N05-A
Offshore-Gasplattform

Prognose der zu erwartenden Unterwasserschall-Immissionen während der Rammarbeiten

Oldenburg, 02. Mai 2022

Version 4

Auftraggeber: ONE-Dyas
UN Studio, 7. OG
Parnassusweg 815
NL – 1082 LZ Amsterdam

Durchführung: Patrick Remmers, B. Eng.
Dr. Michael A. Bellmann

itap GmbH
Institut für technische und angewandte Physik GmbH
Marie-Curie-Straße 8
D – 26129 Oldenburg

Berichtsumfang: 48 Seiten

Sitz
itap GmbH
Marie-Curie-Straße 8
26129 Oldenburg

Amtsgericht Oldenburg
HRB: 12 06 97

Kontakt
Telefon (0441) 570 61-0
Fax (0441) 570 61-10
Mail info@itap.de

Geschäftsführer
Dr. Michael A. Bellmann

Bankverbindung
Raiffeisenbank Oldenburg
IBAN:
DE80 2806 0228 0080 0880 00
BIC: GENO DEF1 OL2

Commerzbank AG
IBAN:
DE70 2804 0046 0405 6552 00
BIC: COBA DEFF XXX

USt.-ID.-Nr. DE 181 295 042

Akkreditiertes Prüflaboratorium nach ISO/IEC 17025:

Ermittlung von Erschütterungen und Unterwasserschall

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung 5

2. Projektbeschreibung und Umfang dieses Dokuments 8

3. Schalltechnische Grundlagen 10

4. Modellansätze 15

4.1 Schallausbreitung in der Nordsee 15

4.2 Vorschriften zur Schallminderung unter Wasser 18

4.3 Modellbeschreibung 20

4.4 Bestimmung der Quelle und des Ausbreitungsgrades 22

4.5 Berechnungsverfahren 28

4.6 Modellunsicherheiten 29

5. Modellierungsszenarios 31

5.1 Vorhandene Bedingungen 31

5.2 Schalltechnisch relevante Eingangsdaten 31

6. Modellierungsergebnisse 33

7. Bewertung von ungeminderten Rammarbeiten zur Einhaltung der deutschen und niederländischen Lärmschutzwerte 36

8. Schallschutz 38

8.1 Schallminderungssystem (Noise Mitigation System (NMS)) 39

8.2 Schallschutzsystem (Noise Abatement Systems (NAS)) 39

8.3 Schaleinträge ins Wasser unter Verwendung vorausgewählter Schallminderungskonzepte 44

9. Referenzen 47

Änderungsverzeichnis

Version	Datum	Bemerkung
1	13.10.2021	Erster Entwurf
2	19.11.2021	Textliche Änderungen
3	08.02.2022	Koordinaten der Gasplattform wurden geändert
4	02.05.2022	Textliche Änderungen

Diese Version ersetzt alle früheren Versionen.

Einheiten:

µm/s - Mikrometer pro Sekunde

µPa - Micropascal

bar - 100 kPa

dB - Dezibel

Hz - Hertz

kHz - Kilohertz

kPa - Kilopascal

m - Meter

min - Minute

mm - Millimeter

Pa - Pascal

s - Sekunde

Messgrößen:

$_{SS}$ - Einzelschlag (Energie) äquivalenter Schalldruckpegel
single strike (energy) equivalent Sound Pressure Level

TL - Ausbreitungsdämpfung (Transmission Loss)

α - Absorptions-Koeffizient

λ - Wellenlänge

ρ - Dichte eines Mediums

E - Einzelereignis

E_{cum} - kumulatives Einzelereignis

F - 10 $\log_{10}$(f *[kHz]*)

L_{hg} - Hintergrundschallpegel

$L_{p,pk}$ - zero-to-peak Spitzenpegel

SEL - Einzelereignispegel

SEL_{05} - 5 % Überschreitungs-Einzelereignispegel

SEL_{cum} - kumulativer Einzelereignispegel

SPL - (Energie-) äquivalenter Dauerschall(druck)pegel

T - Mittelungszeit

Z - Schallwellenwiderstand

c - Schallgeschwindigkeit

f - Frequenz

f_g - Grenzfrequenz

k - Ausbreitungsbedingung

n - Anzahl

p - Schalldruck

$p(t)$ - Zeitvariante Schalldruck

$p0$ - Referenzschalldruck

$_{pk,pk}$ - peak-to-peak Schall(druck)pegel

p_{pk} - maximaler Schalldruck

v - Schallschnelle

Abkürzungen:

BfN	Bundesamt für Naturschutz (engl. Federal Agency for Nature Conservation)
BMU	Bundesministeruim für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, engl. Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (engl. Federal Maritime and Hydrographic Agency
DBBC	double Big Bubble Curtain
DP	Dynamic Positioning
EEZ	*Exclusive Economic Zone*
FEED	Front-End Engineering Design
GABC	Grout Annulus Bubble Curtain
IIg	Gebietsklassifizierung nach Thiele & Schellstede
MNRU	*Menck* Noise Reduction Unit
MSFD	marine strategy framework directive
MSL	Mean Sea Level
NAS	Noise Abatement System
NMS	Noise Mitigation System
NNW	Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer
PTS	Permanent Threshold Shift
rms	root mean square, root mean square
SAC	Special Areas of Conservation
SRD	Soil Resistance Value
TTS	Temporary Threshold Shift

1. Zusammenfassung

ONE-Dyas plant den Bau und die Installation eines Jacket-Fundaments für die *N05-A* Offshore-Gas-plattform in der AWZ der deutschen Nordsee. Geplant ist, 6 Stk Skirt-Piles mit einem maximalen Durchmesser von 2.743 m zu installieren, um das Jacket-Fundament im Meeresboden zu fixieren. Zusätzlich werden 12 Stk Conductor-Piles mit einem Pfahldurchmesser von 0,8 m in der Nähe der Jacket-Plattform installiert.

Die Installation von Gründungsstrukturen in den Meeresboden mittels Impulsrammarbeiten verursacht Schallpegel, die für Meeressäuger und Fische schädlich sein können (Lucke, et al. 2009). Das *itap - Institut für Technische und Angewandte Physik GmbH* wurde beauftragt, die Modellierung von Unterwasser-Rammschall beim Bau der Gasplattform *N05-A* durchzuführen.

Die Modellierungsszenarien, einschließlich des Pfahldurchmessers, des Hammertyps und des Plattform-Standorts, wurden so definiert, dass sie das tatsächliche Projekt so weit wie möglich widerspiegeln, mit dem Ziel, die zu erwartenden Schallpegel zu bestimmen und eine genaue Bewertung der Umweltauswirkungen der Rammarbeiten zu ermöglichen. In diesem Bericht werden drei verschiedene Rammenergien von 604 bis 1.090 kJ zur Modellierung des Rammschalls für die Skirt-Piles der Gasplattform verwendet. Für die Conductor-Piles wird nur eine Rammenergie berücksichtigt. Die Modellierung umfasste Einzelereignispegel (SEL) sowie zero-to-peak-Spitzenpegel ($L_{p,\,pk}$) auf der Grundlage der niederländischen und deutschen Anforderungen.

Die folgenden SEL und $L_{p,pk}$ in einer Entfernung von 750 m zur Impulsrammung werden für die Impulsrammungen ohne Schallschutzmaßnahmen prognostiziert.

Pfahltyp	Durchmesser [m]	Rammenergie [kJ]	SEL_1 in 750 m Entfernung	$L_{p,pk}$ in 750 m Entfernung
Skirt-Pile	2.743 m	604	171	194
Skirt-Pile	2.743 m	845	172	196
Skirt-Pile	2.743 m	1.090	173	197
Conductor-Piles	0,8	90	159	183

Saisonale Schallschutzwerte für Impulsschall werden für Installationen an einem Standort wie Offshore-Versorgungsstationen in 750 m Entfernung zur Quelle in den Niederlanden festgelegt. Im ersten Tertial von Januar bis einschließlich Mai (T1) darf der SEL_1 (entspricht dem maximalen SEL) 162 dB nicht überschreiten, von Juni bis einschließlich August (T2) darf der SEL_1 167 dB nicht überschreiten und von September bis einschließlich Dezember (T3) darf der SEL_1 169 dB nicht überschreiten.

Unabhängig von der Bauzeit und der maximal eingesetzten Rammenergie müssen bei allen Impulsrammungen der Skirt-Piles Schallschutzmaßnahmen ergriffen werden, um die von der zuständigen Behörde *Rijkswaterstaat* festgelegten Schallschutzwerte einhalten zu können.

Zwei mögliche Schallschutzkonzepte für die *N05-A* Jacket-Installation sind die Anwendung eines doppelten Großen Blasenschleiers (DBBC) oder eines einfachen Großen Blasenschleiers (BBC) in Kombination mit einem Grout Annulus Bubble Curtain (GABC). Mit beiden Schallschutzkonzepten ist es möglich, den Schalleintrag ins Wasser so weit zu reduzieren, dass die Einhaltung der niederländischen Lärmschutzwerte unabhängig von der verwendeten Rammenergie und der Jahreszeit gewährleistet ist. Voraussetzung für die Einhaltung der niederländischen Lärmschutzwerte ist jedoch, dass die eingesetzten Schallschutzsysteme Großer Blasenschleier und Grout Annulus Bubble Curtain projektspezifisch nach dem Stand der Technik optimiert werden (Bellmann, et al. 2020).

Für die Conductor-Piles ist kein Schallschutz erforderlich.

Dennoch werden sowohl das Jacket-Fundament als auch die Conductor-Piles in unmittelbarer Nähe der deutschen Grenze errichtet und zwei deutsche Natura-2000-Schutzgebiete (SAC) befinden sich in einer Entfernung von 4,5 und 14,6 km zu den Rammarbeiten. Für diese sensiblen Gebiete hat das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU 2013) zusätzliche Schallschutzvorgaben definiert, um einen erheblichen Lebensraumverlust durch Impulsschall zu verhindern.

Daher sollen 10 % der deutschen AWZ nicht durch impulsive Schallereignisse belastet werden, die das Potenzial haben, Schweinswale jederzeit erheblich zu stören (Lebensraumverlust). In der für Meeressäuger sensiblen Zeit von Mai bis August sollte der Lebensraumverlust in den Natura 2000-Schutzgebieten 1 % nicht überschreiten, wenn die Schweinswalreproduktion ein besonderes Schutzziel der Schutzgebiete ist, ansonsten gelten 10 %. Nach dem Schallschutzkonzept (BMU, 2013) sind jedoch in Entfernungen bis zu 8 km - entsprechend 140 dB Einzelereignispegel (SEL) - Reaktionen und zeitliche Habitatverluste durch Rammarbeiten zu erwarten, wenn die deutschen Lärmschutzwerte von 160 dB für den Einzelereignispegel und 190 dB für den Spitzenpegel in 750 m Entfernung eingehalten werden. Ein zeitlicher Lebensraumverlust ist daher die Fläche, welche SEL-Werten von 140 dB und mehr ausgesetzt ist.

Ohne Schallschutzmaßnahmen wird der in der Richtlinie des BMU (2013) definierte Verlust von Lebensräumen, bei denen der Einzelereignispegel (SEL) größer oder gleich 140 dB ist, für das Natura 2000 Schutzgebiet "Borkum Riffgrund" mit 52,9 % und für das Natura 2000 Schutzgebiet "Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer" mit 5 % für die Skirt-Pile-Installation der Jacket-Konstruktion erwartet. Der Lebensraumverlust für "Borkum Riffgrund" wird durch den Einsatz eines optimierten doppelten Großen Blasenschleiers (DBBC) auf 0,55 % reduziert. Der “Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer” wird durch eine schallgeminderte Rammung während der Skirt-Pile-Installation nicht mit Impulsschall von 140 dB_{SEL} oder mehr

belastet. Alternativ zu einem optimierten DBBC kann auch eine Kombination aus einem einzelnen BBC und einem Grout Annulus Bubble Curtain (GABC) eingesetzt werden.

Während der Errichtung der Conductor-Piles beträgt der Lebensraumverlust ohne Schallschutzmaßnahmen 0,8 % für das Natura 2000 Schutzgebiet "Borkum Riffgrund" und 0 % für das Natura 2000 Schutzgebiet "Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer".

Oldenburg, 2. Mai 2022

Patrick Remmers, B. Eng.	itap GMBH Marie-Curie-Str. 8 26129 Oldenburg	Dr. Michael A. Bellmann
Sachgebietsleiter Unterwasserschall-Prognosen		Geschäftsführer
Erstellt		Gepüft

2. Projektbeschreibung und Umfang dieses Dokuments

ONE-Dyas beginnt mit dem Front-End Engineering Design (FEED) für die Gasplattform *N05-A*. Die Plattform soll auf einer 6-beinigen Jacket-Struktur mit 6 Stk. Skirt-Piles errichtet werden. Die Verbindung zwischen der Struktur und den Pfählen soll durch eine verpresste Verbindung hergestellt werden. Für die Skirt-Piles wurde ein Pfahldurchmesser von 2.743 m gewählt. Darüber hinaus werden 12 Stk. Conductor-Piles mit einem Pfahldurchmesser von 0,8 m in der Nähe der Jacket-Plattform installiert.

Der geplante Standort liegt in der Nähe von niederländischen und deutschen ökologisch wichtigen Gebieten, die als Natura-2000-Gebiete ausgewiesen sind. Für Projekte in der Nähe solcher Schutzgebiete ist nach niederländischem bzw. EU-Recht eine Prüfung erforderlich, um festzustellen, ob es zu erheblichen negativen Auswirkungen auf die Erhaltungsziele kommen wird. Eine Genehmigung kann nur erteilt werden, wenn nachgewiesen wird, dass es keine erheblichen Auswirkungen gibt.

Der Boden im Plangebiet besteht im Wesentlichen aus mitteldichtem bis sehr dichtem Sand. Die Wassertiefe im Projektgebiet beträgt etwa 25.8 m (MSL).

Die Installation der Gründungsstrukturen in den Meeresboden mittels Rammarbeiten verursachte Schallpegel, die für Meeressäuger und Fische schädlich sein könnten (Lucke, et al. 2009).

Das *itap – Institut für technische und angewandte Physik GmbH* wurde beauftragt, die Modellierung des (un-) gedämpften Unterwasser-Rammschalls während der Bauphase der *N05-A*-Plattform durchzuführen und zu bewerten, ob und wie eine Einhaltung der niederländischen saisonalen Schallschutzwerte durch Anwendung von Schallschutzmaßnahmen möglich ist.

Darüber hinaus muss der Rammschall des niederländischen Offshore-Projekts auch die deutschen Lärmschutzwerte des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU 2013) für die nahegelegenen deutschen Natura-2000-Schutzgebiete "Borkum Riffgrund" und "Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer" einhalten, um einen erheblichen Verlust von Lebensräumen durch Impulsschall zu vermeiden.

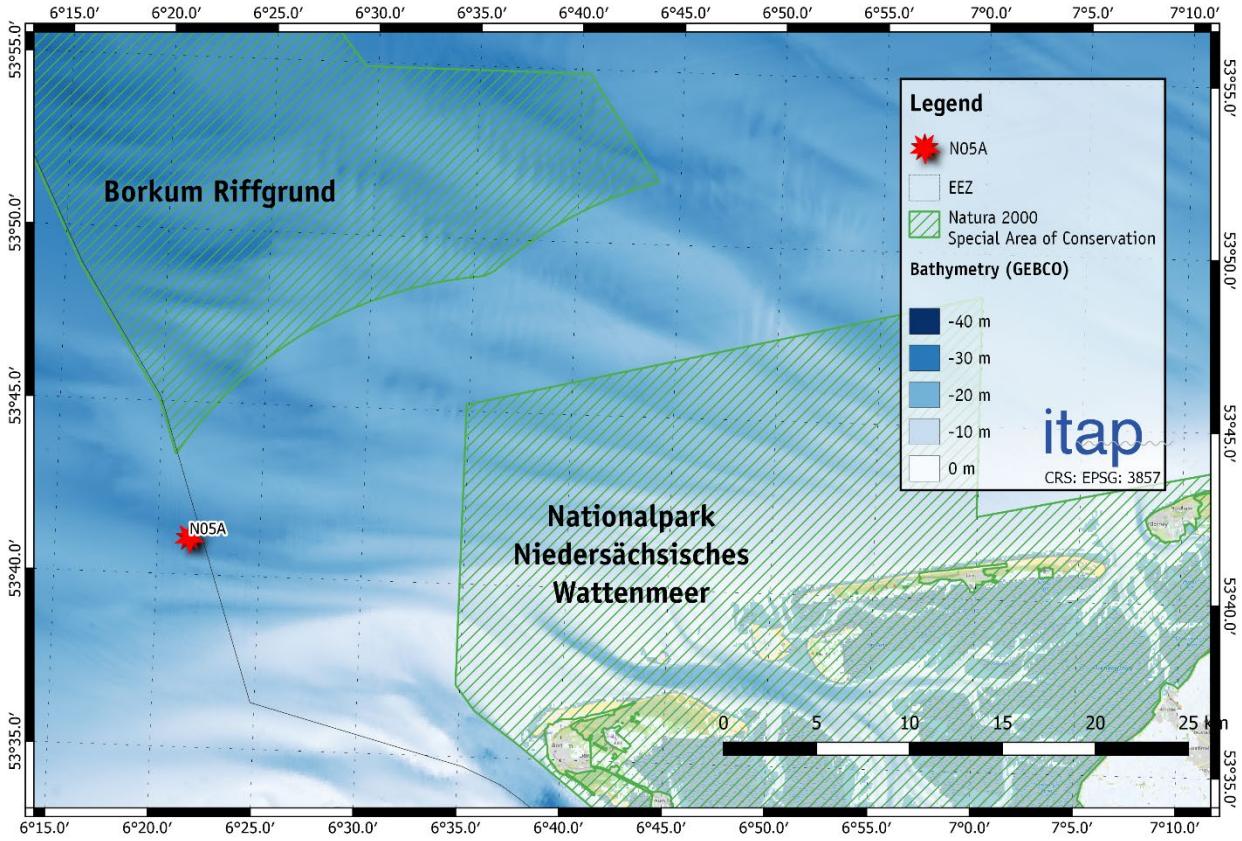

Abbildung 1: Standort der N05-A-Plattform innerhalb der niederländischen AWZ in der Nordsee.

Bei den Skirt-Piles und den Conductor-Piles handelt es sich um große Stahlpfähle, die mit einem Hydraulikhammer in den Meeresboden gerammt werden. Nach den derzeitigen Planungen wird mit Rammenergien von 604 kJ, 845 kJ und 1.090 kJ für die Skirt-Piles und 90 kJ für die Conductor-Piles gerechnet.

3. Schalltechnische Grundlagen

Schall ist eine rasche, oft periodische Schwankung des Drucks, die den Umgebungsdruck (in Wasser den hydrostatischen Druck) additiv überlagert. Dabei kommt es zu einer Hin- und Her-Bewegung von Wasserteilchen, die in der Regel durch die Schallschnelle v beschrieben wird. Die Schallschnelle kennzeichnet die Wechselgeschwindigkeit eines um seine Ruheposition in einem Medium schwingenden Teilchens. Die Schallschnelle ist nicht zu verwechseln mit der Schallgeschwindigkeit c_{Wasser}, also der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schall in einem Medium, die in der Regel bei Wasser im Bereich von c_{Wasser} = 1.500 m/s liegt. Die Schallschnelle v ist deutlich geringer als die Schallgeschwindigkeit c.

Schalldruck p und Schallschnelle v stehen mit der akustischen Kennimpedanz Z, die den Wellenwiderstand des Mediums charakterisiert, im folgenden Zusammenhang:

$$Z = \frac{p}{v}$$

Gleichung 1

Im Fernfeld, d. h. in einigen Wellenlängen Abstand[1] (frequenzabhängig) von der Schallquelle, ist die Kennimpedanz gegeben durch:

$$Z = \rho c$$

Gleichung 2

mit ρ – Dichte eines Mediums und c – Schallgeschwindigkeit.

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) ergibt sich daraus für die Schallschnelle in Wasser ein Wert von ca. 0.7 µm/s.

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 Dezibel (dB). Allerdings gibt es verschiedene Schallpegelgrößen:

- (Energie-) äquivalenter Dauerschalldruckpegel – SPL ,
- Einzelereignispegel – SEL,
- Kumulativer Einzelereignispegel - SEL_{cum},

[1] Die Grenze zwischen Nah- und Fernfeld ist bei Unterwasserschall nicht genau definiert bzw. ausgemessen. Jedoch handelt es sich um eine frequenzabhängige Größe. In Luftschall wird ein Wert von $\geq 2\lambda$ angenommen. Für Unterwasserschall existieren Literaturangaben bis zu $\geq 5\lambda$.

- Zero-to-peak Spitzenpegel $L_{p,}$.

SPL und SEL können sowohl frequenzunabhängig angegeben werden, d. h. als breitbandige Einzahlwerte, als auch frequenzaufgelöst, z. B. in 1/3-Oktav-Bändern (Terzspektrum).

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

(Energie-) äquivalenter Dauerschalldruckpegel (SPL)

Der SPL ist die gebräuchlichste Messgröße in der Akustik und ist definiert als:

$$SPL = 10\ \log_{10}\left(\frac{1}{T}\int_0^T \frac{p(t)^2}{p_0^2}\ \mathrm{d}t\right)\ [\mathrm{dB}]$$

Gleichung 3

mit

$p(t)$ - zeitlich varianter Schalldruck,

p_0 - Bezugsschalldruck (bei Unterwasserschall 1 µPa),

T - Mittelungszeit.

In der Literatur wird manchmal die Bezeichnung SPL für einen Schalldruckpegel ohne zeitliche Mittelwertbildung verwendet. Nach dieser Definition wird der kontinuierliche Schalldruckpegel über ein Intervall dann als SPL_{rms} bezeichnet, wobei der Index rms für "root mean square" (quadratischer Mittelwert) steht. In diesem Bericht wird die Terminologie nach der DIN ISO 18406 (2017) verwendet sowie der Index rms weggelassen und der SPL in diesem Bericht ist gleich SPL_{rms}, da eine Definition nach Gleichung 3 bereits eine Mittelwertbildung impliziert. In einigen Nationen ist der rms-Wert des Schalldruckpegels (SPL_{SS}) jedes einzelnen Rammschlags zu bestimmen. Daher muss die Dauer jedes einzelnen Rammschlags berücksichtigt werden.

Einzelereignispegel (SEL)

Zur Charakterisierung von Rammgeräuschen ist der SPL 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. Die Schallbelastung – E oder vielmehr der resultierende Einzelereignispegel – SEL sind besser geeignet. Beide Werte sind folgendermaßen definiert:

$$E = \frac{1}{T_0} \int_{T_1}^{T_2} \frac{p(t)^2}{p_0^2} \, \mathrm{d}t$$

Gleichung 4

$$SEL = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T_0} \int_{T_1}^{T_2} \frac{p(t)^2}{p_0^2} \, \mathrm{d}t \right) \text{ [dB]}$$

Gleichung 5

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 - Referenz 1 Sekunde.

Der Einzelereignispegel eines Schallimpulses (Rammschlag) ist damit der (SPL) eines kontinuierlichen Schalls von 1 s Dauer und der gleichen Schallenergie wie der Impuls.

Der Einzelereignispegel (SEL) und der Dauerschallpegel (SPL) können ineinander umgerechnet werden:

$$SEL = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{SPL}{10}} - 10^{\frac{L_{hg}}{10}} \right) - 10 \log_{10} \left(\frac{nT_0}{T} \right) \text{ [dB]}$$

Gleichung 6

mit

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

T_0 - 1 Sekunde,

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

Die Gleichung 6 liefert somit den mittleren Einzelereignispegel (SEL) von n Schallereignissen (Rammschlägen) aus nur einer Schalldruckpegel (SPL)-Messung. Im Falle, dass der Hintergundpegel zwischen den Rammschlägen deutlich geringer als der Rammschall ist (z. B. > 10 dB), kann mit hinreichender Genauigkeit mit einer Vereinfachung von Gleichung 6 folgendermaßen gerechnet werden:

$$SEL \approx SPL - 10 \log_{10}\left(\frac{nT_0}{T}\right) \text{ [dB]}$$

Gleichung 7

Hinweis: In einigen Richtlinien zur Messung von Unterwasserschall, z. B. in Deutschland (BSH, 2011), ist ein gemittelter Einzelereignispegel von 30 s (SEL_{30s}) gemäß Gleichung 7 definiert.

Anmerkung: Der SEL_1 (auch bekannt als SEL_{max}) als Lärmschutzwert von Rijkswaterstaat bedeutet, dass alle gemessenen SEL-Werte von jeder Rammaktivität den Lärmschutzwert einhalten müssen.

Kumulativer Einzelereignispegel (SEL_{cum})

Ein Wert für die Schalldosis ist der kumulative Einzelereignispegel (SEL_{cum}) und ist wie folgt definiert:

$$SEL_{cum} = 10 \log_{10}\left(\frac{E_{cum}}{E_{ref}}\right) \text{ [dB]}$$

Gleichung 8

Mit der kumulativen Schalleinwirkung E_{cum} für *N* transiente Schallereignisse mit der frequenzungewichteten Schalleinwirkung E_n

$$E_{cum} = \sum_{n=1}^{N} E_n$$

Gleichung 9

und der Referenzeinwirkung $E_{ref} = p_{ref}^2 \cdot T_{ref}$, in der p_{ref} der Referenzschalldruck 1 µPa und T_{ref} die Referenzdauer von 1 Sekunde darstellt.

Technische Anmerkung: In einigen Richtlinien für Unterwasserschallmessungen wird der kumulative SEL_{cum} bestimmt, um die Auswirkungen auf bestimmte Arten zu bewerten (z. B. NOAA, 2018; Danish Energy Agency, 2016). Die Informationen über den SEL_{cum} sind in diesem Bericht nur zu Informationszwecken enthalten.

Zero-to-peak Spitzenpegel ($L_{p,pk}$)

Diese Größe ist ein Maß für Schalldruckmaxima. Im Gegensatz zum Schalldruckpegel (SPL) und Einzelereignispegel (SEL) gibt es keine Mittelwertbildung:

$$L_{p,pk} = 20 \log_{10}\left(\frac{|p_{pk}|}{p_0}\right) \text{ [dB]}$$

Gleichung 10

mit

$|p_{pk}|$ - maximal festgestellter Schalldruck.

Ein Beispiel ist in Abbildung 2 dargestellt. Der Zero-to-peak-Spitzenpegel ($L_{p,pk}$) ist stets höher als der Einzelereignispegel (SEL). Normalerweise beträgt die Differenz zwischen dem L und dem SEL bei Rammarbeiten 20 dB bis 25 dB. Einige Autoren bevorzugen den Peak-to-peak-Wert ($L_{pk,pk}$) anstelle des $L_{p,pk}$,. Eine visuelle Definition dieses Parameters ist in Abbildung 2 gegeben, aber diese Metrik ist in der ISO 18405 (2017) nicht definiert. Dieser Faktor beschreibt nicht den maximal erreichten (absoluten) Spitzenpegel, sondern die Differenz zwischen der maximalen negative und der maximalen positive Amplitude eines Impulses. Dieser Wert ist maximal 6 dB höher als der Zero-to-peak Spitzenpegel ($L_{p,pk}$).

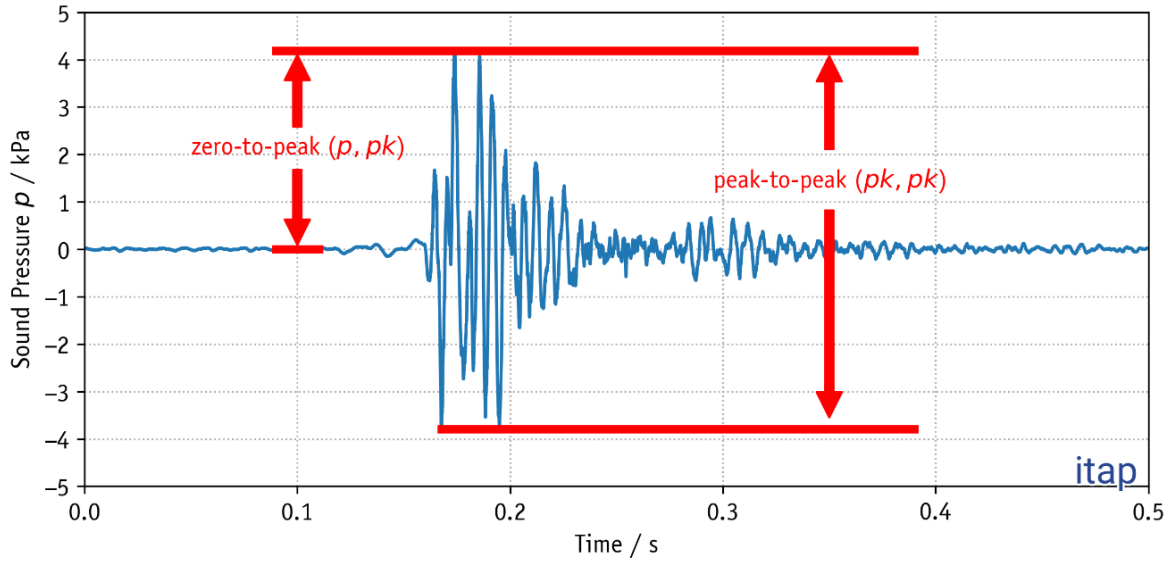

Abbildung 2: Typisches gemessenes Zeitsignal von Unterwasserschall aufgrund von Rammarbeiten in einer Entfernung von mehreren 100 m.

4. Modellansätze

4.1 Schallausbreitung in der Nordsee

Einfluss der Entfernung

Für überschlägige Berechnungen kann davon ausgegangen werden, dass der Schalldruck mit der Entfernung nach einem einfachen Potenzgesetz abnimmt. Der Pegel in dB reduziert sich um:

$$TL = k \cdot \log_{10}\left(\frac{r_1}{r_2}\right) \text{ [dB]}$$

Gleichung 11

mit

r_1 und r_2 - die Entfernung zur Schallquelle steigt von r_1 auf r_2,

TL - Ausbreitungsdämpfung (Transmission Loss),

k - absoluter Begriff (k = 15, wird oft verwendet für flache Gewässer, k = 20 für sphärische Ausbreitung).

Häufig wird die Ausbreitungsdämpfung für die Entfernung r_1 = 1 m angegeben (fiktiver Abstand zu einer angenommenen Punktquelle). Diese wird zur Berechnung der Schallleistung einer Rammung in 1 m Entfernung verwendet. Diese wird häufig Quellpegel genannt. Gleichung 11 wird dann reduziert auf: $TL = -\,k\ \log_{10}(r)$. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass die oben genannte Gleichung nur für das Fernfeld eines akustischen Signals, d. h. in einiger Entfernung (frequenzabhängig) zur Quelle, gültig ist. Zusätzlich macht sich die Absorption im Wasser bei Entfernungen von mehreren Kilometern stärker bemerkbar und führt zu einer weiteren Reduzierung des Schalldrucks. Dies wird mit einer Konstanten α proportional zur Entfernung berücksichtigt. Gleichung 11 erweitert sich zu:

$$TL = -\,k\ \log_{10}(r) + \ \alpha\, r \text{ [dB]}$$

Gleichung 12

Für Regionen in der *Nordsee* mit Wassertiefen unter 50 m führt die folgende Gleichung 13 zu realistischen Ergebnissen im Vergleich zu Rammschallmessungen in verschiedenen Regionen der *Nordsee*. Das Beispiel in der "Richtlinie für Unterwasserlärm - Installation von Pfählen im Impulsrammverfahren" (Danish Energy Agency 2016) berücksichtigte die gleiche Ausbreitungsdämpfung.

$$TL = -\,14.72\ \log_{10}(r) + 0.00027\, r \text{ [dB]}$$

Gleichung 13

Thiele und Schellstede (1980) spezifizierten frequenzabhängige Näherungsgleichungen für die Berechnung der Schallausbreitung in verschiedenen Regionen der *Nordsee* sowie für "raue" und "glatte" See. Für die Installation der Fundamente ist eine "glatte" See erforderlich. Daher wird die folgende Gleichung für Flachwasser und glatte See (IIg) mit Messergebnissen von verschiedenen OWP-Bauphasen durch Impulsrammung in the *Nordsee* in Abbildung 3 verglichen:

$$TL = -(23 + 0.7\,F)\log_{10} r + (0.3 + 0.05\,F + 0.005\,F^2)\,r\,10^{-3} \;\; [\text{dB}]$$

Gleichung 14

mit

F $= 10\,\log_{10}(f\;[\text{kHz}])$, mit der Frequenz f [Hz]

r – Entfernung [m].

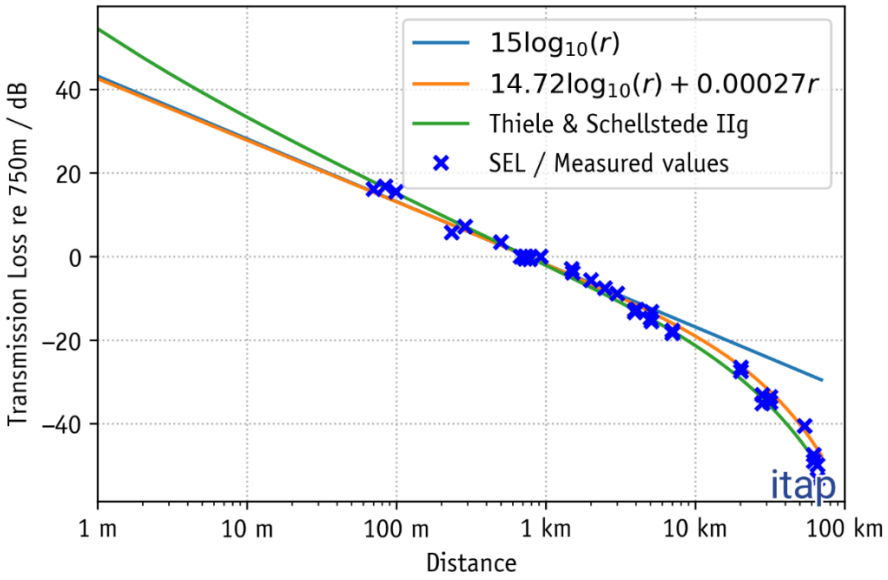

Abbildung 3: Unterschiedlich prognostizierte Ausbreitungsdämpfung (TL)-Kurven gemäß Gleichung 11 (15 $\log_{10}$ R), Gleichung 13 (14.72 $\log_{10}$ R + 0.00027 R) und des halbempirischen Ansatzes von Thiele und Schellstede IIg (1980) (Gleichung 14), verglichen mit vorhandenen Offshore-Messdaten. Die Messdaten stammen aus Rammungsmessungen von verschiedenen Offshore-Windparks in der Nordsee in Deutschland und den Niederlanden. Die Wassertiefe lag in allen Windparks unter 50 m.

Gleichung 13 und Gleichung 14 zeigen eine hohe Ähnlichkeit und eine hohe Übereinstimmung mit den Messwerten des Einzelereignispegels (SEL) während der Rammungen (siehe Abbildung 3) in verschiedenen Regionen der Nordsee mit vergleichbaren Wassertiefen. Nur für Entfernungen von weniger als 100 m weichen die Gleichungen voneinander ab. Für die gebräuch-

lichere *N05-A*-Prognose wird Gleichung 14 berücksichtigt. Die Ausbreitungsdämpfung (Transmission Loss) wird für jede Richtung berücksichtigt. Standortspezifische Änderungen der Bathymetrie werden durch die frequenzabhängige Auswirkung der Wassertiefe, wie unten beschrieben, berücksichtigt.

Einfluss der Wassertiefe

Die Schallausbreitung im Meer wird auch durch die Wassertiefe beeinflusst. Unterhalb einer bestimmten Grenzfrequenz (f_g) ist eine kontinuierliche Schallausbreitung nicht möglich. Je flacher das Gewässer, umso höher ist die Grenzfequenz. Die Grenzfrequenz (f_g) hängt ebenfalls vom Sedimenttyp ab. Die untere Grenzfrequenz für vorwiegend sandigen Boden als Funktion der Wassertiefe ist in Abbildung 4 dargestellt. Darüber hinaus sind die Bandbreiten der unteren Grenzfrequenz (f_g) an verschiedenen Bodenschichten, z. B. Ton und Kreide (Geschiebemergel oder Moräne), in grau dargestellt (Jensen, et al. 2011). Schall um die Grenzfrequenz (f_g) wird mit zunehmendem Abstand zur Schallquelle stärker reduziert oder gedämpft, als es mit Gleichung 14 berechnet wird.

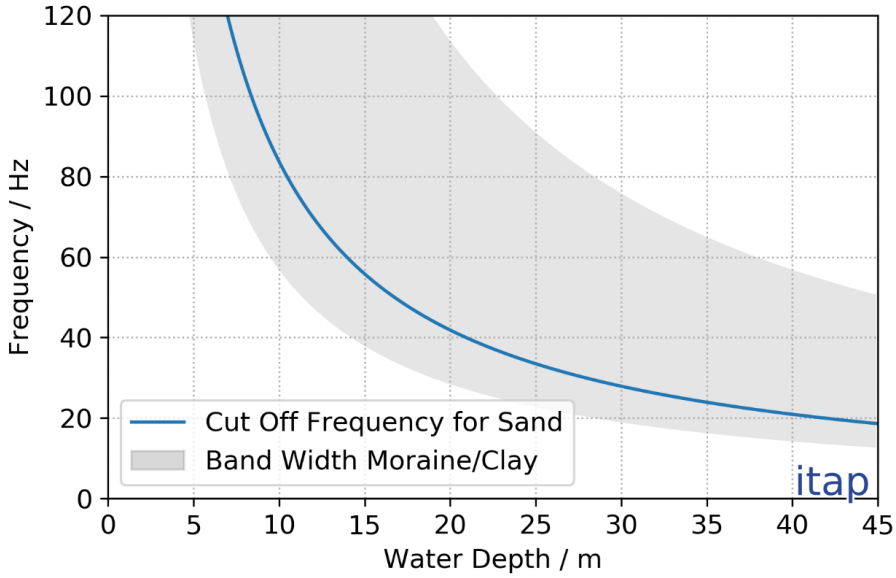

Abbildung 4: Theoretische, untere (Grenz-) Frequenz (f_g) für eine ungestörte Schallausbreitung im Wasser als Funktion der Wassertiefe für verschiedene Bodenschichtungen (Beispiel übernommen von Urick (1983); Jensen et al., (2011); das Beispiel zeigt den möglichen Bereich, der durch verschiedene Schichten verursacht wird; die Schicht entspricht nicht unbedingt den Schichten im Konstruktionsfeld).

4.2 Vorschriften zur Schallminderung unter Wasser

Die Schalleinträge ind Wasser bei Rammarbeiten ist ein Eingriff des Menschen in die Meeresumwelt, der negative Auswirkungen auf die Meeresfauna haben kann. Hohe Schalldruckpegel können Meeressäuger oder Fische schädigen, was zu Verhaltensstörungen, vorübergehendem Hörverlust (TTS, Temporary Threshold Shift) oder dauerhaftem Hörverlust (PTS, Permanent Threshold Shift) (Lucke, et al. 2009) führen kann.

Die Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (MSRL) verpflichtet die Mitgliedsstaaten, innerhalb einer bestimmten Frist eine Meeresstrategie (Aktionsplan) festzulegen. In Umsetzung dessen haben die Niederlande und Deutschland bereits Umweltziele einschließlich Lärmschutzwerten für Impulsschall wie Rammgeräusche festgelegt.

4.2.1 Einhaltung der Vorschriften in den Niederlanden

Rijkswaterstaat, das Ministerium für Infrastruktur und Wasserwirtschaft, ist die Regulierungs- und Überwachungsbehörde für Offshore-Projekte in der niederländischen AWZ und hat die folgenden Lärmschutzwerte festgelegt, um Schädigungen durch impulshaften Schall zu verhindern.

Jedes Impulsschallevent – wie die Installation der *N05-A*-Plattform durch Impulsrammung - muss die folgenden Lärmschutzwerte einhalten (Tabelle 1). Diese Schallschutzwerte sind definiert für den maximalen Einzelereignispegel $SEL_1 = SEL_{max}$ in einer Entfernung von 750 m zur Quelle:

Tabelle 1: Saisonale Lärmschutzwerte für Impulslärm auf der Grundlage des Einzelereignispegels ($SEL1 = SEL_{max}$) in 750 m Entfernung von der Schallquelle (hier: Rammarbeiten).

Tertial	Dauer	Schallschutzwert [dB re µPa²s]
T1	Januar bis Mai	162
T2	Juni bis August	167
T3	September bis Dezember	169

4.2.2 Einhaltung der Vorschriften in Deutschland

Zwei deutsche Natura 2000-Gebiete "Borkum Riffgrund" und "Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer" befinden sich in unmittelbarer Nähe der *N05-A*-Plattform. Daher müssen die potenziellen Auswirkungen auf die Meeresfauna auch auf der deutschen Seite der Nordsee für diese Naturschutzgebiete berücksichtigt werden.

Ein Einzelereignispegel (SEL) von 160 dB und ein zero-to-peak Spitzenpegel ($L_{p,pk}$) von 190 dB in einer Entfernung von 750 m zur Quelle sind als Lärmschutzwerte für impulshaften Schalleintritt definiert, um Verletzungen zu vermeiden. Der 5% Perzentilwert des Einzelereignispegels (SEL_5) pro Pfahl-Installation muss das 160 dB-Kriterium einhalten. Allerdings hat das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit BMU) 2013 auch Vorgaben zur Schallminderung definiert, um einen signifikanten Verlust von Lebensraum für Meeressäuger zu verhindern (Reaktion oder Störung von Meeressäugern aufgrund von impulsivem Schalleintrag). Auf der Grundlage dieser Richtlinie dürfen zu keinem Zeitpunkt mehr als 10% der deutschen AWZ oder des Natura 2000-Gebiets durch impulsive Schallereignisse mit dem Potenzial, Schweinswale erheblich zu stören, belastet werden.

Auf der Grundlage des Schallschutzkonzepts (BMU 2013) sind in Entfernungen bis zu 8 km von Rammarbeiten Reaktionen und zeitliche Lebensraumverluste zu erwarten, wenn die allgemeinen Lärmschutzwerte von 160 dB für den Einzelereignispegel und 190 dB für den Spitzenpegel in 750 m Entfernung eingehalten werden – entsprechend 140 dB Einzelereignispegel (SEL). Ein Lebensraumverlust ist also die Fläche des Lebensraumes, die (SEL)-Werten von 140 dB und mehr ausgesetzt ist. Darüber hinaus dürfen in der für Meeressäuger sensiblen Zeit von Mai bis August nicht mehr als 10% des Natura 2000-Schutzgebietes durch mehr als 140 dB_{SEL5} belastet werden (BMU 2013), wenn die Schweinswalvermehrung kein besonderes Schutzziel des Schutzgebietes ist. Dies ist für die in Tabelle 2 aufgeführten besonderen Schutzgebiete (SAC) der Fall. Die Flächen der Natura 2000-Schutzgebiete (SAC) und die Entfernungen zum *N05-A*-Standort sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Gebiete und Entfernungen der deutschen Natura 2000-Schutzgebiete zum Projektstandort.

Natura 2000 besonderes Schutzgebiet	**Gebiet [km²]**	**Entfernung zu *N05-A* [km]**
Borkum Riffgund	625,189	4,551
Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer	2.766,301	14,633

4.3 Modellbeschreibung

Das (Standard-) Model der *itap GmbH* ist ein empirisches Modell, d. h., es basiert auf gemessenen Einzelereignispegeln (SEL) und den zero-to-peak Spitzenpegeln ($L_{p,pk}$) aus vorherigen Projekten. Daher handelt es sich bei dieser Art von Modell um ein "adaptives" Modell, das mit zunehmenden Eingabedaten immer "präziser" wird.

Der emittierte Schallpegel hängt von vielen verschiedenen Faktoren ab, wie z. B. Wandstärke, Rammenergie, Durchmesser und Bodenbeschaffenheit (Bodenwiderstand) sowie Wassertiefe. Da jedoch alle genannten Parameter in Wechselwirkung zueinanderstehen können, ist es nicht möglich, exakte Aussagen über den Einfluss eines einzelnen Parameters zu treffen. In einem ersten Schritt wird daher nur ein Parameter, der "Pfahldurchmesser", betrachtet.

Abbildung 5 zeigt die Schallpegel, die während der Rammarbeiten an einer Reihe von Windparks gemessen wurden, aufgetragen über den Eingabeparameter "Pfahldurchmesser". Je größer die schallabstrahlende Fläche im Wasser ist, desto größer ist der Schalleintrag. Das heißt, die bewertungsrelevanten Pegelwerte steigen mit zunehmender Pfahloberfläche, also dem Durchmesser des Pfahls. Zu beachten ist auch, dass der Zusammenhang nicht linear ist.

Die Modellunsicherheit beträgt ± 5 dB, allein unter Berücksichtigung des Eingangsparameters "Pfahldurchmesser", und basiert auf der Streuung der tatsächlich vorliegenden Messergebnisse aus Abbildung 5, die wahrscheinlich auf weitere Einflussfaktoren, wie z. B. Rammenergie und reflektierende Pfahloberfläche, zurückzuführen ist.

Der folgende Vergleich zwischen den prognostizierten Werten und den tatsächlich gemessenen Pegelwerten wurde in jedem Fall durch die angegebene Modellunsicherheit (± 5 dB) ausreichend abgedeckt. In den meisten Fällen hat das Modell den Pegelwert in 750 m Entfernung leicht überschätzt (nicht veröffentlichte Daten). Daher ist eine Anwendung im vorliegenden Fall aus praktischer Sicht möglich. Somit ist das Modell wahrscheinlich konservativ.

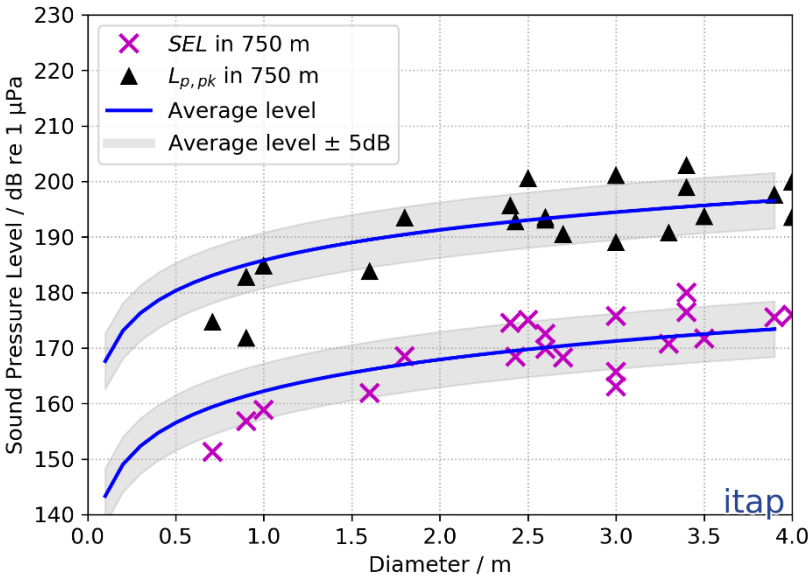

Abbildung 5: Gemessener Zero-to-peak Spitzenpegel ($L_{p,pk}$) und breitbandige 5% Überschreitungs-Einzelereignispegel (SEL_{05}) während ungedämpfter Rammarbeiten an einer Reihe von OWPs als Funktion des Pfahldurchmessers.

Außerdem werden in diesem Modell in einem zweiten Schritt Zuschläge bzw. Abzüge für sehr hohe und sehr niedrige maximale Rammenergien verwendet. Betrachtet man die tatsächlich angewandte maximale Rammenergie bzw. die im Modell geschätzte maximale Rammenergie, so ergaben sich in der Regel Unterschiede zwischen dem Modell und den realen Messwerten von etwa 2 dB. In der Mehrzahl der Fälle überschätzte das Modell mit den Eingangsdaten "Pfahldurchmesser" und "maximale Rammenergie" den Pegelwert in einer Entfernung von 750 m leicht.

Im Rahmen einer Masterarbeit bei der *itap GmbH* wurde festgestellt, dass der Einfluss der eingesetzten Rammenergie im Mittel etwa 2,5 dB pro Verdoppelung der Rammenergie beträgt (Gündert, 2014). Diese Erkenntnis resultierte aus Untersuchungen an verschiedenen Fundamenten, bei denen die Variationen der Rammenergie während des Rammvorgangs (Einbindetiefe) mit entsprechenden Pegeländerungen (jeweils vom Soft-Start bis zur maximalen Rammenergie) statistisch verglichen wurden.

Somit ist dieses Zusatzmodul zum bestehenden Modell der *itap GmbH* in der Lage, die bewertungsrelevanten Pegelwerte für jeden einzelnen Rammschlag bei gegebenen Rammenergieverläufen zu prognostizieren. Die Modellunsicherheit dieses statistischen Modells (*itap GmbH* Basismodell + Erweiterung) beträgt nachweislich ± 2 dB; eine leichte Überschätzung dieses Modells konnte ebenfalls nachgewiesen werden.

Gündert (2014) zeigt, dass die eingesetzten Rammenergien und die Einbindetiefe die resultierende Schallbelastung erheblich beeinflussen, wobei eine signifikante Korrelation zwischen

Einbindetiefe und eingesetzter Rammenergie besteht. Unter Berücksichtigung der Einflussfaktoren "Pfahldurchmesser", "maximale Rammenergie" und "Einbindetiefe" konnte eine Modellunsicherheit von ± 2 dB im Bereich der Messungenauigkeit erreicht werden. Der größte Teil der gemessenen Abweichungen konnte somit auf die drei oben genannten Einflussfaktoren zurückgeführt werden.

Da eine exakte Modellierung der aufzubringenden Rammenergie über die gesamte Einbindetiefe (pro Rammschlag) nicht ohne weitere "Unsicherheiten" möglich ist, werden Zuschläge und Abzüge für die maximale Rammenergie berücksichtigt.

Aufgrund der Erfahrungen der letzten Jahre und der Erkenntnisse aus der Masterarbeit kann davon ausgegangen werden, dass die Modellunsicherheit unter Berücksichtigung der oben genannten Zuschläge und Abzüge deutlich minimiert werden kann.

4.4 Bestimmung der Quelle und des Ausbreitungsgrades

Der Einzelereignispegel (SEL) variiert im Verlauf einer Rammung und hängt, wie bereits erwähnt, von mehreren Parametern ab (z. B. abstrahlende/reflektierende Pfahlmantelfläche, Rammenergie, Bodenbeschaffenheit, Wanddicke, usw.). Das angewandte Modell berücksichtigt in einem ersten Schritt lediglich den Pfahldurchmesser als Einflussparameter. Um ein statistisch valides Ergebnis der lautesten zu erwartenden Rammschläge zu erhalten, basiert das empirische Modell auf der 5%-Überschreitung des Einzelereignispegels (SEL_{05}) während einer Pfahlinstallation.

4.4.1 Rammenergie

Die bewertungsrelevanten Pegelwerte (SEL und $L_{p,pk}$) steigen mit zunehmender Rammenergie. Ausgehend von den Erfahrungen früherer Bauvorhaben wird ein Ausgangspunkt für die Bestimmung der Einflussgröße "Rammenergie" angenommen. Davon ausgehend werden im Modell Zu- bzw. Abschläge von 2,5 dB pro Verdoppelung/Halbierung für höhere bzw. niedrigere maximale Rammenergien angesetzt.

Die verwendeten Rammenergien wurden in Zusammenarbeit mit dem Auftraggeber festgelegt und basieren auch auf den bisher durchgeführten Bodenuntersuchungen. Um die Endtiefe zu erreichen, wird die maximale Rammenergie des Pfahlhammers (wenn überhaupt notwendig) erfahrungsgemäß nur kurzzeitig zum Ende einer Rammung eingesetzt.

Eine Erhöhung der Rammenergie ist erforderlich, wenn eine bestimmte Anzahl von Rammschlägen zum Erreichen der Einbindetiefe von z. B. 0,25 m überschritten wird (Gefahr der Materialermüdung durch zu hohe Rammschlagzahlen (blow rates)).

Die Erfahrungen aus der Praxis zeigen, dass meist geringere Rammenergien aufgebracht werden als im "worst case" prognostiziert.

4.4.2 Hydraulikhammer

Der Einfluss verschiedener Hydraulikhammertypen wird derzeit nicht berücksichtigt, da zu viele Einflussparameter und -faktoren existieren, z. B. Ankerdesign, Kontaktfläche zwischen Hammer und Pfahl, Pile-Gripper (Pfahlgreifer) oder Pile-Guiding-Frame (Pfahlführungsrahmen). Theoretische Untersuchungen zeigen, dass der Einfluss verschiedener Hammertypen in einem Bereich von 0 dB bis max. 3 dB liegen könnte. Darüber hinaus gibt es derzeit keine validen empirischen Daten zu verschiedenen Hammertypen und verschiedenen Hämmern desselben Typs. Daher konzentriert sich das *itap*-Modell auf das Worst-Case-Szenario (lautestes mögliches Szenario). Sollten innerhalb der Projektlaufzeit neue und statistisch valide Ergebnisse für den Einflussfaktor Hammertyp vorliegen, werden diese Erkenntnisse berücksichtigt.

Aufgrund von Erfahrungen wird erwartet, dass ein großer Hammer mit reduzierter Kapazität bei gleicher Rammenergie etwas weniger Schall ins Wasser abstrahlt als ein kleiner Hammer mit voller Kapazität (Bellmann, et al. 2020).

4.4.3 Bodenkopplungen

Der Einfluss unterschiedlicher Bodenverhältnisse ist derzeit noch Gegenstand der Forschung. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass mit zunehmendem Bodenwiderstand (SRD-Wert) einer Bodenschicht auch die eingesetzte Rammenergie steigt. Da das Baufeld im Wesentlichen aus Sand und einem Sand-Ton-Gemisch besteht und die Messdaten, die in Kapitel 4.3, Abbildung 5 weitgehend auf sandigem und mitteldichtem, tonhaltigem Untergrund ermittelt wurden, kann davon ausgegangen werden, dass die zu erwartenden Schallemissionen mit der in Abbildung 5 dargestellten Regressionsgeraden übereinstimmen. Aus diesem Grund ist im Modell ein frequenzunabhängiger Sicherheitszuschlag für die Bodenverhältnisse (Bodenkopplung) nicht erforderlich.

4.4.4 Spektrum des Rammschalls

Die in Kapitel 4.3 dargestellten Schätzungen des breitbandigen Einzelereignispegels (SEL) und des zero-to-peak Spitzenpegels ($L_{p,pk}$) basieren auf den Breitband-Messdaten aus unter-

schiedlichen Studien (Abbildung 5). Die Schallausbreitung im Meer ist jedoch sehr frequenzabhängig; siehe Kapitel 4.1. Deshalb müssen für die Berechnung Schätzungen der Frequenzzusammensetzung der jeweiligen Quellpegel[2] vorgenommen werden.

Abbildung 6 zeigt die spektrale Verteilung der Einzelereignispegel (SEL), die bei Rammarbeiten an verschiedenen Pfählen (graue Linien) ermittelt wurden. Die in unterschiedlichen Abständen sowie bei unterschiedlichen Rammenergien und Pfahldurchmessern ermittelten Spektren verlaufen ähnlich. Das Frequenzspektrum zeigt ein Maximum im Bereich von 60 Hz - 250 Hz. Bei Frequenzen oberhalb von ca. 250 Hz nimmt der Pegel allmählich ab, während bei Frequenzen unterhalb von ca. 60 Hz ein steiler Pegelabfall zu beobachten ist. Die Grenzfrequenz für den steilen Pegelabfall bei niedrigen Frequenzen hängt von der Wassertiefe ab. Je tiefer das Wasser ist, desto niedriger ist die Grenzfrequenz. Die Wassertiefe im Projektgebiet beträgt 25.8 m, die Grenzfrequenz wird bei 32 Hz sein.

Aus Messungen der letzten zwei Jahre hat sich gezeigt, dass sowohl der Typ des Hydraulikhammers, als auch der Pfahldurchmesser einen Einfluss auf das zu erwartende Rammschallspektrum haben können. Tendenziell verschiebt sich das lokale Maximum bei größeren Pfahlhammertypen und größeren Pfahldurchmessern zu niedrigeren Frequenzen. Diese Einflussfaktoren können derzeit jedoch nicht mit statistischer Gültigkeit abgeschätzt werden.

Im Einzelnen ist der spektrale Verlauf eines Rammschalleignisses nach heutigem Kenntnisstand nicht exakt vorhersehbar. Daher wird für die Modellierung ein idealisiertes Modellspektrum für den Einzelereignispegel aus den Messdaten vergleichbarer Bauprojekte extrahiert. Abbildung 6 zeigt die Form dieses idealisierten 1/3-Oktav-Spektrums in roter Farbe. Die frequenzabhängigen Amplituden sind so normiert, dass der Summenpegel dieses Spektrums in 750 m Entfernung den zuvor ermittelten Quellpegeln entspricht. Seit 2016 berechnet das Modell der *itap GmbH* die bewertungsrelevanten Pegelwerte auf den gemessenen Einzelereignispegel (5%-Perzentilpegel, SEL_{05}) und den gemessenen Zero-to-peak Spitzenpegel ($L_{p,pk}$).

[2] "Quellpegel" bezieht sich auf den Einzelereignispegel (SEL) oder Zero-to-peak-Spitzenpegel ($L_{p,pk}$) bei einer fiktiven Entfernung von 750 m zu einer imaginären Punktschallquelle.

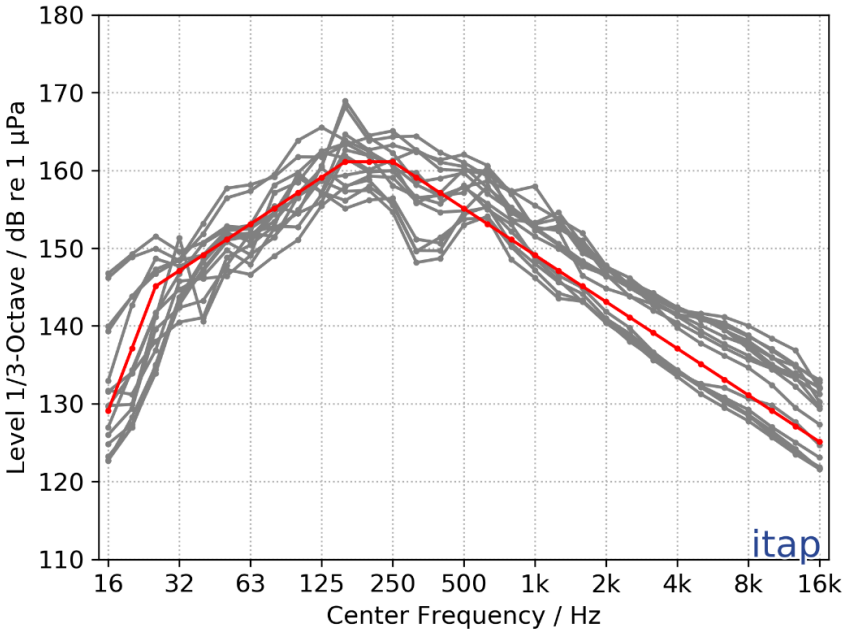

Abbildung 6: Das für den Rammschall geschätzte Modellspektrum (rot), basierend auf verschiedenen Messdaten (grau: Messdaten) für Skirt-Piles.

4.4.5 Akustische Verbindungen/Kopplungen zur Jacket-Struktur

Für den Bau von Jacket-Fundamenten sind zwei verschiedene Installationsverfahren möglich. Das Pre-Piling- und das Post-Piling-Verfahren. Beim Pre-Piling-Verfahren werden zunächst die Pfähle mit einer Rammschablone in den Boden eingebracht und anschließend das Jacket-Fundament auf die vorgesehene Stelle gesetzt. Beim Post-Piling-Verfahren hingegen wird zunächst das Jacket-Fundament an der vorgesehenen Stelle platziert und anschließend mit den Rammpfählen im Boden befestigt.

Aus akustischer/schalltechnischer Sicht besteht bei beiden Varianten die Gefahr, dass es zu Schallbrücken zwischen Pfahl und Gründungsstruktur bzw. Rammschablone kommen kann, wodurch die Schwingungen des Pfahls auf das Fundament bzw. die Schablone übertragen werden. Die Folge wäre ein erhöhter Schalleintrag in das Wasser durch Klappereffekte des Bauwerks.

Um mögliche akustische Verbindungen/Kopplungen zu berücksichtigen, muss dem Modell eine Sicherheitsmarge von 2,5 dB für die Rammschallemissionen der Pin-Piles hinzugefügt werden. Dieser Zusatz ist konservativ und soll die ungünstigsten Bedingungen darstellen und basiert auf Erfahrungen (Bellmann et al., 2020).

4.4.6 Wassertiefe

Auch die Wassertiefe beeinflusst die Schallausbreitung im Meer. Unterhalb einer bestimmten Grenzfrequenz ist eine kontinuierliche Schallausbreitung jedoch nicht möglich. Je flacher das Wasser ist, desto höher ist diese Frequenz. Abbildung 4 in Kapitel 4.1 zeigt die Grenzfrequenzen für eine ungestörte Schallausbreitung. Für die Modellierung werden alle Frequenzen unterhalb dieser Grenzfrequenz mit 12 dB/Oktave abnehmen. Ausschlaggebend ist die Mindestwassertiefe zwischen Quelle und Empfänger. Die verwendeten Bathymetriedaten wurden zur Verfügung gestellt von (EMODnet, 2020). Die Wassertiefe im Projektgebiet beträgt etwa 25.8 m. Daraus ergibt sich eine Grenzfrequenz von 32 Hz für 25.8 m.

4.4.7 Pfahllänge

Bei der Impuls-Rammung von Pfählen gibt es zwei Möglichkeiten: Bei Monopiles befindet sich der Rammhammer immer oberhalb der Meeresoberfläche und die Pfahllänge deckt immer die gesamte Wassersäule ab.

Bei Pin-Piles kann es vorkommen, dass der Hammer gegen Ende des Rammvorgangs eingetaucht wird (Lippert, et al. 2017). Infolgedessen nimmt die schallabstrahlende Pfahloberfläche mit fortschreitender Rammaktivität kontinuierlich ab (Nehls und Bellmann 2015). Im Gegensatz dazu steigt die Rammenergie während der gesamten Rammsequenz mit zunehmendem Bodenwiderstand (SRD-Wert) kontinuierlich an. Im Allgemeinen steigen die bewertungsrelevanten Pegelwerte mit zunehmender Rammenergie innerhalb der ersten 50% bis 65% der gesamten Rammung kontinuierlich an, wobei meist 75% bis 80% der maximalen Rammenergie erreicht werden. Am Ende der Rammung können die Pegelwerte trotz einer weiteren Erhöhung der Rammenergie aufgrund der verringerten Pfahloberfläche um mehrere dB abnehmen (Lippert, et al. 2017). Daher müssen die Rammenergie und die schallabstrahlende Pfahloberfläche theoretisch betrachtet werden, um eine Prognose der zu erwartenden bewertungsrelevanten Pegelwerte zu ermöglichen. Es liegen aber auch Messungen mit einem konstanten SEL vor, bei denen die schallabstrahlende Pfahloberfläche abnimmt und die Rammenergie beim Rammen zunimmt. Wird bei der Installation von Pin-Piles ein Follower verwendet, erhöht sich die herausstehende Länge erheblich, wodurch sich die Auswirkungen der Impulsrammung unter Wasser verringern.

Die Einbinde-Länge eines Pfahls in den Meeresboden ist jedoch stark mit der erforderlichen Rammenergie zur Überwindung des Bodenwiderstands korreliert. Daher ist die Einbinde-Länge kein linearer, unabhängiger Parameter in dem Modell.

Ein SEL Beispiel für eine typische Monopile- und Pin-Pile-Installation wird in Abbildung 7 gezeigt.

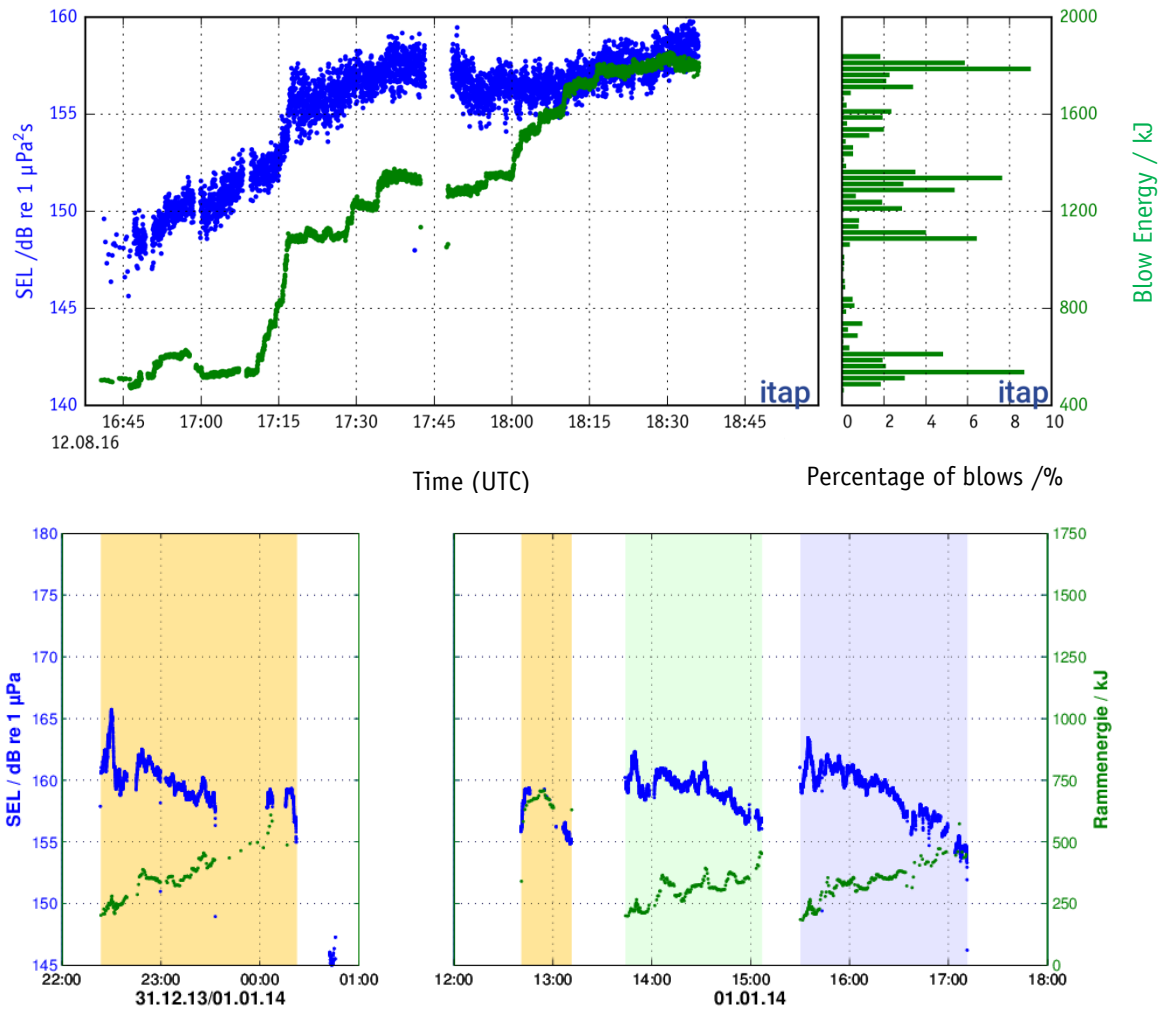

Abbildung 7 *Oben: Einzelereignispegel (SEL) als eine Funktion der Zeit (blaue Linie) und die verwendete Rammenergie (grüne Linie) für eine typische Monopile-Installation in der Nordsee. Unten: Ein mögliches Beispiel für eine Jacket-Installation mit drei Skirt-Piles (farbiger Hintergrund markiert die drei verschiedenen Pfähle).*

4.4.8 Ausbreitungsdämpfung (Transmission Loss)

Für die Modellierung wird Gleichung 14 berücksichtigt. Der Einfluss des Absorptionsparameters α nimmt mit der Entfernung zu, so dass er bei größeren Entfernungen an Bedeutung gewinnt. Bei der Modellierung der Ausbreitungsdämpfung (Transmission Loss) über eine solche Ausbreitungsfunktion wird eine ebene Welle im Wasser angenommen. Dies gilt nur für Entfernungen vom Pfahl, die größer sind als die Wassertiefe, wenn der direkt vom Pfahl abgestrahlte Schall mit den ersten Reflexionen von der Wasseroberfläche und dem Sediment überlagert wird. Unterhalb von 50 m vom Pfahl hat sich in der Wassersäule kein ebenes Wellenfeld gebildet, der Schallpegel liegt unter dem Pegel, der mit Gleichung 14 berechnet wird. In den Modellergebnissen ist der Schallpegel auf den ersten 50 m vom Pfahl konstant.

4.4.9 Modellanforderungen

Das validierte empirische Rammmodell erfüllt die nationalen Richtlinien der Aufsichtsbehörden in Deutschland (BSH 2013) und Dänemark (Danish Energy Agency 2016) für Rammschallprognosen einschließlich der erforderlichen Ergebnisse. Andere internationale Richtlinien oder Normen für Unterwasser-Rammschallprognosen gibt es derzeit nicht. Auch in anderen Ländern gibt es keine festen Vorgaben für die Prognosen; in der Regel werden die Anforderungen an die Prognosen für jedes Bauprojekt einzeln festgelegt. Dieses Modell wurde bereits in Ländern wie Deutschland, Dänemark, den Niederlanden, dem Vereinigten Königreich, Belgien, Frankreich, den USA, Australien und Taiwan angewendet.

Zusätzlich ist die *itap GmbH* akkreditiert für Unterwasserschallprognosen und –messungen in Übereinstimmung mit der ISO 17025 (2018).

4.5 Berechnungsverfahren

In den folgenden Unterkapiteln werden unterschiedliche Berechnungsverfahren/-schritte und Untermodell-Läufe im Detail beschrieben.

4.5.1 Schritt 1: Bestimmung des SEL und $L_{p,pk}$ in 750 m Entfernung zur Quelle

Das *itap*-Modell prognostiziert den Einzelereignispegel (SEL) und den Zero-to-peak Spitzenpegel ($L_{p,pk}$) basierend auf der empirischen Datenbank in einer spezifizierten Entfernung von 750 m zur Quelle nach den Anforderungen der Deutschen Messanleitung (BSH 2011) und der internationalen Norm (ISO 18406 2017). Die Modellergebnisse hängen von den folgenden Parametern ab:

(i) dem Pfahldurchmesser,
(ii) der maximalen Rammenergie (Worst-Case-Szenario),
(iii) der Wassertiefe und
(iv) den Sicherheitsmargen für z. B. Kopplungseffekte, akustische Verbindungen zwischen Pfahl und Jacket-Struktur.

4.5.2 Schritt 2: Frequenzabhängigkeit des Quellpegels und Ausbreitungsdämpfung

Die Schätzungen für den Breitband-Einzelereignispegel (SEL) und den zero-to-peak Spitzenpegel ($L_{p,pk}$) basieren auf empirischen Breitbanddaten aus verschiedenen Bauphasen der OWPs (Bellmann, et al. 2020). Die Schallausbreitung im Meer ist jedoch frequenzabhängig, wie in Kapitel 4.1 erörtert.

Die spektralen Ansätze für den Rammschall in 750 m werden aus empirischen Daten ermittelt (siehe Kapitel 4.4.4) und es wird ein Ansatz für die Ausbreitungsdämpfung (Transmission Loss (TL)) mitberücksichtigt. Die Auswahl der Spektralform auf der Grundlage empirischer Daten sowie der Gesamtpegel werden an den prognostizierten Breitband-Einzelereignispegel (SEL) angepasst.

4.6 Modellunsicherheiten

Sowohl die Modellierung der "Quellstärke" bzw. des "Quellpegels" des Rammgeräuschs, als auch die Rammanalyse zur Bestimmung der maximalen Rammenergien sowie die Modellierung der Schallausbreitung unter Wasser durch Ansätze der Ausbreitungsdämpfung (z. B. die Ausbreitungsdämpfung nach der Danish Energy Agency (2016) oder Thiele & Schellstede; Kapitel 4.1) sind mit einer gewissen Unsicherheit behaftet und damit auch die abgeleiteten berechneten/prognostizierten Pegelwerte sowie deren Wirkungsbereich.

Messungen aus abgeschlossenen Bauprojekten (Bellmann, et al. 2020) mit großen Monopiles zeigen, dass der gemessene SEL am Ende einer Rammsequenz constant bleibt oder um bis zu 25% abnimmt, trotz einer Erhöhung der Rammenergie, d. h. er erhöht sich nicht. Ein möglicher Erklärungsansatz hierfür ist die hohe Einbindetiefe der Skirt-Piles und die daraus resultierende erhöhte Steifigkeit des zu rammenden Pfahls.

Gelegentlich stiegen die Einzelereignispegel jedoch stetig an, bis die maximale Einbindetiefe erreicht war (bei gleichzeitiger Erhöhung der Rammenergie). Deshalb wird für alle Berechnungen immer die maximale Rammenergie verwendet.

Bestimmt man den Quellpegel nur mit dem Eingabeparameter "Pfahldurchmesser", so ergibt sich eine Unsicherheit von +/- 5 dB (Abbildung 5). Um die Unsicherheit zu verringern, werden Annahmen für den zweiten relevanten effektiven Parameter "Rammenergie" getroffen und Zuschläge und Abzüge auf der Grundlage eines Ausgangswerts berücksichtigt. Für Pfahldurchmesser unter 1 m ist in unserem empirischen Modell nur eine begrenzte Anzahl von Datensätzen verfügbar. Für solch kleine Pfahldurchmesser könnte die Unsicherheit bis zu zwei Dezibel höher sein.

Durch die Berücksichtigung des Einflussparameters "Rammenergie" wird die Unsicherheit deutlich reduziert. Der Vergleich der Modellprognosen mit realen Messdaten von 2012 bis heute zeigt eine Unsicherheit von ± 2 dB (unveröffentlichte Daten aus verschiedenen Projekten) für den Einzelereignispegel in 750 m Entfernung zum Rammereignis mit der Tendenz, dass die *itap*-Modellergebnisse mit den Eingangsdaten "Pfahldurchmesser" und "Rammenergie" zu konservativen Messwerten SEL und $L_{p,pk}$ in 750 m Entfernung führen.

5. Modellierungsszenarios

5.1 Vorhandene Bedingungen

Die Wassertiefe im Projektgebiet beträgt ca. 25.8 m. Für die Prognose werden Skirt-Piles mit 2.743 m Durchmesser und Rammenergien von 604 kJ, 845 kJ und 1,090 kJ sowie Conductor-Piles mit 0,8 m Durchmesser und 90 kJ Rammenergie berücksichtigt. Unterschiede im Bodenwiderstand (SRD-Wert) der Bodenschicht führen ebenfalls zu unterschiedlichen Rammenergien. Weitere signifikante Auswirkungen des Sediments sind für die bestehende Sedimentschicht nicht zu erwarten.

Für das Projektgebiet kann von einer guten Durchmischung des Wassers ohne ausgeprägtes Schallgeschwindigkeitsprofil ausgegangen werden. Dies führt zu einer konstanten Schallgeschwindigkeit über die gesamte Wassertiefe. Für das Modell wird eine mittlere Schallgeschwindigkeit von 1.480 m/s angenommen. Die Schallgeschwindigkeit im Wasser hängt vom Salzgehalt und der Temperatur ab und hat einen geringen Einfluss auf die durch die Wassertiefe bedingte Grenzfrequenz (Jensen, et al. 2011).

Das Modell berücksichtigt keinen Hintergrundpegel. Insbesondere bei der Betrachtung eines Szenarios, das ein System zur Schallminderung beinhaltet, können einige Ergebnisse unterhalb des Hintergrundschallpegels liegen.

5.2 Schalltechnisch relevante Eingangsdaten

Für das Modell werden die folgenden Eingangsdaten berücksichtigt:

Eingangsdaten für die Fundamente	
- Fundamenttyp:	Skirt-Pile, Conductor-Pile
- Pfahldurchmesser:	2.743 m, 0,8 m
- Wassertiefe:	ca. 25.8 m (MSL) bei *N05-A*
- Wasserbeschaffenheit:	Gute Durchmischung des Wassers ohne ausgeprägtes Schallgeschwindigkeitsprofil.
- Rammenergie:	604 kJ, 845 kJ, 1.090 kJ für die Jacket-Skirt-Piles, 90 kJ für die Conductor-Piles

Modellannahmen zur Berechnung des Quellpegels	
- Eingangsparameter #1:	Pfahldurchmesser
- Eingangsparameter #2:	Rammenergie: Ausgangswert (modellinterne Parameter) 1,000 kJ für Skirt-Piles / 120 kJ für Conductor-Piles; 2,5 dB Zuschlag oder Abzug pro Verdoppelung oder Halbierung der Rammenergie.
- Bodenbeschaffenheit:	Keine Zuschläge.
- Pfahloberfläche:	Keine Abzüge.
- Einbindetiefe:	Keine Zuschläge oder Abzüge (siehe mögliche Auswirkungen in Kapitel 4.4.3).
- Akustische Kopplung:	2,5 dB
- Ausbreitungsdämpfung:	Gemäß Gleichung 14.
- Wassertiefe:	Grenzfrequenz 32 Hz (25.8 m)
- Modellversion:	1.03

6. Modellierungsergebnisse

Unter Berücksichtigung der Modellansätze in Kapitel 5 werden die folgenden bewertungsrelevanten Einzelereignispegel (SEL) und Zero-to-peak Spitzenpegel ($L_{p,pk}$) für verschiedene maximale Rammenergien in 750 m Entfernung zur Baustelle erwartet:

Für das Modell werden der Einzelereignispegel (SEL) und der Zero-to-peak Spitzenpegel ($L_{p,pk}$) separat mit einem empirischen Modell (Modell-Version: 1.03) berechnet. Der in Tabelle 3 angegebene Einzelereignispegel (SEL) bezieht sich auf die angegebene Rammenergie. Dieser Wert stellt die Schallenergie für jeden einzelnen Rammschlag unter Verwendung dieser Rammenergie dar. Für eine Rammung sind jedoch in der Regel mehrere tausend Rammschläge mit unterschiedlichen Rammenergien erforderlich. Darüber hinaus beziehen sich die Lärmschutzwerte nicht auf einen einzelnen Rammschlag, sondern auf die Pegelverteilung während einer kompletten Rammung. Das bedeutet, dass die angegebenen SEL-Werte identisch sind mit dem für eine Sequenz einzuhaltenden Maximalwert ($SEL_{\mathrm{max}} = SEL1$), wenn die angegebene Rammenergie mit der maximalen Rammenergie identisch ist. Bei prozentualen Überschreitungen sind die angegebenen SEL-Werte ebenfalls gleich, wenn der prozentuale Anteil der Rammschläge mit maximaler Energie größer ist als der Überschreitungsanteil. Bezieht sich der Schallschutzwert auf eine feste Durchschnittszeit, z. B. 30 s, so ist der mittlere Einzelereignispegel für 30 s (SEL_{30s}) identisch mit den berechneten Werten, sofern die Rammenergie über 30 s konstant ist.

Tabelle 3: Berechneter, ungeminderten Einzelereignispegel (SEL_1) und ungeminderten zero-to-peak Spitzenpegel ($L_{p,pk}$) in 750 m Entfernung zu den -Installationen mit unterschiedlichen Rammenergien.

Pfahltyp	Durchmesser [m]	Rammenergie [kJ]	SEL_1 in 750 m Entfernung	$L_{p,pk}$ in 750 m Entfernung
Skirt-Pile	2,743	604	171	194
Skirt-Pile	2,743	845	172	196
Skirt-Pile	2,743	1.090	173	197
Conductor-Pile	0,800 m	90	159	183

Abbildung 8 zeigt den Einzelereignispegel (SEL) während der Skirt-Pile-Installation unter Verwendung von 1,090 kJ Rammenergie als eine Funktion der Entfernung. In der nachstehenden Lärmkarte (Abbildung 9) ist der ungedämpfte Einzelereignispegel (SEL) mit der vorgewählten Rammenergie von 1,090 kJ dargestellt. Die Bereiche für unterschiedliche Einzelereignispegel (SEL) sind in verschiedenen Farben dargestellt.

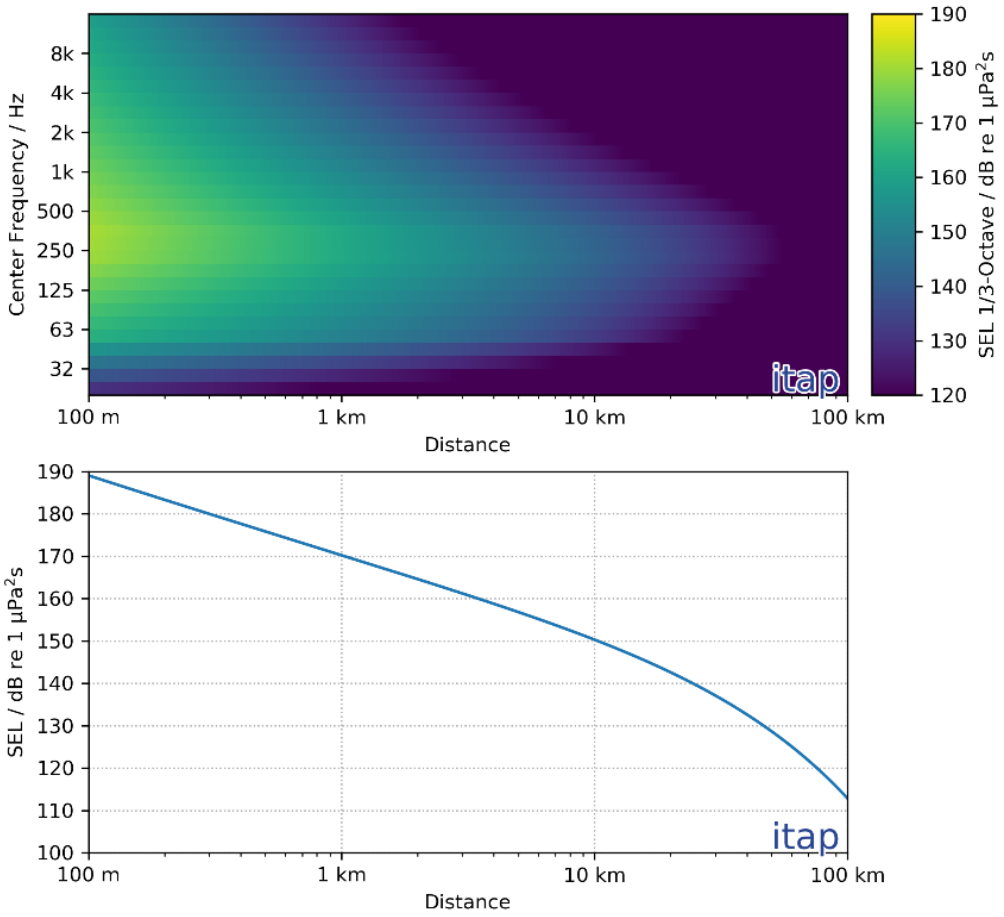

Abbildung 8: Prognostizierter SEL (ungewichtet) durch das Rammen von Skirt-Piles mit einem Durchmesser von 2.743 m bei einer maximalen Rammenergie von 1.090 kJ als Funktion der Entfernung. Das Spektrogramm oben zeigt die SEL aufgeteilt in 1/3-Oktav-Komponenten. Auf der y-Achse ist die Frequenz und auf der x-Achse der Abstand angegeben. Der Wert des ungewichteten Spektrums in jedem 1/3-Oktav-Band ist durch verschiedene Farben gekennzeichnet: gelb für hohe Pegel und blau für niedrige Pegel. Das Diagramm unten zeigt die Breitbandwerte SEL.

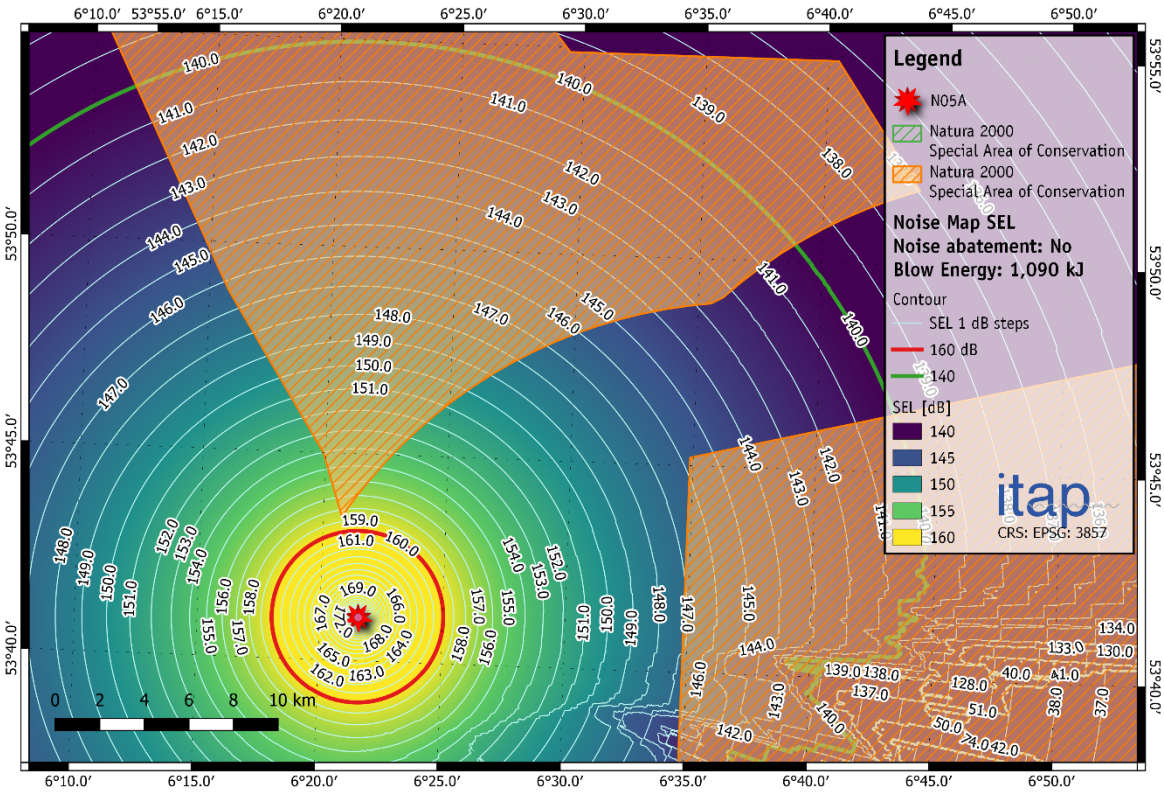

Abbildung 9: Schallkarte für den ungewichteten SEL bei der Installation eines 2.743 m Skirt-Pile bei N05-A mit einer vorausgewählten Rammenergie von 1,090 kJ ohne Schallschutzmaßnahmen.

7. Bewertung von ungeminderten Rammarbeiten zur Einhaltung der deutschen und niederländischen Lärmschutzwerte

Die Einhaltung der niederländischen und deutschen Lärmschutzwerte (wie in Kapitel 4.2) ist für die *N05-A* Plattform-Installation erforderlich. Das bedeutet, dass auf der niederländischen Seite der maximale Einzelereignispegel (SEL_1) die in der folgenden Tabelle 4 aufgeführten Schallschutzwerte nicht überschreiten darf. Ohne Anwendung von Schallschutzmaßnahmen wird der zu erwartende Einzelereignispegel (SEL) diese Werte während der Skirt-Pile-Installation je nach Jahreszeit die maximale Rammenergie um 4 dB bis 11 dB überschreiten, welche für die berechneten Szenarien (Tabelle 4) je nach Jahreszeit berücksichtigt wurde. Daher ist ein Schallschutzkonzept erforderlich.

Tabelle 4: Schallschutzwerte ($SEL_1 = SEL_{max}$) bei 750 m der Impulsschallquelle und erwartete Überschreitung durch die Verwendung einer maximalen Rammenergie von 1.090 kJ.

Tertial	Dauer	Schallschutzwert [dB re µPa²s]	Erwartete Überschreitung für 1.090 kJ Rammenergie
T1	Januar bis Mai	162	11
T2	Juni bis August	167	6
T3	September bis Dezember	169	4

Im Jahr 2022 wird der OWP *KASKASI II* in der Zeit von Januar bis April mittels Vibro-Piling-Verfahren errichtet. Dieser OWP muss jedoch den deutschen Lärmschutzwerten entsprechen und ist mehr als 100 km von den relevanten Natura 2000-Schutzgebieten entfernt. Im Sommer 2022 soll die Konverterplattform *DolWin 6* im Rammverfahren errichtet werden. Auch bei diesem Projekt müssen die deutschen Vorschriften eingehalten werden. Diese Rammarbeiten werden in einer Entfernung von > 30 km zum Naturschutzgebiet (SAC) "Borkum Riffgrund" und > 50 km zur Gasplattform *NO5* stattfinden. Daher kann ein Lebensraumverlust von mehr als 10% der deutschen AWZ der Nordsee und des SAC "Borkum Riffgrund" ausgeschlossen werden. Außerdem werden diese beiden Offshore-Projekte bei der Ermittlung des Lebensraumverlustes während des empfindlichen Zeitraums von Mai bis August nicht berücksichtigt.

Auf der Grundlage der Unterwasserschallberechnungen werden die Rammarbeiten bei *NO5* die allgemeine Anforderung erfüllen, nicht mehr als 10 % der deutschen AWZ der Nordsee zu belasten. In der für Meeressäuger sensiblen Jahreszeit von Mai bis August gelten strengere Anforderungen, so dürfen nicht mehr als 10 % der Fläche des Natura 2000-Schutzgebietes „Borkum Riffgrund“ belastet werden. Während der Skirt-Pile-Installation wird jedoch eine Fläche von mehr als 10 % der Gesamtfläche des Natura 2000-Schutzgebietes „Borkum Riffgrund“ mit Einzelereignispegeln $\geq$ 140 dB belastet. Daher sind für den empfindlichen Zeitraum von

Mai bis August auch Schallschutzmaßnahmen erforderlich, um die deutschen Vorschriften einzuhalten.

Tabelle 5: Exponierte Fläche und Lebensraumverlust des Natura 2000-Gebiets "Borkum Riffgrund" auf Basis des Schallschutzwertes des BMU (2013).

Fundamenttyp	**Schwellenwert für SEL[dB]**	**Kriterien**	**Expositionsbereich in Borkum Riffgund [km²]**	**Lebensraumverlust in Borkum Riffgund [%]**
Skirt-Pile	140	erhebliche Beinträchtigung	330,442	52,9
Conductor-Pile	140	erhebliche Beinträchtigung	5,026	0,8

Tabelle 6: Exponierte Fläche und Lebensraumverlust des Natura 2000-Gebiets "Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer" (NNW) auf Basis des Schallschutzwertes des BMU (2013).

Fundamenttyp	**Schwellenwert für SEL[dB]**	**Kriterien**	**Expositionsbereich im NNW [km²]**	**Lebensraumverlust im NNW [%]**
Skirt-Pile	140	erhebliche Beinträchtigung	138,507	5,0
Conductor-Pile	140	erhebliche Beinträchtigung	0	0

8. Schallschutz

Rammarbeiten führen zu impulsiven Schallemissionen mit hohen Pegeln (sogenannter Rammschall), die Meereslebewesen schädigen können (Lucke, et al. 2009). Für die ökologisch nachhaltige Nutzung erneuerbarer Energiequellen auf See ist es daher notwendig, diesen Schalleintrag ins Wasser zu reduzieren. Daher werden die jahreszeitlich unterschiedlichen Lärmschutzwerte für den Einzelereignispegel (SEL) von *Rijkswaterstaat* festgelegt (festgelegt in "*Vergunning Wet Natuurbescherming*" und "*Ontheffing Wet Natuurbescherming*"), die in einem Abstand von 750 m zur Rammbaustelle eingehalten werden müssen. Der maximale Einzelereignispegel ($SEL1$) ist relevant für die Einhaltung der jahreszeitlich unterschiedlichen Schallschutzwerte von 162 dB_{SEL} bis 169 dB_{SEL} (siehe Kapitel4.2.1, Tabelle 1), d. h. der SEL_1 muss je nach Monat, in dem die Bauarbeiten durchgeführt werden, und der maximalen Rammenergie unter diesen Werten liegen.

Je nach Monat der Bauarbeiten und der maximal eingesetzten Rammenergie müssen daher für dieses Projekt Schallschutzmaßnahmen geplant werden, die in der Lage sind, den Rammschall auf die Einhaltung des Schallschutzwertes zu reduzieren.

Im Allgemeinen kann Schallminderung erreicht werden durch die Anwendung von

- Schallminderungssystemen (Noise Mitigation Systems (NMS)), d. h., den Schallquellenpegel selbst zu reduzieren,
- Schallschutzsystemen (Noise Abatement Systems (NAS)), d. h. den Rammschall im Wasser zu reduzieren.

Im Auftrag des Bundesamtes für Naturschutz (BfN) wurde 2011 (Koschinski und Lüdemann 2011) erstmals ein allgemeiner Überblick über Schallminderungssysteme, technische Schallschutzsysteme und mögliche alternative schallarme Gründungsstrukturen und -verfahren veröffentlicht. In den folgenden Jahren wurde diese Studie zweimal aktualisiert (Koschinski und Lüdemann 2013) und (Koschinski und Lüdemann 2019). In Verfuss et al. (2019) wird auch ein allgemeiner Überblick über die technischen NAS im Auftrag des Schottischen Naturerbes gegeben. In dieser Studie werden die Wirksamkeit jedes einzelnen Schallschutzsystems und die erwarteten Kosten der Anwendung anhand von Fragebögen bewertet. In Bellmann et al. (2020) wird ein Überblick über die mit Schallminderungssystemen und Schallschutzsystemen in deutschen Gewässern insgesamt erzielten Schallminderungen gegeben.

8.1 Schallminderungssystem (Noise Mitigation System (NMS))

Eine robuste und zuverlässige Möglichkeit zur Reduzierung des Quellpegels bei Rammarbeiten ist die Verringerung der eingesetzten Rammenergie. Empirisch sinken die akustischen Parameter um ca. 2,5 dB, wenn die Rammenergie halbiert wird (Gündert, van der Par und Bellmann 2014), indem "schalloptimierte" Rammverfahren mit hohen Rammschlagzahlen (blow rates) und Schlaganzahlen pro 25 cm Einbindetiefe (blow counts) sowie niedriger Energie angewendet werden. Typischerweise wird für eine solche "schalloptimierte" Rammung ein großer Hammer der neuesten Generation mit 50% bis 60% seiner Leistung eingesetzt (Bellmann, et al. 2020).

Die Anwendung eines "schalloptimierten" Rammverfahrens hängt wesentlich vom Bodenwiderstand ab, der meist stark von der Einbindetiefe abhängt; je höher die Einbindetiefe, desto höher muss in der Regel die Rammenergie sein. Darüber hinaus muss die Anwendung des "schalloptimierten" Rammverfahrens vor dem Bau sorgfältig hinsichtlich der Pfahlmüdigkeit, des Bodenwiderstandes und der Rammdauer geprüft werden, d. h. dieses Schallminderungssystem ist nicht bei allen Rammvorhaben anwendbar.

Das Schallminderungspotenzial "schalloptimierter" Rammverfahren wird derzeit auf mehrere Dezibel geschätzt und wird meist in Verbindung mit einer Echtzeit-(Online-)Unterwasserschallüberwachung in 750 m Tiefe eingesetzt.

Derzeit werden jedoch neue Impulshammertechniken wie die *Menck* Noise Reduction Unit (MNRU), *IHC*-PULSE oder der Blue-Piling-Hammer entwickelt. Diese neuen Hammertechniken versuchen, die Spitzenamplitude der Kraftübertragung zwischen Hammer und Pfahl zu verringern und die Dauer jedes einzelnen Rammschlags zu verlängern. Derzeit befinden sich diese neuen Schallminderungssysteme in der Konstruktion oder Entwicklung und es wurden noch keine Anwendungen unter Offshore-Bedingungen durchgeführt, so dass derzeit keine zuverlässigen Prognosen über das Gesamtschallreduzierungspotenzial gemacht werden können. Der Hersteller weist jedoch darauf hin, dass die erreichbare Gesamtschallreduzierung mehrere Dezibel betragen könnte.

8.2 Schallschutzsystem (Noise Abatement Systems (NAS))

Derzeit sind Schallminderungen für den SEL von bis zu 15 dB durch die Verwendung eines einzelnen NAS möglich (Bellmann et al., 2020) und durch die Anwendung einer Kombination von zwei NAS konnten Schallminderungen von 20 dB bei Wassertiefen von bis zu 40 m und mäßigen Strömungen ($\leq$ 0,75 m/s) erreicht werden. Die Gesamtreduktion jedes NAS hängt

wesentlich von technisch-konstruktiven Faktoren wie dem Fundamenttyp und standortspezifischen Faktoren wie z. B. der Wassertiefe ab. Daher müssen alle NAS projektspezifisch angepasst werden.

Die erzielte Gesamtschallreduzierung eines einzelnen NAS oder von Kombinationen aus zwei NAS weist Abweichungen von mehreren Dezibel auf, insbesondere bei der Anwendung von NAS-Kombinationen, selbst wenn technische Probleme oder Fehlfunktionen der verwendeten NAS ausgeschlossen werden können (Bellmann, et al. 2020). Die Erfahrungen haben jedoch gezeigt, dass nicht projektspezifisch optimierte NAS oder technische Probleme die Gesamtschallreduzierung erheblich beeinträchtigen (Bellmann, et al. 2020). Außerdem ist die Gesamtschallreduzierung stark frequenzabhängig. Die resultierende (einstellige) Schallminderung hängt also von der spektralen Zusammensetzung des ungedämpften Rammschalls ab (ungedämpftes Rammschallspektrum). Eine Erhöhung der Gesamtprognoseunsicherheit von mehreren Dezibel für die gedämpfte Rammung ist wahrscheinlich auf die Unsicherheiten bei der Prognose des ungedämpften Spektrums sowie auf die erreichbare Schallminderung durch die angewandten NAS zurückzuführen.

8.2.1 Einfache oder doppelte Große Blasenschleier (BBC und DBBC)

Der einfache (BBC) und doppelte Große Blasenschleier (DBBC) ist eines der praktikabelsten und am häufigsten verwendeten NAS (> 600 Anwendungen). Außerdem ist das BBC-System die einzige pfahlferne Schallminderungsmaßnahme. Zwei geförderte F&E-Projekte wurden durchgeführt, um die Haupteinflussfaktoren eines Großen Blasenschleiers auf die Gesamtschallminderung zu verstehen (Nehls und Bellmann 2015); (Bellmann, et al. 2020).

Die Erfahrungen zeigen, dass die Gesamtschallreduzierung durch den Einsatz eines BBC-Systems für den Einzelereignispegel (SEL) erheblich von der Systemkonfiguration, der Strömung und der Wassertiefe abhängt. Mit zunehmender Wassertiefe nimmt die Leistung eines BBC leicht ab. Erfahrungen haben gezeigt, dass durch den Einsatz eines optimierten doppelten Großen Blasenschleiers (DBBC) in der Ostsee mit sehr geringer Strömung Schallreduktionen von bis zu 18 dB (maximal gemessene Schallreduktion) in 40 m Wassertiefe möglich sind (Bellmann et al., 2020). Die gemittelte Schallreduktion eines optimierten DBBC bei mäßiger Strömung ($\leq$ 0,75 m/s) lag meist zwischen 15 dB und 16 dB. Bei höheren Strömungen ist die Wahrscheinlichkeit von Drifteffekten des Blasenschleiers extrem hoch, was bedeutet, dass die Gesamtreduktion richtungsabhängig wird. In flacheren Gewässern kann die Gesamtschallreduzierung leicht zunehmen.

Ausschlaggebend für eine erfolgreiche Anwendung sind:

(i) eine ausreichende Menge Druckluft und

(ii) eine vollständige Umhüllung des Pfahls durch den Großen Blasenschleier.

Die benötigte Luftmenge hängt aufgrund des statischen Drucks des umgebenden Wassers von der Wassertiefe ab. In der Nordsee (wo die meisten BBC-Einsätze stattfanden) ist ein appliziertes Luftvolumen von ≥ 0.5 m^3/(min*m) derzeit Stand der Technik für Wassertiefen bis zu 40 m (Bellmann et al., 2020). Um eine vollständige Umhüllung des Pfahls zu ermöglichen, ist ein ausreichender Abstand der Blasenschleier-Düsenschläuche zum Pfahl erforderlich. Dieser Abstand ist abhängig von der örtlichen Strömung und der Wassertiefe (Drifteffekte). Das bedeutet, dass bei der Konfiguration des BBC-Systems die Wassertiefe und die Strömung, aber auch die Art des Installationsschiffs (DP, verankertes schwimmendes Schiff oder Hubkahn) bei der Auslegung der Gesamtlänge der verwendeten Düsenschläuche und der Form des Layouts berücksichtigt werden müssen.

Normalerweise ist eine Strömung von bis zu 2 Knoten kein Problem für die Anwendung eines optimierten BBC-Systems im Hinblick auf Drifteffekte.

Die Verwendung eines einzelnen BBC anstelle eines doppelten BBC führt jedoch zu einer Verringerung der Gesamtschallminderung um 2 bis 4 dB. Nachfolgend sind die Mindestanforderungen an das BBC-System aus bereits abgeschlossenen Rammprojekten aufgeführt (Bellmann, et al. 2020).

Systemkonfigurationen für einen optimierten einfachen/doppelten Großen Blasenschleier:	
Lochgröße (Durchmesser) und Lochabstand:	1 - 2 mm alle ca. 20 - 30 cm
Verwendete Luftmenge:	$\geq$ 0,5 m^3/(min*m)
Abstand der Düsenschläuche:	$\geq$ eine Wassertiefe zwischen 1. und 2. BBC
Typischer Düsenschlauch-Durchmesser:	Aktuell 100 mm (begrenzt die Gesamtlänge eines einfachen BBC auf 1.000 m aufgrund der dynamischen Grenzen der Luftströmung)
Gesamtlänge der Düsenschläuche:	$\leq$ doppelt: 1.800 m (einfach: < 1.000 m)
die Gesamtlebensdauer eines jeden Düsenschlauchs ist begrenzt:	derzeit beste Praxis < 80 - 100 Verwendungen
Druck der Druckluft im Inneren der Düsenschläuche:	2 – 3 bar höher als der statische Druck des Wassers außerhalb; → in Wassertiefen bis zu

	30 m muss der Betriebsdruck der Kompressoren mindestens 8,5 bis 10 bar betragen[3]
regelmäßige Wartung der verwendeten Düsenschläuche	
keine turbulenz-verursachenden Hindernisse in den Düsenschläuchen	

Die erzielte Schallminderung ist unabhängig von der Gründungsart (Monopile oder Jacket-Konstruktion). Die genaue Anpassung eines (D)BBC an die örtlichen Gegebenheiten ist nicht Bestandteil einer Unterwasserschallprognose. Aufgrund der hohen Varianzen, die durch unterschiedliche Systemkonfigurationen verursacht werden, ist es nicht möglich, genaue Prognosen über die zu erwartende Schallminderung zu treffen. Um eine maximale Schallminderung zu erreichen, wird eine kontinuierliche Unterwasserschallüberwachung empfohlen, damit Fehler sofort korrigiert und neue Anpassungen schnell vorgenommen werden können.

8.2.2 Grout Annulus Bubble Curtain (GABC)

Beim Bau von Jacket-Strukturen im Post-Piling-Verfahren werden die Pfähle durch sogenannte Pile-Sleeves (Pfahlführungen) gerammt.

Es gibt zwei mögliche Arten von Pile-Sleeves:

(i) Der Pile-Sleeve ist ein fester Bestandteil der Jacket-Konstruktion und erstreckt sich von der Unterkante, d. h. dem Meeresboden, bis zur Oberkante über der Wasseroberfläche der gesamten Jacket-Konstruktion, d. h. die Pfähle werden immer über der Wasseroberfläche gerammt und der Pile-Sleeve überdeckt die gesamte Wassersäule.

(ii) Der Pile-Sleeve ist nur einige Meter hoch und wird an der Unterkante starr mit der Jacket-Konstruktion verbunden. Alternativ kann anstelle der Jacket-Konstruktion auch eine Rammschablone (pile installation frame (PIF)) verwendet werden. Im Zuge der Rammung werden die Pfähle (Pin-Piles) somit unter die Wasseroberfläche gerammt und enden nur wenige Meter über dem Meeresboden bzw. dem Pile-Sleeve.

Bei den beiden beschriebenen Verfahren kann Druckluft in den Spalt zwischen Pfahl und Pile-Sleeve eingeleitet werden. Die Einbringung der Druckluft erfolgt in der Regel über die fest

[3] Üblicherweise kann der Druck der Druckluft an Bord des BBC-Versorgungsschiffes am Verteiler gemessen werden. Erfahrungsgemäß nimmt der Druck in den Düsenschläuchen mit zunehmender Entfernung zum Verteiler aufgrund physikalischer Parameter wie Wassertemperatur, etc. sowie aufgrund der Tatsache, dass die Luft den Düsenschlauch auf dem Meeresboden belässt, leicht ab. Basierend auf Messungen im Inneren der Düsenschläuche ist ein Druck von 9,3 bar am Verteiler für eine Wassertiefe von bis zu 40 m ausreichend, um einen Überdruck im Inneren des Düsenschlauches von 2 - 3 bar zu gewährleisten.

installierten Pipelines/Rohrleitungen zur Zementierung der Pfähle (grouting lines/Injektionsleitungen), die sich meist an der Unterseite des Pile-Sleeves befinden. Die Luftblasen steigen im Spalt zwischen Pfahl und Pile-Sleeve nach oben auf. Der Spalt füllt sich also mit einem Luft-Wasser-Gemisch.

Erfahrungen haben gezeigt, dass die schallmindernde Wirkung von Skirt-Piles aufgrund von Drifteffekten im Bereich von wenigen Dezibel liegt (Bellmann, et al. 2020). Eine genaue Bewertung eines GABC für die Skirt-Pile-Installation nach DIN SPEC 45653 (2017) ist nicht möglich, da dieser GABC immer in Kombination mit einem einfachen oder doppelten BBC eingesetzt wurde; nur für einige Minuten der Rammung wurde der GABC ausgeschaltet und die gemessenen Pegel bei 750 m erhöhten sich leicht. Mit Pile-Sleeves vom Meeresboden bis zur Wasseroberfläche (sogenannte Main-Piles, bei denen kein Unterwasserhämmern angewendet wird), kann eine Schallminderung von bis zu 7 dB erreicht werden (Bellmann, et al. 2020). Der Haupteinflussfaktor für die erreichbare Gesamtschallreduzierung sind die Sleeve-Höhe und die Strömung. Denn die aufsteigenden Blasen werden durch die Strömung oberhalb des Pile-Sleeves abgetrieben. Bei Pile-Sleeves mit einer herausragenden Länge von mehreren Metern über dem Meeresboden ist die Gesamtschallreduzierung eines GABC durch Drifteffekte oberhalb des Pile-Sleeves begrenzt und es sind nur einige Dezibel Schallreduzierung erzielbar.

8.2.3 Kombination von pfahlnahen und pfahlfernen Schallschutzsystemen

An dieser Stelle sei angemerkt, dass sich die Schallminderungen jedes einzelnen (separat) eingesetzten Schallschutzsystems nicht in der (einstelligen) Summe aufaddieren, sondern spektral aufsummiert werden, d. h. zwei Schallschutzsysteme mit je 13 dB Schallminderung bei Einzelanwendung ergeben bei gleichzeitiger Anwendung nicht eine Gesamtschallminderung von 26 dB, sondern eine deutlich geringere Gesamtschallminderung.

Für das aktuelle Projekt ist eine Kombination aus Grout-Annulus Bubble Curtain und einem einfachen Großen Blasenschleier eine mögliche Option. Erfahrungen bei der Anwendung von BBC und GABC für Skirt-Piles haben gezeigt, dass die insgesamt erreichbare Schallminderung um 2 bis 3 dB höher sein kann als bei der Anwendung eines einfachen BBC. Das bedeutet, dass die Kombination aus BBC und GABC mehr oder weniger die gleiche Gesamtschallreduzierung erzielt wie ein DBBC.

8.3 Schaleinträge ins Wasser unter Verwendung vorausgewählter Schallminderungskonzepte

Tabelle 7 zeigt die prognostizierten Werte für den Einzelereignispegel (SEL) und den zero-to-peak Spitzenpegel ($L_{p,pk}$) unter Verwendung von Schallminderungsmaßnahmen zur Verringerung des Rammschalls während der Skirt-Pile-Installation im Wasser. Für die Installation der Conductor-Piles sind keine Schallschutzmaßnahmen erforderlich. Es wird entweder ein doppelter Großer Blasenschleier (DBBC) oder ein Grout Annulus Bubble Curtain in Kombination mit einem einfachen Großen Blasenschleier, wie in Kapitel 8.2.1 und 8.2.2 beschrieben, angenommen, was zu einer Gesamtschallminderung von -16 dB für den DBBC und -15 dB für die Kombination aus einfachem Großen Blasenschleier und Grout Annulus Bubble Curtain (BBC+GABC) für den SEL führt. Die Verringerung des zero-to-peak Spitzenpegels ist um ca. 5 dB bis 6 dB höher.

Tabelle 7: Berechneter reduzierter Einzelereignispegel (SEL) und zero-to-peak Spitzenpegel ($L_{p,pk}$) in 750 m Entfernung zur Skirt-Pile (Durchmesser von 2.743 m) -Installation mit einem BBC+GABC oder einem DBBC mit unterschiedlichen Rammenergien.

Rammenergie [kJ]	NAS	SEL_1 in 750 m Entfernung	$L_{p,pk}$ in 750 m Entfernung
604	BBC+GABC	156	174
845	BBC+GABC	157	176
1.090	BBC+GABC	158	177
604	DBBC	156	174
845	DBBC	157	175
1.090	DBBC	158	176

In Tabelle 8 und Tabelle 9 wird die exponierte Fläche der Natura 2000-Schutzgebiete in der Nähe der Rammarbeiten ermittelt. In Abbildung 10 ist der relevante Einzelereignispegel (SEL_5) als Funktion der Bathymetrie für eine maximale Rammenergie von 1.090 kJ und die Anwendung eines doppelten Großen Blasenschleiers (DBBC) oder einer Kombination aus einfachem BBC und GABC dargestellt.

Durch den Einsatz eines doppelten Großen Blasenschleiers (DBBC) oder einer Kombination aus einfachem Großen Blasenschleier und Grout Annulus Bubble Curtain (GABC) wird die Rammaktivität auf der Gasplattform *N05* die niederländische Verordnung zur Vermeidung von Verletzungen und die deutsche Verordnung über den erheblichen Verlust von Lebensraum in Natura 2000-Schutzgebieten in der für Meeressäuger sensiblen Zeit von Mai bis August erfüllen.

Tabelle 8: Exponierte Fläche und Lebensraumverlust des Natura 2000-Schutzgebiets "Borkum Riffgrund" für Störungskriterien unter Verwendung eines doppelten Großen Blasenschleiers (DBBC) und einer Rammenergie von 1.090 kJ.

Schwellenwert für SEL[dB]	Kriterien	Expositionsbereich in Borkum Riffgund [km²]	Lebensraumverlust in Borkum Riffgund [%]
140	Lebensraumverlust zwischen Mai und August	3,434	0,55

Tabelle 9: Expositionsfläche und Lebensraumverlust des Natura 2000-Schutzgebietes "Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer" (NNW) für Verletzungs- und Störungskriterien unter Verwendung eines doppelten Großen Blasenschleiers (DBBC) und einer Rammenergie von 1.090 kJ.

Schwellenwert für SEL[dB]	Kriterien	Expositionsbereich im NNW [km²]	Lebensraumverlust im NNW [%]
140	Lebensraumverlust zwischen Mai und August	0	0

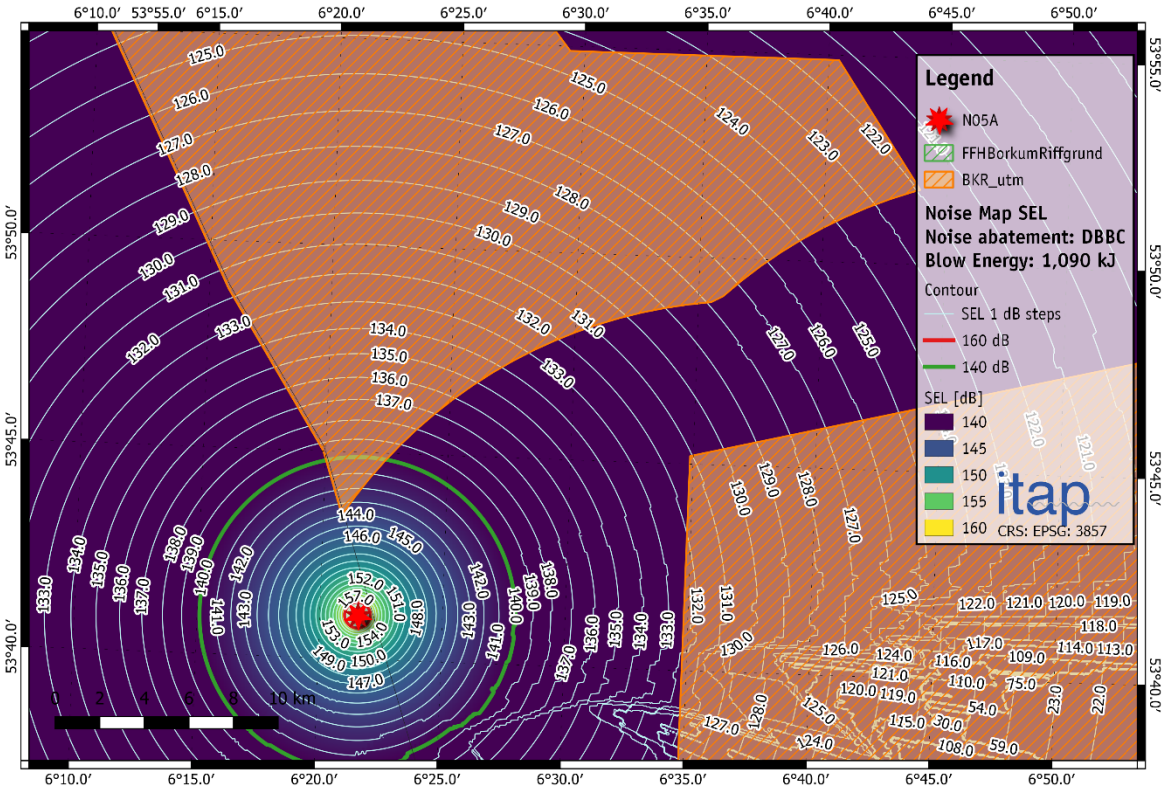

Abbildung 10: Schallkarte für den ungewichteten SEL bei der Installation eines 2.743 m Skirt-Pile bei N05-A mit einer vorausgewählten Rammenergie von 1,090 kJ unter Verwendung eines doppelten Großen Blasenschleiers (DBBC).

Für die Rammarbeiten werden für Offshore-Versorgungsstationen in den Niederlanden saisonale Schallschutzwerte für den Einzelereignispegel in 750 m Entfernung zu den Rammarbeiten festgelegt. Im ersten Tertial von Januar bis einschließlich Mai (T1) darf der SEL_1 (entspricht dem maximalen SEL) 162 dB nicht überschreiten, von Juni bis einschließlich August (T2) darf der SEL_1 167 dB und von September bis einschließlich Dezember (T3) darf der $SEL1$ 169 dB nicht überschreiten.

Abhängig von der Bauzeit und der maximal eingesetzten Rammenergie ist die Anwendung von Schallschutzmaßnahmen erforderlich, um die von der zuständigen Behörde *Rijkswaterstaat* festgelegten Schallschutzwerte einzuhalten.

Es wird erwartet, dass die niederländischen Schallschutzwerte für beide betrachteten Schallschutzmaßnahmen eingehalten werden.

9. Referenzen

Bellmann, Michael A., Jana Brinkmann, Adrian May, Torben Wendt, Stephan Gerlach, und Patrick Remmers. „Underwater noise during the impulse pile-driving procedure: Influencing factors on pile-driving noiseand technical possibilities to comply with noise mitigation values. Supported by the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation andNuclear Safety (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU)), FKZ UM16 881500. Commissioned and managed by the Federal Maritime and Hydrographic Agency (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)), Order No. 10036866. Edited by the itap GmbH.“ Tech. rep., itap GmbH, 2020.

BMU. „Konzept für den Schutz der Schweinswale vor Schallbelastungen bei der Errichtung von Offshore-Windparks in der deutschen Nordsee (Schallschutzkonzept).“ Tech. rep., Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2013.

BSH. „Measuring instruction for underwater sound monitoring – Current approach with annotations - Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie.“ 2011.

BSH. „Offshore Wind Farms – Prediction of Underwater Sound – Minimum Requirements on Documentation - Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie.“ *This report (Report No. M100004/29) was created as part of the research project "Accompanying ecological research at the alpha ventus offshore test site for the evaluation of BSH Standard for Environmental Impact Assessment (StUKplus)" on behalf of the German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (project number 0327689A) and as part of the research project "Study on assessment approaches for monitoring underwater noise associated with offshore approval procedures, spatial planning, and the Marine Strategy Framework Directive" created on behalf of the BSH (order number 10020764)*, 2013.

Danish Energy Agency. „Guideline for underwater noise – Installation of Impact-driven piles.“ *Energistyrelsen, Center for Energiressourcer*, 2016.

DIN 17025. *DIN EN ISO/IEC 17025:2018-03, Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien (ISO/IEC_17025:2017); Deutsche und Englische Fassung EN_ISO/IEC_17025:2017*. Standard, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, 2018.

DIN 45653. *DIN SPEC 45653:2017-04, Hochseewindparks - In-situ-Ermittlung der Einfügungsdämpfung schallreduzierender Maßnahmen im Unterwasserbereich; Text Deutsch und Englisch*. Standard, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, 2017.

Gündert, S., S. van der Par, und M. Bellmann. „Empirische Modellierung zur Prädiktion von Hydroschallimmissionen bei Impulsrammung von Fundamenten für Offshore-Windenergieanlagen." *DAGA*, 2014: 449-545.

ISO 18406. „ISO 18406:2017, Underwater acoustics – Measurement of radiated underwater sound from percussive pile driving." Standard, International Organization for Standardization, Geneva, CH, 2017.

Jensen, Finn B., William A. Kuperman, Michael B. Porter, und Henrik Schmidt. *Computational ocean acoustics*. Springer Science & Business Media, 2011.

Koschinski, S., und K. Lüdemann. „Noise mitigation for the construction of increasingly large offshore wind turbines – Technical options for complying with noise limits, report on behalf of BfN." *Bonn, Germany*, 2019: 1–42.

Koschinski, S., und K. Lüdemann. „Stand der Entwicklungen schallminimierender Maßnahmen beim Bau von Offshore-Windenergieanlagen, report on behalf of BfN." *Bonn, Germany*, 2011: 1–83.

Koschinski, Sven, und K. Lüdemann. „Development of noise mitigation measures in offshore wind farm construction." *Commissioned by the Federal Agency for Nature Conservation*, 2013: 1–102.

Lippert, S., M. Huisman, M. Ruhnau, und K. von Estorff. „Prognosis of underwater pile driving noise for submerged skirt piles of jacket structures." *th Underwater Acoustics Conference and Exhibition (UACE 2017), Skiathos, Greece*, 2017.

Lucke, K., U. Siebert, P. A. Lepper, und M. A. Blanchet. „Temporary shift in masked hearing thresholds in a harbor porpoise (Phocoena phocoena) after exposure to seismic airgun stimuli." *J. Acoust. Soc. Am.* 425 (2009): 4060-4070.

Nehls, G., und M. A. Bellmann. „Weiterentwicklung und Erprobung des „Großen Blasenschleiers" zur Minderung der Hydroschallemissionen bei Offshore-Rammarbeiten. Gefördert durch PTJ und BMWi, FKZ 0325645A/B/C/D." Tech. rep., 2015.

Thiele, R., und G. Schellstede. „Standardwerte zur Ausbreitungsdämpfung in der Nordsee." *FWG-Bericht 1980-7, Forschungsanstalt der Bundeswehr für Wasserschall und Geophysik*, 1980.

Urick, R. J. *Principles of underwater sound*. 3. McGraw-Hill, Inc., 1983.

Verfuss, Ursula K., Rachael R. Sinclair, und Carol Sparling. „A review of noise abatement systems for offshore wind farm construction noise, and the potential for their application in Scottish waters (Report No. 1070)." Tech. rep., Scottish Natural Heritage, 2019.

3930_Prognose_N05A_ONEDyas_v4_b1_deutsch

Final Audit Report 2022-05-02

Created:	2022-05-02
By:	Patrick Remmers (p.remmers@itap.de)
Status:	Signed
Transaction ID:	CBJCHBCAABAAMLfW05FiYzDTBTbGA7VZ4L6c3kdwhlbq

"3930_Prognose_N05A_ONEDyas_v4_b1_deutsch" History

Document created by Patrick Remmers (p.remmers@itap.de)
2022-05-02 - 2:14:09 PM GMT

Document emailed to Michael Bellmann (bellmann@itap.de) for signature
2022-05-02 - 2:14:43 PM GMT

Email viewed by Michael Bellmann (bellmann@itap.de)
2022-05-02 - 2:23:18 PM GMT

Document e-signed by Michael Bellmann (bellmann@itap.de)
Signature Date: 2022-05-02 - 2:24:03 PM GMT - Time Source: server

Agreement completed.
2022-05-02 - 2:24:03 PM GMT