoxon-Mann-Whitney-Rangsummentests (zweiseitig, $\alpha = 5\%$) zum Vergleich der δ PPM-Werte aus Tab. 1.31 und Tab. 1.32 (Fragestellung 2d). Für die Schallklassen 155-160 dB und >160 dB waren bei Baustellen mit BBC 2 aufgrund der Schalldämmung nicht genug bzw. keine Daten vorhanden; diese fehlten somit auch für einen Vergleich. Beschriftung s. Tab. 1.33.

Zeitklasse	Schallklasse (dB _{SEL})	Prüfgröße w	p-value
1-4	<135	2339,5	0,3001
	135-140	193	0,1556
	140-145	3892,5	0,656
	145-150	1784,5	0,04332 *
	150-155	1054	0,4987
	155-160	Nicht genug Daten bei BBC 2	
	>160	Keine Daten bei BBC 2	
5-8	<135	2697	0,9917
	135-140	2628,5	0,5
	140-145	6492	0,7148
	145-150	2811,5	0,1998
	150-155	1514,5	0,5488
	155-160	Nicht genug Daten bei BBC 2	
	>160	Keine Daten bei BBC 2	
9-12	<135	1755	0,9975
	135-140	2075,5	0,6139
	140-145	4245,5	0,9479
	145-150	2049,5	0,6586
	150-155	1215	0,2564
	155-160	Nicht genug Daten bei BBC 2	
	>160	Keine Daten bei BBC 2	
13-16	<135	1661,5	0,9417
	135-140	2118	0,04027 *
	140-145	3261,5	0,9341
	145-150	1391	0,8664
	150-155	1210	0,01593 *
	155-160	Nicht genug Daten bei BBC 2	
	>160	Keine Daten bei BBC 2	
17-20	<135	1631	0,5373
	135-140	1536,5	0,05022
	140-145	2886	0,7957
	145-150	1120	0,6552
	150-155	802	0,1502
	155-160	Nicht genug Daten bei BBC 2	
	>160	Keine Daten bei BBC 2	
21-24	<135	3687	0,01171 *
	135-140	2438	0,008878 **
	140-145	4802	0,9439
	145-150	2374	0,168
	150-155	1213	0,1757
	155-160	Nicht genug Daten bei BBC 2	
	>160	Keine Daten bei BBC 2	

3) Untersuchung der 1. Wartezeit nach Ende der Rammarbeiten im Vergleich zu Wartezeiten aus Zeiträumen ohne Rammarbeiten

In Abb. 1-82 und Abb. 1-83 sind exemplarisch alle an der POD-Position bwf_1 (die der den Baustellen nächstgelegenen POD-Position) und Pos21_ITAW (der am weitesten von den Baustelle entfernten POD-Position) registrierten Wartezeiten für die einzelnen Tage über den gesamten Erfassungszeitraum dargestellt, wobei die 1. Wartezeiten nach einer Rammung jeweils rot markiert sind.

Beide Abbildungen zeigen, dass die 1. Wartezeiten (rote Punkte) in der Regel über dem Median lagen. Dieser Effekt wurde z.T. durch das sogenannte Bus-Paradoxon überlagert (siehe Kapitel E.3.3). Trotz dieser Einschränkung zeigt der Vergleich der Abbildungen, dass an der Position BWF1, die im Mittel nur 3,5 km von den Baustellen entfernt lag, längere 1. Wartezeiten in Bezug zur Rammung auftraten als bei der Station 21_ITAW, die im Mittel über 36 km entfernt lag. Dieses erste Ergebnis wurde mit Hilfe des Vergleichs von zufällig ausgesuchten Wartezeiten unter Berücksichtigung des Bus-Paradoxons überprüft.

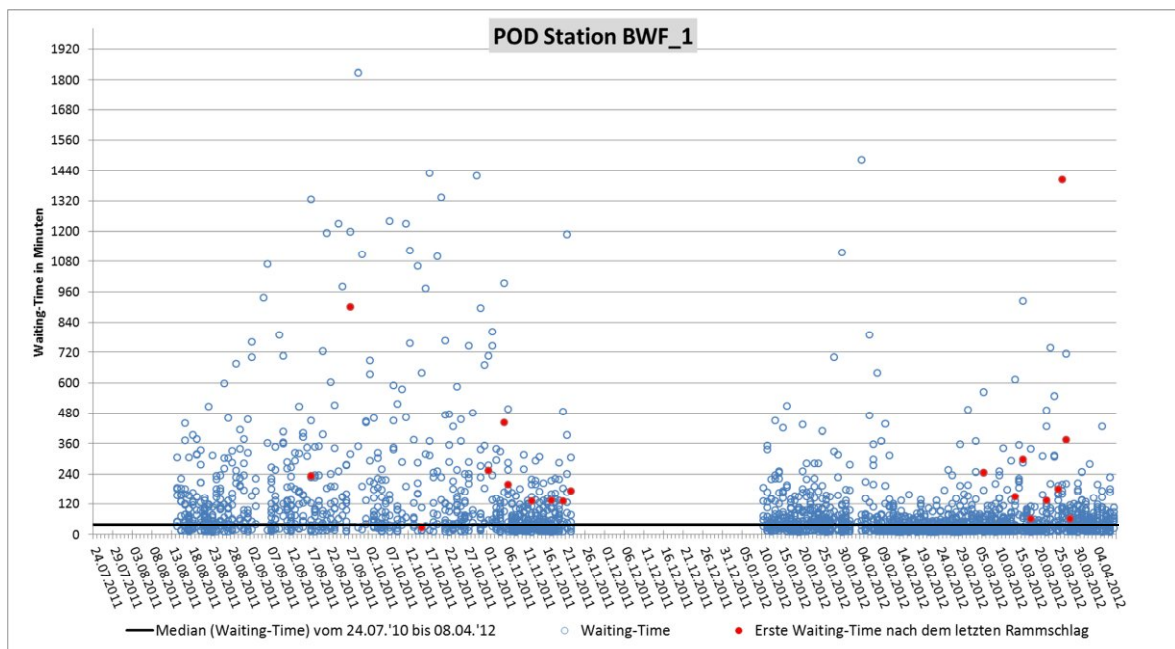


Abb. 1-82: Alle Wartezeiten, welche an der POD-Position bwf_1 (der Rammungen nächstgelegenen Position) registriert wurden, aufgetragen gegen das Anfangsdatum der Wartezeit. 1. Wartezeiten nach einer Rammung sind als rote Punkte, alle übrigen Wartezeiten als blaue Kreise gekennzeichnet. Die schwarze horizontale Linie stellt den Median über den genannten Zeitraum dar.

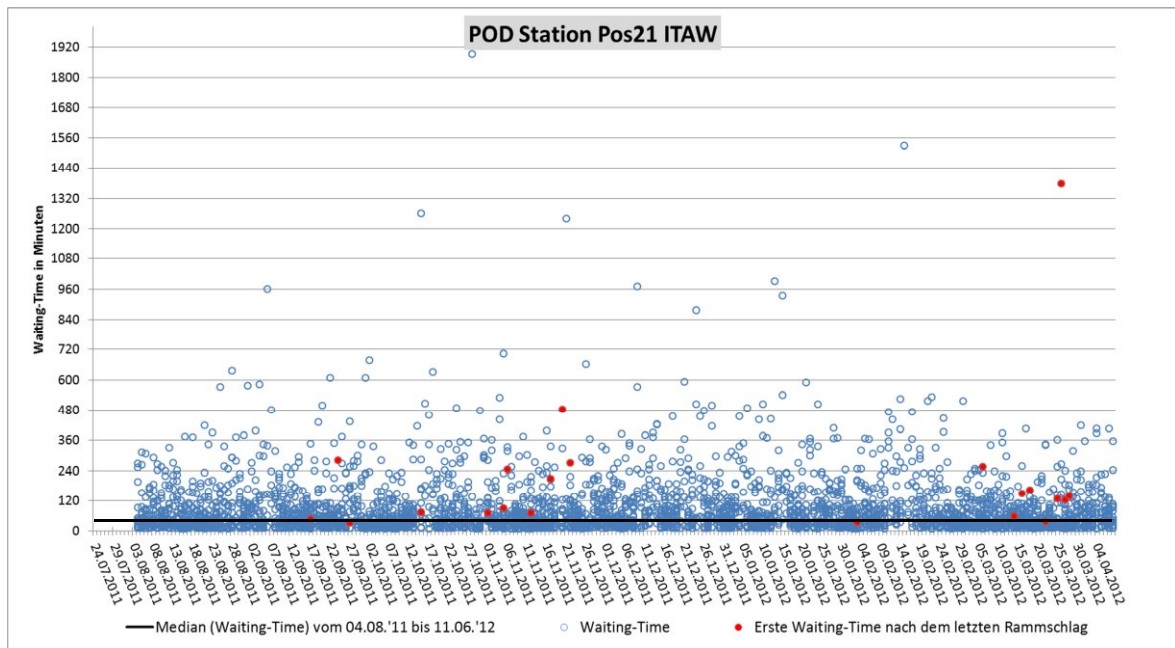


Abb. 1-83: Alle Wartezeiten, welche an der POD-Position Pos21 ITAW (der von Rammungen am weitesten entfernten Position) registriert wurden, aufgetragen gegen das Anfangsdatum der Wartezeit. 1. Wartezeiten nach einer Rammung sind als rote Punkte, alle übrigen Wartezeiten als blaue Kreise gekennzeichnet. Die hier teils verdeckte, schwarze horizontale Linie stellt den Median über den genannten Zeitraum dar.

Es wurden Wilcoxon-Mann-Whitney-Rangsummentests (zweiseitig, $\alpha = 5\%$) mit Bonferroni-Korrektur durchgeführt, wobei die Verteilung der Dauer der 1. Wartezeit nach Beendigung der Rammarbeiten mit der Verteilung der Dauer einer gleichen Anzahl zufällig gewählter Wartezeiten außerhalb der Rammphasen miteinander verglichen wurde.

Zunächst wurde im Rahmen einer ersten Analyse der Effekt der Distanz auf die 1. Wartezeit nach Ende einer Rammung überprüft, unabhängig davon, ob der BBC eingesetzt wurde oder nicht. Der Wilcoxon-Mann-Whitney-Rangsummentest ergab, dass die 1. Wartezeit nach dem Ende einer Rammung in der Distanzklasse von 0 bis 4 Kilometern zur Baustelle signifikant länger andauerte als die Wartezeiten der Kontrollgruppe (Tab. 1.35). In den anderen Distanzklassen konnten beim Vergleich der Länge der 1. Wartezeit mit Wartezeiten aus der Kontrollgruppe keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden.

In einem zweiten Ansatz wurden die ersten Wartezeiten in Abhängigkeit von 2dB-Schallklassen auf ihren Unterschied zu einer Kontrollgruppe mit zufällig ausgewählten Wartezeiten, die außerhalb der Rammphasen lagen, untersucht.

An POD-Messpositionen, die einem Schallpegel von $>158 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ ausgesetzt waren, zeigte sich erwartungsgemäß ein Vertreibungseffekt mit signifikant längerer erster Wartezeit nach Ende der Rammung (Tab. 1.36).

Bei den Schallklassen zwischen $132 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ und $158 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den zufällig ausgewählten Wartezeiten der Kontrollgruppe und den 1. Wartezeiten nach Rammende festgestellt werden. Erst bei den Schallklassen $130-132 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ und $<130 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ wurde wieder ein signifikanter Unterschied festgestellt: Hier waren die 1. Wartezeiten signifikant kürzer als die Wartezeiten der Kontrollgruppe.

Tab. 1.35: Wilcoxon-Mann-Whitney-Rangsummentest (zweiseitig, $\alpha = 5\%$, durch Bonferroni-Korrektur war Signifikanzniveau der Einzeltests auf $\alpha = 0,625\%$ gesenkt) der Ausprägung der 1. Wartezeit im Vergleich mit zufällig ausgewählten Wartezeiten außerhalb der Rammphasen bei unterschiedlichen Distanzen zu den Baustellen.

Distanz	Gruppe	N	Waitingtime (h:m:s)		Wilcox Rangsummentest	
			Mittelwert	Stdabwg	p-Wert	Schlussfolgerung nach Bonferroni-Korrektur $\alpha = 0,00625$
0 - 4 km	1. Wartezeit	65	11:15:01	09:46:45	5,24E-08	1. Wartezeit signifikant länger als Kontrollwartezeit
	Kontrolle	95	05:26:01	05:55:40		
4 - 6 km	1. Wartezeit	63	07:51:13	06:23:34	0,0183163	kein Unterschied
	Kontrolle	63	05:54:18	06:10:42		
6 - 8 km	1. Wartezeit	61	07:49:39	07:11:27	0,3069882	kein Unterschied
	Kontrolle	61	06:31:04	05:31:25		
8 - 10 km	1. Wartezeit	68	06:12:46	04:48:34	0,0499089	kein Unterschied
	Kontrolle	68	04:38:46	03:46:41		
10 - 12 km	1. Wartezeit	57	05:49:31	04:00:21	0,7965152	kein Unterschied
	Kontrolle	57	05:41:14	04:07:44		
12 - 14 km	1. Wartezeit	50	05:18:57	03:40:29	0,2439498	kein Unterschied
	Kontrolle	50	07:02:44	05:43:59		
14 - 18 km	1. Wartezeit	72	05:04:55	06:54:41	0,2788929	kein Unterschied
	Kontrolle	72	04:47:02	05:56:48		
>18 km	1. Wartezeit	82	03:25:01	04:35:54	0,0175647	kein Unterschied
	Kontrolle	82	05:39:52	07:48:02		

Tab. 1.36: Wilcoxon-Mann-Whitney-Rangsummentest (zweiseitig, $\alpha = 5\%$, durch Bonferroni-Korrektur war Signifikanzniveau der Einzeltests auf $\alpha = 0,29\%$ gesenkt) der Ausprägung der 1. Wartezeit innerhalb von 2dB-Schallklassen (SEL50) im Vergleich mit zufällig ausgewählten Wartezeiten außerhalb der Rammphasen.

dB _{SEL}	Gruppe	N	Waitingtime (h:m:s)		Wilcox Rangsummentest	
			Mittelwert	Stdabwg	p-Wert	Schlussfolgerung nach Bonferroni-Korrektur $\alpha=0,0029$
< 130	1. Wartezeit	43	03:17:50	05:15:49	0,0009571	1 Wartezeit signifikant kürzer als Kontrollwartezeit
	Kontrolle	43	08:12:30	09:27:16		
130 - 132	1. Wartezeit	26	03:32:56	04:00:10	0,0006207	1 Wartezeit signifikant kürzer als Kontrollwartezeit
	Kontrolle	26	09:10:32	07:41:14		
132 - 134	1. Wartezeit	45	05:02:54	05:03:08	0,0542755	kein Unterschied
	Kontrolle	45	07:37:42	07:48:47		
134 - 136	1. Wartezeit	37	04:13:24	03:31:25	0,3435083	kein Unterschied
	Kontrolle	37	05:40:50	05:23:37		
136 - 138	1. Wartezeit	33	03:30:34	03:14:47	0,0738237	kein Unterschied
	Kontrolle	33	05:50:29	06:33:57		
138 - 140	1. Wartezeit	32	03:59:51	03:49:18	0,0252026	kein Unterschied
	Kontrolle	32	08:04:51	08:55:39		
140 - 142	1. Wartezeit	33	04:02:20	02:46:08	0,1156514	kein Unterschied
	Kontrolle	33	06:49:03	07:33:50		
142 - 144	1. Wartezeit	53	06:37:47	08:54:09	0,2674637	kein Unterschied
	Kontrolle	53	08:29:55	08:41:18		
144 - 146	1. Wartezeit	32	03:59:51	03:49:18	0,0252026	kein Unterschied
	Kontrolle	32	08:04:51	08:55:39		
146 - 148	1. Wartezeit	52	04:02:20	02:46:08	0,1156514	kein Unterschied
	Kontrolle	52	06:49:03	07:33:50		
148 - 150	1. Wartezeit	53	06:37:47	08:54:09	0,2674637	kein Unterschied
	Kontrolle	53	08:29:55	08:41:18		
150 - 152	1. Wartezeit	46	06:11:49	04:20:15	0,4435983	kein Unterschied
	Kontrolle	46	06:42:23	07:11:46		
152 - 154	1. Wartezeit	35	07:11:14	06:36:00	0,6657669	kein Unterschied
	Kontrolle	35	08:25:25	11:12:51		
154 - 156	1. Wartezeit	36	07:31:10	05:18:43	0,0489608	kein Unterschied
	Kontrolle	36	05:25:36	04:44:42		
156 - 158	1. Wartezeit	33	07:02:14	03:53:30	0,3515433	kein Unterschied
	Kontrolle	33	06:49:45	06:12:39		
158 - 160	1. Wartezeit	24	11:53:42	07:30:35	0,0000111	1. Wartezeit signifikant länger als Kontrollwartezeit
	Kontrolle	24	05:11:43	05:32:16		
> 160	1. Wartezeit	18	17:07:00	14:29:21	0,0001127	1. Wartezeit signifikant länger als Kontrollwartezeit
	Kontrolle	18	06:04:20	08:57:51		

E.5 Diskussion

Die Analyse der Reaktion von Schweinswalen auf den bei den Gründungsarbeiten zum Offshore-Windpark Borkum West II emittierten Rammschall verfolgte zwei grundlegende Ziele:

1. Überprüfung eines räumlich-zeitlichen Störeffektes des Rammschalls auf Schweinswale in Abhängigkeit zur Lautstärke.
2. Überprüfung eines potentiellen Unterschiedes in der Störwirkung des Rammschalls auf Schweinswale abhängig davon, ob ein Blasenschleier eingesetzt worden war oder nicht.

Die der Untersuchung zugrunde liegenden Daten beziehen sich auf Ergebnisse des sogenannten passiven akustischen Monitorings mit Hilfe von Schweinswalklick-Detektoren. Diese Geräte nutzen die Eigenschaft, dass Schweinswale nahezu kontinuierlich Echoortungslaute aussenden, mit denen sie ihre Umwelt taxieren (Akamatsu et al. 2005, 2007). Verschiedene Studien konnten einen direkten Zusammenhang zwischen lokaler Dichte von Schweinswalen und gemessener Detektionsrate der Schweinswalklick-Detektoren herstellen (Tougaard 2006, Siebert & Rhye 2008, Kuhn et al. 2012). Schweinswalklick-Detektoren konnten bereits erfolgreich in verschiedenen Studien zur Auswirkung anthropogener Eingriffe auf marine Säugetiere eingesetzt werden. Todd et al. (2009) wiesen einen deutlichen Tag-Nacht-Rhythmus von Schweinswalen in der Nähe von Ölplattformen in der Nordsee nach und konnten zeigen, dass die Tiere nachts in der Nähe der Plattformen der Nahrungssuche nachgingen. Diederichs et al. (2008) konnten ähnliche Befunde im dänischen Windpark Nysted (Ostsee) zeigen. Tougaard et al. (2009), Brandt et al. (2011), Diederichs et al. 2008, 2010, Haelters et al. 2012 und Dähne et al. (2013) untersuchten mit Hilfe von PODs Auswirkungen der Rammungen von Fundamenten für Offshore-Windenergieanlagen auf Schweinswale. Scheidat et al. (2011) und Teilmann et al. (2012) führten mit PODs Langzeitstudien zur Auswirkung bestehender Windparks auf Schweinswale durch.

Die im Rahmen dieser Studie über alle Stationen zwischen September und April ermittelte mittlere Detektionsrate von Schweinswalen entsprach mit 22,5% PP10M/day einer ähnlich hohen Präsenz der Tiere wie bei Horns Rev. Mit über T-PODs erhobenen Daten über 14 Monate im Gebiet Horns Rev konnten Diederichs et al. (2008) im Vergleich zu Borkum West II sehr ähnliche Detektionsraten von 23% PP10M/day über die gesamte Erfassungszeit feststellen. Teilmann et al. (2010) werten das Gebiet Horns Rev auf Basis von Flugzeug- und schiffsbasierten Zählungen als ein über das gesamte Jahr hinweg wichtiges Gebiet für Schweinswale mit vergleichbar hohen (sommerlichen) Dichten wie das südlich anschließende Gebiet Sylter Außenriff. Hierfür konnten Gilles & Siebert (2010) eine mittlere Dichte im Sommer von >2 Ind./km² nachweisen. Dass im Seegebiet um Borkum West II relativ hohe Schweinswaldichten über das gesamte Jahr hinweg vorkommen, wird von Ergebnissen des StUK3-Monitorings (Hansen et al. 2012) zum Windpark alpha ventus bestätigt. Es konnten höchste Schweinswaldichten von 2,1 Ind./km² festgestellt werden. Obwohl das StUKplus-Monitoring zu alpha ventus über Flugzeugzählungen keinen Jahresgang abdeckt, kann ebenfalls gezeigt werden, dass mindestens seit 2009 höhere Schweinswaldichten im Seegebiet um Borkum West II beobachtet werden (Siebert et al. 2012). Studien aus Holland, Belgien und Nordfrankreich weisen seit einigen Jahren auf ansteigende Schweinswalsichtungen und -strandungen im Bereich der südlichen Nordsee hin (Camphuysen 2004, Kiszka et al. 2004, Scheidat & Verdaat 2009, Camphuysen 2011, Geelhoed et al. 2011). Zusammengefasst zeigen die o.e. Studien, dass trotz des Baus des ersten deutschen Offshore Windparks im Untersuchungsgebiet der vorliegenden Studie im Jahr 2009 keine Vorbelastung im Vorkommen von Schweinswalen vorliegt.

Gemittelt über alle 26 POD-Messpositionen konnte im Untersuchungszeitraum über insgesamt sieben Monate keine ausgeprägte Saisonalität erkannt werden. Die Daten aus dem StUK3-Monitoring zum Windpark alpha ventus (Diederichs et al. 2008, 2009, 2010, Höschle et al. 2011, Hansen et al. 2012) zeigten dagegen, dass die PODs in der Nähe zum Windparkgebiet einem

deutlichen Jahresgang mit minimalen Werten im Mai/Juni und Maximalwerten im März unterlagen, während die nur ca. 15 km weiter südwestlich liegenden POD-Messpositionen im Gebiet Borkum Riffgrund keine ausgeprägte Saisonalität in der Schweinswal-Detektionsrate zeigten. Insgesamt bestätigten die Detektionsraten, die im Rahmen der vorliegenden Studie erhoben wurden, eine kontinuierlich hohe Anwesenheitsrate von Schweinswalen im Seegebiet um das Schutzgebiet Borkum Riffgrund in den Monaten September bis Anfang April. Schweinswale waren nahezu täglich an allen Messpositionen anwesend, die im Einsatz waren.

Im Vorhaben Borkum West II wurde weltweit erstmalig der serienmäßige Einsatz einer Schallminderungsmaßnahme bei Offshore-Rammarbeiten entwickelt und erprobt und die Reaktion der Schweinswale untersucht. In dem technischen Teil des Vorhabens konnte gezeigt werden, dass regelmäßige Verlegung und Betrieb des Blasenschleiers möglich sind, ohne in den Errichtungsprozess einzugreifen. Messungen des Unterwasserschalls zeigten, dass die Schallimmissionen durch den Blasenschleier um mehr als 10 dB gedämpft werden können. Die begleitenden Untersuchungen über das Vorkommen von Schweinswalen konnten anhand verschiedener Parameter nachweisen, dass die Tiere weniger stark durch Rammungen mit Schallminderung vertrieben wurden als durch ungedämmte Rammungen.

Auf Basis der phänologischen Darstellung des Parameters PP10M/day wurde festgestellt, dass in Zeiten, in denen mehrere Fundamente in nur wenigen Tagen gerammt wurden, im Nahbereich von weniger als 5 km zum jeweiligen Rammort die Detektionsrate (und damit die Anzahl der Schweinswale) unerwarteter Weise anstieg. Die statistische Analyse des Parameters PP10M/day konnte ebenfalls keinen negativen Einfluss der Rammarbeiten von Borkum West II auf die Anwesenheit von Schweinswalen bei einer zeitlichen Auflösung von Tagen nachweisen, unabhängig davon, ob ein Blasenschleier zur Schallminderung eingesetzt wurde oder nicht.

Bei anderen Studien zum Störeffekt von Rammarbeiten auf Schweinswale konnte hingegen auch auf der Basis von PP10M/day ein Vertreibungseffekt festgestellt werden (Brandt et al. 2011, Diederichs et al. 2010, Haelters et al. 2012, Dähne et al. 2013). Während der Rammarbeiten zur Gründung einzelner Fundamente des Windparks Horns Rev II (Brandt et al. 2009, 2011), die im Durchschnitt nur 45 min dauerten, lag der Schallpegel bei mit 176 dB_{SEL} in 720 m Distanz zum jeweiligen Rammort deutlich höher als bei Borkum West II, wo bei den neun Fundamentstandorten, an denen Rammungen ohne Schallschutz ausgeführt wurden, ca. 170 dB_{SEL} in 750 m Entfernung gemessen wurde. Bei Horns Rev II konnte auf Basis von PPM/h im Bereich bis zu 2,6 km Distanz zum jeweiligen Rammort ein Vertreibungseffekt bis maximal 72 h nach Ende der Rammung festgestellt werden, so dass dort auch ein deutlicher Effekt auf Basis PP10M/day zu erkennen war (Brandt et al. 2009, 2011). Mit ca. 169 dB_{SEL} erreichten die Rammarbeiten bei alpha ventus sehr ähnliche Schallpegel wie bei ungedämmten Rammungen der Fundamente von Borkum West II (Bette & Matuschek 2010). Jedoch dauerte hier die mittlere Nettoramzeit zumindest im ersten Bauabschnitt ca. 5 Stunden (Diederichs et al. 2010) und war damit deutlich länger als die 2 Stunden Nettoramzeit bei Borkum West II. Auch die Anzahl Hammerschläge unterschied sich deutlich: Während bei alpha ventus im Mittel über 15.500 Schläge pro Fundament ausgeführt wurden, waren dies bei Borkum West II lediglich im Mittel etwa 4.500. Bei alpha ventus konnte im Bereich bis ca. 4 km zum jeweiligen Rammort eine Meidereaktion von bis zu 35 Stunden nach Ende der Rammung nachgewiesen werden (Diederichs et al. 2010), so dass ein Störeffekt auch auf Tagesbasis zu erkennen war. Die im Vergleich zu Horns Rev II geringeren Schallpegel verbunden mit der im Vergleich zu alpha ventus relativ kurzen Nettoramzeit sowie der geringeren Anzahl Rammschläge können als Ursache dafür angenommen werden, dass bei Borkum West II auf der Basis von Tagen kein Vertreibungseffekt von Schweinswalen auch im Nahbereich der Rammbaustelle erkannt werden konnte. Während der Rammarbeiten zum belgischen Windpark C-Power (Thorntonbank) konnten Haelters et al. (2012) in einer Distanz zwischen 2,6 km und 7,3 km zum jeweiligen Rammort einen signifikanten Abfall der Detektionsrate auf der Basis von PP10M/day im Vergleich zwischen der Woche vor Beginn der

Rammarbeiten (ca. 30 % PP10M/day) und der ersten Woche nach dem Start der Rammungen (ca. 5 % PP10M/day) feststellen.

Dass auf der Basis von PP10M/day kein Vertreibungseffekt nachgewiesen werden konnte, führte zu folgenden zwei Erkenntnissen mit Relevanz für die weiteren Analysen im Rahmen der vorliegenden Studie: 1. Die Untersuchung eines räumlich-zeitlichen Vertreibungseffektes musste auf einer zeitlich Auflösung von Stunden (PPM/h) erfolgen. 2. Die Erholungszeit (= Zeit in der potenziell vertriebene Schweinswale wieder zurückkehren) war kürzer als 24 Stunden. Um sicher zu stellen, dass mögliche Vertreibungseffekte einzelner Rammphasen nicht durch die Effekte der vorhergehenden Rammphasen überlagert wurden, wurde auf Basis dieses Ergebnisses eine Zeit von 36 Stunden definiert, die mindestens zwischen zwei Rammphasen liegen musste, um sie im Rahmen der statistischen Analyse zu berücksichtigen.

Die Auswertung des Parameters PPM/h zeigte, dass der Vertreibungseffekt von Rammschall auf Schweinswale in seiner räumlichen Dimension eindeutig von der Lautstärke (SEL_{50}) der Impulsrammung abhängig war und maximal bis zu einem Schallpegel von 144 dB_{SEL} reichte. Waren die Tiere einem leiseren Impulsschall ausgesetzt, konnte keine geringere Detektionsrate von Schweinswalen im Vergleich zum neunstündigen Referenz-Zeitraum vor Beginn der Rammung festgestellt werden.

Weiterhin nahm die Detektionsrate mit abnehmender Lautstärke (also zunehmender Distanz zur Schallquelle) graduell zu. Dieser Gradient verlief nahezu linear. Der stärkste (statistisch höchst signifikante) Vertreibungseffekt war bei der höchsten Lautstärke ($>160 dB_{SEL}$) zu erkennen. An der Nachweisgrenze des Effektes (also etwas lauter als 144 dB_{SEL}) verließen dagegen nur relativ wenige Schweinswale das Gebiet. Je stärker die Tiere dem Schall ausgesetzt waren, desto geringer war die Detektionsrate, also desto mehr Tiere verließen den entsprechenden Bereich.

Durch die Einteilung des Datensatzes in Schallklassen gelang in dieser Studie eine sehr gute räumliche Eingrenzung des Störeffektes. Alle bisherigen Untersuchungen mussten aufgrund hoher Variabilität in den Schweinswaldaten und/oder des z.T. geringen Datensatzes sehr grobe Distanzklassen bilden, um die Grenze eines störenden Effektes durch Rammarbeiten auf Basis von POD-Daten zu definieren (Diederichs et al. 2010, Brandt et al. 2011, Dähne et al. 2013).

Über den in Kapitel D.3, (S. 78 ff) dargestellten Zusammenhang von breitbandiger Schallemission und Distanz kann auf die räumliche Distanz des Vertreibungseffektes im Projekt Borkum West II geschlossen werden. Die Schallmessungen zeigen, dass bei Rammungen ohne Schallschutz ein Schallpegel im Median von 144 dB_{SEL} in einer Distanz von ca. 15 km Entfernung unterschritten wird. (siehe auch Abb. 1-47, S. 106). Die Lautstärke in 750 m Entfernung zum Rammort betrug bei ungedämmter Rammung 170 dB_{SEL} .

Bei gedämmter Rammung mit der Blasenschleier-Konfiguration 2 (BBC 2) wurde eine Lautstärke von 158 dB_{SEL} in 750 m Entfernung gemessen. In einer Entfernung von ca. 4,8 km wurde auf Basis der Schallmessungen eine Lautstärke von 144 dB_{SEL} unterschritten. Dies entsprach einer Reduktion der Fläche, innerhalb der Schweinswale gestört wurden, von ca. 707 km^2 bei ungedämmter Rammung auf 72 km^2 bei gedämmter Rammung, entsprechend einer Reduktion der „gestörten“ Fläche (und damit auch von „betroffenen“ Schweinswalen) um 90 %! Bei dem etwas weniger stark schallmindernden Blasenschleiertyp BBC 1 war ein Vertreibungseffekt bis in eine Entfernung von 6,7 km ($= 144 dB_{SEL}$) nachweisbar, was immer noch einer Reduktion der potenziell gestörten Fläche um 80 % auf 141 km^2 entsprach.

Wird zusätzlich der (lineare) Gradient in der Abnahme der Störwirkung berücksichtigt, reduziert sich die Anzahl der tatsächlich „gestörten“ Individuen noch weiter. Unter der Annahme einer linearen Abnahme der Störung ab 1 km Distanz zur Schallquelle bis zur nachweisbaren Reaktionsgrenze (144 dB_{SEL}) und einer 100%-igen Vertreibung der Tiere bis in eine Distanz von 1 km zur Schallquelle, werden nur ca. 40 % der Individuen durch den Impulsschall zum Verlassen des Gebietes getrieben.

Da Tiere, die ein Gebiet hoher Schallbelastung verlassen, nicht aus dem Gesamtsystem verschwinden, wäre zu erwarten, dass es in zunehmender Entfernung zur Schallquelle zu einer

Erhöhung der Abundanz von Schweinswalen kommt. Ein solcher Effekt, der von Dähne et al. (2013) im Zusammenhang mit Rammungen bei alpha ventus vermutet wurde, wurde durch die Daten von Borkum West II nicht bestätigt. Die Detektionsraten in den Schallklassen knapp oberhalb des Hintergrundschallpegels ($<135 \text{ dB}_{\text{SEL}}$) lagen zwar über der mittleren Detektionsrate im Vergleichszeitraum vor den Rammarbeiten, jedoch unterschieden sich die Werte nicht signifikant. Da die Fläche mit zunehmenden Abstand zur Schallquelle allerdings exponentiell zunimmt, war ohnehin ein starker Verdünnungseffekt zu erwarten: Wenige Tiere, die aufgrund des Rammschalls aus dem Zentrum eines Kreises vertrieben wurden, verteilten sich auf große Ringflächen außerhalb der Nachweisgrenze für Störungen durch Rammschall. Daher war auch keine signifikant höhere Dichte von Schweinswalen unterhalb von $144 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ zu erwarten.

Unsere Ergebnisse zur Nachweisgrenze eines Störungseffektes durch Rammschall werden durch Resultate bisheriger Studien zur Auswirkung von Impulsschall auf Schweinswale bestätigt (z.B. Lucke et al. 2009, Brandt et al. 2009, 2011, Diederichs et al. 2010, Dähne et al. 2013, Rose et al. 2014). Jedoch ist herauszustellen, dass die Datenbasis der vorliegenden Untersuchung wesentlich besser ist als die aller bisherigen Studien. So basierte die Untersuchung von Lucke et al. (2009) auf einem einzigen in Gefangenschaft lebenden Schweinswal, bei dem unterhalb von $145 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ keine Verhaltensänderung festgestellt wurde, wenn das Tier der impulshaften Beschallung einer seismischen Airgun ausgesetzt war. Diese Beobachtung stimmte mit den Erwartungen von Richardson et al. (1995) überein, die basierend auf verschiedenen Studien an Zahnwalen von keiner Störungsreaktion der Tiere unterhalb eines Geräuschpegels von 140 dB in den Frequenzen ihrer besten Hörkapazitäten ausgehen. Brandt et al. 2009 stellten einen negativen Effekt von Rammschall auf Schweinswale bis zu einem (berechneten) Schallimmissionswert von $144\text{-}147 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ fest; Rose et al. (2014) fanden beim Bau des Windparks alpha ventus hierfür einen Wert von $143 \text{ dB}_{\text{SEL}}$. Diese beiden Studien basierten allerdings auf deutlich weniger Messpositionen als die hier vorgelegte Studie. Bei alpha ventus konnten Rose et al. (2014) während und nach längeren Rammphasen Vertreibungseffekte maximal bis zu einer mittleren Entfernung von etwa $16,6 \text{ km}$ feststellen, während diese bei kürzeren Rammphasen nur bis in etwa 9 km Entfernung feststellbar waren. Dähne et al. (2013) wiesen im selben Windpark einen Vertreibungseffekt bis $10,7 \text{ km}$ Distanz zur Schallquelle nach. Letzteres entspräche in etwa einer Schallbelastung von $146\text{-}152 \text{ dB}_{\text{SEL}}$. Die für Borkum West II festgestellte Nachweisgrenze eines Effekts in etwa 15 km Entfernung (Mittel) um nicht schallgeschützte Rammorte herum liegt somit im Bereich der für Horns Rev II (Brandt et al. 2009, 2011: im Mittel $17,8 \text{ km}$) und alpha ventus (Dähne et al. 2013, Rose et al. 2014: Werte siehe oben) ermittelten Störradien.

Bei der Übersetzung des breitbandigen Einzelereignispegels SEL in Entfernungen zur Schallquelle wurde zunächst vereinfachend davon ausgegangen, dass die Hörbarkeit für Schweinswale bei gleichlauten Schallimpulsen bezogen auf den Einzelereignispegel SEL bei gedämmter und ungedämmter Rammung identisch war. Wie in Kapitel D.6.2 (S. 98 f) dargestellt, unterschieden sich jedoch die Frequenzspektren eines Einzelereignispegels gleicher Lautstärke, abhängig davon, ob das Schallsignal einen Blasenschleier passiert hatte oder nicht. Bei Signalen, die durch einen Blasenschleier gelaufen waren, war das Frequenzspektrum zu den tiefen Tönen hin verschoben, da die hohen Tonlagen durch den Blasenschleier stärker gedämpft wurden. Da das Hörvermögen der Schweinswale zum hochfrequenten Frequenzbereich ($>1 \text{ kHz}$) zunehmend besser wird (Kastelein et al. 2002), kann angenommen werden, dass ein gedämmter Schallimpuls für einen Schweinswal schlechter hörbar ist als ein ungedämmter Schallimpuls gleicher Stärke.

Die Ergebnisse im Rahmen der vorliegenden Studie für Rammungen ohne Schallschutz zeigten, dass die Nachweisgrenze des Störeffektes wie beim Gesamtdatensatz bei $145\text{-}150 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ lag. Hier ergab sich in der Schallklasse $135\text{-}140 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ eine sichtbare, wenn auch nicht signifikant höhere Detektionsrate als im Vergleichszeitraum vor den Rammarbeiten. Weiterhin war ein deutlicher Gradient mit abnehmender Detektionsrate bei zunehmender Lautstärke zu erkennen. Bei $>160 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ trat der stärkste Vertreibungseffekt auf.

Bei Rammungen mit dem am stärksten schallmindernden Blasenschleiertyp BBC 2 war ebenfalls ein Gradient mit abnehmendem Störeffekt bei abnehmender Lautstärke zu beobachten, jedoch wies hier nur noch die Schallklasse 150-155 dB_{SEL} signifikant geringere Detektionsraten auf. Die nächst lautere Schallklasse 155-160 dB_{SEL} zeigte sogar wieder eine leicht erhöhte Detektionsrate, jedoch konnten hieraus bei insgesamt nur sechs Messwerten keine weit reichenden Schlüsse gezogen werden. In einer direkten Gegenüberstellung der modellierten Detektionsraten mit und ohne Blasenschleier konnte für die Zeit während des Rammens in keiner Schallklasse ein signifikanter Unterschied nachgewiesen werden.

Es muss hier hinzugefügt werden, dass der Einsatz des Blasenschleiers Typ BBC 2 zu einer solchen guten Schallminderung geführt hat, dass keine Messwerte aus dem Schallbereich von >160 dB_{SEL} und nur sehr wenige Werte aus den Schallklassen oberhalb von 145 dB_{SEL} vorlagen. Diese Schallklassen bedürfen einer zukünftigen Überprüfung mit einem größeren Datensatz.

Da die Höreigenschaften der Schweinswale sehr stark frequenzabhängig sind, ist für die Reichweite einer schallinduzierten Störwirkung die Frequenz, in der die Hauptenergie des jeweiligen Schallimpulses liegt, von hoher Wichtigkeit. Das kann sehr einfach am Beispiel des seal scarers demonstriert werden: Brandt et al. (2013) konnten zeigen, dass Schweinswale bei dem Einsatz eines seal scarers, der bei einer Frequenz von 18 kHz den größten Schalldruck entwickelt, bereits bei einem Ereignispegel (SEL) von 118 dB eine Verhaltensänderung zeigen. Lucke et al. (2009) stellten dagegen bei tieffrequenter Beschallung mit einer Airgun fest, dass bei Schweinswalen unterhalb von 145 dB_{SEL} keine aversive Verhaltensänderung mehr ausgelöst wurde.

Neben der räumlichen Dimension wurde auch die zeitliche Dimension des Störeffektes untersucht. Dazu wurden die Stunden nach dem Ende einer Rammphase durchnummeriert und zu Zeitklassen von je 4 Stunden zusammengefasst. Es wurde bis zu einer Dauer von maximal 21 bis 24 Stunden nach dem Ende der Rammarbeiten ein möglicher Störeffekt überprüft.

Es konnte demonstriert werden, dass es im Median über den gesamten Datensatz 9 bis 12 Stunden dauerte, bis die Tiere wieder vollständig in das zuvor verlassene Gebiet einwanderten. Diese Dauer des Störeffektes unterlag bis zur Nachweisgrenze offensichtlich keinem Gradienten, was bedeutete, dass es auch in einer Entfernung, in der noch soeben ein Vertreibungseffekt nachgewiesen werden konnte, mindestens 12 Stunden dauerte, bis die Tiere wieder zurück kamen. Die Ausprägung der Detektionsrate unterlag jedoch insbesondere im lauten Schallbereich (>150 dB_{SEL}) einem deutlichen Gradienten mit umso geringerer Detektionsrate, je weniger Zeit zur Rammung vergangen war. Warum höhere Detektionsraten im lauten Schallbereich 17 bis 24 Stunden nach dem Ende der Rammtätigkeit auftraten, und ob dieses Phänomen überhaupt mit den Bauarbeiten in Verbindung stand, konnte nicht abschließend geklärt werden.

Warum die Detektionsrate in der Schallklasse 140-145 dB_{SEL} nach dem Ende der Rammung für über 24 Stunden signifikant niedriger als im Vergleichszeitraum lag, bleibt offen. In dieser Schallklasse konnte während der Rammung kein Unterschied in der Detektionsrate im Vergleich zur Rate vor der Rammung festgestellt werden. Es muss beachtet werden, dass sich gleich weite Schallklassen nicht in flächenmäßig gleich große Abstandsklassen zur Schallquelle übersetzen lassen. Aufgrund der Ausbreitungseigenschaften von Unterwasserschall (Kapitel D.6.2, S. 98 ff) ist die Fläche einer Schallklasse von 140-145 dB bei ungedämmter Rammung wesentlich größer als die Fläche der Schallklasse von 150-155 dB (ungedämmt) und auch größer als die Fläche 140-145 dB bei gedämmter Rammung. Möglicherweise kann hier eine sehr ungleichmäßige Verteilung der Schweinswale bzw. mögliche lokale oder regionale Wanderungsbewegungen die Auswirkung des Rammschalls überlagern.

So war auch in der Schallklasse <135 dB_{SEL}, in der eigentlich kein Effekt mehr zu erwarten war, immer noch in den beiden ersten Zeitklassen bis 8 Stunden nach dem Ende der Rammarbeiten eine signifikant geringere Detektionsrate zu erkennen. Da aber bereits in der vorherigen (lauteren) Schallklasse kein Effekt feststellbar war, stand diese Beobachtung wahrscheinlich nicht im Zusammenhang mit dem Rammschall.

Für beide Teildatensätze (ohne und mit Schallschutz BBC 2) blieb das grundsätzliche oben geschilderte Bild erhalten. Im Median dauerte es bis zu 12 Stunden, bevor die Schweinswale das Gebiet wieder in der gleichen Anzahl besiedelten wie vor Beginn der Rammung. Bei beiden Teildatensätzen wich die Schallklasse 140-145 dB ab, da hier über 24 Stunden hinweg signifikant weniger Schweinswalsignale aufgezeichnet wurden als vor der Rammung. Und beide Teildatensätze unterstützten die Aussage, dass unterhalb von 140 dB Vertreibung und Rückkehr nicht wie in den höheren Schallklassen konsistent nachweisbar sind.

Der direkte Vergleich zwischen den Datensätzen mit und ohne Schallschutz ergab keine Hinweise, dass ein Schallsignal gleicher Lautstärke unterschiedlich starke Störeffekte auf Schweinswale ausübte, je nachdem, ob es durch einen Blasenschleier gedämmt wurde oder nicht. Allerdings ließ auch hier der deutlich begrenzte Datensatz bei hohen Lautstärken bei Rammungen mit Blasenschleier eine statistisch belastbare Aussage nicht zu.

Im letzten Schritt der Analyse wurde der räumlich-zeitliche Störeffekt über den Parameter „1. Wartezeit“ überprüft. Die Untersuchung der 1. Wartezeit wies einen (schwachen) schallinduzierten Vertreibungseffekt sowohl in räumlicher als auch in zeitlicher Dimension nach. Der Effekt einer längeren Dauer bis zum nächsten Schweinswalereignis war bis in eine Entfernung von 4 km nachweisbar. Da die 1. Wartezeit zumeist auch die Zeit der Rammphase und eine gewisse Zeit vor dem Start der Rammung einschloss, konnte mit Hilfe der Dauer der 1. Wartezeit keine exakte Vertreibungsdauer definiert werden. Im Mittel dauerte die Netto-Rammzeit pro Fundament zwei Stunden, während die mittlere Wartezeit (ohne Rammung) im Durchschnitt etwas länger als fünf Stunden andauerte. Da die 1. Wartezeit im Nahbereich um 6 Stunden länger war als die Kontroll-Wartezeit, konnte von einem zeitlichen Vertreibungseffekt zwischen vier und sechs Stunden im Nahbereich bis 4 km ausgegangen werden.

Um den Vertreibungseffekt auf Basis der 1. Wartezeit hinsichtlich verschiedener Schallklassen zu überprüfen, wurde im nächsten Schritt die 1. Wartezeit nach Ende einer Rammung im Vergleich zu von Rammschall unbeeinflussten Wartezeiten in Abhängigkeit von Schallklassen in 2 dB_{SEL}-Schritten getestet. Auch hier bestätigte sich eine signifikante Verlängerung der 1. Wartezeit bei hohen Lautstärken. An POD-Stationen, an denen ein Schallpegel von über 160 dB_{SEL} erreicht wurde, verlängerte sich die 1. Wartezeit um 11:00 h über die durchschnittliche Wartezeit von 6:00 h hinaus. Die Dauer des Störeffektes reduzierte sich bis auf eine Verlängerung um 6:00 h bei einem Einzelereignispegel von 158-160 dB_{SEL}. Bei den nachfolgenden Schallklassen war kein signifikanter Unterschied mehr feststellbar.

Bisherige Studien konnten eine graduelle Abnahme der Dauer des Störeffektes mit zunehmender Distanz zur Schallquelle zeigen (Brandt et al. 2009, 2011, Diederichs et al. 2010, Dähne et al. 2013). Dieser Effekt konnte auf Basis der 1. Wartezeit im Projekt Borkum West nicht sehr deutlich gezeigt werden. Zwar wäre eigentlich eine graduelle schnellere zeitliche Erholung mit zunehmender Distanz zu erwarten gewesen, da das Seegebiet den Tieren uneingeschränkt wieder zur Verfügung steht, sobald der Störreiz (in diesem Fall Rammschall) aufhört. Dieser zeitliche Gradient in einer Rückkehrzeit war jedoch auf Basis der 1. Wartezeit nur sehr schwach ausgeprägt. Hier entsprach das Ergebnis der Analyse der 1. Wartezeit den Ergebnissen der Auswertung der Detektionsrate in δ PPM/h und gab Hinweise darauf, dass die Rückkehrzeit der Tiere offenbar nicht sehr ausgeprägt mit der Schallbelastung (und damit mit der Distanz zur Schallquelle) in Zusammenhang stand.

Die Ergebnisse der akustischen Untersuchungen dokumentieren eine deutliche Reduzierung der Störwirkung von Offshore-Ramarbeiten durch den Einsatz eines Großen Blasenschleiers, da ein Störradius durch den Rammschall bis zu einer Schallbelastung von maximal 144 dB_{SEL} abgesichert werden konnte. Gleichzeitig konnte gezeigt werden, dass die Störwirkung auf Schweinswale einem deutlichen Gradienten folgte. An der Nachweisgrenze reagierten nur noch wenige Individuen im Vergleich zum Bereich hoher Schallbelastung (>160 dB_{SEL}), wo die Detektionsrate im Vergleich zum Zeitraum vor der Rammung hoch signifikant geringer war. Dies ließ vermuten, dass nahezu alle Individuen ein Gebiet solch hoher Schallbelastung verließen. Dieses Resultat stimmt

mit Ergebnissen anderer Studien überein. In der Auswertung der erhobenen Daten konnte kein Effekt hinsichtlich des unterschiedlichen Frequenzspektrums gedämmter und ungedämmter Rammungen nachgewiesen werden.

Die Beziehung zwischen Schallstärke und Störwirkung konnte auf Basis verschiedener Parameter und unabhängig von jeweiligen Schallschutzkonfigurationen nachgewiesen werden. Die vorliegenden Ergebnisse belegen dadurch eine deutliche Reduzierung der Störwirkung von Rammschall auf die Anwesenheit von Schweinswalen bei Einsatz eines Großen Blasenschleiers.

Der Zeitpunkt, ab dem Tiere das gestörte Gebiet nach dem Ende der Rammung vollständig wiederbesiedelten, lag bei Borkum West II bei ca. 12 Stunden. Hier konnte entgegen der Erwartungen kein deutlicher Gradient mit schnellerer Rückkehrzeit bei zunehmender Entfernung zur Schallquelle nachgewiesen werden. Die Gründe hierfür bleiben offen. Möglicherweise ist das gestörte Gebiet bei Einsatz des Blasenschleiers bereits zu klein, um einen zeitlichen Gradienten nachweisen zu können.

AUSBLICK UND WEITERER FORSCHUNGSBEDARF

Die Erfahrungen aus dem Projekt HYDROSCHALL-OFF BW II bilden eine gute Grundlage für die zukünftige Anwendung von Schallminderungsmaßnahmen beim Ausbau der Offshore-Windenergie in Deutschland. Zugleich zeigt sich aber aus anderen derzeit laufenden Vorhaben, dass die Ergebnisse des Vorhabens nur bedingt auf andere Standorte übertragbar sind und es nicht in jedem Fall gelingt, die bei Borkum West II erzielte Schallminderungswirkung unter veränderten Rahmenbedingungen zu reproduzieren. Neben einer technischen Weiterentwicklung von Blasenschleiern erscheint es in diesem Zusammenhang bedeutsam, die Wirkungsweise unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen weiter zu untersuchen und die wesentlichen Einflussfaktoren zu beschreiben, welche die schallmindernde Wirkung bestimmen. Gleichzeitig wird aus der laufenden Diskussion über die Bewertung von Störungen durch Rammschall und die Frage, ob weitere Regelungen zur Steuerung von Rammarbeiten notwendig sind, deutlich, dass ein großes Interesse besteht, die Reaktion von Schweinswalen räumlich und zeitlich detailliert beschreiben und bewerten zu können. Hierzu hat das Vorhaben neue Ergebnisse erbracht, aber vor dem Hintergrund heterogener Datensätze von gedämmten und ungedämmten Rammungen auch Fragen offen gelassen. Als Ausblick seien hier kurz die wesentlichen Punkte aufgeführt, die für die Entwicklung eines Stands der Technik beim Blasenschleier und für die weitere Untersuchung der Schallminderung und der Reaktion von Schweinswalen als nächste Schritte empfohlen werden:

- Es sind weitere technische Optimierungen und Tests mit Auslegungsverfahren des Großen Blasenschleiers notwendig, um mit den wachsenden Anforderungen im Offshore-Windparkbau Schritt zu halten. Dies gilt insbesondere hinsichtlich des Einsatzes bei großen Errichterschiffen, um die herum, sofern die gängige Errichtungsprozedur beibehalten wird, weitaus längere Düsenschläuche verlegt werden müssten als die in diesem Projekt erprobten Schläuche von 560 m Länge. Längere Schläuche hätten aber zur Folge, dass mehr Kompressoren benötigt würden, um eine ausreichende Luftmenge ($\text{m}^3 \cdot (\text{m} \cdot \text{min})$) erzeugen zu können.
- Die wesentlichen Einflussfaktoren und deren theoretische und praktische Grenzen auf die schallmindernde Wirkung des Großen Blasenschleiers sind noch nicht ausreichend bekannt und müssen weiter untersucht werden. Dies gilt in Bezug auf einfache Einflussgrößen wie die verwendete Luftmenge, aber auch für Faktoren wie die Blasengröße, die Blasendichte und den Abstand zwischen den Düsenrohren.
- Derzeit ist noch kein Modell für die Ausbreitungsdämpfung mit und ohne Schallminderungsmaßnahme verfügbar, mit dem die hydroakustische Belastung in Entfernungen von mehreren Kilometern zu einem Rammort mit hinreichend großer Genauigkeit abgeschätzt werden kann.

Die Reaktion von Schweinswalen auf den Unterwasserschall von Rammarbeiten sollte im Hinblick auf die frequenzabhängige Wirkung des Blasenschleiers untersucht und beschrieben werden. Es sollten geeignete Parameter für die Bemessung und Bewertung von Störreaktionen entwickelt und festgelegt werden.

LITERATUR

- Akamatsu, T., J. Teilmann, Miller, L.A., Tougaard, J., Dietz, R., Wang, D., Wang, K., Siebert, U. & Naito, Y. (2007): Comparison of echolocation behaviour between coastal and riverine porpoises. *Deep-Sea Res.* 54: 290-297
- Akamatsu, T., Wang, D., Wang, K. & Yasuhiko, N. (2005): Biosonar behaviour of free-ranging porpoises. *Proc. R. Soc. Lond. B.* 272: 797-801
- alpha ventus (2012): FACT-SHEET alpha ventus. (www.alpha-ventus.de)
- Bellmann, M. A. (2012): Die technische Entwicklung von Schallminderungstechnologien: Stand der Forschung, Fachtagung Offshore: Minimierung von Unterwasserschall, organisiert von Offshore Forum Windenergie und IHK, am 28. März 2012, Rostock
- Bellmann, M. A. (2012): Forschungsprojekt: ESra (Evaluation von Systemen zur Ramm-schallminderung an einem Offshore-Testpfahl) – Auswertung der Hydroschall- und Erschütterungsmessungen. Itap Projektbericht Nr. 1749-11-a-bel für BMU gefördertes Projekt ESra, FKZ 0325307
- Bellmann, M. A. & Gerke, P. (2012): Baumonitoring beim Offshore Windkraftwerk Borkum West II – Hydroschallmessungen, Schallminderung durch das eingesetzte Schallschutzsystem "Großer Blaseschleier". Itap Projektbericht 1906-12-a-mb
- Bellmann, M. A. & Gerke, P. (2012): Offshore Windkraftwerk BARD Offshore 1 – Kleiner Blaseschleier. Itap Projektbericht 1763-12-c-pg für BMU gefördertes Projekt HYDROSCHALL OFF BO 1, FKZ 0325334A/B/C/G
- Bellmann, M. A. & Gerke, P. (2013): Offshore Messkampagne 1 (OMK 1) für das Projekt BORA im Windpark BARD Offshore 1, Messbericht der itap GmbH Projekt Nr. 1924-12-mb für BMU gefördertes Projekt BORA, FKZ 0325421A/B/C
- Bellmann, M. A., Müller, M. & Gündert, S. (2013): Offshore-Windpark Meerwind Süd/Ost – Baumonitoring Marine Säuger (Hydroschallmessungen – Stand nach den ersten 57 Fundamenten: statistische Auswertung der Wirksamkeit des eingesetzten Schallminderungssystems und Darstellung der daraus resultierenden und geplanten Verbesserungen gemäß Maßgabe II.2.3. Itap Projektbericht 1959-13-mb
- Betke, K. (2008): Measurement of wind turbine construction noise at Horns Rev II. Itap Bericht Nr. 1256-08-a-KB im Auftrag von BioConsult SH
- Betke, K. & Matuschek, R. (2009): Unterwassergeräusche beim Bau der Umspannplattform im Offshore-Testfeld alpha ventus. Zwischenbericht zum StUK3-Monitoring
- Betke, K. & Matuschek, R. (2010): Messungen von Unterwasserschall beim Bau der Windenergieanlagen im Offshore-Testfeld "alpha ventus". Abschlussbericht zum Monitoring nach StUK 3 in der Bauphase vom 15.03.2010. Erhältlich beim BSH
- Betke, K. & Matuschek, R. (2011): Einsatz eines „Großen Blaseschleiers (Big Bubble Curtain – BBC)“. Abschlussbericht zum Monitoring nach StUK 3 in der Bauphase der itap GmbH
- BioConsult SH (2011): Offshore-Windenergiepark "Borkum West II."
- BioConsult SH (2012): Offshore-Windpark „DanTysk“. Fachgutachten Marine Säugetiere. 3. Untersuchungsjahr der Basisaufnahme (März 2011 bis März 2012). Unveröff. Gutachten im Auftrag der DanTysk Offshore Wind GmbH
- Brandt, M., Diederichs, A. & Nehls, G. (2009): Harbour porpoise responses to pile driving at the Horns Rev II offshore wind farm in the Danish North Sea. Unveröff. Gutachten im Auftrag von DONG Energy

- Brandt, M. J., Höschle, C., Diederichs, A., Betke, K., Matuschek, R., Witte, S. & Nehls, G. (2011): Effectiveness of a seal scarer in deterring harbour porpoises (*Phocoena phocoena*) and its application as a mitigation measure during offshore pile driving. Final report 2011 on behalf of the German Federal Ministry of Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (FKZ: 0325141) and DONG Energy
- Brandt, M., Diederichs, A., K. Betke & Nehls, G. (2011): Responses of harbour porpoises to pile driving at the Horns Rev II offshore wind farm in the Danish North Sea. *Mar Ecol Prog Ser.* Vol. 421: 205–216
- Brandt, M., Höschle, C., Diederichs, A., Betke, K., Matuschek, R. & Nehls, G. (2013): Seal scarers as a tool to deter harbour porpoises from offshore construction sites. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 475: 291-302
- Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) (2007): Standard Untersuchung der Auswirkungen von Offshore-Windenergieanlagen auf die Meeresumwelt (StUK3). Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg
- Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) (2010): Leitsätze für die Anwendung der Eingriffsregelung innerhalb der ausschließlichen Wirtschaftszone und auf dem Festlandsockel im Rahmen von § 58 Abs. 1 Satz 2 BNatSchG. http://www.bsh.de/de/Meeresnutzung/Wirtschaft/Windparks/Grundlagen/Leitsaetze_Eingriffsregelung.pdf
- Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) (2011): Baumonitoring nach STUK 3: Vollzug der Genehmigung für das Offshore Windparkvorhaben „Borkum-West II“ in der deutschen AWZ der Nordsee. Auflagen des BSHs, Aktenzeichen 5111/Borkum-West II/Vollzug/11-M5303
- Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) (2011): Messvorschrift für Unterwasserschallmessungen – Aktuelle Vorgehensweise mit Anmerkungen. Bericht im Rahmen des Forschungsvorhabens „Ökologische Begleitforschung am Offshore-Testfeldvorhaben „alpha ventus“ zur Evaluierung des Standarduntersuchungskonzeptes des BSH (StUKplus)“. Förderkennzeichen 0327689A
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMU) (2010): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Leitstudie 2010. BMU - FKZ 03MAP146
- Bureau of Ocean Energy Management (BOEM) (2013): Quieting technologies for reducing noise during seismic surveying and pile driving. Information synthesis. February 4, 2013. https://www.infinityconferences.com/InfinityBase/Templates/183779/Information_Synthesis.pdf
- Camphuysen, K. (2004): The return of the harbour porpoise (*Phocoena phocoena*) in Dutch coastal waters. *Lutra* 47: 113-122
- Camphuysen, K. (2011). Recent trends and spatial patterns in nearshore sightings of harbour porpoises (*Phocoena phocoena*) in the Netherlands (Southern Bight, North Sea), 1990-2010. *Lutra* 54: 39-47
- Dähne, M., Gilles, A., Lucke, K., Peschko, V., Adler, S., Krügel, K., Sundermeyer, J. & Siebert, U. (2013): Effects of pile-driving on harbour porpoises (*Phocoena phocoena*) at the first offshore wind farm in Germany. *Environ. Res. Lett.* 8. doi:10.1088/1748-9326/8/2/025002
- Diederichs, A., Hennig, V. & Nehls, G. (2008) Investigations of the bird collision risk and the responses of harbour porpoises in the offshore wind farms Horns Rev, North Sea, and Nysted, Baltic Sea, in Denmark. Part II: Harbour porpoises. Funded by the German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety. FKZ 0329963 + FKZ 0329963A. Final Report 2008

- Diederichs, A., Brandt, M. J. & Nehls, G. (2009): Auswirkungen des Baus des Umspannwerks am Offshore-Testfeld „alpha ventus“ auf Schweinswale – Untersuchungen zu Schweinswalen mit T-PODs. Im Auftrag der Stiftung Offshore-Windenergie
- Diederichs, A., Brandt, M. J., Nehls, G., Laczny, M., Hill, A. & Piper, W. (2010): Auswirkungen des Baus des Offshore-Testfelds „alpha ventus“ auf marine Säugetiere, BioConsult SH Husum, Biola Hamburg
- Elmer, K. H., Betke, K. & Neumann, T. (2007): Standardverfahren zur Ermittlung und Bewertung der Belastung der Meeresumwelt durch die Schallimmissionen von Offshore-Windenergieanlagen: Schall2. Abschlussbericht, BMU gefördertes Projekt, FKZ 0329947
- Geelhoed, S., Scheidat, M., Aarts, G., van Bemmelen, R., Janinhoff, N., Verdaat, H., & Witte, R. (2011): Shortlist Masterplan Wind – Aerial surveys of harbour porpoises on the Dutch Continental Shelf. Research Report IMARES Wageningen UR – Institute for Marine Resources & Ecosystem Studies, Report No. C103/11
- Gerke, P. & Bellmann, M. A. (2012): Offshore Windpark Riffgat – Zusätzliche Messungen der Bauschallimmissionen. Itap Projektbericht 1924-2-12-b-pg
- Gilles, A. (2008): Characterisation of harbour porpoise (*Phocoena phocoena*) habitat in German waters. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. http://eldiss.uni-kiel.de/macau/receive/dissertation_diss_00003429
- Gilles, A., Risch, D., Scheidat, M., & Siebert, U. (2006): Erfassung von Meeressäugtieren und Seevögeln in der deutschen AWZ von Nord- und Ostsee (EMSON) – Teilvorhaben: Erfassung von Meeressäugtieren. Bericht des F + E Vorhabens „Erfassung von Meeressäugtieren und Seevögeln in der deutschen AWZ der Nord- und Ostsee“ (FKZ-Nr. 802 85 250). Forschungs- und Technologiezentrum Westküsteder Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
- Gilles, A., Herr, H., Lehnert, K., Scheidat, M., Kaschner, K., Sundermeyer, J., Westerberg, U. & Siebert, U. (2008): Erfassung der Dichte und Verteilungsmuster von Schweinswalen (*Phocoena phocoena*) in der deutschen Nord- und Ostsee. MINOS 2 – Weiterführende Arbeiten an Seevögeln und Meeressäugern zur Bewertung von Offshore - Windkraftanlagen (MINOS plus). Endbericht für das BMU. FKZ 0329946 B. Teilprojekt 2, http://www.uni-kiel.de/ftzwest/ag7/projekte/mammals/MINOSplus_TP2_final.pdf
- Gilles, A., Scheidat, M., & Siebert, U. (2009): Seasonal distribution of harbour porpoises and possible interference of offshore wind farms in the German North Sea. Mar. Ecol. Prog. Ser. 383: 295-307
- Gilles, A. & Siebert, U. (2010): Monitoringbericht 2009-2010. Marine Säugetiere und Seevögel in der deutschen AWZ von Nord- und Ostsee. Teilbericht marine Säugetiere – Visuelle Erfassung von Schweinswalen. Endbericht für das Bundesamt für Naturschutz, S. 4-34
- Gilles, A., Adler, S., Kaschner, K., Scheidat, M., & Siebert, U. (2011): Modelling harbour porpoise seasonal density as a function of the German Bight environment: implications for mangagement. Endang. Species Res. 14: 157-169
- Grießmann, T., Rustemeier, J., Betke, K., Gabriel, J., Neumann, T., Nehls, G., Brandt, M., Diederichs, A. & Bachmann, J. (2010): Erforschung und Anwendung von Schallminimierungsmaßnahmen beim Rammen des FINO3-Monopiles. Abschlussbericht zum BMU-Vorhaben "Erforschung und Anwendung von Schallminimierungsmaßnahmen beim Rammen des FINO3-Monopiles - Schall FINO3", Förderkennzeichen 0325023A und 0325077
- Grünkorn, T., Diederichs, A., & Nehls, G. (2004): Fachgutachten Meeressäuger: Liniensektzählungen mit Flugzeug und Schiff westlich von Sylt. Zwischenbericht für den Untersuchungszeitraum von Mai 2002 bis Dezember 2003. Gutachten im Auftrag der Offshore-Bürger-Windpark-Butendiek GmbH & Co. KG

- Haelters, J., Van Roy, W., Vigin, L. & Degraer, S. (2012): The effect of pile driving on harbour porpoises in Belgian waters, in: Degraer, S. et al. (Eds.): Offshore wind farms in the Belgian part of the North Sea: Heading for an understanding of environmental impacts. S. 127-144
- Hammond, P. S. (2006): Small cetaceans in the European Atlantic and North Sea (SCANS-II). LIFE project number LIFE04NAT/GB/000245, final report. biology.st-andrews.ac.uk/scans2/documents/final/SCANS-II_final_report.pdf
- Hammond, P. S., Benke, H., Berggren, P., Borchers, D. L., Buckland, S. T., Collet, A., Heide-Jørgensen, M. P., Heimlich-Boran, S., Hiby, A. R., Leopold, M. F. & Øien, N. (1995): Distribution and abundance of the harbour porpoise and other small cetaceans in the North Sea and adjacent waters (SCANS). EU - Project LIFE 92 - 2/UK/027, Final Report
- Hammond, P. S., Berggren, P., Benke, H., Borchers, D. L., Collet, A., Heide-Jørgensen, M. P., Heimlich, S., Hiby, A. R., Leopold, M. F. & Øien, N. (2002): Abundance of harbour porpoise and other cetaceans in the North Sea and adjacent waters. *J. Appl. Ecol.* 39: 361-376
- Hansen, S., Höschle, C., Diederichs, A., Nehls, G., Laczny, M. & Piper, W. (2012): Offshore-Testfeld Alpha ventus. Fachgutachten Meeressäugtiere. 2. Untersuchungsjahr der Betriebsphase (Januar-Dezember 2011)
- Heckl, M. & Müller, H.A. (1994): Taschenbuch der Technischen Akustik. Zweite Auflage. Springer-Verlag, Berlin
- Höschle, C., Diederichs, A., Nehls, G., Laczny, M. & Piper, W. (2011) Statusbericht Meeressäugtiere im Bereich des Offshore-Testfeldes alpha ventus. Betrachtungszeitraum: 15.12.2009 bis 31.12.2010
- Hothorn, T., Bretz, F., & Westfall, P. (2012): multcomp: Simultaneous Inference for General Linear Hypotheses. <http://cran.r-project.org/package=multcomp>. R package version 1.2-13
- Illingworth, R. R. & Rodkin, R. B. (2001): Final Data Report: Noise and Vibration Measurements Associated with the Pile Installation Demonstration Project for the San Francisco-Oakland Bay Bridge East Span. May 21, 2001
- Illingworth, R. R. & Rodkin, R. B. (2007): Compendium of Pile Driving Sound Data. Prepared for: The California Department of Transportation. 1120 N Street. Sacramento, CA 94274. http://www.dot.ca.gov/hq/env/bio/files/pile_driving_snd_comp9_27_07.pdf
- Institut für Statik und Dynamik (ISD) (2010): Vergleich verschiedener Blasenschleierkonzepte und Darstellung des Forschungsbedarfs
- Institut für technische und angewandte Physik (itap) (2010): Messungen von Unterwasserschall beim Bau der Windenergieanlagen im Offshore-Testfeld „alpha ventus“. Bericht an die Stiftung Offshore-Windenergie, Varel. www.bsh.de/de/Meeresnutzung/Wirtschaft/Windparks/StUK3/StUK3-Schall-Bauphase-15Mar2010.pdf
- Ito, J., Nikolaev, A.R., Luman, M., Aukes, M. F., Nakatani, C. & van Leeuwen, C. (2003): Perceptual switching, eye movements, and the bus paradox. *Perception* 32: 681-698
- Jensen, F. B., Kuperman, W. A., Porter, M. B. & Schmidt, H. (2011): Computational Ocean Acoustics. Second Edition. Springer, New York
- Kastelein, R. A., van der Heul, S., van der Veen, J., Verboom, W. C., Jennings, N., de Haan, D. & Reijnders, P. J. H. (2007): Effects of acoustic alarms, designed to reduce small cetacean by-catch in gillnet fisheries, on the behaviour of North Sea fish species in a large tank. *Mar. Environ. Res.* 64: 160-180
- Kastelein, R. A. (2011): Temporary hearing threshold shifts and recovery in a harbor porpoise and two harbor seals after exposure to continuous noise and playbacks of pile driving sounds. SEAMARCO Ref: 2011/01
- Kastelein, R. A., Bunscoek, P., Hagedoorn, M., Au, W. W. L. & De Haan, D. (2002): Audiogram of a harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) measured with narrow-band frequency-modulated signals. *J. Acoust. Soc. Am.* 112: 334-344

- Kastelein, R. A., Hoek, L., Jennings, N., de Jong, C. A. F., Terhune, J. & Dieleman, M. (2010): Acoustic mitigation devices (AMDs) to deter marine mammals from pile driving areas at sea: audibility & behavioural responses of a harbour porpoise & harbour seals
- Kieler Institut für Landschaftsökologie (KifL) (2005): Verkehrslärm und Avifauna – Quantifizierung und Bewältigung entscheidungserheblicher Auswirkungen von Verkehrslärm auf die Avifauna. Zwischenbericht zum F+E Vorhaben 02.237/2003/LR im Auftrag des BMV
- Kiszka J., Haelters J. & Jauniaux T. (2004): The harbour porpoise (*Phocoena phocoena*) in the southern North Sea: a come-back in northern French and Belgian waters? Report for ASCOBANS. AC11/Doc. 24. www.service-board.de/ascobans_neu/files/ac11-24.pdf
- Clump, G. M. (2001): Die Wirkung von Lärm auf die auditorische Wahrnehmung der Vögel. Angewandte Landschaftsökologie, Heft 44, Seite 9-23, Hrsg Bundesamt für Naturschutz, Bonn
- Koschinski, S. & Lüdemann, K. (2011): Stand der Entwicklung Schallminimierender Maßnahmen beim Bau von Offshore Windenergieanlagen. Studie im Auftrag vom Bundesamt für Naturschutz (BfN). http://www.bfn.de/habitatmare/de/downloads/berichte/BfN-Studie_Bauschallminderung_Juli-2011.pdf
- Kyhn L. A., Tougaard J., Thomas L., Duve L. R., Stenback, J., Amundin, M., Desportes, G. & Teilmann, J. (2012): From echolocation clicks to animal density — acoustic sampling of harbour porpoises with static dataloggers. J. Acoust. Soc. Am. 131: 550-560
- Lockyer, C., Desportes, G., Hansen, K., Labberté, S. & Siebert, U. (2003): Monitoring growth and energy utilisation of the harbour porpoise (*Phocoena phocoena*) in human care. NAMMCO Sci. Publ. Vol. 5: 107-120.
- Lucke, K., Hanke, W. & Denhardt, G. (2004): Untersuchungen zum Einfluß akustischer Emissionen von Offshore-Windkraftanlagen auf marine Säuger im Bereich der deutschen Nord- und Ostsee. – Marine Warmblüter in Nord- und Ostsee: Grundlagen zur Bewertung von Windkraftanlagen im Offshore-Bereich. Endbericht, Teilprojekt 1, Nationalpark Schleswig-holsteinisches Wattenmeer und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (FKZ: 0327520), S. 23-76
- Lucke, K., Lepper, P. A., Blanchet, A. M., Siebert, U. (2007): Testing the auditory tolerance of harbour porpoise hearing for impulsive sound. Poster at: The Effects of Noise on Aquatic Life. International Conference Nyborg Denmark, August 13th to 17th 2007
- Lucke, K., Lepper, P.A., Hoeve, B., Everaarts, E., van Elk, N. & Siebert, U. (2007): Perception of low-frequency acoustic signals by a harbour porpoise (*Phocoena phocoena*) in the presence of simulated offshore wind turbine noise. Aquatic Mammals 33: 55-68
- Lucke, K., Siebert, U., Lepper, P. A. & Blanchet, M. A. (2009): Temporary shift in masked hearing thresholds in a harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) after exposure to seismic airgun stimuli. J. Acoust. Soc. Am. 125: 4060-4070
- Medwin, H. & Clay, C.S. (1998): Fundamentals of Acoustical Oceanography. Academic Press, San Diego
- Medwin, H. (2005): Sounds in the sea – From ocean acoustics to acoustical oceanography. Cambridge
- Nehls, G. & Betke, K. (2011): Darstellung und Bewertung der Auswirkungen von Schallemissionen durch Offshore-Rammarbeiten auf Meeressäuger. Im Auftrag des Offshore Forum Windenergie, Dez 2011
- Nehls, G., Betke, K., Eckelmann, S. & Ros, M. (2007): Assessment and costs of potential engineering solutions for the mitigation of the impacts of underwater noise arising from the construction of offshore windfarms. - BioConsult SH report, Husum, Germany. On behalf of COWRIE Ltd. <http://www.offshorewindfarms.co.uk/Assets/COWRIE-ENGFinal270907.pdf>

- Nehls, G., Betke, K., Koschinski, S., & Lüdemann, K. (2009): Sources of underwater noise and their implications on marine wildlife – with special emphasis on the North Sea and the Baltic Sea. Unveröffentlichtes Gutachten im Auftrag des Umweltbundesamtes
- Petrie, F. S. (2005): Washington State Ferries' Experience with Bubble Curtains: Purpose, Hardware, and Use. 2005 Summer Meeting/Conference of the Transportation Research Board ADC40 (A1F04) Noise & Vibration Committee
- Pinheiro, J. (2010): nlme: Linear and Nonlinear Mixed-Effects Models. <http://cran.r-project.org/packages/nlme>. R package version 3.1-109
- Reck, H., Rasmus, J., Klump, G. M., Böttcher, M., Brüning, H., Gutmiedl, I., Herden, C., Lutz, K., Mehl, U., Penn-Bressel, G., Roweck, H., Trautner, J., Wende, W., Winkelmann, C. & Zschalich, A. (2001): Empfehlung zur Berücksichtigung von Lärmwirkungen in der Planung (UVP, FFH-VU, §8 BNatSchG, §20c BNatSchG). Angewandte Landschaftsökologie, Heft 44, S. 153-160, Hrsg. Bundesamt für Naturschutz, Bonn
- Reyff, J. A. (2003): Underwater sound pressures associated with the restrrike of the pile installation demonstration project piles. Report prepared by Illingworth & Rodkin, Inc. for State of California, Department of Transportation
- Richardson, W. J., Greene Jr, C. R., Malme, C. I. & Thomson, D. H. (1995): Marine Mammals and Noise, Academic Press
- Rigby, R. A. & Stasinopoulos, D. M. (2010): The gamlss.family distributions. Distributed with package gamlss, <http://www.gamlss.com>
- Rodkin, R. B., Reyff, J. A. (2007): Underwater sound from marine pile driving. Effects of noise on aquatic life, Session 6: Anthropogenic sources. Nyborg, 13-17 August
- Rose, A., Diederichs, A., Nehls, G., Brandt, M. J., Witte, S., Höschle, C., Dorsch, M., Liesenjohann, T., Schubert, A., Kosarev, V., Laczny, M., Hill, A. & Piper, W. (2014): Offshore Test Site Alpha Ventus. Expert Report: Marine Mammals. Final Report: From baseline to wind farm operation. Abschlussbericht im Auftrag der DOTI. BioConsult SH, Husum & IfaÖ, Hamburg.
- Rustemeier J., Griebmann T., Betke, K., Gabriel, J., Thomas Neumann, T. & Küchenmeister, M. (2012) Erforschung der Schallminderungsmaßnahme Gestufter Blasenschleier (Little Bubble Curtain) im Testfeld alpha ventus. Abschlussbericht zum BMU-Vorhaben "Schall alpha ventus", FKZ 0325122 A und 0325122 B, gefördert vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Hannover, Germany (2012)
- Rustemeier, J., Neuber, M., Griebmann, T., Ewaldt, A., Uhl, A., Schultz-von Glahn, M., Betke, K., Matuschek, R. & Lübben, A. (2012): Konzeption, Erprobung, Realisierung und Überprüfung von lärmarmen Bauverfahren und Lärminderungsmaßnahmen bei der Gründung von Offshore-WEA („Schall3“). Abschlussbericht des durch BMU und PTJ geförderten Projekts „Schall03“, FKZ 0327645, Institut für Statik und Dynamik, <http://www.isd.uni-hannover.de/387.html?&L=2>
- Rustemeier. J. & Rolfes, R. (2012): Konzeption, Erprobung, Realisierung und Überprüfung von lärmarmen Bauverfahren und Lärminderungsmaßnahmen bei der Gründung von Offshore-WEA (Schall3). Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben. Förderkennzeichen BMU 0327645. - Verbund-Nr. 01061471. Hannover. 236
- Santos M. B. & Pierce G. J. (2003): The diet of harbour porpoise (*Phocoena phocoena*) in the Northeast. Atlantic. Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev. 41: 355-390
- SCANS II (2008): Small Cetaceans in the European Atlantic and North Sea. Final Report submitted to the European Commission under project LIFE04NAT/GB/000245
- Scheidat, M. & Verdaat, H. (2009): Distribution and density of harbour porpoises in Dutch North Sea waters. IMARES, Wageningen. Report number C125/09, S. 1-23

- Scheidat, M., Gilles, A., & Siebert, U. (2004): Erfassung der Dichte und Verteilungsmuster von Schweinswalen (*Phocoena phocoena*) in der deutschen Nord- und Ostsee. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben „Marine Warmblüter in Nord- und Ostsee – Grundlagen zur Bewertung von Windkraftanlagen im Offshore-Bereich (MINOS)“ des Ministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Förderkennzeichen 0329946B
- Scheidat, M., Gilles, A., Herr, H., Risch, D. & Siebert, U. (2007): Monitoring der Abundanz von Schweinswalen und anderen Kleinwalen in deutschen Gewässern (03HS059). Endbericht für das Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV), 36 pp
- Scheidat, M., Tougaard, J., Brasseur, S., Carstensen, J., van Polanen Petel, T., Teilmann, J., Reijnders, P. (2011): Harbour porpoises (*Phocoena phocoena*) and wind farms: a case study in the Dutch North Sea. *Env. Res. Lett.* 6: doi:10.1088/1748-9326/6/2/025102
- Schmidtke, E. (2010): Schockwellendämpfung mit einem Luftblasenschleier zum Schutz der Meeressäuger. http://gsm-ev.de/wp-content/uploads/2009/05/Schmidtke_2010_Schockwellend%C3%A4mpfung_mit_Blasenschleier_Heidkate_DAGA.pdf
- Schultz-von Glahn, M. & Gerke, P. (2011): Messung der Hydroschall-Immissionen bei Probe-Rammarbeiten am Offshore-Windpark EnBW Baltic 2 sowie Messung und Beurteilung der Wirksamkeit von Schallminderungsmaßnahmen. itap Bericht Nr. 1653-10-svg
- Schultz-von Glahn, M., Betke, K. & Matuschek, R. (2006): Minderung des Unterwasserschalls bei Rammarbeiten für Offshore-WEA – Praktische Erprobung verschiedener Verfahren unter Offshore-Bedingungen. UFOPLAN Ref. No. 205 53 113, Abschlussbericht. Umweltbundesamt, Berlin
- Schulze, G. (1996): Die Schweinswale. Westarp Wissenschaften, Magdeburg
- Siebert, U. & Rye, J. H. (2008): Correlation between aerial surveys and acoustic monitoring. In: Wollny-Goerke, K. & Eskildsen, K. (Eds.): Marine mammals and seabirds in front of offshore wind energy. Teubner, Wiesbaden
- Siebert, U., Gilles, A., Dähne, M., Peschko, V., Krügel, K., Benke, H., Lucke, K., Müller, S., Adler, S. & Sundermeyer, J. (2011): Ergänzende Untersuchungen zum Effekt der Bau- und Betriebsphase im Offshore-Testfeld „alpha ventus“ auf marine Säugetiere. Fortschrittsbericht 2010 zum Projekt: Ökologische Begleitforschung am Offshore-Testfeldvorhaben alpha ventus zur Evaluierung des Standarduntersuchungskonzeptes des BSH – StUKplus
- Siebert, U., Gilles, A., Dähne, M., Peschko, V., Krügel, K., Benke, H., Lucke, K., Müller, S., Adler, S. & Sundermeyer, J. (2012): Ergänzende Untersuchungen zum Effekt der Bau und Betriebsphase im Offshore-Testfeld „alpha ventus“ auf marine Säugetiere. In: Blasche, K., Dahlke, C., Boethling, M., Binder, A. (Eds.): Ökologische Begleitforschung am Offshore-Testfeldvorhaben „alpha ventus“ zur Evaluierung des Standarduntersuchungskonzeptes des BSH – StUKplus. Fortschrittsbericht 2011
- Southall, B. A., Bowles, A. E., Ellison, W. T., Finneran, J. J., Gentry, R. L., Greene Jr, C. R., Kastak, D., Ketten, D. R., Miller, J. H., Nachtigal, P. E., Richardson, W. J., Thomas, J. A. & Tyac, P. L. (2007): Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Initial Scientific Recommendations. *Aquatic Mammals* 33: 411-522
- Spence J. & Dreyer, H. (2012): The Design, Predictive Performance Modeling and Field Testing of Underwater Sound Attenuation Systems - A Review of Two Case Studies. POMA Volume 17, pp. 070004
- Stokes, A., Cockrell, K., Wilson, J., Davis, D. & Warwick, D. (2010): Mitigation of Underwater Pile Driving Noise During Offshore Construction: Final Report. Applied Physical Sciences
- Teilmann, J., Rigét, F. & Harkonen, T. (2010): Optimizing survey design for Scandinavian harbour seals: population trend as an ecological quality element. *ICES J. Mar. Sci.* 67: 952-958

- Teilmann, J., Tougaard, J. & Carstensen, J. (2012): Effects on Harbour porpoises from Rodsand 2 Offshore Wind Farm. Scientific Report from DCE – Danish Centre for Environment and Energy. No. 42.2012
- Thiele, R. & Schellstede, G. (1980): Standardwerte zur Ausbreitungsdämpfung in der Nordsee. FWG-Bericht 1980-7, Forschungsanstalt der Bundeswehr für Wasserschall und Geophysik
- Thomsen, F., Laczny, M., & Piper, W. (2007): The harbour porpoise (*Phocoena phocoena*) in the central German Bight: phenology, abundance and distribution in 2002-2004. Helgoland Mar. Res. 61: 283-289
- Todd, V. L. G., Pearse W. D., Tregenza N. C., Lepper P. A. & Todd I. B. (2009): Diel echolocation activity of harbour porpoises (*Phocoena phocoena*) around North Sea offshore gas installations. ICES J. Mar. Sci. 66: 734-745
- Tougaard, J., Carstensen, J., Bech, N. I. & Teilmann, J. (2006): Final report on the effect of Nysted Offshore Wind Farm on harbour porpoises. Annual Report to EnergiE2 (Roskilde: NERI)
- Tougaard, J., Carstensen, J., Teilmann, J., Skov, H. & Rasmussen, P. (2009): Pile driving zone of responsiveness extends beyond 20 km for harbor porpoises (*Phocoena phocoena*). J. Acoust. Soc. Am. 126: 11-4. doi: 10.1121/1.3132523
- Umweltbundesamt (UBA) (2005): Beurteilung von Umweltauswirkungen bei der Genehmigung von Offshore Windenergieanlagen. Positionspapier von UBA FG II 2.3 (Meeresschutz). Dessau
- Umweltbundesamt (UBA) (2011): Empfehlung von Schallschutzgrenzwerten bei der Errichtung von Offshore-Windenergieanlagen (OWEA). Information Unterwasserlärm, Umweltbundesamt Berlin
- Vagle, S. (2003): On the Impact of Underwater Pile-Driving Noise on Marine Life. Institute of Ocean Sciences, DFO/Pacific, Ocean Science and Productivity Division
- Veit, I. (1996): Technische Akustik. Vogel Verlag Würzburg
- Warnes, G. R. (2013): gdata: Various R programming tools for data manipulation. <http://cran.r-project.org/web/packages/gdata>. R package version 2.12.02
- Wickham, H. (2013): plyr: Tools for splitting, applying and combining data. <http://cran.r-project.org/web/packages/plyr>. R package version 1.8
- Wilke, F., Kloske, K. & Bellmann, M. (2012): ESra – Evaluation von Systemen zur Ramm-schallminderung an einem Offshore-Testpfahl. Technischer Abschlußbericht. Projektträger: PTJ, Forschungszentrum Jülich GmbH Förderkennzeichen 0325307
- Würsig, B., Greene Jr, C. R. & Jefferson, T. A. (2000): Development of an air bubble curtain to reduce underwater noise of percussive piling. Mar. Environ. Res. 49: 79-93
- Zuur, A. F., Ieno, E. I., Walker, N. J., Saveliev, A. A. & Smith, G. M. (2009): Mixed Effects Models and Extensions in Ecology with R. Springer Science & Business Media. New York
- Zwicker, E. & Fastl, H. (1999): Psychoacoustics – Models and facts. Information Science, Springer Verlag, München

ANHANG

Anhang zum Großen Blasenschleier

Beteiligte Schiffe

Rammpattform *Goliath*



Anhang Abb: 1: Rammpattform *Goliath* (Quelle: www.geosea.be/EN/Equipment_post.html?postId=36).

Länge: 59,50 m

Länge mit Kran auf Auslegerstütze: 99,50 m

Breite: 32,20 m

Tiefe: 5,00 m

Tiefgang des Pontons: 3,55 m

Stützbeinlänge: 78,85 m

Bein-Durchmesser: 3,00 m

Max. zulässige Deckbelastung: 8 Tonnen / m²

freie Decksfläche: 1.080 m²

Winden: 4 x 30-Tonne-Seilzugkraft, hydraulisch angetrieben, Haltekraft 56.50 Tonnen

Anker: 4 x Delta Flipper, 6-Tonnen

Triebwerke: CCP Strahlruder mit Dynamic Positioning Mode (DP)

Hubgeschwindigkeit: 0,50 Meter/Minute

maximale Nutzlast: 1.400 Tonne

Offshore-Sockel-Kran: SWL 400 Tonne bei 14,90 Meter Höhe

Deck-Kran: SWL 10 Tonnen auf 20,00 Meter

Hydraulikkreislauf: 2 x 405 kw (Vortrieb System)

Triebwerke: 4 x 969 kW

Kran Antrieb: 1 x 750 kW

Hauptgeneratoren: 3 x 240 kVA / 400 V / 50 Hz

Hilfs-Generatoren: 1 x 80 kVA / 400 V / 50 Hz

Unterkunft für 12 + 40 Personen

Büros, Krankenstation, Kontrollraum, Küche/Messe

Erbaut 2008, Lemants Werft in Hoboken (Belgien)

Noortruck



Anhang Abb: 2: Die Noortruck.

Baujahr: 1975

Länge: 53 m

Breite: 12 m

Bruttoregistertonnen: 625 T

Tragfähigkeit: 590 t

Eingetragene Geschwindigkeit (Max./Durchschnitt): 13 / 11 Knoten

Umbau: Anfang 2011, Kröger Werft

Entwicklung und Herstellung des Großen Blasenschleiers

Entwurf und Konstruktion des Düsenschlauches

Die Luftaustrittsöffnungen, die in einem regelmäßigen Abstand voneinander in den Schlauch gebohrt werden sollten, wurden so geplant, dass die im Betrieb aus dem Schlauch entweichende Luft möglichst die für den Schallschutz optimale Blasengröße von theoretisch ca. 3 cm Durchmesser ausbildet.

Aufgrund der Erfahrungen die die Firmen HYDROTECHNIK Lübeck und itap bereits in verschiedenen Projekten gesammelt haben, war bekannt, dass die Art und Weise wie die komprimierte Luft den Schlauch verlässt und in welcher Form sie dann weiter aufsteigt, kaum zu beeinflussen ist.

Der Düsenschlauch wurde so konfiguriert, dass eine Luftmenge von ca. 0,25 m³/m/min ins Wasser gegeben wird. Bei diesem Vorgehen stellt sich die Blasengröße der ausströmenden Druckluft in einem Abstand von ca. 0,3 m vom Düsenschlauch selbständig ein. Im Wasser entsteht dabei ein Gemisch aus vielen verschiedenen Blasengrößen.

Da Offshore große Kräfte auf alle eingesetzten Bauteile wirken und davon auszugehen war, dass die Blasengröße der aus den Luftaustrittsöffnungen entweichenden Druckluft nicht maßgeblich zu beeinflussen war, lag der Schwerpunkt dieser Projektphase auf den mechanischen Eigenschaften des Druckluftschlauches.

Im Rahmen des Projektes BW II wurden 2 Schlauchkonfigurationen untersucht:

- a. Der erste Düsenschlauch (als Konfiguration BBC 1 bezeichnet) ist mit Luftaustrittsöffnungen versehen, die einen kleinen Durchmesser aufweisen, die jeweils in einem Abstand von mehr als einem Meter voneinander gebohrt sind. Abstand und der Durchmesser der Luftaustrittsöffnungen dieses Schlauches wurde vom ITAP bestimmt.
- b. der zweite Düsenschlauch (als Konfiguration BBC 2 bezeichnet) hat Öffnungen mit einem wesentlich kleineren Durchmesser als die Konfiguration BBC 1. Auch der Abstand der gebohrten Luftaustrittsöffnungen ist bei dieser Konfiguration erheblich geringer. Abstand und Durchmesser der Luftaustrittsöffnungen des zweiten Schlauches basierten auf den Erfahrungen von HYDROTECHNIK Lübeck.

Es war klar, dass man die Form bzw. die Größe der Luftblasen nicht besonders beeinflussen kann, es sollte jedoch untersucht werden welche Auswirkungen verschiedenen Abstände und Lochdurchmesser haben.

Bis Januar 2012 wurden die Schläuche der beiden Konfigurationen BBC 1 und BBC 2 abwechselnd eingesetzt. Ab Januar 2012 wurden nur noch zwei Schläuche der Konfiguration BBC 2 abwechselnd eingesetzt. Dafür gab es zwei Gründe: Erstens konnte der Düsenschlauch Nr. 1 (Konfiguration BBC 1) nicht mehr eingesetzt werden, da dieser aufgrund der Tests in der Ostsee und dem Einsatz im Baubetrieb schon Verschleißerscheinungen aufwies und zweitens zeigte die erste Forschungsphase des HYDROSCHALL OFF BW II Projekts, dass die Konfiguration BBC 2 eine deutlich bessere Schalldämpfung erzielt, als die Konfiguration BBC 1.

Nach ersten Versuchen der Firma HYDROTECHNIK Lübeck zeichnete sich ab, dass ein spezieller Splitförderschlauch den Anforderungen am besten gerecht wurde. Dieser Schlauch lässt sich aufgrund seiner Flexibilität als geschlossener kreisförmiger Blasenschleier, als halbkreisförmiger und als doppelter Blasenschleier einsetzen, ist aber trotz seiner Flexibilität den Beanspruchungen gewachsen.

Durch spezielle Kupplungen als Verbindungstücke ist es möglich, die Länge des Schlauches zu variieren, bzw. defekte Schlauchteile herauszutrennen und den Schlauch dann wieder zu verbinden.

Die Beschaffung des Schlauches lief über den Fachhandel. Aufgrund der benötigten Mengen, musste die Entscheidungsfindung sehr schnell abgeschlossen werden, da sonst aufgrund der langen Lieferzeiten die benötigte Menge nicht hätten beschafft werden können.

Der Düsenschlauch wurde in 40 m Sektionen geliefert. Die Schlauchsegmente wurden mittels Kupplungen miteinander verbunden um die nötige Gesamtlänge für einen Blasenschleier zu erzielen. Die Schläuche wurden außerdem mit Ballasthülsen und Zugketten ausgerüstet, die Luftaustrittsöffnungen wurden gebohrt und die fertigen Schläuche dann auf der Werft auf die Offshore Winden aufgetrommelt.

Um zu verhindern, dass der Schlauch Schaden beim Auf- und Abtrommeln erleidet, bzw. der Schlauch sich auf der Winde durch sein Eigengewicht plattdrückt, wurden über die gesamte Schlauchlänge Stahlmanschetten geschoben. Eine Kette verbindet die lose über den Schlauch geschobenen Manschetten miteinander und nimmt zusätzlich die Zugkräfte auf, die beim

Verlegen und Heben des Schlauches auftreten. Zusätzlich sorgen diese Materialien dafür, dass der Schlauch auf dem Meeresboden auch wenn dieser mit Druckluft versorgt wird.

Konstruktion und Herstellung der Ablauftrommeln

Für die Lagerung und den Transport der DüsenSchläuche wurden von einem Ingenieurbüro unter Berücksichtigung der GL-Vorschriften extra starke Offshore Trommelwinden entwickelt. Diese Winden wurden dann von der Firma HYDROTECHNIK Lübeck gebaut. Die Winden können frei drehen oder mit einem Power Pack angetrieben oder auch gebremst werden, so dass der Schlauch kontrolliert ins Wasser abgetrommelt werden kann. Eine Trommel kann bis zu 600 m DüsenSchlauch aufnehmen.

Aufstellungsgeometrie der Komponenten an Bord

Für die Aufstellung der für das Betreiben des Blasenschleiers notwendigen Komponenten an Bord der *Noortruck* war lediglich darauf zu achten, dass die Komponenten (6 Kompressoren, 2 Treibstofftanks für die Kompressoren, 3 Schlauchwinden) so aufgestellt wurden, dass die Fluchtwege noch frei blieben und die einzelnen Komponenten richtig verlascht waren. Darüber hinaus sollte der Deckmannschaft natürlich auch noch genügend Platz für eventuell anfallende Reparaturarbeiten zur Verfügung stehen.

Erstellen von Prozeduren für den sicheren Umgang (H & S Protokoll)

Für den sicheren Umgang mit dem Gerät des Blasenschleiers erstellte die Firma HYDROTECHNIK Lübeck ein Risk Assessment, das von der Firma GeoSea geprüft und gebilligt wurde.

Mobilisierung und Erprobung

Wie bereits erwähnt, wurde an den DüsenSchlauch, der auf dem Meeresboden rund um die Baustelle verlegt werden sollte, verschiedene Anforderungen gestellt:

- Es musste ein Schlauch gefunden werden, dessen Innendurchmesser zur eingesetzten Luftmenge und dem geplanten Luftdruck passte. Darüber hinaus müsste es möglich sein, dass man diesen Schlauch ohne Verdrehungen und Knicke auf dem Meeresboden verlegen kann.
- Der Schlauch musste den Beanspruchungen, die durch Verlegen und Heben sowie Ab- und Auftrommeln auf eine Trommelwinde auftreten, gewachsen sein, das heißt das Material musste in der Lage sein diese Prozedur möglichst unbeschadet zu überstehen. Darüber hinaus musste der Schlauch natürlich auch seewasserbeständig sein.

Die meisten Kenngrößen des Schlauches wie Druckfestigkeit, chemische Beständigkeit, Abriebfestigkeit und Kuppelbarkeit ließen sich verhältnismäßig schnell mit Hilfe der Datenblätter und durch Rückfragen beim Handel klären. Schwieriger wurde es bei der Bestimmung der Zugfestigkeit des Schlauches, da Schläuche dieser Art normalerweise keinen Zug aufzunehmen haben.

Nach ersten Versuchen der Firma HYDROTECHNIK Lübeck zeichnete sich ab, dass ein 3 Zoll (1 Zoll = 2,54 cm) Splitförderschlauch, mit einer Mantelstärke von 8 mm, der durch zwei Metallspiralen in der Schlauchwandung stabilisiert wurde, den Anforderungen am besten gerecht wird. Dieser Schlauch lässt sich aufgrund seiner Flexibilität als geschlossener kreisförmiger Blasenschleier, als halbkreisförmiger und als doppelter Blasenschleier einsetzen, ist aber auch stabil genug um dengenannten Beanspruchungen standzuhalten.

Der Schlauch hat laut Datenblatt einen Betriebsdruck von 10 bar und ist gegen die in der Nordsee vorkommenden Chemikalien beständig. Die Angaben des Datenblattes wurden aber teilweise anhand von Materialtests an Land nochmals überprüft

Belastungstests der Materialien an Land

Der Schlauch hatte laut Datenblatt einen Betriebsdruck von 10 bar. Um dieses zu verifizieren wurden die Schläuche mit einem Druck von 15 bar belastet, ohne dass hierbei eine Leckage auftrat. Um die Zugfestigkeit der Schläuche zu testen, wurden diese solange mit Betongewichten beschwert, bis sie rissen. Dieses geschah erst bei einer Zugbelastung von 2,5 Tonnen. Für die mit einer Kette versehenen Schläuche reichte der Versuchsaufbau nicht aus, um sie zu zerreißen. Im Einsatz auf See wird aber eine solche Zugbelastung von 2,5 Tonnen, die ausschließlich auf das Schlauchelement wirkt, nicht erwartet, da die Zugkräfte durch die Ketten und Manschetten aufgenommen werden.

Die Kammdruckfestigkeit wurde geprüft indem der Schlauch belastet und gleichzeitig beobachtet wurde wie lange dieser seine runde Form behält. Auch dabei waren die erzielten Ergebnisse hinsichtlich der Verwendung des Schlauches als Blasenschleier absolut zufriedenstellend.

Weitere besondere Testhinsichtlich der Abriebfestigkeit des Schlauches wurden nicht durchgeführt, da für den Blasenschleier ein Schlauch gewählt wurde, der aufgrund seines eigentlichen Verwendungszweckes – Transport von Sand und Split – sehr hohe Abriebzahlen aufweist. Abriebbelastungen, die diese Werte übersteigen, sind aber im Betrieb des Blasenschleiers nicht zu erwarten.

Um zu überprüfen, wie sich Seewasser auf den Schlauch auswirkt, wurde dieser für einen Zeitraum von 21 Tagen in Wasser gelegt, dessen Salzgehalt 20 mal höher war als das Wasser der Nordsee. Innerhalb dieses Zeitraums konnten keine Veränderungen am Schlauch festgestellt werden.

Um die Gewebefestigkeit des Düsenschlauches zu testen, wurde dieser in sich verdreht und beobachtet, ob er seine alte Form wieder annimmt. Auch dieser Test verlief völlig zufriedenstellend.

Um zu überprüfen, ob die Verbindungen die Anforderungen auf Dichtigkeit und Zugfestigkeit entsprechen wurden zwei Schlauchstücke mit einer Kupplung miteinander verbunden und dann unter Druck (15 bar) gesetzt. Auch hier zeigte sich, dass die gewählten Verbindungen solchen Ansprüchen gewachsen sind.

Es musste natürlich auch untersucht werden, wie schnell ein möglicher Schaden am Schlauch unter realen Bedingungen repariert werden könnte. Es zeigte sich, dass mit Bordmitteln ein Schaden am Schlauch (z.B. ein geplatzter Schlauch) durch eine eingespielte Crew innerhalb von 5 bis 10 Minuten an Bord repariert werden können sollte (Heraustrennen des defekten Schlauchteils und Neuverbinden der Schlauchenden mittels Kupplungen). Tests auf der Ostsee und die Erfahrungen im Baubetrieb auf der Nordsee bestätigten später diese Einschätzung.

Auf einen Belastungstest der Winden an Land musste aus Zeitgründen verzichtet werden. Die Tests auf der Ostsee und der anschließende Einsatz im Baubetrieb zeigten aber, dass die Winden mehr als ausreichend stark konzipiert worden sind.

Da im Baueinsatz auch mit Schlechtwetter zu rechnen war, musste festgestellt werden, bis zu welcher Schiffsneigung die Kompressoren bei den Kompressoren wurde getestet, welche Schrägstellung sie ohne Probleme vertragen. Diese wurde an Land getestet, indem der Kompressor im laufenden Betrieb an einer Seite gehoben wurde. Eine Schrägstellung von 12 Grad stellte kein Problem dar. Da allerdings eine wetterbedingte Schiffsneigung von 12 Grad Rammarbeiten ausschließen würden, wurde dieser Tests als ausreichend erachtet.

Mobilisierung und Testausbringungen des Blasenschleiers in der Ostsee

Die *Noortruck* ist ein ehemaliges Offshoreversorgungsschiff (OSV), das von der Reederei Bitunamel-Feldmann Ende 2010 angeschafft und seit Januar 2011 in einer Werft in Rendsburg umgebaut wurde. Da beim Umbau der *Noortruck* die geplante spätere Verwendung als Düsenschlauchverlegeschiff im großen Maße berücksichtigt wurde, ist die *Noortruck* für diese Aufgabe bestens konzipiert und für einen solchen Einsatz besser geeignet als andere Schiffe vergleichbarer Größe. Zusätzlich wurde die *Noortruck* mit einem SideScanSonar ausgestattet, das zum späteren Orten und Einmessen des verlegten Düsenschlauches verwendet werden soll.

Die Komponenten des Blasenschleiers wie Schlauchwinden und Kompressoren sind zum größten Teil mit Twistlooks (Verriegelungen, die Wechselbehälter oder ISO-Container mit dem Trägerfahrzeug verbinden) auf dem Deck der *Noortruck* befestigt und sind so schnell und verhältnismäßig einfach austauschbar. Die Hauptkomponenten sind: Kompressoren, Treibstofftanks für die Kompressoren, Winden für den Düsenschlauch und Power Packs für die Betätigung der Winden. Dennoch ist an Deck noch ausreichend Platz um eventuell anfallende Reparaturen sicher durchführen zu können.

Die Probefahrten und die ersten Testauslegungen des Düsenschlauches wurden im August 2011 auf der Ostsee durchgeführt, da hier die Nähe der Werft die Möglichkeit von kleinen Reparaturen und Änderungen sehr begünstigte.

Es wurde ein Gebiet gewählt, dessen Wassertiefe ungefähr der des späteren Einsatzgebietes in der Nordsee entsprach. Im Rahmen dieser Testfahrt wurde die Navigation der *Noortruck*, die Handhabung des Düsenschlauches und des Zubehörs getestet und erprobt:

Es wurde getestet wie genau sich die *Noortruck* manövrieren lässt, wie das Zusammenspiel der Brückenmannschaft mit der Deckcrew funktioniert. Der Düsenschlauch wurde mehrfach ausgebracht und wieder aufgetrommelt, auch wurde der Blasenschleier mehrfach aktiviert, d.h. der ausgebrachte Düsenschlauch wurde mit den Luftzufuhrschläuchen verbunden und von den Kompressoren mit Druckluft versorgt.

Es wurde getestet, wie genau sich der am Meeresboden verlegte Schlauch wieder orten lässt. Auch wurde der Blasenschleier, die Art und die Form der Luftblasen mit einer Unterwasserkamera beobachtet und kontrolliert.

Darüber hinaus wurde getestet, wie sich die Reparatur eines möglichen Schadens am Düsenschlauch mit Bordmitteln durchführen lässt.

Orten und Einmessen des verlegten Düsenschlauches

In dem Projekt BW II soll sich die Rammplattform *Goliath* in den vorher auf dem Meeresboden verlegten Düsenschlauchkreis hineinmanövrieren. Um zu vermeiden, dass sich die Rammplattform auf den Düsenschlauch positioniert oder etwa ein Anker der Rammplattform auf dem Düsenschlauch abgelegt wird, musste die genaue Lage des Düsenschlauches am Meeresboden bekannt sein und diese Daten an die Rammplattform weitergegeben werden.

Dies sollte durch ein Einmessen des Düsenschlauches nach dem Verlegen durch ein erneutes Abfahren der Lage des Düsenschlauches durch die *Noortruck* geschehen. Es wurden dabei zwei Vermessungsmethoden getestet:

- Einmessen des Düsenschlauches mit einem Tauchroboter (ROV, Remote Operating Vehicle)
- Einmessen des Düsenschlauches mit dem SideScanSonar der *Noortruck*

Bei den Versuchen den ausgebrachten Düsenschlauch wieder genau zu orten zeigte sich, dass das Vermessen des Schlauches mit dem Tauchroboter (ROV) sehr aufwendig und kompliziert ist. Die Bedienungsmannschaft des ROV versuchte bei Tests in der Ostsee drei Tage lang ohne Erfolg den Düsenschlauch zu finden bzw. dessen Lage genau zu vermessen. Auch ein Einmessen mit dem SideScanSonar war in der Ostsee nicht möglich.

Wie sich herausstellte hing dieses mit dem Sediment des Meeresbodens zusammen. In dem Testgebiet in der Ostsee war der Meeresboden sehr schlammig, was dazu führte, dass der Düsenschlauch nach dem Verlegen in das Sediment einsank und teilweise von diesem bedeckt wurde. Dadurch war es weder mit dem ROV noch mit dem SideScan-Sonar möglich den Schlauch genau genug zu orten. Es wurde aber vereinbart die Vermessungstests mit beiden Systemen in der Nordsee zu wiederholen.

Bei den folgenden Tests in der Nordsee -ein Gebiet in dem Sand das vorherrschende Sediment war und der Schlauch nicht versank -hatte das ROV dennoch die gleichen Probleme wie bereits in der Ostsee. Ein Einmessen des Düsenschlauches mit dem SideScan-Sonar hingegen funktionierte in der Nordsee sehr gut und bildete den Düsenschlauch als scharfe Kontur ab, wodurch es möglich war mittels GPS die Koordinaten der Lage des Schlauches zu ermitteln und diese dann an die Rammpattform weiterzugeben.

Videountersuchungen hinsichtlich der Qualität des Blasenschleiers auf See mittels ROV

Im Rahmen des ROV-Einsatzes bei den Vermessungsversuchen in der Ostsee wurden auch Unterwasser-Videoaufnahmen des Blasenschleiers mit Hilfe eines Tauchroboters (ROV) gemacht. Wie bereits erwähnt hatte das ROV große Schwierigkeiten den Düsenschlauch am Meeresboden wieder aufzufinden. War der Blasenschleier jedoch in Betrieb, stellte das Wiederauffinden des Düsenschlauches auf dem Meeresboden durch das ROV sich als problemlos dar, da der Tauchroboter nur an den Luftblasen entlang in Richtung Meeresboden bewegt werden musste. Die Videoaufnahmen des Blasenschleiers belegten, dass sich der Blasenschleier oberhalb des Düsenschlauches gut aufbaute und ein dichtes Feld von Blasen erzeugte. Dieses war immer der Fall, auch wenn der Düsenschlauch vorher durch das Sediment des Meeresbodens bedeckt wurde. Die Druckluft war in der Lage auch stärkere Sedimentüberdeckungen wegzublasen.

Tests auf Möglichkeiten schneller Reparaturen der Ausrüstung auf See

Um auf alle Eventualitäten vorbereitet zu sein, übte die Deckscrew bei der Testfahrt in der Ostsee auch den Düsenschlauch mit Bordmitteln zu reparieren. Hierbei war nicht die Reparatur an sich das Problem, sondern die Hauptaufgabe bestand darin, den Düsenschlauch so auf Deck zu befestigen, dass die Reparatur ohne Gefährdung der Crew durchgeführt werden konnte. Die Tests in der Ostsee zeigten, dass sich die Reparatur eines Schlauches – Heraustrennen eines beschädigten Schlauchstückes und Neuverbinden der dabei entstandenen Schlauchteile mittels einer Kupplung– nach einiger Übung innerhalb von 5 bis 10 Minuten durchführen ließ.

Aufgrund dieser Erfahrungen konnte es als sichergestellt angesehen werden, dass im Falle solcher Schäden eine Verzögerung des Bauablaufes aufgrund einer notwendigen Reparatur des Schlauches als nahezu ausgeschlossen betrachtet werden kann.

Erprobung des Großen Blasenschleiers beim Bau des OWP Borkum West II

Im Verlauf des wiederholten Ausbringens und Bergens des Düsenschlauches wurden die Arbeitsabläufe und Hilfsmittel ständig verbessert, so dass die Arbeit immer zügiger und sicherer ausgeführt werden konnte. So wurden aufgrund der gewonnenen Erfahrungen z. B. alle Verbindungsgliedern auf Mittel aus der Fischerei wie C-Glieder, Sicherheitshaken und Halteringe umgerüstet.

Der Hauptunterschied zwischen den Testläufen auf der Ostsee und dem Arbeitseinsatz auf der Nordsee bestand darin, dass die auf der Nordsee herrschenden Strömungen einen großen Einfluss auf die Planung der Arbeiten hatten, da sie das Arbeitsfenster bestimmten.

Der Einfluss der Strömung ist für die Verlegearbeit des Düsenschlauches von großer Bedeutung). Bei der im Projekt veranschlagten Montagegeschwindigkeit kann dem jedoch durch angemessene

Planung Rechnung getragen werden, so dass es – nach anfänglichen Schwierigkeiten – in der Regel zu keinen strömungsbedingten Störungen kam. Im Gegensatz zum Testgebiet in der Ostsee sank in der Nordsee der Schlauch gar nicht oder nur wenig in das Sediment ein. Das erleichterte die Ortung des Schlauches nach dem Verlegen erheblich, so dass die genaue Lage des Schlauches der Rammplattform *Goliath* mitgeteilt werden konnte, bevor diese ihre Position anfuhr.

Verschiedene Konfigurationen des Großen Blasenschleiers (BBC)

Für das Forschungsvorhaben HYDROSCHALL OFF BW II wurden an mehreren Fundamentstandorten systematische Variationen der Schlauch-Konfiguration und der verwendeten Luftmenge (Anzahl der Kompressoren) durchgeführt.

Zwei Ausnahmen des o. g. Vorgehens erfolgten während der Rammarbeiten. Zu Beginn der Rammarbeiten an den Fundamenten der Anlagen BW01 und BW03 im September 2011 wurde etwa 400 m östlich der Arbeitsplattform *Goliath* ein einzelner linienförmiger Blasenschleier installiert. Dazu wurde vor Aufnahme der Rammarbeiten von der *Noortruck* am Meeresgrund ein 440 m langer Düsenschlauch in gerader Linie in Nord-Süd-Richtung ausgelegt. Für eine solche Konfiguration, welche die Geräuschquelle nur einseitig abschirmt, hat sich die Bezeichnung „(halb-) offener Blasenschleier“ etabliert. Die Luft wurde am nördlichen Ende des Schlauchs von der *Noortruck* aus eingespeist. Die Messgeometrie ist in Abb. 1-19 (S. 48) skizziert. Ein Schallaufzeichnungsgerät wurde etwa 750 m westlich von der Position BW01 ausgelegt. Das Hydrophon befand sich dabei etwa 1,5 m über dem Meeresboden. Ein zweiter Messpunkt befand sich östlich der *Goliath* „hinter“ dem Blasenschleier. Diese Messposition wurde im Rahmen des hier vorgestellten Forschungsvorhabens ausgebracht.

Zusätzlich wurde an zwei Standorten während der zweiten Phase des Forschungsvorhabens im Februar und März 2012 ein linearer doppelter Blasenschleier ausgelegt. Dazu wurden zwei halbe Schläuche (jeweils ca. 280 m lang) parallel in einem Halbkreis um das jeweilige Fundament in einem definierten Abstand zueinander ausgelegt. Mit diesen Experimenten sollte die Wirkungsweise eines doppelten Blasenschleiers untersucht werden. Dabei wurde einmal ein Abstand zwischen den beiden ausgebrachten Düsenschläuchen von ca. 10 m bis 20 m (entspricht ungefähr der einfachen Wassertiefe) und einmal ein Abstand von ca. 80 m (ungefähr dreifacher Wassertiefe) zwischen den beiden Schläuchen verwendet. Im ersten Fall vereinten sich die beiden linearen Blasenschleier zu einem einzigen, nahezu doppelt so breiten Blasenschleier an der Wasseroberfläche. Im zweiten Fall wurden die beiden parallelen Blasenschleier so ausgelegt, dass diese vollständig getrennt waren, d. h. die Schallwellen passierten hier nacheinander zwei unabhängige Blasenschleier (siehe auch Abb. 1-20, S. 49 und Abb. 1-21, S. 50).

Für die Experimente mit einem linearen doppelten Blasenschleier wurden mehrere zusätzliche Messsysteme um den jeweiligen Standort im Rahmen des Forschungsvorhabens ausgelegt. Die mobilen PODs innerhalb des Baugebietes sowie die beiden festen PODs außerhalb des Baufeldes lagen in diesen Fällen auf der Seite des Fundaments, die nicht oder nur teilweise durch den Blasenschleier abgeschirmt wurde.

Im Rahmen der Auswertung der Effekte des Blasenschleiers auf Schweinswale wurden für diesen Bericht die Rammungen an den vier oben beschriebenen Fundamenten, an denen kein geschlossener Blasenschleier vorlag, ausgeschlossen.

Es sei an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass der Einsatz des Schallminderungssystems Großer Blasenschleier im normalen Errichterprozess des Offshore Windparks Borkum West II getestet werden sollte, d. h. der Baufortschritt (Rammarbeiten) lief unabhängig von der Einsatzfähigkeit des Blasenschleiers weiter. Im Fall, dass der Blasenschleier nicht verlegt werden konnte bzw. nicht funktionstüchtig war, wurde ohne Schallminderungsmaßnahme gerammt. Eine Fundamentgründung ohne Einsatz des Blasenschleiers wird im Folgenden Referenz genannt. Bei welchen Baustellen der Große

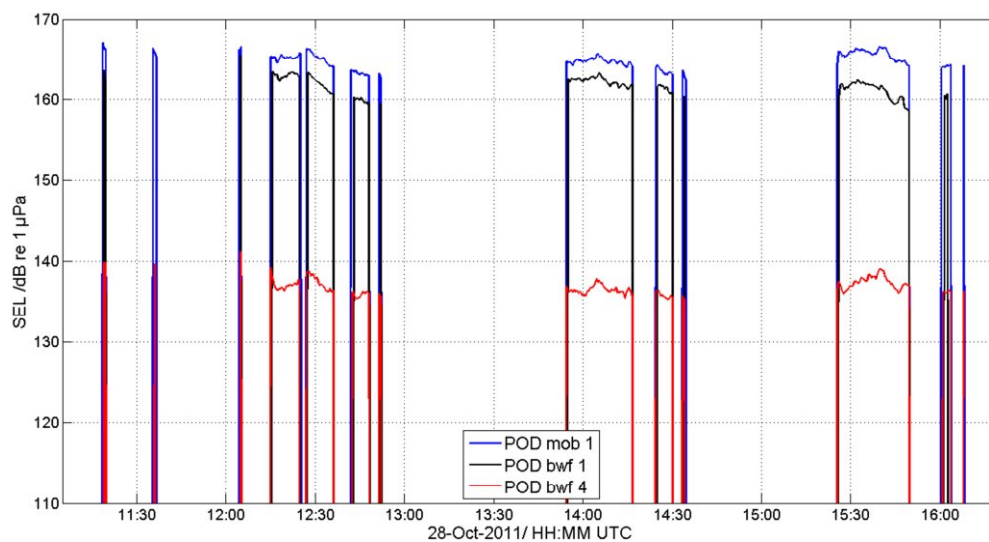
Blasenschleier eingesetzt wurde und mit welcher Konfiguration dieses geschah kann man Tab. 1.3 auf Seite 51 entnehmen.

Anhang zur Hydroschallmessung und -auswertung

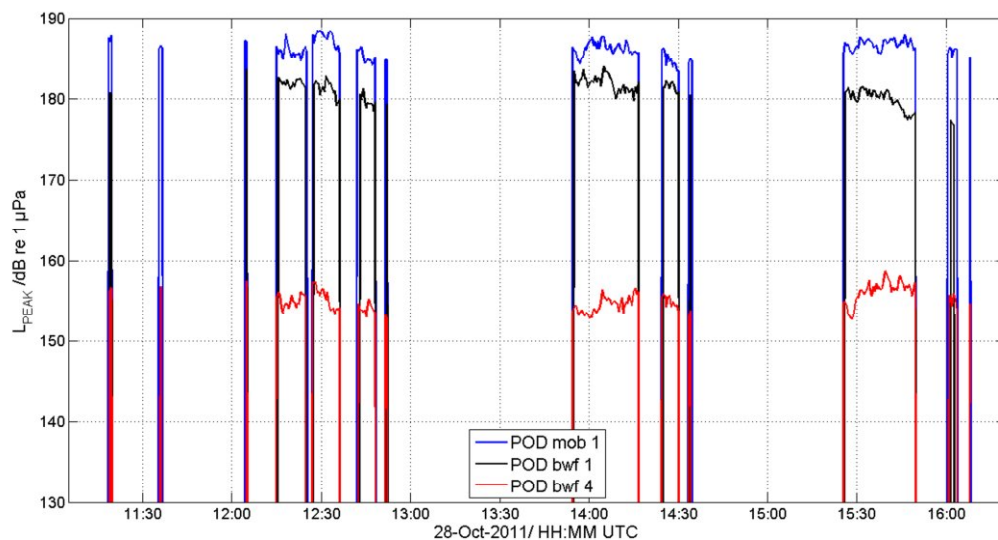
Zeitlicher Verlauf des Einzelereignispegels und des Spitzenpegels

In Ergänzung zu Kapitel D.3 sind nachfolgend für jede getestete Blasenschleierkonfiguration und der Referenzmessungen der zeitliche Verlauf einer Rammung an einem Fundamentstandort des Einzelereignispegels (SEL) und des Spitzenpegels (L_{Peak}) dargestellt.

Referenz (kein Blasenschleier im Einsatz)

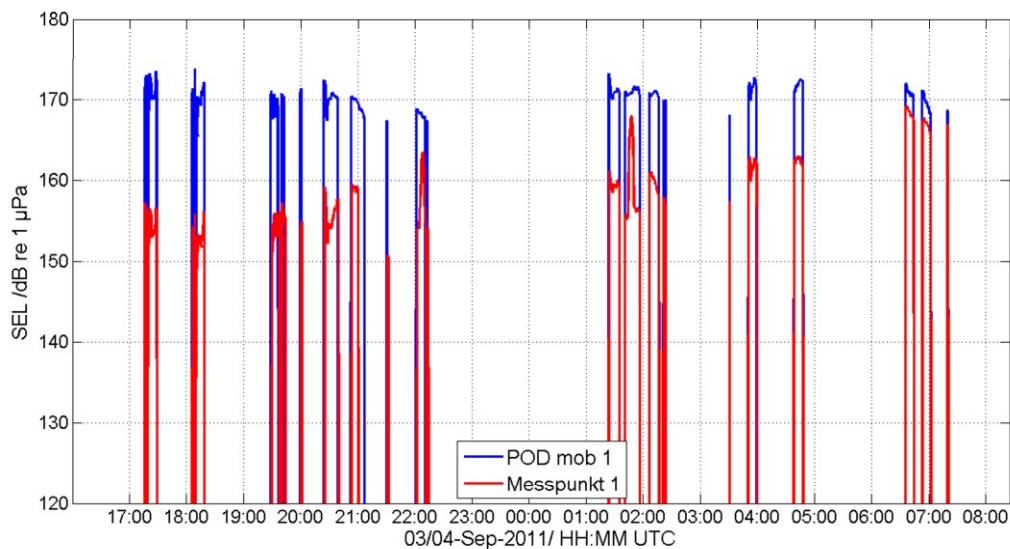


Anhang Abb: 3: Zeitlicher Verlauf des Einzelereignispegels (SEL, breitbandig) bei den Rammarbeiten zur Anlage BW35 an unterschiedlichen Messpositionen in unterschiedlichen Entfernungen (mobil 1: 1,5 km; bwf_1: 2,9 km; bwf_4: 18,4 km).

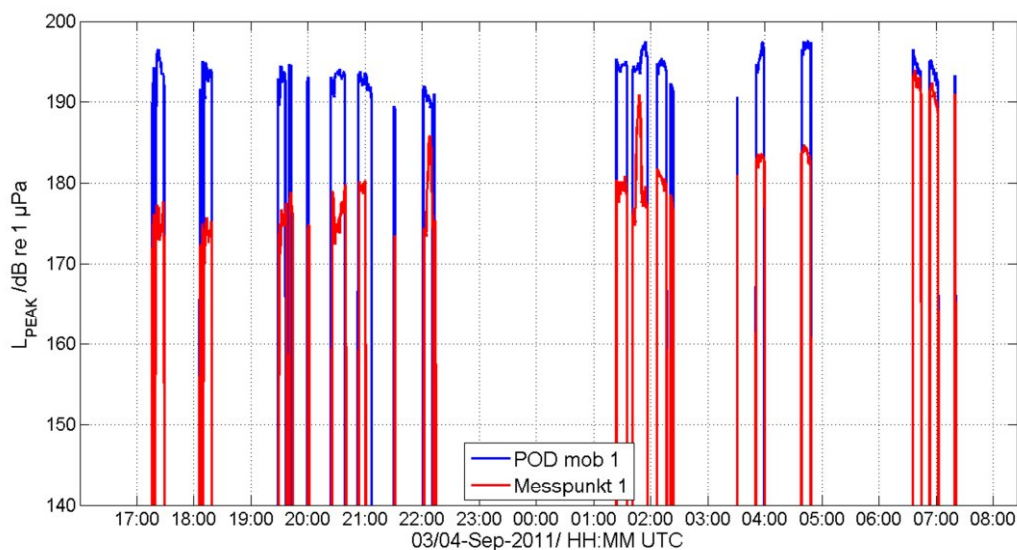


Anhang Abb: 4: Zeitlicher Verlauf des Spitzenpegels (L_{Peak} , breitbandig) bei den Rammarbeiten zur Anlage BW35 an unterschiedlichen Messpositionen in unterschiedlichen Entfernungen (mobil 1: 1,5 km; bwf_1: 2,9 km; bwf_4: 18,4 km).

Halboffener (linienförmiger) Blasenschleier

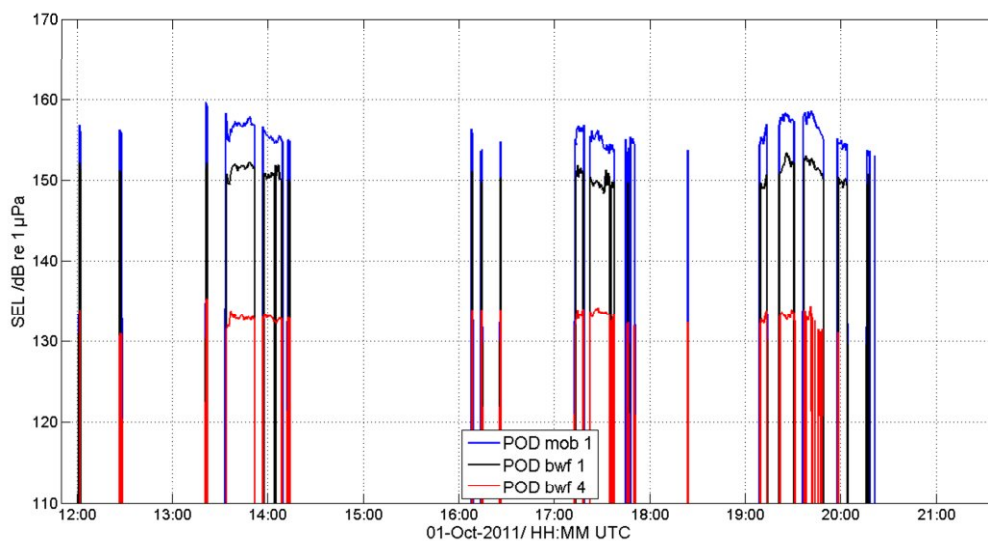


Anhang Abb: 5: Einzelerignispegel (SEL) am westlichen Messpunkt (750 m Entfernung, POD mob 1) und am östlichen Messpunkt (Entfernung etwa 800 m bis 1000 m, Messpunkt 1), bei Rammung BW 01, Projekt Borkum West II, Phase I. Wegen einer technischen Störung der Stromversorgung ist in den Daten an der östlichen Messposition gegen 21:05 UTC eine Lücke von 15 Minuten. Um 22:00 Uhr und 01:45 Uhr und nach 06:00 Uhr UTC war der Blasenschleier kurzzeitig nicht in Betrieb.

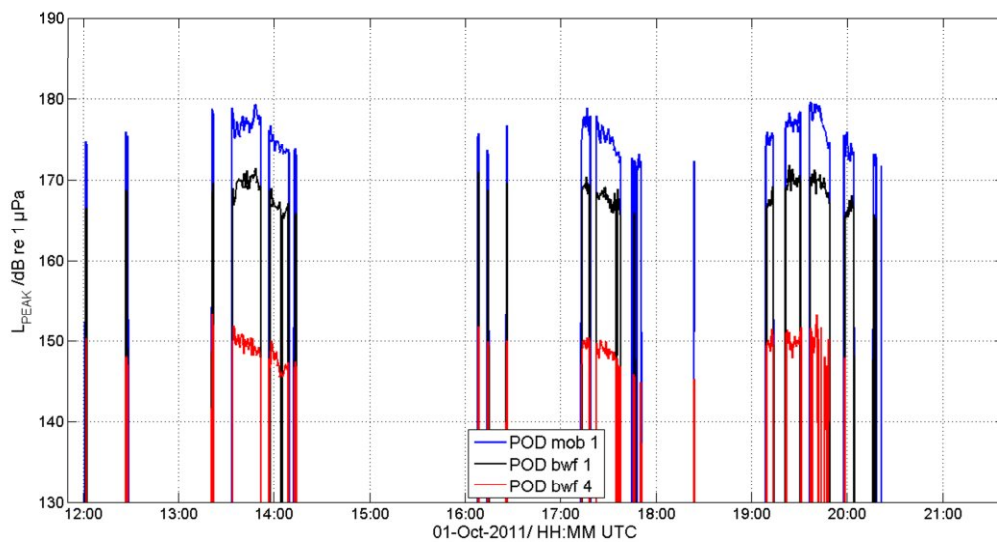


Anhang Abb: 6: Zeitlicher Verlauf des Spitzenpegels (L_{Peak}) am westlichen Messpunkt (750 m Entfernung, POD mob 1, ohne dazwischenliegendem Blasenschleier) und am östlichen Messpunkt (Entfernung etwa 800 m bis 1000 m, Messpunkt 1, mit dazwischenliegendem Blasenschleier) bei kurzzeitiger Abschaltung des Blasenschleiers am Fundament BW01.

Ringförmiger Blasenschleier mit der Düsen Schlauchkonfiguration BBC 1

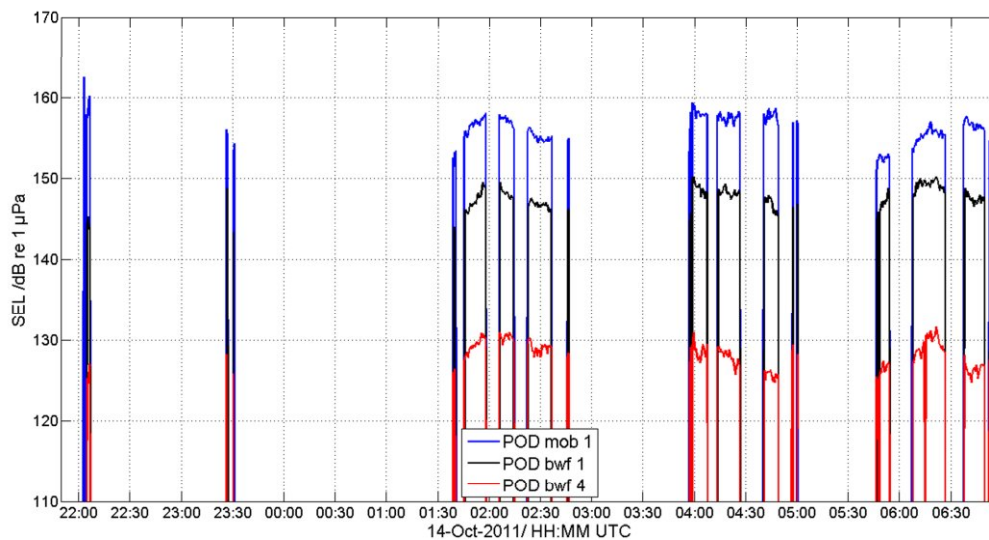


Anhang Abb: 7: Zeitlicher Verlauf des Einzelereignispegels (SEL, breitbandig) bei den Rammarbeiten zur Anlage 12 an unterschiedlichen Messpositionen in unterschiedlichen Entfernungen (mobil 1: 1,6 km; bwf_1: 4,0 km; bwf_4: 18,4 km).

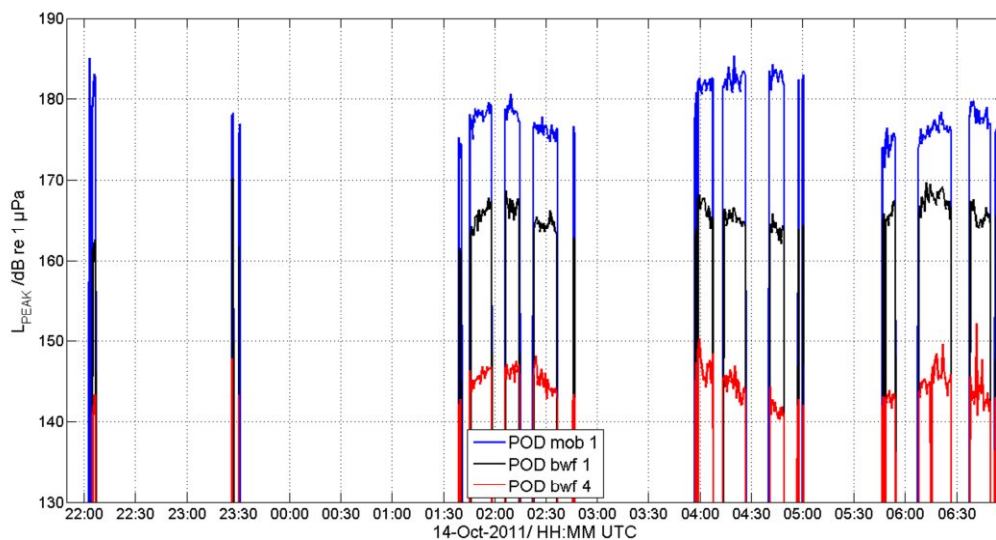


Anhang Abb: 8: Zeitlicher Verlauf des Spitzenpegels (L_{Peak} , breitbandig) bei den Rammarbeiten zur Anlage BW12 an unterschiedlichen Messpositionen in unterschiedlichen Entfernungen (mobil 1: 1,6 km; bwf_1: 4,0 km; bwf_4: 18,4 km).

Ringförmiger Blasenschleier mit der Düsenkonfiguration BBC 2



Anhang Abb: 9: Zeitlicher Verlauf des Einzelereignispegels (SEL, breitbandig) bei den Rammarbeiten zur Anlage 34 an unterschiedlichen Messpositionen in unterschiedlichen Entfernungen (mobil 1: 0,75 km; bwf_1: 3,9 km; bwf_4: 19,2 km).



Anhang Abb. 10: Zeitlicher Verlauf des Spitzenpegels (L_{Peak} , breitbandig) bei den Rammarbeiten zur Anlage 34 an unterschiedlichen Messpositionen in unterschiedlichen Entfernungen (mobil 1: 0,74 km; bwf_1: 3,9 km; bwf_4: 19,2 km).

Messergebnisse

Einzelereignispegel und Spitzenpegel für jede Messposition und jeden Fundamenstandort

Anhang Tab. 1: Dargestellt sind die Perzentilwerte des Einzelereignispegels (SEL) und der maximale Spitzenpegel (L_{Peak}) für die Messposition POD mobil 1. In rot sind die Werte gekennzeichnet, die mithilfe der Gleichung 8 aus der am nächsten gelegenen Messposition berechnet wurden.

Nr	Fund.	Blasenschleier			Einzelereignispegel SEL				L_{Peak} [dB]	Kommentar
		Schlauch	Luftmenge [m ³ /min*m]	Auslegung	Ab-stand [m]	SEL ₉₀ [dB]	SEL ₅₀ [dB]	SEL ₅ [dB]		
1	BW01	2	0,32	Lin. BBC	742	167,8	170,5	172,4	197,6	Messposition ohne BBC
2	BW03	1	0,32	Lin. BBC	1.474	151,4	153,5	155,4	178,2	Messposition hinter BBC
3	BW46	-	-	Referenz	648	165,0	167,7	170,4	197,2	
4	BW47	2	0,32	Ring BBC	782	160,4	162,2	163,2	187,5	
5	BW15	1	0,32	Ring BBC	1.593	154,5	156,8	158,7	181,2	
			0,23		1.593	154,7	156,7	157,5	178,6	
			0,15		1.593	155,1	158,5	159,4	178,7	
6	BW14	2	0,23	Ring BBC	744	158,8	159,8	162,0	183,1	
			0,32		744	156,7	157,8	159,5	180,5	
7	BW12	1	0,32	Ring BBC	1.607	153,7	156,0	158,2	179,7	
8	BW34	2	0,32	Ring BBC	739	153,8	156,9	158,3	185,4	
9	BW26	1	0,32	Ring BBC	3.212	148,0	150,0	152,1	173,8	
10	BW35	-	-	Referenz	1.477	163,1	164,8	166,3	188,4	
11	BW49	1	0,32	Ring BBC	4.299	148,1	149,4	150,9	170,7	

Nr	Fund.	Blasenschleier			Einzelereignispegel SEL				L _{Peak} [dB]	Kommentar
		Schlauch	Luftmenge [m ³ /min*m]	Auslegung	Ab- stand [m]	SEL ₉₀ [dB]	SEL ₅₀ [dB]	SEL ₅ [dB]		
			0,23		4.299	146,8	148,4	149,5	171,4	
			0,15		4.299	148,7	150,3	151,4	172,5	
			0,07		4.299	151,3	152,5	153,7	175,6	
12	BW41	-	-	Referenz	732	166,2	169,5	170,9	195,2	
13	BW42	1	0,32	Ring BBC	1.488	154,9	157,5	160,7	182,6	
14	BW43	-	-	Referenz						Kein Messsyst. ausgelegt
15	BW54	2	0,32	Ring BBC	741	152,9	157,0	160,2	181,7	
			0,23		741	159,5	161,9	164,0	186,1	
			0,15		741	158,6	160,0	162,5	184,6	
			0,07		741	161,9	164,3	164,8	187,4	
		-	-	Referenz	741	160,1	167,9	168,2	194,4	Zeitlich kurze Abschaltung des BBCs
16	BW53	1	0,32	Ring BBC	741	158,0	159,6	160,3	181,3	
17	BW50	2	0,32	Ring BBC	747	155,6	157,7	160,6	184,3	
18	BW61	1	0,32	Ring BBC	1.446	154,6	158,6	161,5	184,3	
19	BW64	2	0,32	Ring BBC	730	153,5	157,6	159,2	181,7	
20	BW44	1	0,32	Ring BBC	1.514	157,1	158,7	160,6	183,6	
21	BW65	2	0,32	Ring BBC	464	156,2	159,8	163,0	185,1	
22	BW66	2	0,32	Ring BBC	741	152,1	154,7	156,8	180,5	
23	BW55	2	0,32	Ring BBC						Kein Messsystem ausgelegt
24	BW52	2	0,23 oder 0,15	Ring BBC	750	163,8	167,6	170,1	192,9	
25	BW62	2	0,23?	Ring BBC	700	159,6	162,0	164,8	187,6	
26	BW63	-	-	Referenz	1.389	164,0	165,3	167,4	190,9	
27	BW51	2	0,23?	Ring BBC	685	160,2	163,7	165,7	185,2	
			0,23		685	160,9	163,2	168,1	190,3	
			0,07		685	161,8	163,7	165,0	185,9	
		-	-	Referenz	685	166,9	171,8	172,9	196,7	Zeitlich kurze Abschaltung des BBCs
28	BW48	2	0,07	Ring BBC	750	164,7	165,9	166,5	187,7	
			0,15		750	161,7	162,1	162,7	184,2	
			0,23		750	160,2	161,4	163,1	184,2	
			0,23		750	161,7	162,7	164,1	182,9	
29	BW24	2	0,32	Doppelter halber BBC	2.525	161,4	163,5	164,7	184,6	Messposition wird nur teilweise vom BBC abgeschirmt
			0	Referenz	2.525	161,6	161,7	161,7	181,9	
			0,32	Doppelter halber BBC	2.525	158,8	160,4	162,1	183,3	Messposition wird nur teilweise vom BBC abgeschirmt

Nr	Fund.	Blasenschleier			Einzelereignispegel SEL				L _{Peak} [dB]	Kommentar
		Schlauch	Luftmenge [m ³ /min*m]	Auslegung	Ab- stand [m]	SEL ₉₀ [dB]	SEL ₅₀ [dB]	SEL ₅ [dB]		
30	BW33	2*2	0,32 (2 Ringe)	Doppelter halber BBC	1.465	163,6	167,1	169,7	194,3	Messposition wird nur teilweise vom BBC abgeschirmt
		2*1	0,32 (1 Ring)		1.465	163,4	165,8	167,7	192,0	
31	BW32	-	-	Referenz	750	170,2	172,6	173,8	197,5	
32	BW31	-	-	Referenz	750	172,3	174,2	176,3	202,0	
33	BW40	-	-	Referenz	750	168,4	170,8	172,9	196,2	
34	BW36	-	-	Referenz	750	169,1	171,9	173,0	194,6	
35	BW23	2	0,23 ?	Ring BBC	749	159,4	162,0	166,6	188	
36	BW13	2	0,23 ?	Ring BBC	754	158,4	161,1	163,9	185,6	
37	BW25	2	0,23 ?	Ring BBC	669	160,2	161,9	164,8	187,2	
38	BW02	2	0,32	Ring BBC	1.546	151,8	154,1	157,5	180,1	
39	BW37	2	0,32	Ring BBC	734	154,4	156,5	158,4	179,5	
40	BW04	2	0,32	Ring BBC	746	157,4	158,7	161,0	180,2	

Anhang Tab. 2: Dargestellt sind die Perzentilwerte des Einzelereignispegels (SEL) und der maximale Spitzenpegel (L_{Peak}) für die Messposition POD mobil 2. Mit rot sind die Werte gekennzeichnet, die mithilfe der Gleichung 8 aus der am nächsten gelegenen Messposition berechnet wurden.

Nr	Fund.	Blasenschleier			Einzelereignispegel SEL				L _{Peak} [dB]	Kommentar
		Schlauch	Luft-menge	Auslegun- g	Absta- nd [m]	SEL ₉₀ [dB]	SEL ₅₀ [dB]	SEL ₅ [dB]		
1	BW01	2	0,32	Lin. BBC	1.506	163,1	165,8	167,7	192,9	Messposition ohne BBC
2	BW03	1	0,32	Lin. BBC	711	156,2	158,3	160,2	183,0	Messposition hinter BBC
3	BW46	-	-	Referenz	1.678	157,9	160,6	163,2	190,0	
4	BW47	2	0,32	Ring BBC	1.733	154,0	155,8	156,8	181,1	
5	BW15	1	0,32	Ring BBC	737	159,5	161,8	163,7	186,2	
			0,23		737	159,7	161,7	162,5	183,6	
			0,15		737	160,1	163,5	164,4	183,7	
6	BW14	2	0,23	Ring BBC	1.480	154,3	155,3	157,5	178,7	
			0,32		1.480	155,3	156,4	157,4	178,6	
7	BW12	1	0,32	Ring BBC	3.389	148,9	151,2	153,4	174,8	
8	BW34	2	0,32	Ring BBC	1.465	149,4	152,5	153,9	181,0	
9	BW26	1	0,32	Ring BBC	2.302	150,2	152,2	154,2	176,0	
10	BW35	-	-	Referenz	737	167,6	169,4	170,9	192,9	
11	BW49	1	0,32	Ring BBC	2.397	151,9	153,2	154,7	174,5	
			0,23		2.397	150,6	152,2	153,3	175,2	
			0,15		2.397	152,6	154,1	155,2	176,3	
			0,07		2.397	155,1	156,3	157,5	179,4	
12	BW41	-	-	Referenz	5.895	152,6	155,9	157,3	181,6	
13	BW42	1	0,32	Ring BBC	6.774	145,1	147,7	150,9	172,8	
14	BW43	-	-	Referenz						Kein Messsystem ausgelegt

Nr	Fund.	Blasenschleier			Einzelereignispegel SEL				L _{Peak} [dB]	Kommentar
		Schlauch	Luft-menge	Auslegung	Abstand [m]	SEL ₉₀ [dB]	SEL ₅₀ [dB]	SEL ₅ [dB]		
15	BW54	2	0,32	Ring BBC	1.545	150,1	154,0	155,1	177,8	
			0,23		1.545	154,6	157,7	158,5	181,6	
			0,15		1.545	152,0	153,8	155,3	178,2	
			0,07		1.545	156,6	157,5	158,3	181,9	
		-	-	Referenz	1.545	161,6	161,7	161,7	184,6	Zeitlich kurze Abschaltung des BBCs
16	BW53	1	0,32	Ring BBC	1.647	148,4	151,6	153,7	177,4	
17	BW50	2	0,32	Ring BBC	1.498	148,3	151,9	154,7	178,0	
18	BW61	1	0,32	Ring BBC	3.228	148,8	151,8	155,9	178,5	
19	BW64	2	0,32	Ring BBC	1.510	148,2	151,2	153,2	175,1	
20	BW44	1	0,32	Ring BBC	3.916	149,9	151,7	153,7	176,4	
21	BW65	2	0,32	Ring BBC	797	154,5	157,5	159,7	184,9	
22	BW66	2	0,32	Ring BBC	743	152,4	155,6	158,7	182,8	
23	BW55	2	0,32	Ring BBC						Kein Messsystem ausgelegt
24	BW52	2	0,23 oder 0,15	Ring BBC	1.519	159,2	163,0	165,5	188,3	
25	BW62	2	0,23?	Ring BBC	1.439	156,7	158,9	161,1	183,5	
26	BW63	-	-	Referenz	903	168,7	169,2	171,7	194,1	
27	BW51	2	0,23?	Ring BBC	1.279	158,5	160,5	164,6	185,5	
			0,23		1.279	156,6	159,3	161,3	180,7	
			0,07		1.279	163,1	165,3	166,2	189,0	
		-	-	Referenz	1.279	166,9	171,8	172,9	196,7	Zeitlich kurze Abschaltung des BBCs
28	BW48	2	0,07	Ring BBC	1.487	161,0	162,2	162,7	183,8	
			0,15		1.487	158,2	159,0	161,7	180,8	
			0,23		1.487	157,3	158,1	161,2	180,2	
			0,23		1.487	157,9	157,9	158,0	176,2	
29	BW24	2	0,32	Doppelter halber BBC	1.485	164,5	165,2	166,2	186,5	Messposition wird nur teilweise vom BBC abgeschirmt
			0		1.485	164,8	165,0	165,2	186,2	
			0,32	Referenz	1.485	163,5	164,3	165,3	187,7	
30	BW33	-	0,32 (2 Ringe)	Doppelter halber BBC	762	168,3	171,8	174,4	199,0	Messposition wird nur teilweise vom BBC abgeschirmt
		2*2	0,32 (1 Ring)		762	168,1	170,5	172,4	196,7	
31	BW32	-	-	Referenz	1.465	165,8	168,1	169,4	193,1	
32	BW31	-	-	Referenz	1.483	167,9	169,8	171,8	197,6	
33	BW40	-	-	Referenz	1.400	164,3	166,8	168,9	192,1	
34	BW36	-	-	Referenz	6.500	155,0	157,7	158,9	180,0	
35	BW23	-	0,23 ?	Referenz	1.497	154,9	157,4	162,1	184	
36	BW13	2	0,23 ?	Ring BBC	5.500	145,7	148,2	151,5	174,3	
37	BW25	2	0,23 ?	Ring BBC	3.300	150,0	151,5	153,3	174,8	
38	BW02	2	0,32	Ring BBC	2.511	150,7	152,0	154,8	178,8	

Nr	Fund.	Blasenschleier			Einzelereignispegel SEL				L _{Peak} [dB]	Kommentar
		Schlauch	Luft-menge	Auslegung	Abstand [m]	SEL ₉₀ [dB]	SEL ₅₀ [dB]	SEL ₅ [dB]		
39	BW37	2	0,32	Ring BBC	1.479	149,7	151,8	153,7	174,8	
40	BW04	2	0,32	Ring BBC	1.512	152,7	154,1	156,3	175,6	

Anhang Tab. 3: Dargestellt sind die Perzentilwerte des Einzelereignispegels (SEL) und der maximale Spitzenpegel (L_{Peak}) für die Messposition bwf_1. Mit rot sind die Werte gekennzeichnet, die mithilfe der Gleichung 8 aus der am nächsten gelegenen Messposition berechnet wurden.

Nr	Fund.	Blasenschleier			Einzelereignispegel SEL				L _{Peak} [dB]	Kommentar
		Schlauch	Luft-menge	Auslegung	Abstand [m]	SEL ₉₀ [dB]	SEL ₅₀ [dB]	SEL ₅ [dB]		
1	BW01	2	0,32	Lin. BBC	4.328	156,2	158,9	160,8	186,0	Messposition ohne BBC
2	BW03	1	0,32	Lin. BBC	2.734	147,3	149,5	151,4	174,2	Messposition hinter BBC
3	BW46	-	-	Referenz	3.337	154,4	157,1	159,7	186,5	
4	BW47	2	0,32	Ring BBC	2.578	149,7	151,5	152,5	176,8	
5	BW15	1	0,32	Ring BBC	1.352	155,6	157,9	159,8	182,3	
			0,23		1.352	155,8	157,8	158,6	179,7	
			0,15		1.352	156,2	159,6	160,5	179,7	
6	BW14	2	0,23	Ring BBC	2.129	151,9	152,9	155,1	176,3	
			0,32		2.129	149,8	151,0	152,6	173,7	
7	BW12	1	0,32	Ring BBC	3.993	149,1	151,0	152,6	171,8	
8	BW34	2	0,32	Ring BBC	3.902	145,7	147,7	149,3	170,2	
9	BW26	1	0,32	Ring BBC	853	157,5	159,0	162,8	187,7	
10	BW35	-	-	Referenz	2.927	159,5	161,8	163,2	184,0	
11	BW49	1	0,32	Ring BBC	1.653	152,1	155,8	156,5	177,1	
			0,23		1.653	153,7	155,0	156,3	175,5	
			0,15		1.653	153,9	155,8	156,8	178,0	
			0,07		1.653	153,2	157,1	158,5	179,5	
12	BW41	-	-	Referenz	3.412	159,2	160,9	161,9	181,8	
13	BW42	1	0,32	Ring BBC	4.278	148,1	150,7	153,9	175,8	
14	BW43	-	-	Referenz						Kein Messsystem ausgelegt
15	BW54	2	0,32	Ring BBC	5.276	140,1	144,2	147,4	168,9	
			0,23		5.276	146,7	149,1	151,3	173,3	
			0,15		5.276	145,8	147,2	149,7	171,8	
			0,07		5.276	149,1	151,5	152,1	174,6	
		-	-	Referenz	5.276	147,3	155,1	155,4	181,6	
16	BW53	1	0,32	Ring BBC	4.338	146,5	148,1	148,8	169,8	
17	BW50	2	0,32	Ring BBC	1.944	149,4	151,5	154,4	178,1	
18	BW61	1	0,32	Ring BBC	3.058	144,4	148,2	150,9	183,3	
19	BW64	2	0,32	Ring BBC	4.997	141,8	143,7	145,7	177,6	
20	BW44	1	0,32	Ring BBC	6.006	143,3	145,4	150,0	192,1	
21	BW65	2	0,32	Ring BBC	5.765	144,8	146,8	149,9	179,0	
22	BW66	2	0,32	Ring BBC	6.541	143,3	144,6	146,1	177,9	
23	BW55	2	0,32	Ring BBC						Kein

Nr	Fund.	Blasenschleier			Einzelereignispegel SEL				L _{Peak} [dB]	Kommentar
		Schlauch	Luftmenge	Auslegung	Abstand [m]	SEL ₉₀ [dB]	SEL ₅₀ [dB]	SEL ₅ [dB]		
										Messsystem ausgelegt
24	BW52	2	0,23 oder 0,15	Ring BBC	3.436	153,8	157,6	160,2	183,0	
25	BW62	2	0,23?	Ring BBC	3.610	148,2	151,4	154,8	173,9	
26	BW63	-	-	Referenz	4.270	155,7	156,6	158,9	181,8	
27	BW51	2	0,23?	Ring BBC	2.606	150,4	153,9	155,9	175,4	
			0,23		2.606	151,1	153,4	158,3	180,5	
			0,07		2.606	152,0	153,9	155,2	176,1	
		-	-	Referenz	2.606	157,1	162,0	163,1	186,9	Zeitlich kurze Abschaltung des BBCs
28	BW48	2	0,07	Ring BBC	1.961	158,1	159,3	159,8	180,9	
			0,15		1.961	155,2	155,8	157,4	177,8	
			0,23		1.961	154,0	155,0	157,4	177,4	
			0,23		1.961	155,0	155,6	156,2	174,8	
29	BW24	2	0,32	Doppelter halber BBC	2.845	168,3	169,8	170,9	191,0	Messposition wird nur teilweise vom BBC abgeschirmt
			0	Referenz	2.845	168,6	168,7	168,9	189,5	
			0,32	Doppelter halber BBC	2.845	166,5	167,7	169,1	190,9	
30	BW33	2*2	0,32 (2 Ringe)	Doppelter halber BBC	5.930	142,0	145,3	150,1	188,3	Messposition wird nur teilweise vom BBC abgeschirmt
		2*1	0,32 (1 Ring)		5.930	143,1	145,5	150,2	188,3	
31	BW32	-	-	Referenz	5.039	155,8	158,0	159,8	179,1	
32	BW31	-	-	Referenz	4.127	156,8	159,6	161,7	181,1	
33	BW40	-	-	Referenz	2.558	161,3	163,8	165,4	188,4	
34	BW36	-	-	Referenz	1.977	162,7	165,6	166,6	188,8	
35	BW23	2	0,23 ?	Ring BBC	3.844	150,7	152,5	155,1	188,0	
36	BW13	2	0,23 ?	Ring BBC	3.040	151,5	154,3	157,6	188,2	
37	BW25	2	0,23 ?	Ring BBC	1.847	153,4	156,0	159,0	188,4	
38	BW02	2	0,32	Ring BBC	3.486	147,8	149,5	152,9	172,4	
39	BW37	2	0,32	Ring BBC	1.119	151,7	153,7	155,6	176,8	
40	BW04	2	0,32	Ring BBC	2.166	150,4	151,8	154,0	173,2	

Anhang Tab. 4: Dargestellt sind die Perzentilwerte des Einzelereignispegels (SEL) und der maximale Spitzenpegel (L_{Peak}) für die Messposition bwf_4 bzw. bwf_6. Mit rot sind die Werte gekennzeichnet, die mithilfe der Gleichung 8 aus der am nächsten gelegenen Messposition berechnet wurden.

Nr	Fund.	Blasenschleier			Einzelereignispegel SEL				L _{Peak} [dB]	Kommentar
		Schlauch	Luftmenge	Auslegung	Abstand [m]	SEL ₉₀ [dB]	SEL ₅₀ [dB]	SEL ₅ [dB]		
1	BW01	2	0,32	Lin. BBC	18.043	138,2	138,9	139,5	159,3	Messposition ohne BBC

Nr	Fund.	Blasenschleier			Einzelereignispegel SEL				L _{Peak} [dB]	Kommentar
		Schlauch	Luftmenge	Auslegung	Abstand [m]	SEL ₉₀ [dB]	SEL ₅₀ [dB]	SEL ₅ [dB]		
										Bwf_4
2	BW03	1	0,32	Lin. BBC	16.273	135,5	137,8	139,1	159,7	Messposition hinter BBC Bwf_4
3	BW46	-	-	Referenz	18.955	136,2	136,7	139,4	157,1	Bwf_4
4	BW47	2	0,32	Ring BBC						Bwf_4
5	BW15	1	0,32	Ring BBC	15.770	130,5	132,8	134,7	155,5	Bwf_4
			0,23		15.770	131,5	132,4	134,0	151,7	Bwf_4
			0,15		15.770	131,2	132,8	134,1	150,6	Bwf_4
6	BW14	2	0,23	Ring BBC	16.636	131,4	132,9	134,0	151,1	Bwf_4
			0,32		16.636	128,8	130,2	132,2	152,1	Bwf_4
7	BW12	1	0,32	Ring BBC	18.409	132,1	133,0	133,9	153,2	Bwf_4
8	BW34	2	0,32	Ring BBC	19.246	127,3	129,0	130,8	150,3	Bwf_4
9	BW26	1	0,32	Ring BBC	16.243	128,3	131,1	132,8	150,6	Bwf_4
10	BW35	-	-	Referenz	18.396	135,6	136,6	138,5	158,7	Bwf_4
11	BW49	1	0,32	Ring BBC	25.965	126,4	128,3	129,5	145,9	Bwf_6
			0,23		25.965	126,9	128,3	129,0	145,2	
			0,15		25.965	126,0	128,6	129,5	145,1	
			0,07		25.965	127,6	129,1	129,9	148,8	
12	BW41	-	-	Referenz	22.624	133,5	135,5	137,2	156,0	Bwf_6
13	BW42	1	0,32	Ring BBC	21.926	126,4	128,2	130,3	150,7	Bwf_6
14	BW43	-	-	Referenz	21.243	132,4	134,5	136,9	155,6	Bwf_6
15	BW54	2	0,32	Ring BBC	21.900	126,6	128,0	129,1	146,5	Bwf_6
			0,23		21.900	128,5	129,2	130,0	146,1	
			0,15		21.900	131,0	131,0	131,0	142,8	
			0,07		21.900	131,3	132,6	133,3	151,4	
		-	-	Referenz	21.900	128,8	134,0	134,3	155,4	Zeitlich kurze Abschaltung des BBCs; Bwf_6
16	BW53	1	0,32	Ring BBC	22.656	129,3	129,6	129,9	146,1	Bwf_6
17	BW50	2	0,32	Ring BBC	25.029	124,2	126,7	129,5	146,9	Bwf_6
18	BW61	1	0,32	Ring BBC	25.043	126,8	129,8	131,4	148,0	Bwf_6
19	BW64	2	0,32	Ring BBC	23.038	121,0	124,3	126,7	151,1	Bwf_6
20	BW44	1	0,32	Ring BBC	20.589	124,2	127,8	129,8	147,7	Bwf_6
21	BW65	2	0,32	Ring BBC	22.399	126,7	130,4	132,7	151,7	Bwf_6
22	BW66	2	0,32	Ring BBC	21.789	125,9	128,7	130,1	148,6	Bwf_6
23	BW55	2	0,23 oder 0,15	Ring BBC						Kein Messsystem ausgelegt
24	BW52	2	0,23?	Ring BBC	14.497	136,7	139,6	142,1	161,1	Bwf_4
25	BW62	-	-	Referenz	15.483	133,1	136,6	138,8	158,0	Bwf_4
26	BW63	2	0,23?	Ring BBC	14.925	139,9	141,9	143,4	163,8	Bwf_4
27	BW51		0,23		15.184	138,1	138,4	139,0	159,9	Bwf_4
			0,07		15.184	128,5	139,0	140,6	159,1	Bwf_4
		-	-	Referenz	15.184	129,1	139,9	141,3	163,0	Zeitlich kurze Abschaltung des BBCs Bwf_4
28	BW48	2	0,07	Ring BBC	17.473	139,4	140,4	141,6	157,9	Bwf_4

Nr	Fund.	Blasenschleier			Einzelereignispegel SEL				L _{Peak} [dB]	Kommentar
		Schlauch	Luftmenge	Auslegung	Abstand [m]	SEL ₉₀ [dB]	SEL ₅₀ [dB]	SEL ₅ [dB]		
			0,15		17.473	136,5	137,2	140,1	159,1	Bwf_4
			0,23		17.473	134,8	137,1	139,5	158,6	Bwf_4
			0,23		17.473	134,3	134,7	135,1	153,4	Bwf_4
29	BW24	2	0,32	Doppelter halber BBC	17.940	138,1	139,0	142,0	159,3	Messposition wird nur teilweise vom BBC abgeschirmt
			0	Referenz	17.940	139,1	139,2	139,6	158,5	
			0,32	Doppelter halber BBC	17.940	134,0	138,6	140,3	160,0	
30	BW33	2*2	0,32 (2Ringe)	Doppelter halber BBC	20.024	122,3	130,2	137,2	158,4	Messposition wird nur teilweise vom BBC abgeschirmt Bwf_6
		2*1	0,32 (1 Ring)		20.024	122,3	129,3	136,4	158,4	
31	BW32	-	-	Referenz	20.719	137,0	138,6	139,7	159,1	Bwf_6
32	BW31	-	-	Referenz	21.444	137,0	138,3	139,2	159,2	Bwf_6
33	BW40	-	-	Referenz	23.334	136,1	138,2	139,5	158,6	Bwf_6
34	BW36	-	-	Referenz	26.910	134,0	135,3	137,4	155,2	Bwf_6
35	BW23	2	0,23 ?	Ring BBC	28.242	128,1	130,1	131,5	149,6	Bwf_6
36	BW13	2	0,23 ?	Ring BBC	26.956	128,0	130,5	133,0	150,9	Bwf_6
37	BW25	2	0,23 ?	Ring BBC	26.476	128,5	130,6	132,2	149,1	Bwf_6
38	BW02	2	0,32	Ring BBC	26.606	128,7	130,8	132,4	148,0	Bwf_6
39	BW37	2	0,32	Ring BBC	26.055	126,9	128,6	130,4	150,2	Bwf_6
40	BW04	2	0,32	Ring BBC	24.843	129,2	129,9	130,3	147,9	Bwf_6

Anhang Tab. 5: Dargestellt sind die Perzentilwerte des Einzelereignispegels (SEL) und der maximale ungewichtete Spitzenpegel (L_{Peak}) für die zusätzlichen Messpositionen innerhalb der Forschungsphasen 1 und 2.

Nr	Fund.	Blasenschleier			Einzelereignispegel SEL				L _{Peak} [dB]	Kommentar
		Schlauch	Luftmenge	Auslegung	Abstand [m]	SEL ₉₀ [dB]	SEL ₅₀ [dB]	SEL ₅ [dB]		
1	BW01	2	0,32	Lin. BBC	800 - 1000	152,2	156,6	162,6	184,8	Messposition mit BBC; Messpunkt 1 im Osten
28	BW48	2	0,07	Ring BBC	693	163,3	164,4	166,3	186,0	
			0,15		693	161,1	163,4	164,5	185,8	
			0,23		693	159,9	161,5	162,7	184,5	

Nr	Fund.	Blasenschleier			Einzelereignispegel SEL				L _{Peak} [dB]	Kommentar	
		Schlauch	Luftmenge	Auslegung	Abstand [m]	SEL ₉₀ [dB]	SEL ₅₀ [dB]	SEL ₅ [dB]			
29	BW24	2	0,32	Doppelter halber BBC	214	167,6	170,1	178,2	195,6	Zusatz-Messposition 1 zwischen 1. und 2. BBC nicht zu verwerfen für Evaluation des BBCs ¹⁵	
					430	167,9	169,0	171,7	194,0		Messposition hinter DBBC bzw. BBC
					835	153,0	154,2	157,1	178,3		
		-	Referenz	835	162,3	171,2	171,4	194,9			
30	BW33	2*2	0,32 (2 Ringe)	Doppelter halber BBC	500	156,3	158,6	160,6	186,6	Zusatz-Messpositionen 1+2 hinter DBBC / BBC	
		2*1	0,32 (1 Ring)	Halber BBC	500	161,7	164,6	166,1	190,3		
		2*2	0,32 (2 Ringe)	Doppelter halber BBC	500	157,0	158,3	162,5	184,4		
		2*1	0,32 (1 Ring)	Halber BBC	500	162,9	164,6	166,3	188,9		

¹⁵ Es zeigte sich bei diversen anderen Messungen auch, dass Messungen bis zu einer Entfernung von 250 m bis 400 m sich noch im akustischen Nahfeld befinden können und somit nicht oder nur eingeschränkt zur Evaluation eines Schallminderungssystems herangezogen werden können (z.B. Bellmann & Gerke 2012).

Spektral ungewichteter und gewichteter Einzelereignispegel und Dauerschallpegel

Anhang Tab. 6: Spektral ungewichteter und S-gewichteter Einzelereignispegel (SEL_{50} und $S-SEL_{50}$) sowie energieäquivalenter Dauerschallpegel ($L_{eq50,30s}$ und $L_{Seq50,30s}$) in der lautesten Konfiguration¹⁶ in einer Entfernung von 750 m.

Fund.	Blasenschleier			Abstand [m]	Einzelereignispegel		Dauerschallpegel	
	Schlauch	Luftmenge [m ³ /min*m]	Auslegung		SEL ₅₀ [dB]	S-SEL ₅₀ [dB]	Leq ₅₀ [dB]	LSeq ₅₀ [dB]
BW46	Referenz			750	167	139	166	138
BW47	2	0,32	ringförmiger BBC	750	161	123	141	121
BW15	1	0,15	ringförmiger BBC	750	163	128	161	127
BW14	2	0,32	ringförmiger BBC	750	161	120	159	119
BW12	1	0,32	ringförmiger BBC	750	161	126	160	125
BW34	2	0,32	ringförmiger BBC	750	157	124	155	123
BW26	1	0,32	ringförmiger BBC	750	159	131	160	130
BW35	Referenz			750	169	140	169	139
BW49	1	0,07	ringförmiger BBC	750	164	133	163	132
BW41	Referenz			750	169	143	168	142
BW42	1	0,32	ringförmiger BBC	750	162	126	161	125
BW54	2	0,32	ringförmiger BBC	750	157	124	159	121
BW53	1	0,32	ringförmiger BBC	750	160	121	159	121
BW50	2	0,32	ringförmiger BBC	750	158	121	156	120
BW61	1	0,32	ringförmiger BBC	750	163	125	162	124
BW64	2	0,32	ringförmiger BBC	750	157	120	156	119
BW44	1	0,32	ringförmiger BBC	750	163	125	163	124
BW65	2	0,32	ringförmiger BBC	750	157	123	156	122
BW66	2	0,32	ringförmiger BBC	750	157	125	159	125
BW52	2	0,15 oder 0,23	ringförmiger BBC	750	168	137	168	136
BW62	2	0,23 ?	ringförmiger BBC	750	162	122	160	121
BW63	Referenz			750	169	141	169	139
BW51	Referenz			750	171	140	170	141
BW48	2	0,15	ringförmiger BBC	750	166	126	161	123
BW32	Referenz			750	173	146	172	144
BW31	Referenz			750	174	150	173	148
BW40	Referenz			750	171	142	170	141
BW36	Referenz			750	172	145	173	144
BW23	2	0,23	ringförmiger BBC	750	162	117	161	126
BW13	2	0,23	ringförmiger BBC	750	161	108	142	128
BW25	2	0,23	ringförmiger BBC	750	161	120	159	119
BW02	2	0,32	ringförmiger BBC	750	159	125	157	124
BW37	2	0,32	ringförmiger BBC	750	156	120	155	119
BW04	2	0,32	ringförmiger BBC	750	159	121	157	119

¹⁶Im Fall, dass verschiedene Luftmengen beim Betrieb des Blasenschleiers verwendet wurden oder das Schallminderungssystem kurzzeitig ausgeschaltet wurde, wird der lauteste Zeitabschnitt (Konfiguration) dargestellt.

Aufschlüsselung der Tabelle 1.10

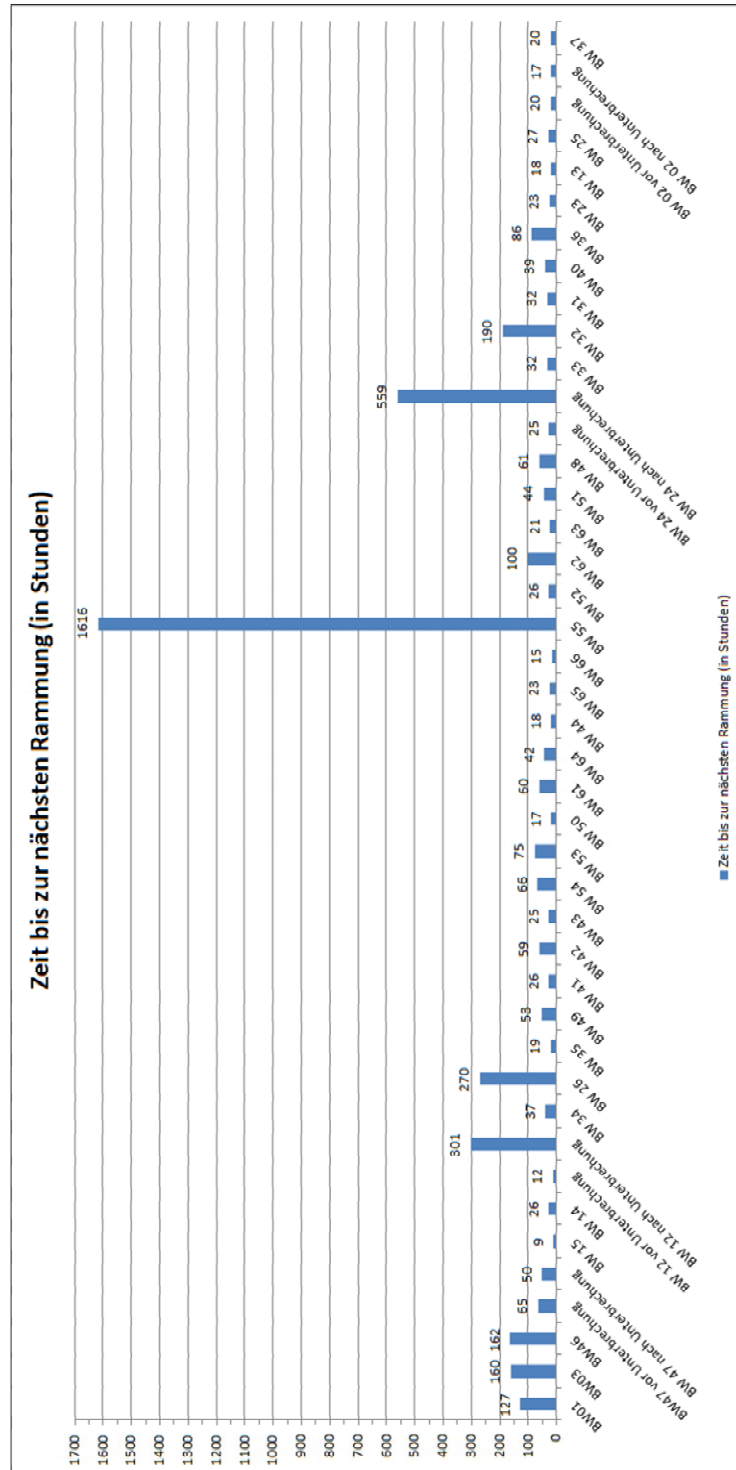
Anhang Tab. 7: Schalldruckpegel (SEL) und Spitzenpegel (L_{Peak}) in 750 m Entfernung vom Rammort – Referenzmessungen.

Bezeichnung	Wandstärke [mm]	Fundament	Luftmenge [$m^3/(min*m)$]	SEL ₉₀ [dB]	SEL ₅₀ [dB]	SEL ₅ [dB]	L _{Peak} [dB]
REF(50)	50	BW46	-	164,1	166,8	169,4	196,2
		BW35		167,5	169,3	170,8	192,8
		BW41		166,1	169,4	170,7	195,1
		Mittel (n = 3)		168,4	170,6	172,3	197,5
Ref(70)	70	BW63	-	168,9	169,9	172,2	195,1
		BW24		169,1	170,6	171,7	191,8
		BW32		170,2	172,6	173,8	197,5
		BW31		172,3	174,2	176,3	202,0
		BW40		168,4	170,8	172,9	196,2
		BW36		169,1	171,9	173,0	194,6
		Mittel (n = 6)		169,7	171,7	173,3	197,5
Ref(70 + 50)	50 & 70		-				
		Mittel (n = 9)		168,4	170,6	172,3	195,7

Anhang Tab. 8: Schalldruckpegel (SEL) und Spitzenpegel (L_{Peak}) in 750 m Entfernung vom Rammort – Konfigurationen BBC 1 und BBC 2.

Bezeichnung	Wandstärke [mm]	Fundament	Luftmenge [$m^3/(min*m)$]	SEL ₉₀ [dB]	SEL ₅₀ [dB]	SEL ₅ [dB]	L _{Peak} [dB]
BBC 1	50	BW15	0,32	159,4	161,7	163,6	186,1
		BW12		158,7	161,0	163,2	184,6
		BW26		157,5	159,5	161,5	183,3
		BW49		159,5	160,8	162,3	182,1
		BW42		159,5	162,0	165,2	187,1
		BW53		154,8	158,3	160,2	183,4
		BW61		158,6	162,1	165,6	188,3
		BW44		161,1	162,9	164,8	187,7
		Mittel (n = 8)		158,6	161,0	163,3	185,3
BBC 2	50	BW47	0,32	159,5	161,3	162,2	186,5
		BW14		156,7	157,8	159,5	180,5
		BW34		153,8	156,8	158,2	185,3
		BW54		153,8	157,8	160,0	182,1
		BW50		154,2	157,0	159,9	183,4
		BW64		153,1	156,6	158,4	180,6
		BW65		154,0	157,2	160,0	183,6
		BW66		152,2	155,1	157,7	181,5
	70	BW23		159,4	161,9	166,6	188,1
	50	BW02		157,5	159,3	162,5	185,7
		BW37		154,3	156,4	158,2	179,4
		BW04		157,3	158,7	160,9	180,2
	50 & 70	Mittel (n = 12)		155,5	158,0	160,3	183,1
50	Mittel (n = 11)	155,1	157,6	159,8	182,6		

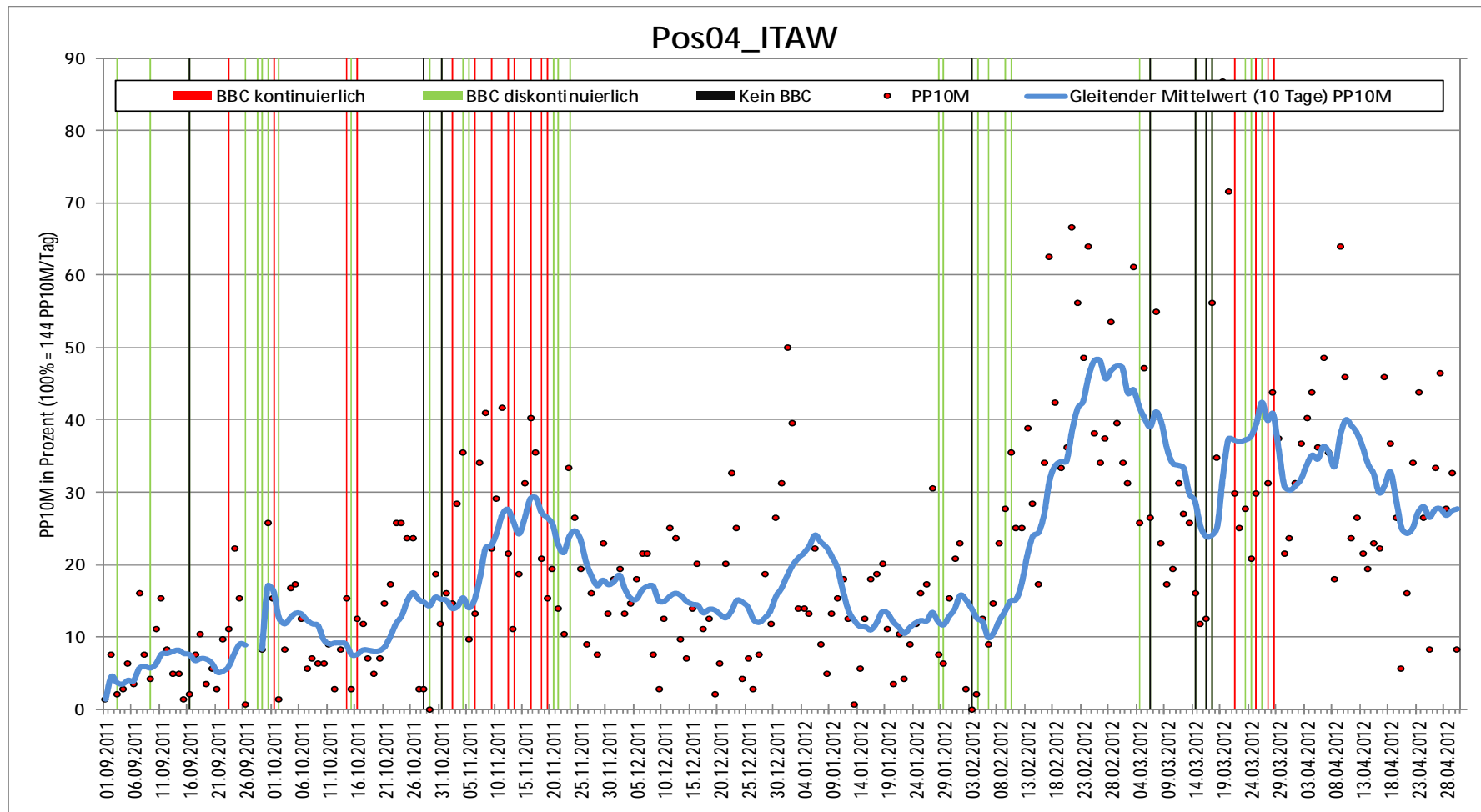
Anhang zum Schweinswalmonitoring



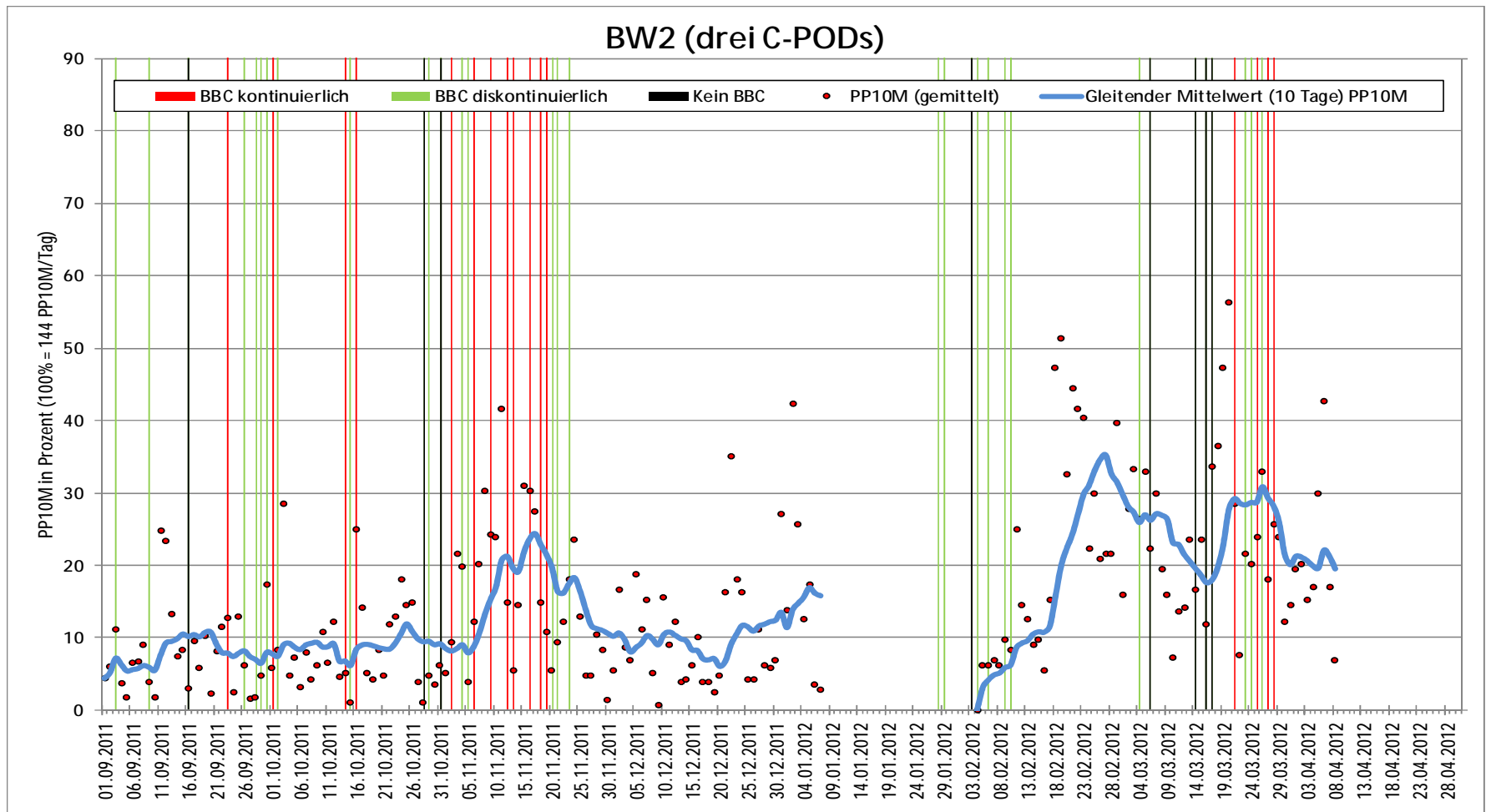
Anhang Abb: 11: Länge der Zeitintervalle zwischen zwei aufeinanderfolgenden Rammphasen in Stunden. Dargestellt ist der Zeitraum von der Beendigung der Rammarbeiten an einer Rammbaustelle (z.B. BW01) bis zum Beginn der Arbeiten an der Folgebaustelle (z.B. BW03) in Stunden (zwischen BW01 und BW03: 127 Stunden).

Anhang Tab. 9: Durchschnittliche Entfernung der POD-Stationen zu den Baustandorten der WEAs (geordnet nach der gemittelten Entfernung zu den Rammbaustellen).

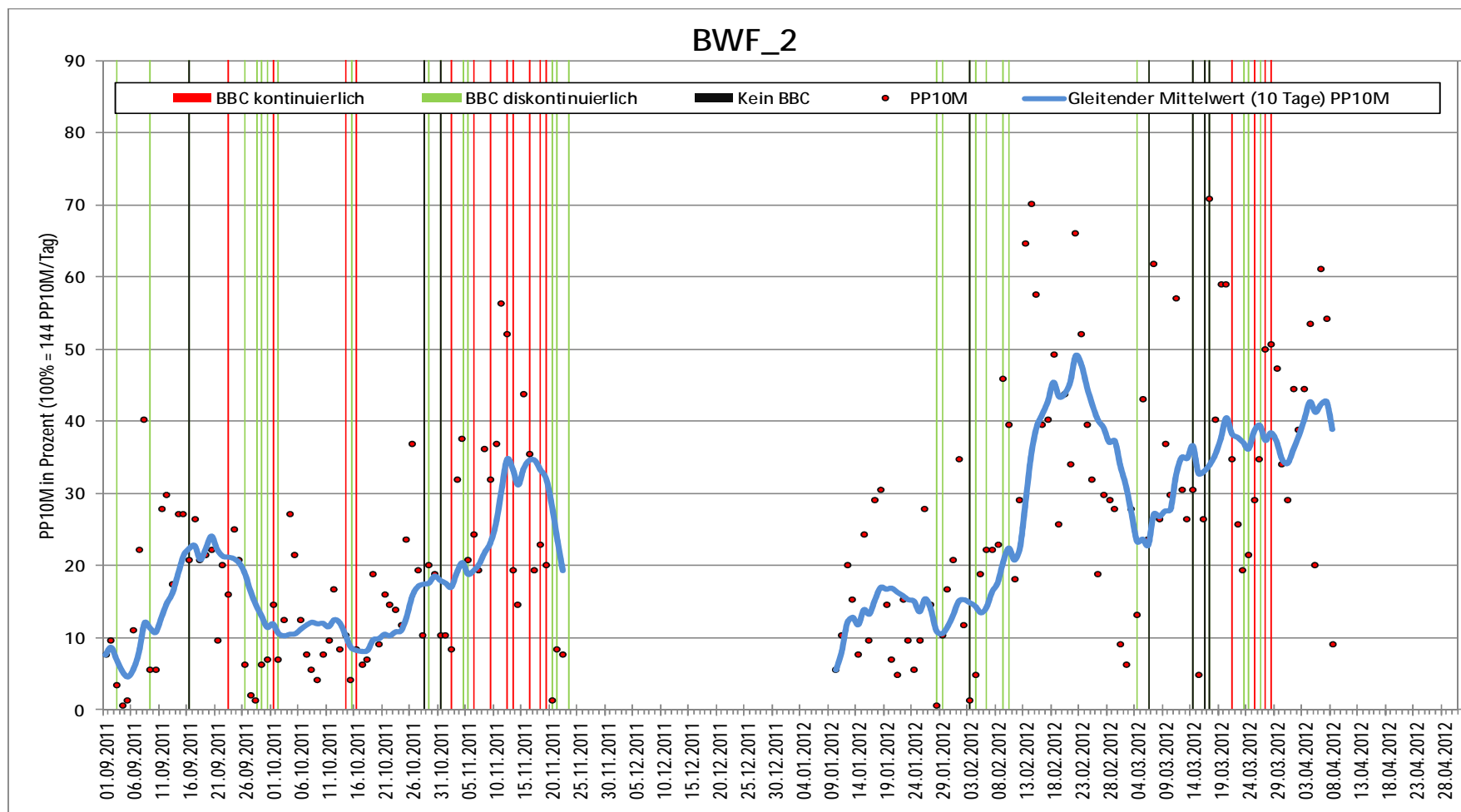
POD-Station	Distanzen zu WEAs (km)		
	Mittelwert	Minimum	Maximum
bwf_1	3,5	0,9	6,6
Pos04 ITAW	3,9	0,8	6,8
bwf_2	5,2	2,5	7,5
bw2	5,4	1,2	9,6
Pos05 ITAW	5,9	0,6	11,1
bwf_3	6,2	3,0	9,3
T5	9,1	5,5	13,7
T10	9,4	5,7	12,7
T12	9,5	4,0	14,7
T1	9,5	6,3	13,7
T4	9,8	6,0	14,4
T2	9,9	6,5	13,7
Pos10 ITAW	10,3	8,0	12,9
T8	11,3	8,8	14,2
T9	11,3	5,8	16,4
T7	11,7	7,5	16,5
T3	12,6	9,3	16,9
T6	13,3	10,1	17,5
bwf_4	15,6	11,3	19,3
Pos02 ITAW	17,4	14,7	19,9
Pos19 ITAW	18,7	16,2	22,2
T11	18,7	13,4	23,9
MEG1	19,1	16,8	20,9
bwf_5	19,9	15,3	23,8
bwf_6	24,7	20,1	28,7
Pos21 ITAW	34,3	32,2	37,2



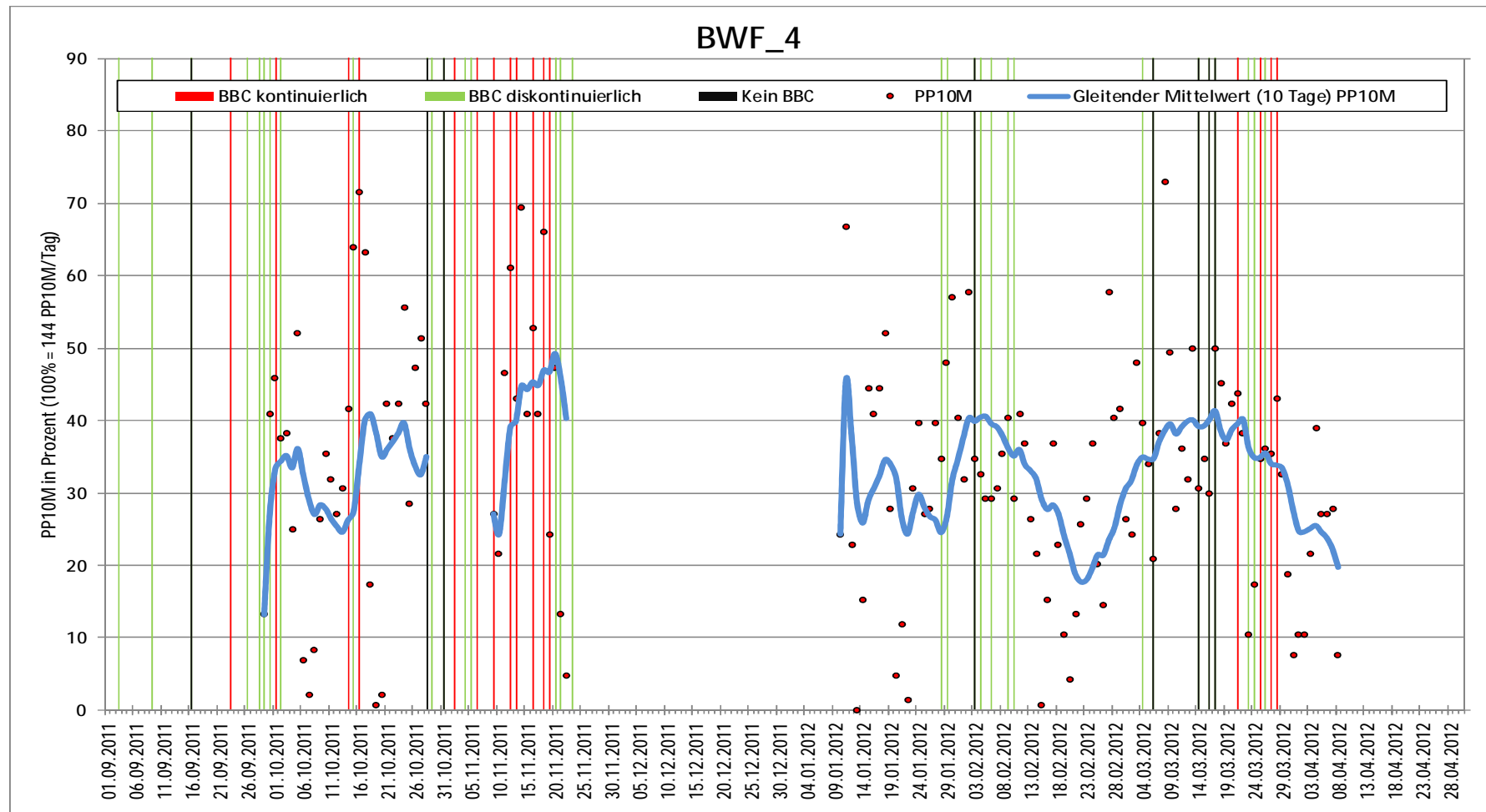
Anhang Abb: 13: PP10M-Mittelwert (in Prozent des Tagesmaximums) der POD Stationen Pos04_ITAW. In der Abbildung erkennbar sind auch die Zeitpunkte der Arbeitsaufnahme an den verschiedenen Baustellen (vertikale Linien). Im Mittel lag die Station 3,9 km vom jeweiligen Rammort entfernt, die minimale Distanz betrug 0,8 km, die maximale 6,8 km.



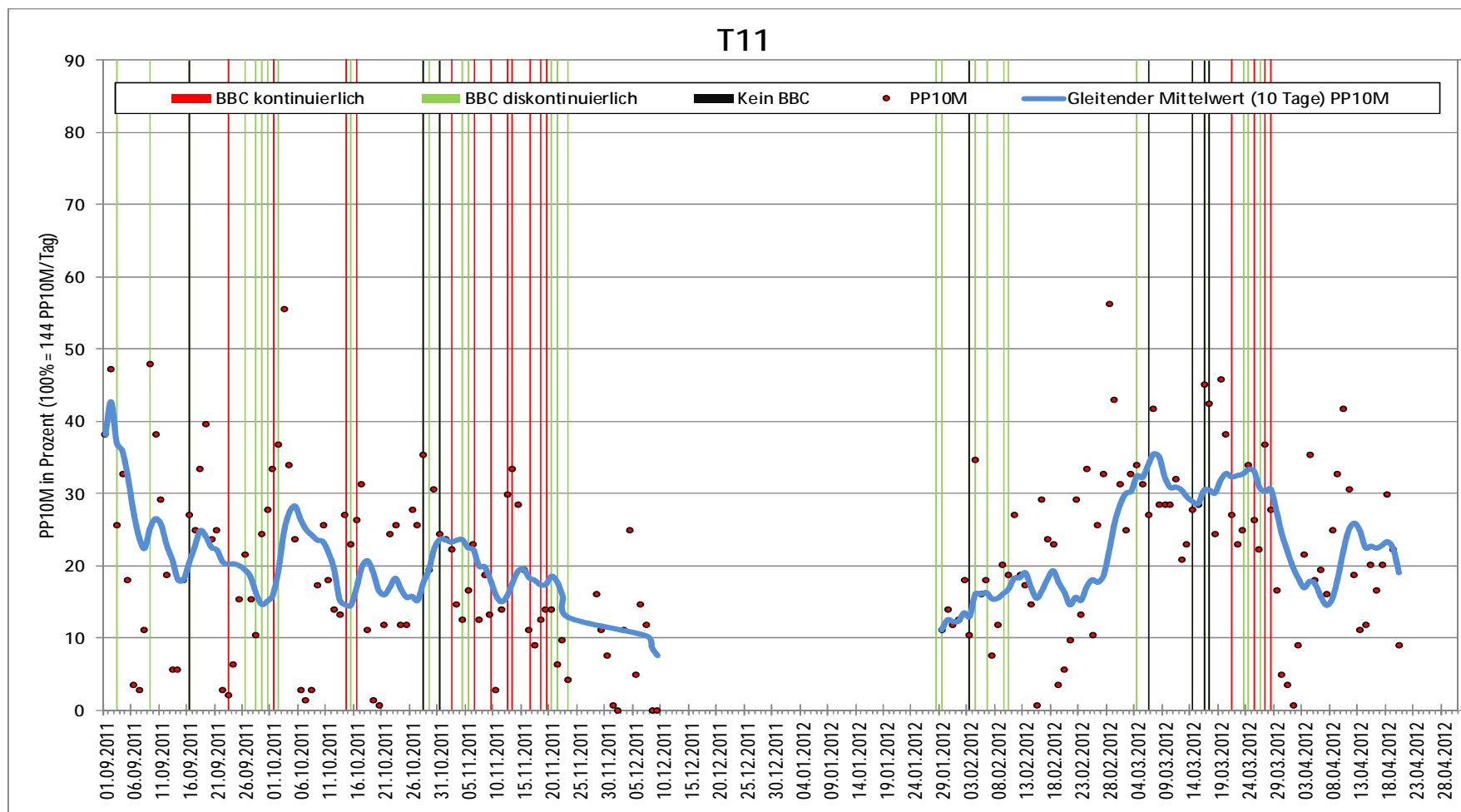
Anhang Abb: 14: PP10M-Mittelwert (in Prozent des Tagesmaximums) der POD Stationen BW2. In der Abbildung erkennbar sind auch die Zeitpunkte der Arbeitsaufnahme an den verschiedenen Baustellen (vertikale Linien). Im Mittel lag die Station 5,4 km vom jeweiligen Rammort entfernt, die minimale Distanz betrug 1,2 km, die maximale 9,6 km.



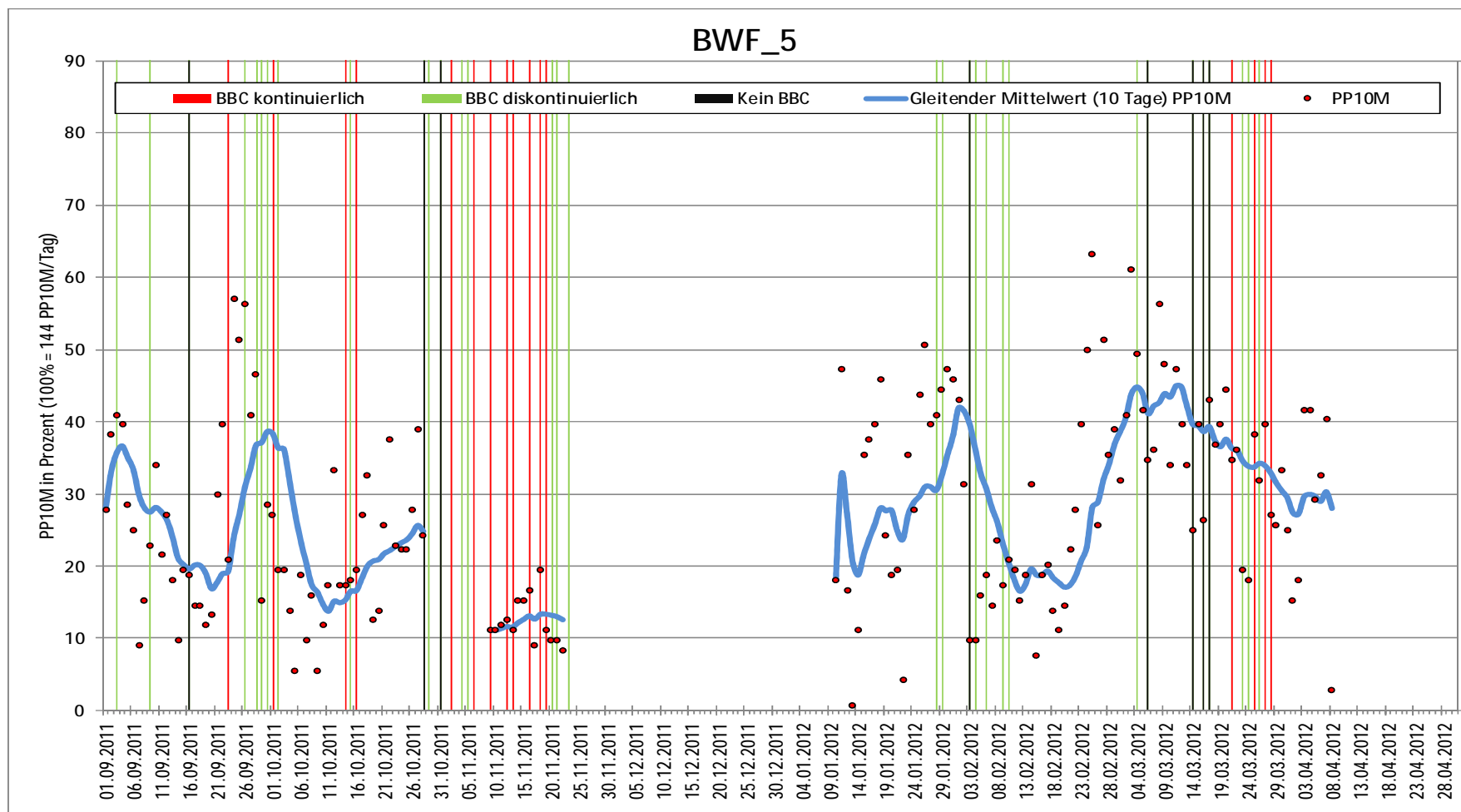
Anhang Abb: 15: PP10M-Mittelwert (in Prozent des Tagesmaximums) der POD Stationen BWF_2. In der Abbildung erkennbar sind auch die Zeitpunkte der Arbeitsaufnahme an den verschiedenen Baustellen (vertikale Linien). Im Mittel lag die Station 5,4 km vom jeweiligen Rammort entfernt, die minimale Distanz betrug 1,2 km, die maximale 9,6 km.



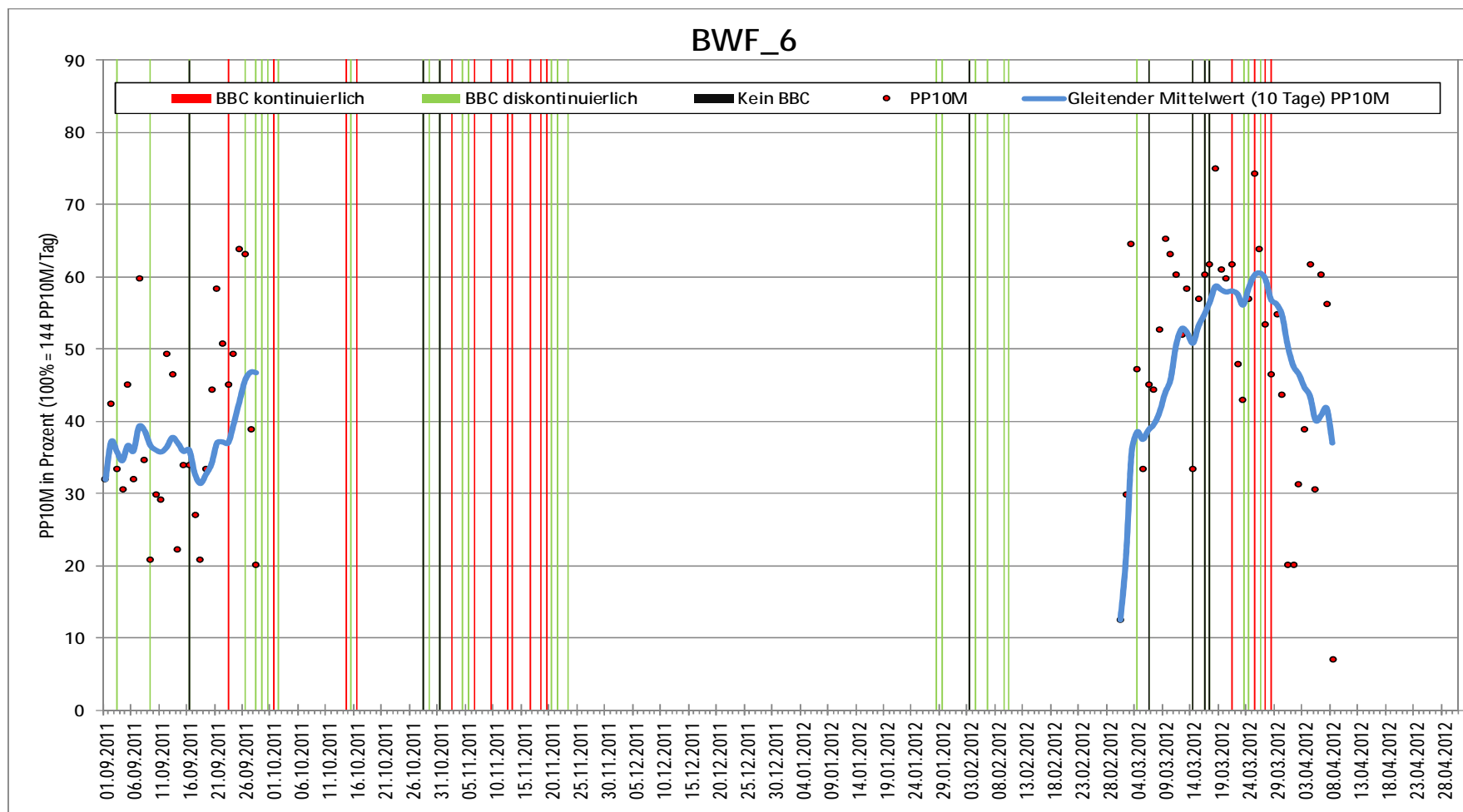
Anhang Abb: 16: PP10M-Mittelwert (in Prozent des Tagesmaximums) der POD Stationen BWF_4. In der Abbildung erkennbar sind auch die Zeitpunkte der Arbeitsaufnahme an den verschiedenen Baustellen (vertikale Linien). Im Mittel lag die Station 15,6 km vom jeweiligen Rammort entfernt, die minimale Distanz betrug 11,3 km, die maximale 19,3 km.



Anhang Abb: 17: PP10M-Mittelwert (in Prozent des Tagesmaximums) der POD Stationen T11. In der Abbildung erkennbar sind auch die Zeitpunkte der Arbeitsaufnahme an den verschiedenen Baustellen (vertikale Linien). Im Mittel lag die Station 18,7 km vom jeweiligen Rammort entfernt, die minimale Distanz betrug 13,4 km, die maximale 23,9 km.



Anhang Abb: 18: PP10M-Mittelwert (in Prozent des Tagesmaximums) der POD Stationen BWF_5. In der Abbildung erkennbar sind auch die Zeitpunkte der Arbeitsaufnahme an den verschiedenen Baustellen (vertikale Linien). Im Mittel lag die Station 19,9 km vom jeweiligen Rammort entfernt, die minimale Distanz betrug 15,3 km, die maximale 23,8 km.



Anhang Abb: 19: PP10M-Mittelwert (in Prozent des Tagesmaximums) der POD Stationen BWF_6. In der Abbildung erkennbar sind auch die Zeitpunkte der Arbeitsaufnahme an den verschiedenen Baustellen (vertikale Linien). Im Mittel lag die Station 24,7 km vom jeweiligen Rammort entfernt, die minimale Distanz betrug 20,1 km, die maximale 28,7 km.

POD - Station	01.09.11	26.09.11	28.09.11	29.09.11	30.09.11	15.10.11	16.10.11	17.10.11	28.10.11	08.11.11	09.11.11	22.11.11	23.11.11	27.11.11	28.11.11	09.12.11	10.12.11	29.12.11	07.01.12	09.01.12	10.01.12	17.01.12	27.01.12	28.01.12	29.01.12	04.02.12	01.03.12	02.03.12	08.04.12	20.04.12	30.04.12	Tage	Summe																			
bw2	129 Tage																			65 Tage																									194							
bwf_1	83 Tage																		90 Tage																								173									
bwf_2	83 Tage																		90 Tage																									173								
bwf_3	83 Tage																		90 Tage																									173								
bwf_4				30 Tage								14 Tage								90 Tage																							134									
bwf_5	58 Tage								14 Tage								90 Tage																								162											
bwf_6	28 Tage																					39 Tage																											67			
MEG1											70 Tage												71 Tage																									141				
Pos02 ITAW						198 Tage																																												198		
Pos04 ITAW	26 Tage				215 Tage																																															241
Pos05 ITAW								197 Tage																																									197			
Pos10 ITAW	46 Tage																																																	46		
Pos19 ITAW	233 Tage																																																	233		
Pos21 ITAW	243 Tage																																																	243		
T1	233 Tage																																																	233		
T10	233 Tage																																																		233	
T11	84 Tage														12 Tage								83 Tage																							179						
T12	139																			83 Tage																										222						
T2	84 Tage																		50 Tage																											134						
T3	28 Tage								56 Tage								84 Tage																									168										
T4	84 Tage																		84 Tage																											168						
T5	84 Tage																		84 Tage																												168					
T6	233																																																	233		
T7	84 Tage																		50 Tage																												134					
T8	233 Tage																																																		233	
T9	29 Tage																			102 Tage																											131					
Tage	1	26	28	29	30	45	46	47	58	69	70	83	84	88	89	100	101	120	129	131	132	139	149	150	151	157	183	184	221	233	243																					

Anhang Abb: 20: Ausbringungsdauer der C-PODs an den fixen POD-Stationen.

Anhang Tab. 10: Beginn der Bauarbeiten an den verschiedenen Fundamenten und deren Entfernung zur der POD-Station BW 2.

WEA	Datum	Distanz (km)	Blasen-schleier (BBC)	BBC Leistung	Art des BBC	Schlauchtyp	max. Anzahl Kompressoren
BW01	03.09.'11	4,8	Ja	nicht durchgängig gleich	linienförmig	2	4
BW03	09.09.'11	4,9	Ja	nicht durchgängig gleich	linienförmig	1	4
BW46	16.09.'11	1,2	Nein	-	-	-	-
BW47	23.09.'11	1,7	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW15	28.09.'11	4,5	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	1	4
BW14	30.09.'11	4,1	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 bis 4
BW12	01.10.'11	3,9	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW34	14.10.'11	2,2	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW26	16.10.'11	3,8	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW35	28.10.'11	2,1	Nein	-	-	-	-
BW49	29.10.'11	3,3	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	1	4
BW41	31.10.'11	6,8	Nein	-	-	-	-
BW42	02.11.'11	7,7	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW43	04.11.'11	8,5	Nein	-	-	-	-
BW54	06.11.'11	8,3	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW53	09.11.'11	7,3	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW50	12.11.'11	4,4	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW61	13.11.'11	4,9	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW64	16.11.'11	7,5	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW44	18.11.'11	9,4	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW65	19.11.'11	8,4	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW66	21.11.'11	9,2	Ja	nicht durchgängig gleich (?)	ringförmig	2(?)	4
BW55	21.11.'11	9,3	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW52	28.01.'12	6,3	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	?
BW62	29.01.'12	5,8	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	?
BW63	03.02.'12	6,6	Nein	-	-	-	-
BW51	04.02.'12	5,3	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 oder 3
BW48	06.02.'12	2,4	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	1 bis 3
BW24	09.02.'12	3	Ja	nicht durchgängig gleich	linear, doppelt	2	3
BW33	04.03.'12	9,6	Ja	nicht durchgängig gleich	linear, doppelt	2	4
BW32	06.03.'12	8,7	Nein	-	-	-	-
BW31	14.03.'12	7,9	Nein	-	-	-	-
BW40	16.03.'12	6	Nein	-	-	-	-
BW36	17.03.'12	2,4	Nein	-	-	-	-
BW23	21.03.'12	3	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW13	23.03.'12	3,9	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 oder 3
BW25	24.03.'12	3,2	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 oder 3
BW02	25.03.'12	4,8	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW37	27.03.'12	3,1	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW04	28.03.'12	5,3	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4

Anhang Tab. 11: Beginn der Bauarbeiten an den verschiedenen Fundamenten und deren Entfernung zu der POD-Station BWF_1.

WEA	Datum	Distanz (km)	Blasen-schleier (BBC)	BBC Leistung	Art des BBC	Schlauchtyp	max. Anzahl Kompressoren
BW01	03.09.'11	4,3	Ja	nicht durchgängig gleich	linienförmig	2	4
BW03	09.09.'11	3,4	Ja	nicht durchgängig gleich	linienförmig	1	4
BW46	16.09.'11	3,7	Nein	-	-	-	-
BW47	23.09.'11	4,3	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW15	28.09.'11	3,9	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	1	4
BW14	30.09.'11	4	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 bis 4
BW12	01.10.'11	1,3	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW34	14.10.'11	4,4	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW26	16.10.'11	3,4	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW35	28.10.'11	2	Nein	-	-	-	-
BW49	29.10.'11	2	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	1	4
BW41	31.10.'11	5,8	Nein	-	-	-	-
BW42	02.11.'11	6,2	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW43	04.11.'11	6,6	Nein	-	-	-	-
BW54	06.11.'11	2,6	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW53	09.11.'11	4,1	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW50	12.11.'11	2,9	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW61	13.11.'11	3,9	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW64	16.11.'11	3,5	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW44	18.11.'11	3,5	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW65	19.11.'11	1,2	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW66	21.11.'11	2,1	Ja	nicht durchgängig gleich (?)	ringförmig	2(?)	4
BW55	21.11.'11	2	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW52	28.01.'12	5	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	?
BW62	29.01.'12	3	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	?
BW63	03.02.'12	1,9	Nein	-	-	-	-
BW51	04.02.'12	5,9	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 oder 3
BW48	06.02.'12	2,6	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	1 bis 3
BW24	09.02.'12	3	Ja	nicht durchgängig gleich	Halboffen, doppelt	2	3
BW33	04.03.'12	5,3	Ja	nicht durchgängig gleich	Halboffen, doppelt	2	4
BW32	06.03.'12	5,1	Nein	-	-	-	-
BW31	14.03.'12	4,3	Nein	-	-	-	-
BW40	16.03.'12	6	Nein	-	-	-	-
BW36	17.03.'12	3,1	Nein	-	-	-	-
BW23	21.03.'12	0,9	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW13	23.03.'12	2,1	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 oder 3
BW25	24.03.'12	1,7	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 oder 3
BW02	25.03.'12	2,7	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW37	27.03.'12	5	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW04	28.03.'12	2,6	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4

Anhang Tab. 12: Beginn der Bauarbeiten an den verschiedenen Fundamenten und deren Entfernung zu der POD-Station BWF_2.

WEA	Datum	Distanz (km)	Blaseschleier (BBC)	BBC Leistung	Art des BBC	Schlauchtyp	max. Anzahl Kompressoren
BW01	03.09.'11	4,8	Ja	nicht durchgängig gleich	linienförmig	2	4
BW03	09.09.'11	4,9	Ja	nicht durchgängig gleich	linienförmig	1	4
BW46	16.09.'11	1,2	Nein	-	-	-	-
BW47	23.09.'11	1,7	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW15	28.09.'11	4,5	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	1	4
BW14	30.09.'11	4,1	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 bis 4
BW12	01.10.'11	3,9	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW34	14.10.'11	2,2	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW26	16.10.'11	3,8	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW35	28.10.'11	2,1	Nein	-	-	-	-
BW49	29.10.'11	3,3	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	1	4
BW41	31.10.'11	6,8	Nein	-	-	-	-
BW42	02.11.'11	7,7	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW43	04.11.'11	8,5	Nein	-	-	-	-
BW54	06.11.'11	8,3	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW53	09.11.'11	7,3	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW50	12.11.'11	4,4	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW61	13.11.'11	4,9	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW64	16.11.'11	7,5	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW44	18.11.'11	9,4	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW65	19.11.'11	8,4	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW66	21.11.'11	9,2	Ja	nicht durchgängig gleich (?)	ringförmig	2(?)	4
BW55	21.11.'11	9,3	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW52	28.01.'12	6,3	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	?
BW62	29.01.'12	5,8	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	?
BW63	03.02.'12	6,6	Nein	-	-	-	-
BW51	04.02.'12	5,3	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 oder 3
BW48	06.02.'12	2,4	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	1 bis 3
BW24	09.02.'12	3	Ja	nicht durchgängig gleich	linear, doppelt	2	3
BW33	04.03.'12	9,6	Ja	nicht durchgängig gleich	linear, doppelt	2	4
BW32	06.03.'12	8,7	Nein	-	-	-	-
BW31	14.03.'12	7,9	Nein	-	-	-	-
BW40	16.03.'12	6	Nein	-	-	-	-
BW36	17.03.'12	2,4	Nein	-	-	-	-
BW23	21.03.'12	3	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW13	23.03.'12	3,9	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 oder 3
BW25	24.03.'12	3,2	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 oder 3
BW02	25.03.'12	4,8	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW37	27.03.'12	3,1	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW04	28.03.'12	5,3	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4

Anhang Tab. 13: Beginn der Bauarbeiten an den verschiedenen Fundamenten und deren Entfernung zu der POD-Station BWF_3.

WEA	Datum	Distanz (km)	Blasen-schleier (BBC)	BBC Leistung	Art des BBC	Schlauchtyp	max. Anzahl Kompressoren
BW01	03.09.'11	8,5	Ja	nicht durchgängig gleich	linienförmig	2	4
BW03	09.09.'11	6,6	Ja	nicht durchgängig gleich	linienförmig	1	4
BW46	16.09.'11	8,9	Nein	-	-	-	-
BW47	23.09.'11	8,1	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW15	28.09.'11	5,8	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	1	4
BW14	30.09.'11	6,7	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 bis 4
BW12	01.10.'11	8,7	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW34	14.10.'11	9,3	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW26	16.10.'11	6,2	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW35	28.10.'11	8,4	Nein	-	-	-	-
BW49	29.10.'11	6,7	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	1	4
BW41	31.10.'11	4,1	Nein	-	-	-	-
BW42	02.11.'11	3,9	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW43	04.11.'11	3,9	Nein	-	-	-	-
BW54	06.11.'11	4,8	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW53	09.11.'11	4,8	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW50	12.11.'11	6	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW61	13.11.'11	6,4	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW64	16.11.'11	5,7	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW44	18.11.'11	4,1	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW65	19.11.'11	5,7	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW66	21.11.'11	5,9	Ja	nicht durchgängig gleich (?)	ringförmig	2(?)	4
BW55	21.11.'11	5	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW52	28.01.'12	5,1	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	?
BW62	29.01.'12	6,1	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	?
BW63	03.02.'12	5,8	Nein	-	-	-	-
BW51	04.02.'12	5,4	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 oder 3
BW48	06.02.'12	7,4	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	1 bis 3
BW24	09.02.'12	8	Ja	nicht durchgängig gleich	linear, doppelt	2	3
BW33	04.03.'12	3,3	Ja	nicht durchgängig gleich	linear, doppelt	2	4
BW32	06.03.'12	3	Nein	-	-	-	-
BW31	14.03.'12	3	Nein	-	-	-	-
BW40	16.03.'12	4,4	Nein	-	-	-	-
BW36	17.03.'12	7,5	Nein	-	-	-	-
BW23	21.03.'12	8,9	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW13	23.03.'12	7,7	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 oder 3
BW25	24.03.'12	7,1	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 oder 3
BW02	25.03.'12	7,5	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW37	27.03.'12	6,7	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW04	28.03.'12	5,6	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4

Anhang Tab. 14: Beginn der Bauarbeiten an den verschiedenen Fundamenten und deren Entfernung zu der POD-Station BWF_4.

WEA	Datum	Distanz (km)	Blasen-schleier (BBC)	BBC Leistung	Art des BBC	Schlauchtyp	max. Anzahl Kompressoren
BW01	03.09.'11	18,1	Ja	nicht durchgängig gleich	linienförmig	2	4
BW03	09.09.'11	16,3	Ja	nicht durchgängig gleich	linienförmig	1	4
BW46	16.09.'11	19	Nein	-	-	-	-
BW47	23.09.'11	18,2	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW15	28.09.'11	15,8	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	1	4
BW14	30.09.'11	16,7	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 bis 4
BW12	01.10.'11	18,4	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW34	14.10.'11	19,3	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW26	16.10.'11	16,3	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW35	28.10.'11	18,4	Nein	-	-	-	-
BW49	29.10.'11	16,8	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	1	4
BW41	31.10.'11	13,6	Nein	-	-	-	-
BW42	02.11.'11	13,1	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW43	04.11.'11	12,5	Nein	-	-	-	-
BW54	06.11.'11	13,3	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW53	09.11.'11	13,9	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW50	12.11.'11	15,9	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW61	13.11.'11	16,1	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW64	16.11.'11	14,4	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW44	18.11.'11	12	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW65	19.11.'11	13,9	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW66	21.11.'11	13,5	Ja	nicht durchgängig gleich (?)	ringförmig	2(?)	4
BW55	21.11.'11	12,7	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW52	28.01.'12	14,5	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	?
BW62	29.01.'12	15,5	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	?
BW63	03.02.'12	15	Nein	-	-	-	-
BW51	04.02.'12	15,2	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 oder 3
BW48	06.02.'12	17,5	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	1 bis 3
BW24	09.02.'12	18	Ja	nicht durchgängig gleich	linear, doppelt	2	3
BW33	04.03.'12	11,3	Ja	nicht durchgängig gleich	linear, doppelt	2	4
BW32	06.03.'12	11,8	Nein	-	-	-	-
BW31	14.03.'12	12,4	Nein	-	-	-	-
BW40	16.03.'12	14,3	Nein	-	-	-	-
BW36	17.03.'12	17,6	Nein	-	-	-	-
BW23	21.03.'12	18,9	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW13	23.03.'12	17,6	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 oder 3
BW25	24.03.'12	17,1	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 oder 3
BW02	25.03.'12	17,2	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW37	27.03.'12	16,8	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW04	28.03.'12	15,4	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4

Anhang Tab. 15: Beginn der Bauarbeiten an den verschiedenen Fundamenten und deren Entfernung zu der POD-Station BWF_5.

WEA	Datum	Distanz (km)	Blasenschleier (BBC)	BBC Leistung	Art des BBC	Schlauchtyp	max. Anzahl Kompressoren
BW01	03.09.'11	22,7	Ja	nicht durchgängig gleich	linienförmig	2	4
BW03	09.09.'11	20,9	Ja	nicht durchgängig gleich	linienförmig	1	4
BW46	16.09.'11	23,5	Nein	-	-	-	-
BW47	23.09.'11	22,7	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW15	28.09.'11	20,3	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	1	4
BW14	30.09.'11	21,2	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 bis 4
BW12	01.10.'11	23	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW34	14.10.'11	23,8	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW26	16.10.'11	20,8	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW35	28.10.'11	22,9	Nein	-	-	-	-
BW49	29.10.'11	21,2	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	1	4
BW41	31.10.'11	17,9	Nein	-	-	-	-
BW42	02.11.'11	17,2	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW43	04.11.'11	16,6	Nein	-	-	-	-
BW54	06.11.'11	17,3	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW53	09.11.'11	18	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW50	12.11.'11	20,3	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW61	13.11.'11	20,3	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW64	16.11.'11	18,4	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW44	18.11.'11	16	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW65	19.11.'11	17,8	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW66	21.11.'11	17,3	Ja	nicht durchgängig gleich (?)	ringförmig	2(?)	4
BW55	21.11.'11	16,6	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW52	28.01.'12	18,7	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	?
BW62	29.01.'12	19,7	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	?
BW63	03.02.'12	19	Nein	-	-	-	-
BW51	04.02.'12	19,5	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 oder 3
BW48	06.02.'12	21,9	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	1 bis 3
BW24	09.02.'12	22,5	Ja	nicht durchgängig gleich	linear, doppelt	2	3
BW33	04.03.'12	15,3	Ja	nicht durchgängig gleich	linear, doppelt	2	4
BW32	06.03.'12	16	Nein	-	-	-	-
BW31	14.03.'12	16,7	Nein	-	-	-	-
BW40	16.03.'12	18,6	Nein	-	-	-	-
BW36	17.03.'12	22,1	Nein	-	-	-	-
BW23	21.03.'12	23,4	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW13	23.03.'12	22,1	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 oder 3
BW25	24.03.'12	21,6	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 oder 3
BW02	25.03.'12	21,8	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW37	27.03.'12	21,2	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW04	28.03.'12	20	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4

Anhang Tab. 16: Beginn der Bauarbeiten an den verschiedenen Fundamenten und deren Entfernung zu der POD-Station BWF_6.

WEA	Datum	Distanz (km)	Blasen-schleier (BBC)	BBC Leistung	Art des BBC	Schlauchtyp	max. Anzahl Kompressoren
BW01	03.09.'11	27,5	Ja	nicht durchgängig gleich	linienförmig	2	4
BW03	09.09.'11	25,8	Ja	nicht durchgängig gleich	linienförmig	1	4
BW46	16.09.'11	28,3	Nein	-	-	-	-
BW47	23.09.'11	27,5	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW15	28.09.'11	25,2	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	1	4
BW14	30.09.'11	26,1	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 bis 4
BW12	01.10.'11	27,9	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW34	14.10.'11	28,7	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW26	16.10.'11	25,6	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW35	28.10.'11	27,8	Nein	-	-	-	-
BW49	29.10.'11	26	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	1	4
BW41	31.10.'11	22,7	Nein	-	-	-	-
BW42	02.11.'11	22	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW43	04.11.'11	21,3	Nein	-	-	-	-
BW54	06.11.'11	21,9	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW53	09.11.'11	22,7	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW50	12.11.'11	25,1	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW61	13.11.'11	25,1	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW64	16.11.'11	23,1	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW44	18.11.'11	20,6	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW65	19.11.'11	22,4	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW66	21.11.'11	21,8	Ja	nicht durchgängig gleich (?)	ringförmig	2(?)	4
BW55	21.11.'11	21,2	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW52	28.01.'12	23,5	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	?
BW62	29.01.'12	24,4	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	?
BW63	03.02.'12	23,7	Nein	-	-	-	-
BW51	04.02.'12	24,3	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 oder 3
BW48	06.02.'12	26,8	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	1 bis 3
BW24	09.02.'12	27,4	Ja	nicht durchgängig gleich	linear, doppelt	2	3
BW33	04.03.'12	20,1	Ja	nicht durchgängig gleich	linear, doppelt	2	4
BW32	06.03.'12	20,8	Nein	-	-	-	-
BW31	14.03.'12	21,5	Nein	-	-	-	-
BW40	16.03.'12	23,4	Nein	-	-	-	-
BW36	17.03.'12	27	Nein	-	-	-	-
BW23	21.03.'12	28,3	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW13	23.03.'12	27	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 oder 3
BW25	24.03.'12	26,5	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 oder 3
BW02	25.03.'12	26,6	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW37	27.03.'12	26,1	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW04	28.03.'12	24,9	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4

Anhang Tab. 17: Beginn der Bauarbeiten an den verschiedenen Fundamenten und deren Entfernung zu der POD-Station Pos04_ITAW.

WEA	Datum	Distanz (km)	Blasen-schleier (BBC)	BBC Leistung	Art des BBC	Schlauchttyp	max. Anzahl Kompressoren
BW01	03.09.'11	5,6	Ja	nicht durchgängig gleich	linienförmig	2	4
BW03	09.09.'11	4,6	Ja	nicht durchgängig gleich	linienförmig	1	4
BW46	16.09.'11	2,6	Nein	-	-	-	-
BW47	23.09.'11	1,8	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW15	28.09.'11	3,5	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	1	4
BW14	30.09.'11	3,7	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 bis 4
BW12	01.10.'11	4,9	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW34	14.10.'11	3,8	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW26	16.10.'11	2,6	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW35	28.10.'11	3	Nein	-	-	-	-
BW49	29.10.'11	0,8	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	1	4
BW41	31.10.'11	4	Nein	-	-	-	-
BW42	02.11.'11	4,8	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW43	04.11.'11	5,7	Nein	-	-	-	-
BW54	06.11.'11	5,4	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW53	09.11.'11	4,4	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW50	12.11.'11	1,5	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW61	13.11.'11	2	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW64	16.11.'11	4,6	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW44	18.11.'11	6,5	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW65	19.11.'11	5,5	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW66	21.11.'11	6,4	Ja	nicht durchgängig gleich (?)	ringförmig	2(?)	4
BW55	21.11.'11	6,4	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW52	28.01.'12	3,4	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	?
BW62	29.01.'12	2,9	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	?
BW63	03.02.'12	3,8	Nein	-	-	-	-
BW51	04.02.'12	2,5	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 oder 3
BW48	06.02.'12	1	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	1 bis 3
BW24	09.02.'12	3,5	Ja	nicht durchgängig gleich	linear, doppelt	2	3
BW33	04.03.'12	6,8	Ja	nicht durchgängig gleich	linear, doppelt	2	4
BW32	06.03.'12	6	Nein	-	-	-	-
BW31	14.03.'12	5,1	Nein	-	-	-	-
BW40	16.03.'12	3,2	Nein	-	-	-	-
BW36	17.03.'12	2,2	Nein	-	-	-	-
BW23	21.03.'12	4,3	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW13	23.03.'12	4,2	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 oder 3
BW25	24.03.'12	2,9	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 oder 3
BW02	25.03.'12	5	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW37	27.03.'12	1,7	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW04	28.03.'12	4,4	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4

Anhang Tab. 18: Beginn der Bauarbeiten an den verschiedenen Fundamenten und deren Entfernung zu der POD-Station T11.

WEA	Datum	Distanz (km)	Blasen-schleier (BBC)	BBC Leistung	Art des BBC	Schlauchtyp	max. Anzahl Kompressoren
BW01	03.09.'11	23,9	Ja	nicht durchgängig gleich	linienförmig	2	4
BW03	09.09.'11	22	Ja	nicht durchgängig gleich	linienförmig	1	4
BW46	16.09.'11	22,3	Nein	-	-	-	-
BW47	23.09.'11	21,4	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW15	28.09.'11	20,8	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	1	4
BW14	30.09.'11	21,7	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 bis 4
BW12	01.10.'11	23,7	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW34	14.10.'11	23,3	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW26	16.10.'11	20,5	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW35	28.10.'11	22,4	Nein	-	-	-	-
BW49	29.10.'11	19,6	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	1	4
BW41	31.10.'11	16,3	Nein	-	-	-	-
BW42	02.11.'11	15,4	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW43	04.11.'11	14,6	Nein	-	-	-	-
BW54	06.11.'11	14,5	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW53	09.11.'11	15,5	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW50	12.11.'11	18,4	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW61	13.11.'11	17,7	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW64	16.11.'11	15,1	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW44	18.11.'11	13,7	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW65	19.11.'11	14,2	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW66	21.11.'11	13,4	Ja	nicht durchgängig gleich (?)	ringförmig	2(?)	4
BW55	21.11.'11	13,5	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW52	28.01.'12	16,4	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	?
BW62	29.01.'12	16,8	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	?
BW63	03.02.'12	15,9	Nein	-	-	-	-
BW51	04.02.'12	17,4	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 oder 3
BW48	06.02.'12	20,5	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	1 bis 3
BW24	09.02.'12	22,5	Ja	nicht durchgängig gleich	linear, doppelt	2	3
BW33	04.03.'12	14	Ja	nicht durchgängig gleich	linear, doppelt	2	4
BW32	06.03.'12	14,8	Nein	-	-	-	-
BW31	14.03.'12	15,7	Nein	-	-	-	-
BW40	16.03.'12	17,1	Nein	-	-	-	-
BW36	17.03.'12	21,4	Nein	-	-	-	-
BW23	21.03.'12	23,5	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW13	23.03.'12	22,7	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 oder 3
BW25	24.03.'12	21,5	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 oder 3
BW02	25.03.'12	22,9	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW37	27.03.'12	20,4	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW04	28.03.'12	21,1	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4

Anhang Tab. 19: Beginn der Bauarbeiten an den verschiedenen Fundamenten und deren Entfernung zu der Pos05_ITAW.

WEA	Datum	Distanz (km)	Blasen-schleier (BBC)	BBC Leistung	Art des BBC	Schlauchtyp	max. Anzahl Kompressoren
BW01	03.09.'11	11,1	Ja	nicht durchgängig gleich	linienförmig	2	4
BW03	09.09.'11	9,3	Ja	nicht durchgängig gleich	linienförmig	1	4
BW46	16.09.'11	9,4	Nein	-	-	-	-
BW47	23.09.'11	8,5	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW15	28.09.'11	7,9	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	1	4
BW14	30.09.'11	8,9	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 bis 4
BW12	01.10.'11	10,8	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW34	14.10.'11	10,4	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW26	16.10.'11	7,6	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW35	28.10.'11	9,4	Nein	-	-	-	-
BW49	29.10.'11	6,7	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	1	4
BW41	31.10.'11	3,4	Nein	-	-	-	-
BW42	02.11.'11	2,6	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW43	04.11.'11	1,8	Nein	-	-	-	-
BW54	06.11.'11	1,5	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW53	09.11.'11	2,5	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW50	12.11.'11	5,5	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW61	13.11.'11	4,9	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW64	16.11.'11	2,3	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW44	18.11.'11	1,3	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW65	19.11.'11	1,5	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW66	21.11.'11	0,8	Ja	nicht durchgängig gleich (?)	ringförmig	2(?)	4
BW55	21.11.'11	0,6	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW52	28.01.'12	3,5	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	?
BW62	29.01.'12	4	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	?
BW63	03.02.'12	3,1	Nein	-	-	-	-
BW51	04.02.'12	4,5	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 oder 3
BW48	06.02.'12	7,6	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	1 bis 3
BW24	09.02.'12	9,6	Ja	nicht durchgängig gleich	linear, doppelt	2	3
BW33	04.03.'12	2,2	Ja	nicht durchgängig gleich	linear, doppelt	2	4
BW32	06.03.'12	2,6	Nein	-	-	-	-
BW31	14.03.'12	3,2	Nein	-	-	-	-
BW40	16.03.'12	4,2	Nein	-	-	-	-
BW36	17.03.'12	8,4	Nein	-	-	-	-
BW23	21.03.'12	10,6	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW13	23.03.'12	9,8	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 oder 3
BW25	24.03.'12	8,6	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 oder 3
BW02	25.03.'12	10,2	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW37	27.03.'12	7,4	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW04	28.03.'12	8,4	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4

Anhang Tab. 20: Beginn der Bauarbeiten an den verschiedenen Fundamenten und deren Entfernung zu der POD-Station Pos21_ITAW.

WEA	Datum	Distanz (km)	Blasenschleier (BBC)	BBC Leistung	Art des BBC	Schlauchtyp	max. Anzahl Kompressoren
BW01	03.09.'11	37,2	Ja	nicht durchgängig gleich	linienförmig	2	4
BW03	09.09.'11	36,9	Ja	nicht durchgängig gleich	linienförmig	1	4
BW46	16.09.'11	33,5	Nein	-	-	-	-
BW47	23.09.'11	33,3	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW15	28.09.'11	35,9	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	1	4
BW14	30.09.'11	36	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 bis 4
BW12	01.10.'11	36,3	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW34	14.10.'11	34,5	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW26	16.10.'11	35	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW35	28.10.'11	34,4	Nein	-	-	-	-
BW49	29.10.'11	33,2	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	1	4
BW41	31.10.'11	34	Nein	-	-	-	-
BW42	02.11.'11	34	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW43	04.11.'11	34,1	Nein	-	-	-	-
BW54	06.11.'11	33,2	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW53	09.11.'11	33,1	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW50	12.11.'11	33,1	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW61	13.11.'11	32,2	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW64	16.11.'11	32,2	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW44	18.11.'11	34,2	Ja	konstante Leistung	ringförmig	1	4
BW65	19.11.'11	32,3	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW66	21.11.'11	32,4	Ja	nicht durchgängig gleich (?)	ringförmig	2(?)	4
BW55	21.11.'11	33,3	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW52	28.01.'12	33,1	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	?
BW62	29.01.'12	32,2	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	?
BW63	03.02.'12	32,2	Nein	-	-	-	-
BW51	04.02.'12	33,1	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 oder 3
BW48	06.02.'12	33,2	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	1 bis 3
BW24	09.02.'12	35,2	Ja	nicht durchgängig gleich	linear, doppelt	2	3
BW33	04.03.'12	35,1	Ja	nicht durchgängig gleich	linear, doppelt	2	4
BW32	06.03.'12	35	Nein	-	-	-	-
BW31	14.03.'12	34,9	Nein	-	-	-	-
BW40	16.03.'12	34	Nein	-	-	-	-
BW36	17.03.'12	34,2	Nein	-	-	-	-
BW23	21.03.'12	35,4	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW13	23.03.'12	36,1	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 oder 3
BW25	24.03.'12	35,1	Ja	nicht durchgängig gleich	ringförmig	2	2 oder 3
BW02	25.03.'12	37	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW37	27.03.'12	34,1	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4
BW04	28.03.'12	36,8	Ja	konstante Leistung	ringförmig	2	4