

Anlage 6

Stand: 14.07.2023

Feste Fehmarnbeltquerung
Planänderung zur Vergrößerung der
Arbeitsbereiche während der
Absenkarbeiten und zum partiellen
Überstand der Tunnelschutzschicht
über den Meeresboden

**Anhang 3 zum
Schallschutzkonzept
Unterwasserschall**

Feste Fehmarnbeltquerung

Planänderung zur Vergrößerung der Arbeitsbereiche während der Absenkarbeiten und zum partiellen Überstand der Tunnelschutzschicht über den Meeresboden

Anlage 6 Anhang 3 zum Schallschutzkonzept Unterwasserschall

Aufgestellt:



DEGES

im Auftrag der Autobahn
GmbH des Bundes



Kopenhagen, 14.07.2023
Femern A/S

Berlin, 14.07.2023
DEGES Deutsche Einheit
Fernstraßenplanungs- und -bau GmbH

gez. Claus Dynesen

gez. Kirsten von Grumbkow

Die alleinige Verantwortung für diese Veröffentlichung liegt beim Autor.
Die Europäische Union haftet nicht für die Verwendung der darin enthaltenen Informationen.



Von der Europäischen Union kofinanziert
Transeuropäisches Verkehrsnetz (TEN-V)

Seite 2

Erstellt durch

TGP Konsortium

Verantwortlicher Projektleiter: Peter Hermanns

Datum: 14.07.2023

gez. Peter Hermanns

**Trüper Gondesen Partner
Landschaftsarchitekten BDLA (TGP)
An der Untertrave 17 23552 Lübeck
Deutschland**

sowie

FEMO-Konsortium

Verantwortliche Projektleiterin: Sanne Lina Niemann

Datum: 14.07.2023

gez. Sanne Lina Niemann

**DHI A/S
Agern Allé 5
2970 Hørsholm
Dänemark**

mit

WSP Danmark A/S
Linnés Allé 2
2630 Taastrup
Dänemark

BioConsult SH GmbH & Co.
KG
Schobüller Straße 36
25813 Husum
Deutschland

MariLim Gesellschaft für
Gewässeruntersuchung
mbH
Heinrich-Wöhlk-Straße 14
24232 Schönkirchen
Deutschland

Inhaltsverzeichnis

1.	ANLASS UND AUFGABENSTELLUNG	7
2.	HINTERGRUND	8
3.	DAS UVS-MODELL.....	9
4.	DAS QUONOPS-MODELL.....	12
5.	VERGLEICH BEIDER MODELLE	14
6.	ANWENDUNG DES QUONOPS-MODELLS WÄHREND DER MARINEN BAUARBEITEN	16

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 3-1 Beispiel für die Prognose der baubedingten Schallimmission (> 144 dB) mit dem UVS-Model. Dargestellt sind (1) ein Arbeitsbereich mit Greifbaggern (grün) und (2) ein Arbeitsbereich des Laderaumsaugbaggers (TSHD, rot). Schraffierte Pufferzonen markieren den Bereich, in dem die Schallbelastung bis zum äußeren Rand auf 144 dB abnimmt. Die Karte ist unterlegt mit der Schweinswal-Dichteverteilung im Sommer 2010 (Anlage 22.5 der Planfeststellungsunterlagen, Anhang 2, Kap. 1.2.5, Abb. 1-3, S. 17)..... 12
- Abbildung 4-1 Beispiel der Prognose der baubedingten Schallimmissionen. Die Projektschiffe werden dabei als Punktquelle, unabhängig von der Lage der Arbeitsbereiche (nicht eingezeichnet) modelliert. Die rote Linie zeigt die modellierte 144 dB-Isophone. Anmerkung: nicht alle Klassen der dB Skala sind auf dem gewählten Ausschnitt/Zeitpunkt sichtbar. 14

Tabellenverzeichnis

- Tabelle 5-1 Modellierte Ausdehnung der 140 dB re. $1\mu\text{Pa}$ und 144 dB re. $1\mu\text{Pa}$ Isophonen um einen Laderaumsaugbagger, ermittelt mit dem statischen Modell aus der UVS und dem Quonops-Modell..... 15

Abkürzungsverzeichnis

µPa	Mikro Pascal
Abb.	Abbildung
AIS	Automatisches Identifikationssystem (aus dem Englischen: <i>automatic identification system</i>)
Bd.	Band
BIAS	Baltic Sea Information on the Acoustic Soundscape
bzw.	beziehungsweise
dB	Dezibel
d.h.	das heißt
ff.	fortfolgend
FFH	Fauna Flora Habitat (Richtlinie der EU)
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
Kap.	Kapitel
m	Meter
RANDI	Aus dem Englischen: <i>research ambient noise directionality model</i>
re.	Aus dem Englischen: <i>in reference to</i>
s.	siehe
S.	Seite
TSHD	Laderaumsaugbagger (aus dem Englischen: <i>trailing suction hopper dredger</i>)
u.a.	unter anderem
UBB	Umweltbaubegleitung
UVS	Umweltverträglichkeitsstudie
z.B.	zum Beispiel

1. Anlass und Aufgabenstellung

Der Planfeststellungsbeschluss vom 31.01.2019 setzt durch Nebenbestimmung (Ziff. 2.2.4 Nr. 17) fest, dass im Rahmen einer Umweltbaubegleitung (UBB) die zulassungskonforme Umsetzung des Vorhabens vorbereitet, überwacht und dokumentiert und eine Baudurchführung entsprechend der einschlägigen gesetzlichen Regelungen und Vorschriften des Umwelt- und Naturschutzes im Hinblick auf alle Schutzgüter sichergestellt wird. In Bezug auf den Schweinswal bedeutet dies, dass während der Bauarbeiten die Funktion des Fehmarnbelts als allgemeines Vorkommensgebiet, Aufzuchtgebiet und Wanderungskorridor aufrecht zu erhalten ist. Für die Beschreibung und Bewertung der Auswirkungen der projektbedingten Unterwasserschallimmissionen auf Schweinswale in den Planfeststellungsunterlagen wurden bestimmte Quellpegel der Bauschiffe angesetzt und Schallausbreitung im Fehmarnbelt berechnet.

Gemäß Planfeststellungsbeschluss ist die Einhaltung folgender zwei Lärmindikatoren zum Schutz des Schweinswales zu gewährleisten:

1. Indikator 1: Es dürfen zu keiner Zeit mehr als 20 % des Querschnitts des Fehmarnbelts mit mehr als 144 dB durch stationäre Projektarbeiten beschallt werden (Anlage 12 der Planfeststellungsunterlagen, Anhang IA, Maßnahmenblatt 8.4 M/V_{Ar}; sowie Planfeststellungsbeschluss, Kap. 3.4.2).
2. Indikator 2: Zwischen Anfang Juni und Ende September darf nicht mehr als 1 % des FFH-Gebiets „Fehmarnbelt“ (280 km²) mit mehr als 140 dB durch das Vorhaben beschallt werden (Ziffer 2.2.4 Nr. 19 des Planfeststellungsbeschlusses).

Die Einhaltung dieser Grenzwerte haben die Vorhabenträger während des Bauvorgangs in Echtzeit zu messen und zu dokumentieren. Dabei werden die Schallimmissionen der Bauarbeiten unabhängig vom Hintergrundschall des übrigen Schiffsverkehrs im Fehmarnbelt betrachtet.

Die im Planfeststellungsbeschluss formulierten Nebenbestimmungen stellen hohe Ansprüche an die Überwachung der baubedingten Schallimmissionen. Die Einhaltung der Grenzwerte haben die Vorhabenträger während des Bauvorgangs in Echtzeit zu messen und zu dokumentieren, wobei die Einzelheiten der Ausgestaltung der Messungen und ihrer Auswertung, Darstellung und Übermittlung in einem gesonderten Konzept darzustellen sind (NB Ziff. 2.2.4 Nr. 19). In Abstimmung mit der Planfeststellungsbehörde sowie den zuständigen Naturschutzbehörden wurde die Umsetzung dieser Überwachung im Detailkonzept Unterwasserschall konkretisiert: zur Erfüllung der Vorgabe werden die baubedingten Schallimmissionen fortlaufend in 15 Minuten-Schritten modelliert und die Ergebnisse durch regelmäßige Messungen überprüft. Eine Modellierung ist notwendig, da eine Messung der räumlichen Ausdehnung ausschließlich der baubedingten Schallimmissionen aufgrund vielfältiger weiterer Schallquellen (z.B. durch den weiteren Schiffsverkehr im Fehmarnbelt) nicht möglich ist. Einzelne Bauschiffe lassen sich aus dem Gesamtschall bei der Messung nicht isolieren, entsprechend war auch im Rahmenkonzept (Anlage 22.5 der Planfeststellungsunterlagen) eine Auswertung über Modellierung vorgesehen. In den Planfeststellungsunterlagen wurde für die Prognose der baubedingten

Schallimmissionen ein statisches Modell verwendet, welches auf empirischen ermittelten Ausbreitungskonstanten beruht und einzelne, zuvor definierte Situationen der Unterwasserschallausbreitung abbildet. Dieses Modell zur Unterwasserschallausbreitung ist für die Prognose der baubedingten Schallimmissionen geeignet, es wurde allerdings nicht für die kontinuierliche Verarbeitung laufend aufgenommener AIS-Daten oder Umweltvariablen programmiert. Die Nebenbestimmung Ziffer 2.2.4 Nr. 19 des Planfeststellungsbeschlusses fordert ein baubegleitendes Monitoring in Echtzeit. Daher wird für das baubegleitende Monitoring („Umweltbaubegleitung“) ein dynamisches Überwachungsmodell angewendet, welches Ergebnisse in Echtzeit liefert, um bei einer möglichen Abweichung von den einzuhaltenden Umweltauflagen unmittelbar reagieren zu können und u.U. eine Anpassung der Bauschritte vorzunehmen.

In den folgenden Abschnitten wird die Problemstellung näher erläutert und das angepasste Verfahren für die Überwachung der baubedingten Schallimmissionen vorgestellt. Dieses ist geeignet, die Einhaltung der Nebenbestimmungen mit hoher Genauigkeit in Echtzeit zu überwachen und wird in Abstimmung mit der Planfeststellungsbehörde und den zuständigen Naturschutzbehörden bereits seit Beginn der UBB Marin angewendet. Beide Methoden werden gegenübergestellt und es wird gezeigt, dass sehr gut übereinstimmende Ergebnisse erzielt werden, das neue Verfahren aber als dynamisches Überwachungsmodell besser geeignet ist.

2. Hintergrund

Im Schallschutzkonzept zum Unterwasserlärm wurden die Anforderungen an die Überwachung der Schallimmissionen festgelegt (s. Anlage 22.5 der Planfeststellungsunterlagen): während der marinen Arbeiten des Tunnelbaus soll der von den Arbeitsschiffen ausgehende Unterwasserschall mit eigens ausgebrachten Hydrophonen in den Arbeitsbereichen gemessen werden, wobei die Messpositionen dem Baufortschritt anzupassen sind. Zusätzlich sollen Dauermessstationen an permanenten Positionen eingerichtet werden und Bauschiffe während unterschiedlicher Betriebszustände vermessen werden.

In den Planfeststellungsunterlagen wurde für die Auswertung der Messungen ein während der Basisaufnahme erstelltes, statisches Modell, das von der itap GmbH programmiert wurde, verwendet (nachfolgend als UVS-Modell bezeichnet), welches den Schall der Baustelle und des übrigen Schiffsverkehrs im Fehmarnbelt berücksichtigt. Dieses Modell zur Unterwasserschallausbreitung (ausführlich dargestellt in Anhang 2 des Schallschutzkonzeptes zum Unterwasserlärm, Anlage 22.5 der Planfeststellungsunterlagen) ist für die Prognose der baubedingten Schallimmissionen geeignet, es ist jedoch kein Instrument für ein baubegleitendes Monitoring in Echtzeit. Das UVS-Modell ist ein statisches Modell, um einzelne, zuvor definierte Situationen der Unterwasserschallbelastung im Fehmarnbelt darzustellen. Für die Modellierung des Hintergrundschalls durch den Schiffsverkehr nutzt es Daten des Automatischen Identifikationssystems (AIS) für die Positionsangabe der Schiffe entweder als Momentaufnahme oder als über einen definierten Zeitraum gemittelten Wert (s. Kap. 3).

Für das baubegleitende Monitoring ist allerdings ein dynamischer Modellierungsansatz erforderlich, welcher Ergebnisse in Echtzeit liefern kann, um bei einer möglichen Abweichung von den einzuhaltenden Umweltauflagen unmittelbar reagieren zu können.

Hinzu kommt, dass der Fehmarnbelt eine stark befahrene Wasserstraße ist und der hier auftretende Hintergrundschall durch den Fährverkehr und den Verkehr entlang der T-Route geprägt wird und sehr variabel ist. Die von den Bauarbeiten für den Absenktunnel ausgehenden Schallimmissionen werden durch diesen hohen und zeitlich bzw. räumlich sehr variablen Hintergrundschall überlagert. Aufgrund dieser Überlagerung kann bei *in situ* Schallmessungen nicht immer zwischen baubedingtem und anderem, nicht-baubedingtem Unterwasserschall unterschieden werden. Mit Messungen allein können Höhe und Ausdehnung der baubedingten Schallimmissionen daher nicht kontinuierlich und exakt beschrieben werden. Als Lösung wurde eine Kombination zwischen *in situ* Schallmessungen und der Modellierung der Schallausbreitung entwickelt, die auf den mittels AIS erfassten Positionen der Bauschiffe sowie bestimmten Umweltparametern basiert. Zudem werden die vermessenen Quellpegel der Bauschiffe im Modell integriert und können jederzeit bei Bedarf angepasst werden (z.B. bei Modifikationen eines zuvor vermessenen Schiffes oder Vermessungen eines neuen Schiffes).

Im Folgenden werden Aufbau und Funktionsweise des UVS-Modells der Auswirkungsprognose und des Quonops-Modells der Bauüberwachung dargelegt. Es wird erläutert, in welchen Punkten sich die beiden Modelle voneinander unterscheiden und es wird gezeigt, dass der dynamische Ansatz (d.h., das Quonops-Modell) für die Überwachung der Schallprognosen bzw. der tatsächlich realisierten Schallimmissionen geeignet ist.

3. Das UVS-Modell

Im Rahmen der Umweltverträglichkeitsstudie wurde der Unterwasserschall im Fehmarnbelt mit den folgenden beiden Ansätzen untersucht:

- 1) Der im Wesentlichen durch Schiffslärm verursachte Hintergrundschall wurde über einen Zeitraum von mehr als einem Jahr an verschiedenen Orten im und um den Fehmarnbelt gemessen. Auch der Ausbreitungsverlust, d.h. die Verminderung des gemessenen Schallpegels mit der Entfernung von der Schallquelle, wurde über mehrere Tage vor Ort vermessen. Mittels dieser Daten wurde ein empirisches Ausbreitungsmodell entwickelt, um die Schallbelastung auf einem Raster mit 750 m Kantenlänge zu modellieren. Die Modellierung basiert auf der im Fehmarnbelt gemessenen Ausbreitungsdämpfung und berücksichtigt ebenso die relevanten Einflussfaktoren wie Wassertiefe und Sedimenttyp. Auf diese Weise wurden Umweltparameter integriert, die die Schallausbreitung bestimmen. Eine Beschreibung der Schallmodellierung enthält Anlage 15 der Planfeststellungsunterlagen (Anhang B Methodik, S. 930 ff.) bzw. Anlage 22.5 (Anhang 2 zum Schallschutzkonzept zum Unterwasserlärm). Ergebnisse wurden u.a. in Schallkarten dargestellt (Anlage 15 der Planfeststellungsunterlagen, Bd. II B, Kap. 3.10.3.9, S. 628 ff.). Für die weitere Modellierung der Schallausbreitung wurden Ausbreitungskonstanten für zwei

Tiefenbereiche berechnet: Für flachere, küstennahe Bereiche wurde eine Schallausbreitungskonstante von 17,5 angesetzt, und für den tieferen Bereich (d.h. innerhalb der T-Route) wurde eine Ausbreitungskonstante von 16,14 angesetzt.

- 2) Die Ausbreitung der baubedingten Schallimmissionen durch Bauschiffe wurde für die einzelnen Arbeitsbereiche entlang des gesamten Tunnelgrabens berechnet. Diese Berechnung stützt sich auf die für die Schallmodellierung zuvor ermittelten Parameter der Schallausbreitung (s. Punkt 1) sowie Prognosen der zu erwartenden Quellschallpegel, basierend auf Literaturangaben (Schallschutzkonzept Anlage 22.5, Anhang 2 der Planfeststellungsunterlagen, Kap. 1.2.5, S. 16 ff.). Um die Werte auf die genauen Arbeitsbereiche beim Bau des Absenktunnels übertragen zu können, wurde berechnet, in welcher Distanz ein bestimmter Schallpegel erreicht wird. Dieser Vorgang wurde dann auf die einzelnen Arbeitsbereiche angewendet. Für jeden Arbeitsbereich wurde ein Summenpegel für alle eingesetzten Bauschiffe basierend auf den entsprechenden Angaben zu Typ und Anzahl gemäß Anlage 27.1 der Planfeststellungsunterlagen (Baulogistik) ermittelt. Bei der Berechnung der Ausdehnung der 144 dB-Isophone um die einzelnen Arbeitsbereiche wurde angenommen, dass sich die Bauschiffe mittig in den nominalen Arbeitsbereichen verteilen bzw. bei den verkleinerten Arbeitsbereichen in der T-Route/FFH-Gebiet am Rand. Für den freifahrenden Laderaumsaugbagger (TSHD) wurde ein fiktiver Arbeitsbereich von 250 x 250 m angesetzt, der mit der entsprechenden 144 dB-Isophone gepuffert wurde. Da die Ausdehnung der 144 dB-Isophone unterhalb des verfügbaren 750-m-Rasters liegt, wurden die Grenzen der Arbeitsbereiche in alle Richtungen gleichmäßig mit den berechneten Schallausdehnungen gepuffert. Die Ausdehnung der baubedingten Schallimmissionen wurde wiederum für definierte, statische Situationen berechnet. Die Berechnungen erfolgten dazu außerhalb des eigentlichen Schallmodells, um eine höhere Auflösung zu erreichen. Der Hintergrundschall blieb dabei unberücksichtigt, es wurde allein der baubedingte Schalleintrag ermittelt (s. Abbildung 3-1).

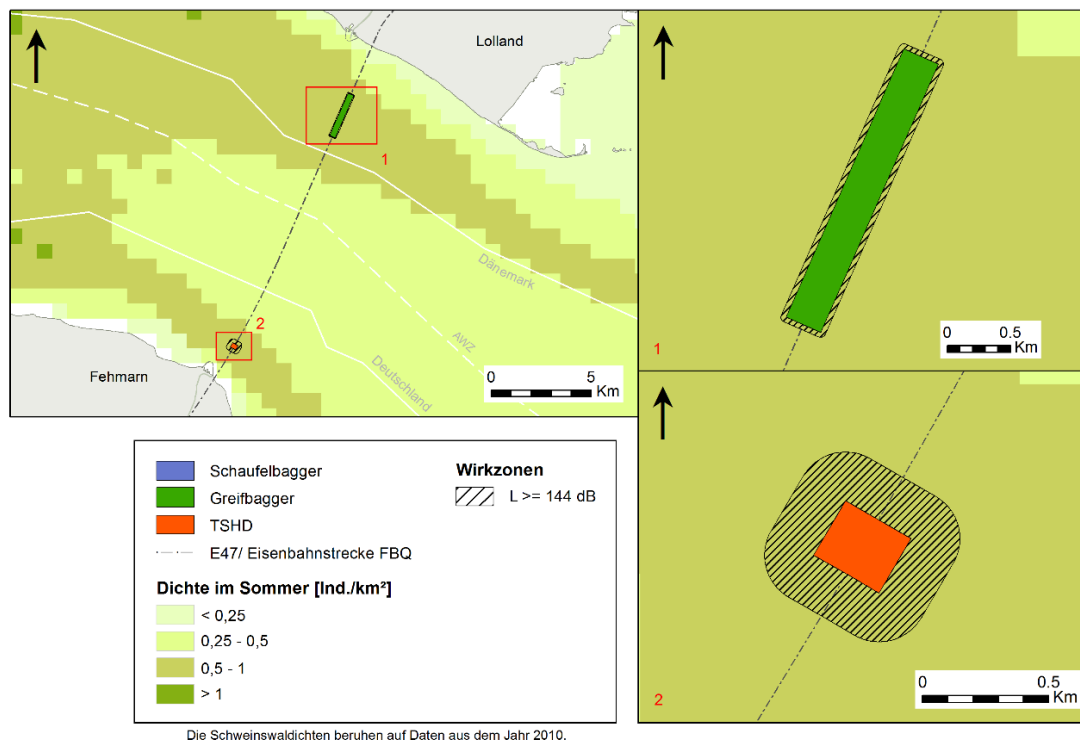


Abbildung 3-1 Beispiel für die Prognose der baubedingten Schallimmission (> 144 dB) mit dem UVS-Modell. Dargestellt sind (1) ein Arbeitsbereich mit Greifbaggern (grün) und (2) ein Arbeitsbereich des Laderaumsaugbaggers (TSHD, rot). Schraffierte Pufferzonen markieren den Bereich, in dem die Schallbelastung bis zum äußeren Rand auf 144 dB abnimmt. Die Karte ist unterlegt mit der Schweinswal-Dichteverteilung im Sommer 2010 (Anlage 22.5 der Planfeststellungsunterlagen, Anhang 2, Kap. 1.2.5, Abb. 1-3, S. 17).

4. Das Quonops-Modell

Für eine Echtzeitüberwachung, wie in Nebenbestimmung Ziffer 2.2.4 Nr. 19 gefordert, ist es notwendig, eine kontinuierliche Erfassung der Bauschiffe vorzunehmen und mit diesen Daten die baubedingten Schallbelastungen im Fehmarnbelt zu berechnen. Dies ist durch das sogenannte Quonops-Modell möglich. Es kann Baulärm und Hintergrundschall gemeinsam, aber auch separat darstellen. Das Quonops-Modell bildete schon im Rahmen des europäischen BIAS-Projektes¹ die Grundlage für die Modellierung der Unterwasserschallimmissionen in der gesamten Ostsee einschließlich des Fehmarnbelts und ist durch zahlreiche *in situ*-Messungen (insgesamt an mehr als 20.000 Messtagen) unter

¹ BIAS: **B**altic Sea **I**nformation on the **A**coustic **S**oundscape; Das BIAS-Projekt war ein EU-gefördertes Life-Projekt mit dem Ziel einheitliche Grundlagen und Instrumente für die grenzüberschreitende Bewertung der Auswirkungen von Unterwasserschall auf die marine Umwelt zu entwickeln und zu etablieren.

verschiedensten Umweltbedingungen validiert. Es ist eine patentierte Plattform (Brevet der Europäischen Union n° EP2488839, 2009).

Das Quonops-Modell unterscheidet sich von den für das Schallschutzkonzept (Anlage 22.5.2 der Planfeststellungsunterlagen) durchgeführten Modellierungen, indem es die Positionen der Bauschiffe und des anderen Schiffsverkehrs im Fehmarnbelt über deren AIS-Signale automatisch erfasst und diese als Punktquellen modelliert (s. Abbildung 4-1). Jedem Schiff wird dabei entweder durch direkte Vermessung vor Ort bzw. mittels Literaturdaten oder dem RANDI Modell ein Quellpegel zugeordnet. Das RANDI Modell benutzt dabei die Länge und Geschwindigkeit von Schiffen, die von den AIS-Daten geliefert werden, um deren Quellpegel zu jedem beliebigen Zeitpunkt zu berechnen. Es wird für Schiffe verwendet, die nicht vor Ort individuell vermessen wurden und für die kein Quellpegel eines vergleichbaren Schiffstyps vorliegt. Neben dem Quellpegel wird zudem der Einfluss von statischen (z.B. Bathymetrie) aber auch dynamischen (ozeanographische wie meteorologische; in Echtzeit) Umweltvariablen erfasst und ihr Einfluss auf die Schallausbreitung berücksichtigt. Es werden dieselben Umweltvariablen wie für die Schallprognosen mit dem UVS-Modell verwendet, allerdings wurden diese auf eine geringere Auflösung von 35 m interpoliert, d.h. innerhalb des 750-m-Gitters linear gemittelt (Anmerkung: bis zum 01.12.2021 hatten die Rasterzellen noch eine Kantenlänge von 21 m. Diese musste angepasst werden, da das Untersuchungsgebiet für die Modellierung vergrößert wurde). Das Quonops-Modell verwendet ein physikalisch basiertes Ausbreitungsmodell für Schalleinträge in die Wassersäule unter realistischen ozeanographischen Bedingungen durch Auflösung der Helmholtz-Gleichung. Anders als im UVS-Modell, welches auf empirischen ermittelten Ausbreitungskonstanten beruht, wird die Schallausbreitung im Quonops-Modell also über die geometrische Verteilung von Schall in der Wassersäule unter den lokalen vorherrschenden Umweltbedingungen berechnet.

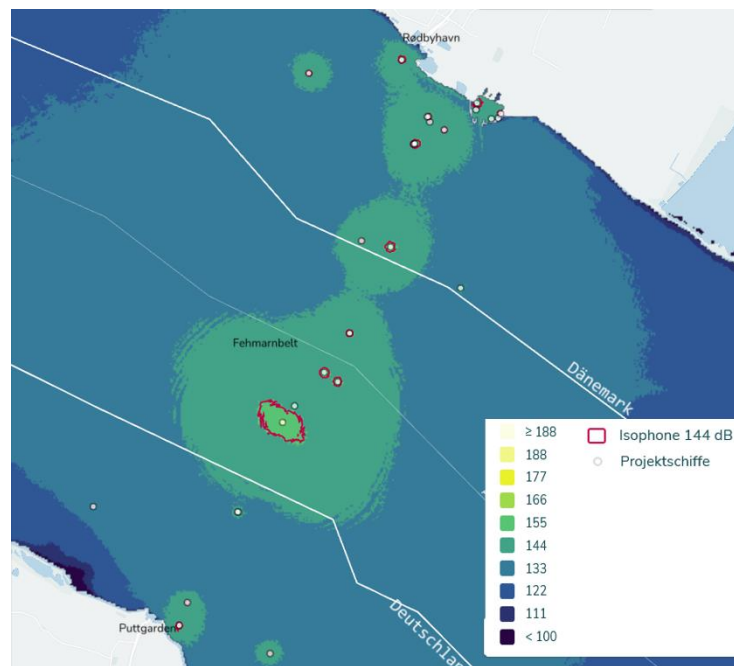


Abbildung 4-1 Beispiel der Prognose der baubedingten Schallimmissionen. Die Projektschiffe werden dabei als Punktquelle, unabhängig von der Lage der Arbeitsbereiche (nicht eingezeichnet) modelliert. Die rote Linie zeigt die modellierte 144 dB-Isophone. Anmerkung: nicht alle Klassen der dB Skala sind auf dem gewählten Ausschnitt/Zeitpunkt sichtbar.

Für die Überwachung des baubedingten Unterwasserschalls während der marinen Bauaktivitäten für die Feste Fehmarnbeltquerung berechnet das Quonops-Modell alle 15 Minuten anhand der erfassten Umweltdaten und des Schiffsverkehrs die Schallpegel im Untersuchungsgebiet auf einem Raster mit 35 m Kantenlänge. Auch die durch den modellierten Baulärm verursachten 140 bzw. 144 dB-Isophonen (Kurven gleichen Schalldruckpegels) werden mittels Quonops ermittelt und daraus wiederum die Einhaltung beider Indikatoren in Echtzeit bestimmt.

Damit ist das Quonops-Modell besser geeignet, um die baubedingten bzw. allgemeinen Dauerschallimmissionen fortlaufend realitätsnah und separat abzubilden. Zudem wird das Quonops-Modell regelmäßig mit Daten von baubegleitenden Unterwasserschallmessungen kalibriert. Auch die Größe bzw. Lage der Arbeitsbereiche spielt für das baubegleitende Schall-Monitoring keine Rolle mehr, da das Quonops-Modell jedes Schiff einzeln als Punktquelle modelliert. Die Auflagen des Planfeststellungsbeschlusses mit Bezug zu den Arbeitsbereichen bleiben hiervon unberührt und werden weiterhin beachtet.

5. Vergleich beider Modelle

Das UVS-Modell ist als ein statisches Modell programmiert worden, um einzelne, zuvor definierte Situationen der Unterwasserschallbelastung im Fehmarnbelt abzubilden. Es ist nicht

für die kontinuierliche Verarbeitung laufend aufgenommener AIS-Daten oder Umweltvariablen programmiert worden. Das UVS-Modell modelliert den Bauschall unabhängig vom bestehenden anthropogenen Hintergrundlärm und beruht auf empirischen ermittelten Ausbreitungskonstanten. Im Gegensatz dazu berücksichtigt das Quonops-Modell die dynamische Position von Schiffen sowie den Einfluss von statischen und dynamischen, lokalen Umweltvariablen auf die Schallausbreitung. Dies wird im Folgenden verglichen.

Beide Modelle nutzen dieselben Messwerte der die Schallausbreitung beeinflussenden Umweltparameter (u.a. Wassertiefe, Temperatur, Salzgehalt und Sedimentstruktur) und haben damit für den Fehmarnbelt übereinstimmende Datengrundlagen. Die Modelle unterscheiden sich jedoch im Wesentlichen in folgenden Punkten:

1. Während das UVS-Modell auf empirisch ermittelten Ausbreitungskonstanten (d.h. in Abhängigkeit von Temperatur, Salinität und Druck) beruht, erfolgt im Quonops-Modell eine komplexe Berechnung der Ausbreitungsverluste in höherer räumlicher Auflösung unter Berücksichtigung der lokalen Umweltparameter.
2. Während die Schallprognose mit dem UVS-Modell auf Summenpegeln für einzelne Baubereiche beruht, berücksichtigt das Quonops-Modell die genauen Positionen einzelner Bauschiffe und berechnet die Schallausbreitung unabhängig von den definierten Baubereichen.
3. Das UVS-Modell modelliert den Bauschall unabhängig vom bestehenden anthropogenen Hintergrundlärm. Im Quonops-Modell wird dieser via AIS mit berechnet, kann aber auch herausgerechnet werden, so dass Baulärm und Hintergrundschall separat dargestellt werden können.

Vor Beginn der marinen Arbeiten wurde der Grad der Übereinstimmung der Schallmodellierung durch das UVS-Modell bzw. Quonops-Modell evaluiert. Hierzu wurden zwei Teilgebiete im Fehmarnbelt mit unterschiedlichen Wassertiefen (flach *versus* tief) ausgewählt und die Arbeit eines Laderaumsaugbaggers wurde modelliert. Die Ergebnisse beider Modellierungen wurden für beide Gebiete verglichen und die Unterschiede quantifiziert. Die Modelle zeigten eine außerordentlich gute Übereinstimmung (mit weniger als 1 dB Unterschied) sowohl für das Flachwassergebiet als auch für das Tiefwassergebiet. Auch die modellierte Ausdehnung der 140 dB und 144 dB-Isophonen um den Laderaumsaugbagger wiesen nur kleinste Abweichungen für beide Szenarien und Modelle auf (s. Tabelle 5-1). Beide Modelle hatten daher weitgehend übereinstimmende Ergebnisse und bestätigten sich gegenseitig.

Tabelle 5-1 Modellierte Ausdehnung der 140 dB re. 1µPa und 144 dB re. 1µPa Isophonen um einen Laderaumsaugbagger, ermittelt mit dem statischen Modell aus der UVS und dem Quonops-Modell.

Schallwert	Flachwasser		Tiefwasser	
	UVS-Modell	Quonops	UVS-Modell	Quonops
144 dB	193 m	210 m	300 m	260 m
140 dB	327 m	360 m	533 m	510 m

6. Anwendung des Quonops-Modells während der marinen Bauarbeiten

Das UVS-Modell ist ein Modell zur Prognose definierter Szenarien für Planung und Eingriffsbewertung, wohingegen das Quonops-Modell ein dynamisches Überwachungsmodell ist, das die fortwährende Eingabe real existierender Daten erlaubt. Es ermöglicht die räumliche Verteilung der Bauschiffe über das AIS zu erfassen und die Schallimmissionen in Echtzeit unter Berücksichtigung der momentan vorherrschenden meteorologischen und hydrographischen Umweltbedingungen zu modellieren. So kann die Einhaltung der im Planfeststellungsbeschluss formulierten Auflagen, in Echtzeit zu überwachen und bei Überschreitung der vorgegebenen Werte kurzfristig zu reagieren, sichergestellt werden. Das Quonops-Modell bietet sich daher für Dokumentation und Überwachung des Unterwasserschalls während der Bauzeit an.

Das Quonops-Modell berücksichtigt die Quellpegel der Bauschiffe, die nach einer standardisierten Prozedur vermessen werden und modelliert die Ausbreitung ihres Lärms laufend mit Hilfe ihrer aktuellen Positionen. Zudem werden die Modellergebnisse mit Daten von baubegleitenden Unterwasserschallmessungen (an mehrere Messstationen an unterschiedlichen Positionen im Projektgebiet) verglichen und das Modell wird regelmäßig mit diesen Daten kalibriert bzw. adaptiert. Dabei ist die Kalibrierung ein Standardverfahren, bei der akustische *in situ*-Messdaten verwendet werden, um die modellierten Ergebnisse zu verifizieren und das Modell an die Messergebnisse anzupassen. Sie basiert auf der Minimierung der Differenz zwischen der kumulativen Dichtefunktionen der Messung und Modellierung.

Seit Beginn der Überwachung der Unterwasserschallimmissionen wird das Quonops-Modell angewendet und die Erfahrung zeigt, dass die Abweichungen zwischen Modell und Messungen generell als niedrig einzustufen sind und im Durchschnitt bei weniger als 1 dB liegen. Tendenziell überschätzt das Modell den Projektschall leicht. So ist im Modell definiert, dass eine projektbezogene stationäre Projektaktivität beginnt (z.B. baggern), wenn die Geschwindigkeit des Schiffes weniger als 3 Knoten beträgt und endet, wenn die Schiffsgeschwindigkeit wieder über 3 Knoten liegt. Diese Definition führt dazu, dass der Projektschall überschätzt wird, denn es ist davon auszugehen, dass die Bauaktivität in der Realität verzögert einsetzt (d.h., dass z.B. stationäre Arbeiten wie Baggern nicht unmittelbar nach Unterschreiten der 3 Knoten einsetzen bzw. auch nicht erst bei Überschreiten der 3 Knoten eingestellt werden, sondern bereits vorher). Zudem sind Bauschiffe nicht durchgehend aktiv, wenn sie stationär sind. Das Modell kann aber keine Pausen in den Arbeiten abbilden. Zusammenfassend lässt sich schlussfolgern, dass das Quonops-Modell gut geeignet ist die Auflagen der Planfeststellung mit hoher Genauigkeit in Echtzeit zu überwachen.