
Fehmarnbelt Marine Mammal Studies

Messung von Unterwasserschall und Vibrationen durch den Verkehr im Drogdentunnel

Eingereicht bei	Femern A/S
Datum	2012/02/13
Dokumentnummer	ATR ENV0500024
Autoren	Rainer Matuschek, Klaus Betke (itap)
Genehmigt von	Georg Nehls
Version	Entwurf 2

Kontaktdaten

ITAP

Rainer Matuschek

Marie-Curie-Str. 8

26129 OLDENBURG, GER

Tel. +49 (0) 441 5706124

Email: matuschek@itap.de

BioConsult SH

Dr. Georg Nehls

Schobüller Str. 36

25813 HUSUM, GER

Tel. +49 (0) 4841 66 3 29 – 11

Email: g.nehls@bioconsult-SH.de

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung.....	3
2. Messverfahren	4
3. Ergebnisse	8
4. Diskussion	15

1. Zusammenfassung

Als Teil der UVS für die Feste Fehmarnbelt Querung beauftragte Femern A/S das Beraterkonsortium FEMM Messungen der vom Tunnel verursachten Vibrationen des Meeresbodens durchzuführen, die zu erhöhtem Unterwasserschallpegel führen. Die Messungen wurden im Öresund direkt über und in 400 m Entfernung zum Tunnel zwischen Amager und Peberholm durchgeführt.

Zur Abgrenzung der vom Tunnel verursachten Geräusche von Umgebungsgeräuschen wie Schiffslärm und Ähnlichem wurde ein Geophon direkt über der Tunneltrasse platziert, um Vibrationen des Meeresbodens aufzuzeichnen.

Direkt über dem Tunnel konnten messbare Vibrationen während der Durchfahrt von Zügen nachgewiesen werden, die zu einem erhöhten Unterwasserschallpegel führen.

In einer Entfernung von ca. 400 m zum Tunnel ist ein erhöhter Unterwasserschallpegel durch Züge, die den Tunnel durchfahren, kaum messbar und trägt nicht zum durch den Schiffsverkehr verursachten Gesamtbreitbandschallpegel bei.

2. Messverfahren

Die Messungen wurden am 19 Juli 2011 durchgeführt. Am Meeresboden wurden zwei unabhängige Aufzeichnungssysteme mit Hydrophonen ausgebracht. System 1 wurde über dem Tunnel bei $55^{\circ}37.14'n$ $12^{\circ}42.42'e$ und System 2 nördlich der Tunneltrasse in ca. 400 m Entfernung von Position 1 bei $55^{\circ}37.37'n$ $12^{\circ}42.58'e$ platziert (Abbildung 1). Die Abbildungen 2 und 4 zeigen die Aufzeichnungssysteme. Die Hydrophone wurden mit Hilfe von Schwimmern in einer Höhe von 1 m über dem Meeresboden fixiert. Zusätzlich zu dem Hydrophon wurde System 1 über dem Tunnel mit einem Vibrationssensor (Geophon, Abbildung 3) ausgerüstet. Während der Messung ankerte das Arbeitsschiff JHC Miljø 500 m nördlich von Position 2. Die Wassertiefe im Bereich der Messungen liegt zwischen 7 m und 9 m.

Da angenommen wurde, dass der Schiffsverkehr während der Messungen eine der Hauptlärmquellen sein würde, wurde der Schiffsverkehr an Bord der JHC Miljø mit einem AIS-Empfänger aufgenommen. Durch die Nähe zu Københavns Lufthavn (Flughafen Kopenhagen) wurden Vorkehrungen getroffen, zusätzlich den Fluglärm als eine mögliche Quelle von Unterwasserschall zu messen (Abbildung 5). Trotzdem aber die Starts und Landungen am Flughafen von der Messposition aus visuell beobachtet werden konnten, gab es keinen erkennbaren Fluglärm, da im Bereich der Messungen keine Flüge mit geringen Flughöhen stattfanden.

Die Aufzeichnungsbandbreite lag zwischen 10 Hz und 20 kHz. Die obere Grenzfrequenz des Geophons lag aber bei ca. 1 kHz. Die Aufzeichnungen wurden nachträglich mit einer von itap in MATLAB geschriebenen Software ausgewertet. Geräusch- und Vibrationspegel wurden pro Zeit und 1/3 Oktavfrequenzspektrum berechnet.

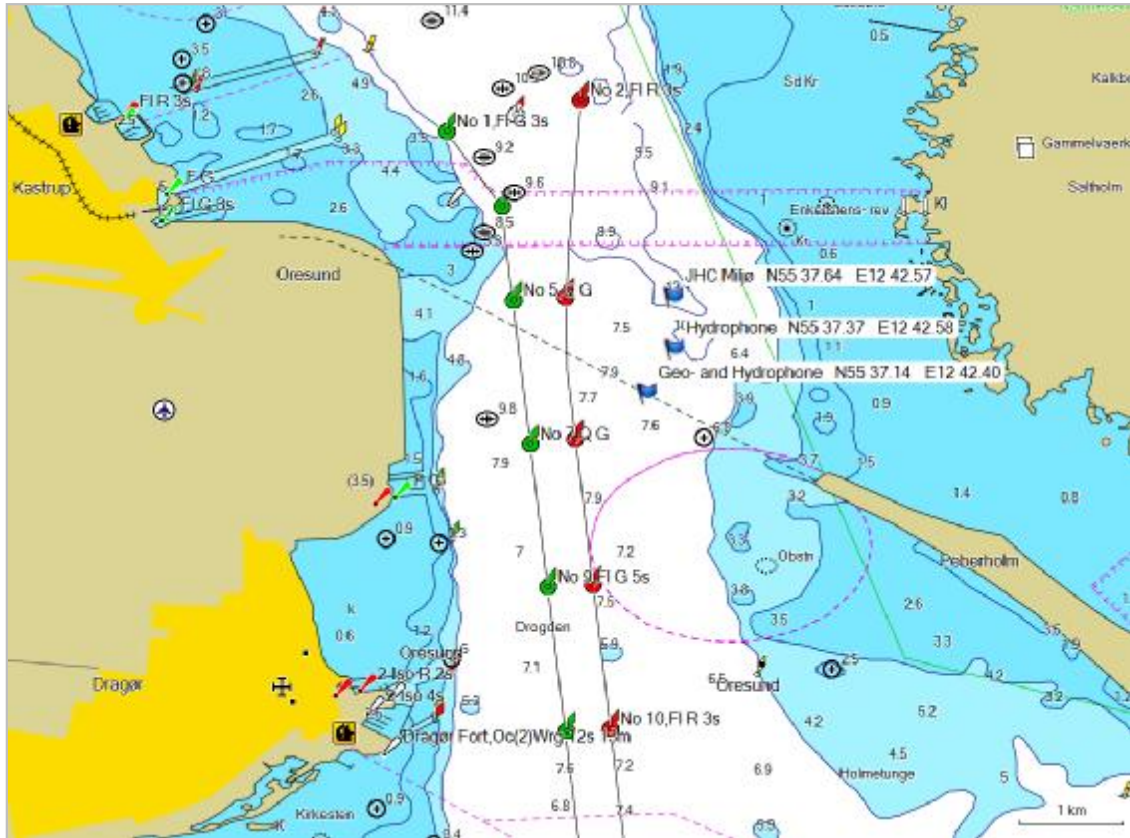


Abbildung 1. Messpositionen. Aufzeichnungssystem 1 wurde direkt über dem Tunnel platziert, während Aufzeichnungssystem 2 in einer Entfernung von 400 m von der Tunneltrasse positioniert wurde.

Gerät	Typ	Hersteller	Bemerkungen
2 x autonomes Unterwasserschall-Aufnahmesystem		(itap)	
2 x Hydrophon	8106	Brüel & Kjær	an das Aufzeichnungssystem angeschlossen
Hydrophon-Kalibrator	4229	Brüel & Kjær	
Geophon	SM-6	Sensor Nederland	im Aufzeichnungssystem installiert
Rekorder	PMD 620	Marantz	zur Aufnahme von möglichem Fluglärm
Mikrofon	4189	Brüel & Kjær	
Mikrofon-Kalibrator	4231	Brüel & Kjær	
AIS-Empfänger	MXA-5000	Icom	
GPS-Gerät	GPSmap 76cx	Garmin	

Tabelle 1. Für die Messungen verwendete Geräte



Abbildung 2 Ausbringung des Aufzeichnungssystems über dem Tunnel. Das Rohrgehäuse war mit Stahlstäben mit einem Querschnitt von 40 x 40 mm² und 1 m Länge beschwert (grün lackiert) um den Kontakt des Geophons mit dem Meeresgrund sicherzustellen. Im Hintergrund: Tower und andere Gebäude des Kopenhagener Flughafens und ein Personenzug auf einem Abstellgleis.



Abbildung 3. Geophon



Abbildung 4. Vorbereitung des zweiten Aufnahmegeräts zur Ausbringung 400 m nördlich der Tunneltrasse.

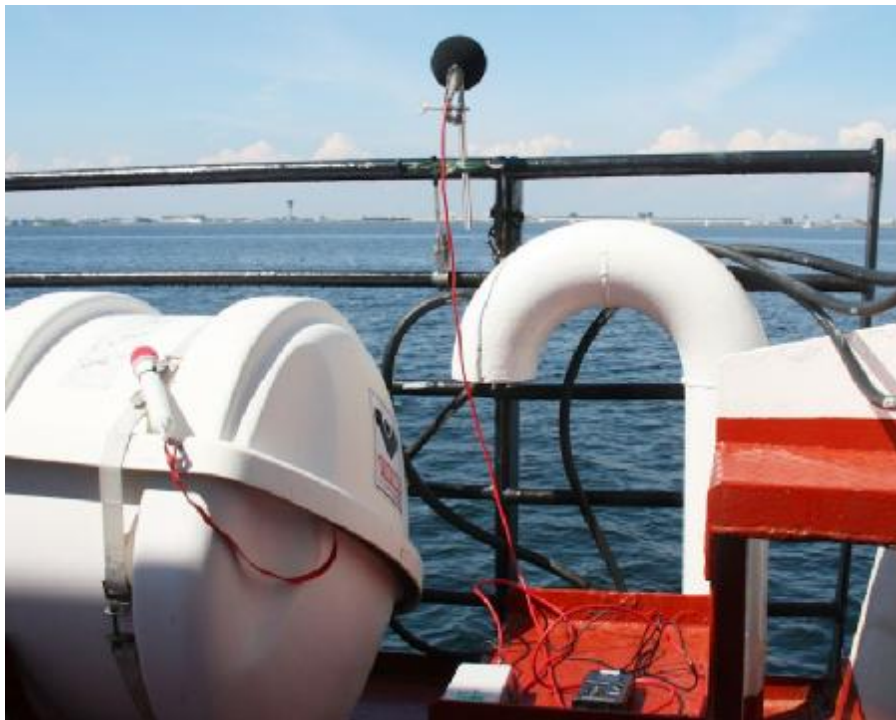


Abbildung 5. Mikrophon zum Aufnehmen von Fluglärm.

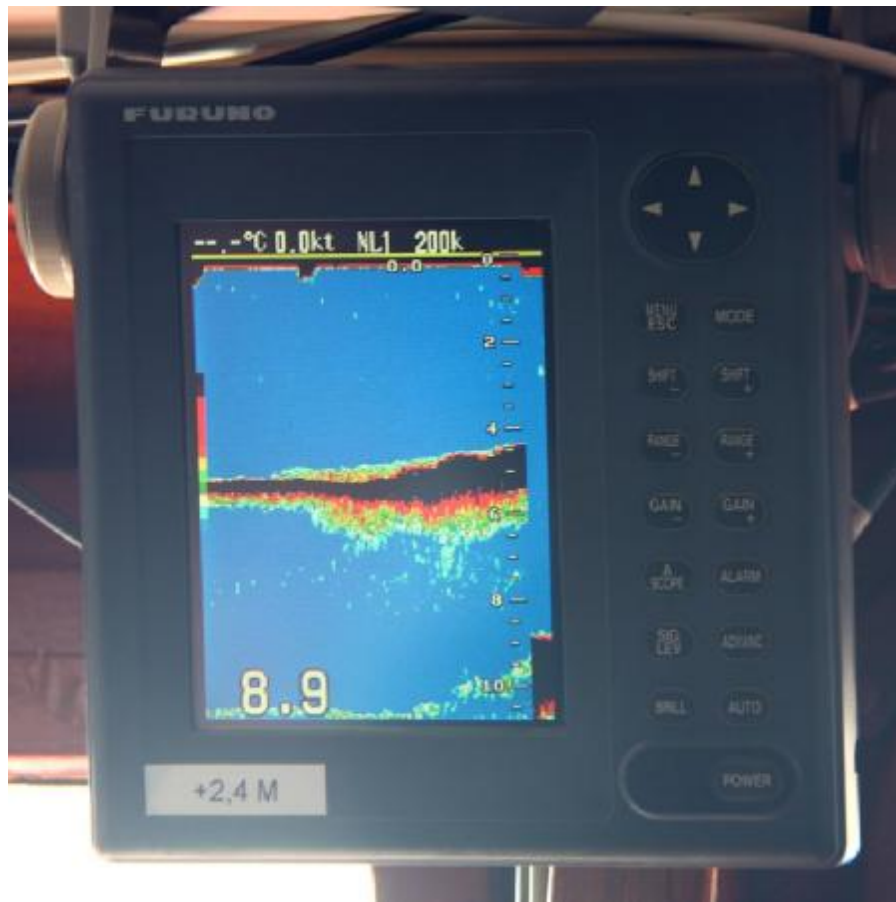


Abbildung 6. Anzeige des Echolots bei Annäherung an den Tunnel (Anmerkung: die Tiefenskala auf der rechten Seite des Displays bezieht sich aufgrund automatischer Bereichsumschaltung nur auf den äußeren rechten Rand der Anzeige, der sich vom Rest unterscheidet).

3. Ergebnisse

Abbildung 7 zeigt den an Position 1 über dem Tunnel gemessenen Breitbandgeräuschpegel über einen Zeitraum von 105 Minuten. Der niedrigste gemessene Pegel (Hintergrundgeräuschpegel) entspricht ca. 105 dB re 1 μ Pa. Neben einigen durch Schiffslärm verursachten Maxima sind deutliche Spitzen über 130 dB re 1 μ Pa und in einigen Fällen über 140 dB re 1 μ Pa erkennbar. Beim Anhören der Aufnahmen konnten diese Spitzen Zugdurchfahrten zugeordnet werden. Laut den von Öresundståg (oresundstag.se) für 2011 verfügbaren Fahrplänen sollten zwischen 07:30 und 09:15 Ortszeit 20 Personenzüge den Tunnel passieren. Abbildung 7 zeigt 23 Spitzen. Mindestens einer der gehörten Züge war wahrscheinlich ein Güterzug (um 08:27), der natürlich nicht in den regulären Fahrplänen aufgeführt ist. Wie Abbildung 8 zeigt, dauert der durch einen Zug verursachte Anstieg des Geräuschpegels ca. 10 s an. Die Durchfahrt des Güterzuges um 08:27 dauerte ca. 20 s.

Beim Vergleich des Breitbandpegels von Zug- und Schiffslärm wurde die Entfernung zum Schiff berücksichtigt. Durch eine konservative Näherung für den Übertragungsverlust (der Pegel nimmt mit zunehmender Entfernung ab) von $15 \lg(\text{Entfernung}_1/\text{Entfernung}_2)$ ergibt sich ein um 15 dB höherer Pegel, wenn sich die Entfernung zum Schiff um den Faktor zehn verringert. Bei einer Entfernung von 50 m zu dem vorüberfahrenden Schiff würden die Pegel aus Abbildung 7 um 07:33 auf 162 dB und um 08:26 auf 149 dB ansteigen. Diese Pegel übersteigen die durch Züge verursachten Geräuschpegel um rund 10–20 dB.

Keine der Aufnahmen des Unterwasserschalls enthielten hörbare Signale, die eindeutig dem Autoverkehr im Tunnel zugeordnet werden konnten.

Die Züge verursachen einen Pegelanstieg in einem breiten Frequenzbereich mit einem breiten Maximum zwischen 30 Hz und 1 kHz und einem absoluten Maximum bei annähernd 50 Hz bei den meisten der Züge (Abbildung 9). Zum Vergleich zeigt Abbildung 10 die Spektren für zwei Schiffe, die in einer Entfernung von 470 m bzw. 650 m an der Messposition vorbeiführen.

Die durch Züge verursachten Spitzen finden sich ebenfalls im Vibrationssignal des Geophons (Abbildung 11). Hier liegt das Vibrationsmaximum zwischen 200 Hz und 500 Hz (Abbildung 12). Unter 100 Hz konnte ein starker Anstieg des Vibrationspegels festgestellt werden. Der Grund für diesen Anstieg, der nicht im Zusammenhang mit Zügen oder Schiffen steht, ist unklar. Er wird möglicherweise von durch Wellengang hervorgerufene Bewegungen der Verankerung (Seil und Markerball an der Wasseroberfläche) verursacht. Es ist ausgeschlossen, dass dieser Anstieg auf Autoverkehr im Tunnel zurückzuführen ist, da in diesem Fall die Pegel der Hintergrundgeräusche bei diesen Frequenzen höher sein müssten. Vibrationen des Sediments führen zu Geräuschen unter Wasser so wie auch Unterwasserlärm zu Bewegungen des Sediments führt. Zumindest bis zur Grenzfrequenz von ca. 50 Hz, ab der die geringe Wassertiefe die Ausbreitung des Schalls behindert, sollte es einen Geräuschanteil geben, wenn die Vibrationen von Autoverkehr verursacht wären.

Um die Korrelation zwischen den Vibrationen des Meeresbodens und dem Schalldruck über dem Tunnel zu analysieren, wurde die Kohärenz zwischen diesen beiden Signalen berechnet (Abbildung 13). Die Kohärenz ergibt die lineare Korrelation als Funktion der Frequenz und wurde mit einer Frequenzauflösung von 4 Hz jeweils mit und ohne Zugdurchfahrt über ein Intervall von 6 Sekunden gemittelt. Im Frequenzbereich zwischen ca. 100 Hz und 500 Hz besteht eine auffällige Korrelation

zwischen Schalldruck und Vibration. Bei Frequenzen unter ca. 100 Hz fällt die Kohärenz abrupt ab. Dies deutet darauf hin, dass die niederfrequenten Bereiche des Schalldruckspektrums und auch die Vibrationen nicht durch Zugverkehr im Tunnel hervorgerufen werden. Aus den gleichen Gründen kann Autoverkehr als Quelle der Vibrationsanteile unter 100 Hz ausgeschlossen werden. Weder mit noch ohne Zugdurchfahrten konnte unter 100 Hz keine signifikante Kohärenz nachgewiesen werden.

Das Schallsignal, das in einer Entfernung von 400 m zur Tunneltrasse aufgezeichnet wurde, zeigt nur wenige Spitzen mit Pegeln von ca. 120 dB re 1 μ Pa oder weniger (Abbildung 14), die nach Abbildung 7 dem Zugverkehr zugeordnet werden konnten. An dieser Position entsprach der Hintergrundgeräuschpegel ca. 113 dB re 1 μ Pa und die Zugdurchfahrten verursachten nur einen leichten Anstieg im Frequenzspektrum (Abbildung 15). Die Schiffsspektren (Abbildung 16) sind denen, die direkt über dem Tunnel gemessen wurden hinsichtlich Pegel und Form sehr ähnlich.

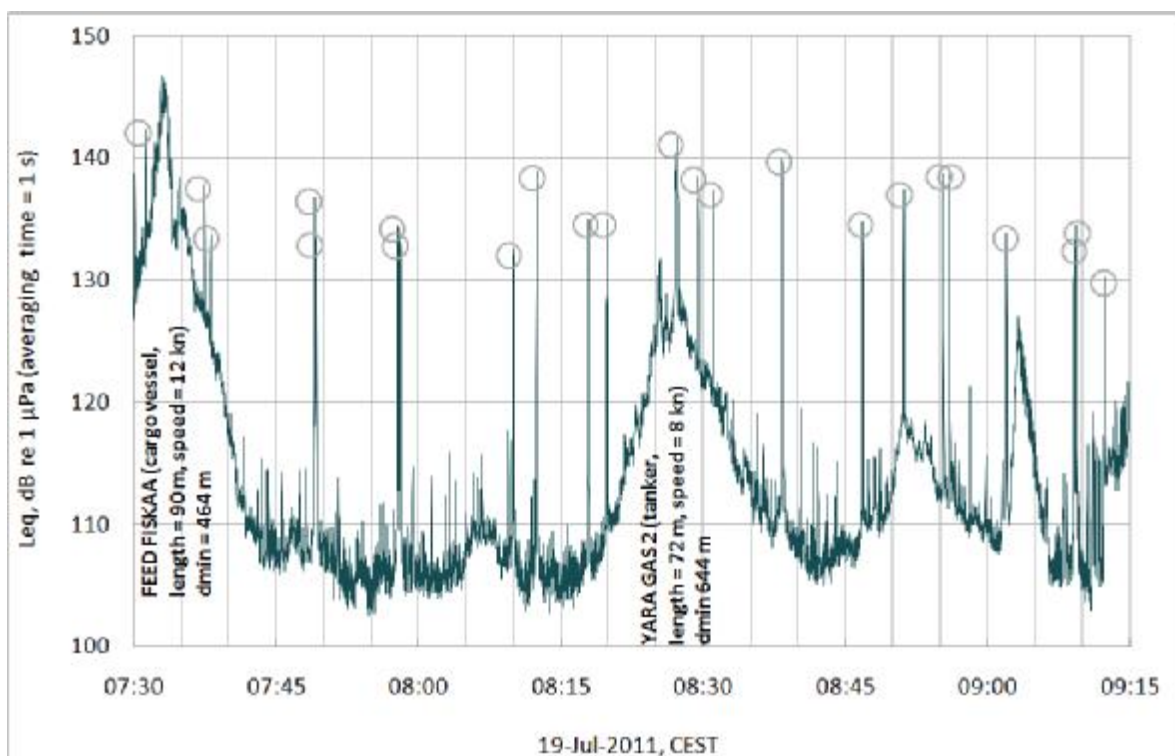


Abbildung 7. Über dem Tunnel aufgezeichneter Breitbandschallpegel. Die mit Kreisen gekennzeichneten Spitzen wurden als Zugdurchfahrten identifiziert.

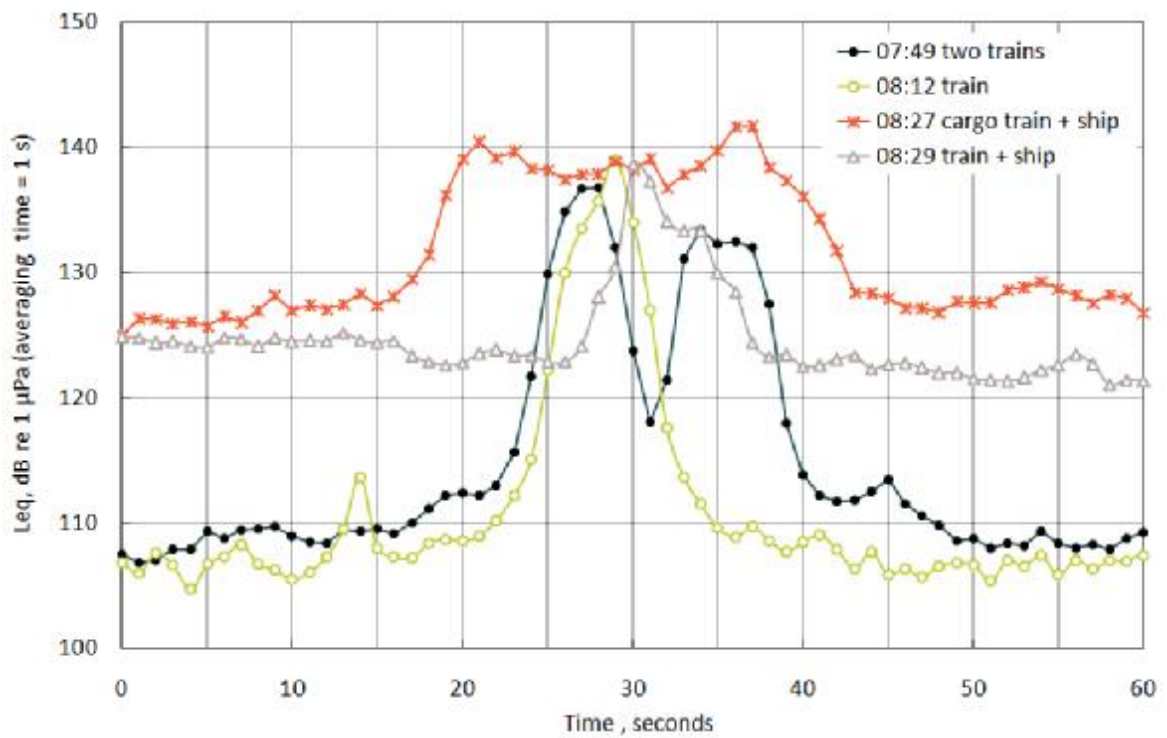


Abbildung 8. Breitbandschallpegel zu einigen der Zugdurchfahrten aus Abbildung 7 für eine kürzere Zeitspanne.

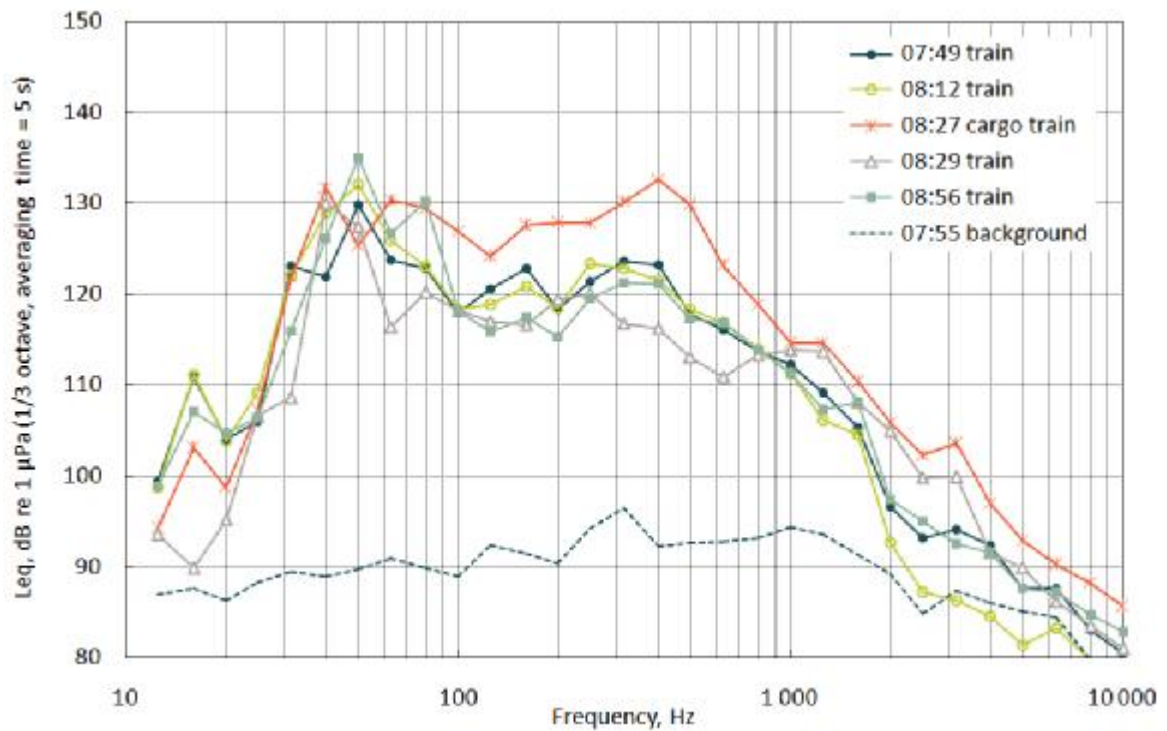


Abbildung 9. Schallspektren einiger Zugdurchfahrten, die über dem Tunnel aufgezeichnet wurden.

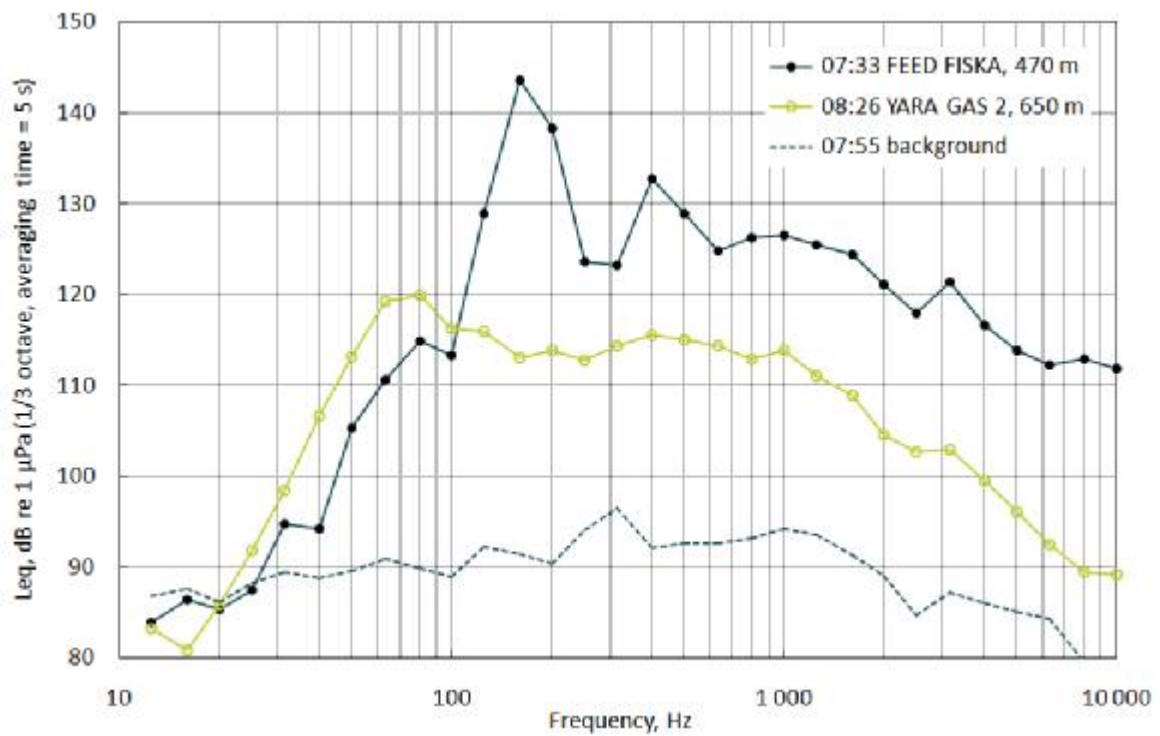


Abbildung 10. Schallspektren von Schiffen, die über dem Tunnel aufgezeichnet wurden.

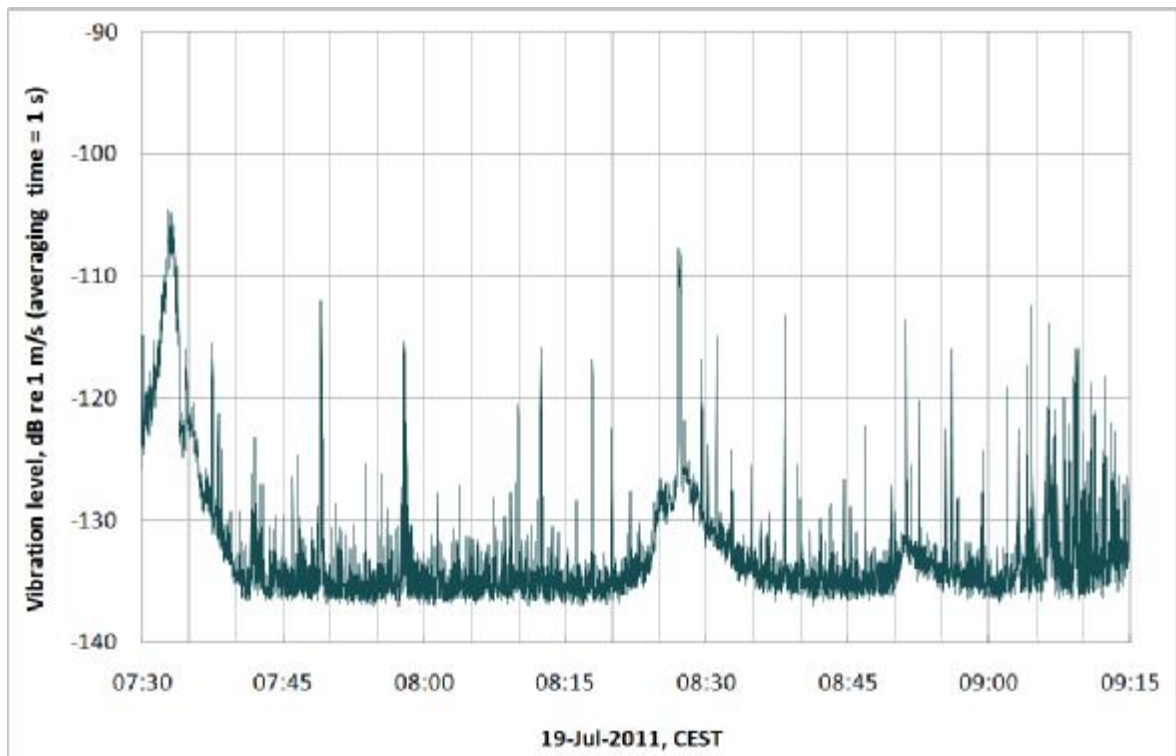


Abbildung 11. Breitband-Vibrationspegel (Hochpassfilter bei 100 Hz), der am Meeresgrund über dem Tunnel aufgezeichnet wurde.

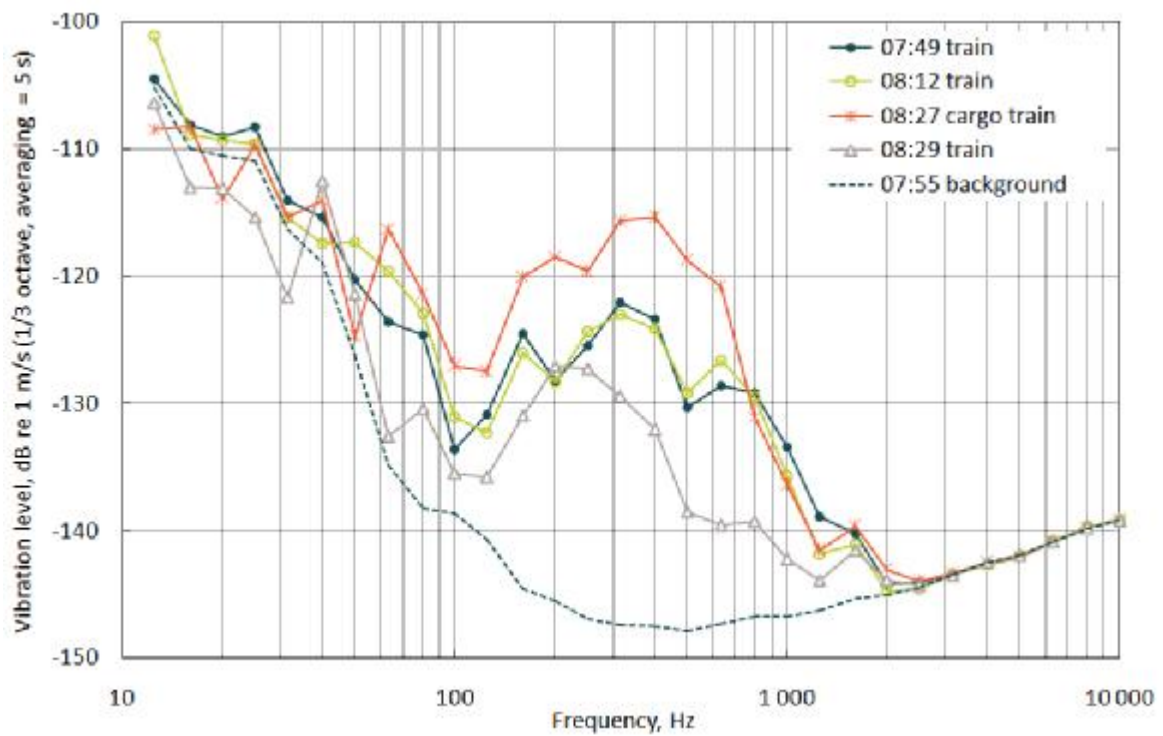


Abbildung 12. Vibrationsspektren des Meeresbodens über dem Tunnel.

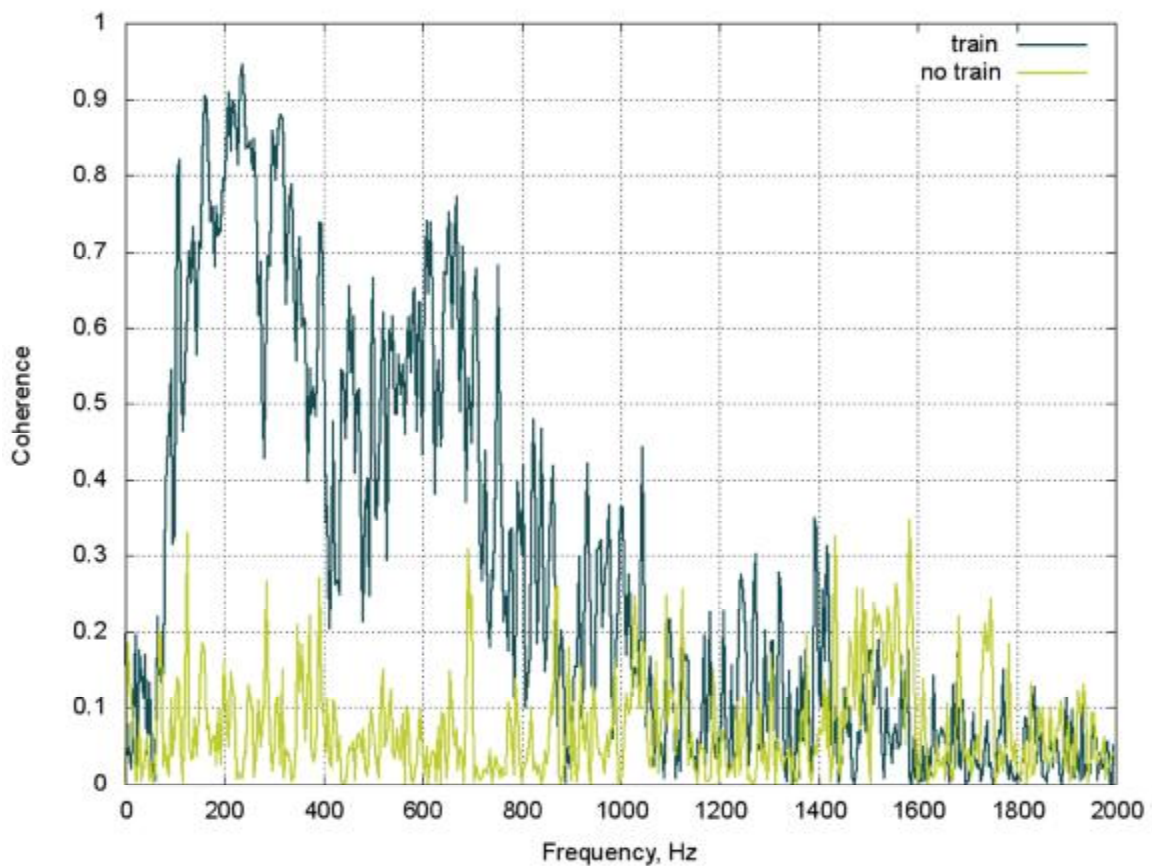


Abbildung 13. Kohärenz zwischen Schalldruck und Vibration des Meeresbodens über dem Tunnel.

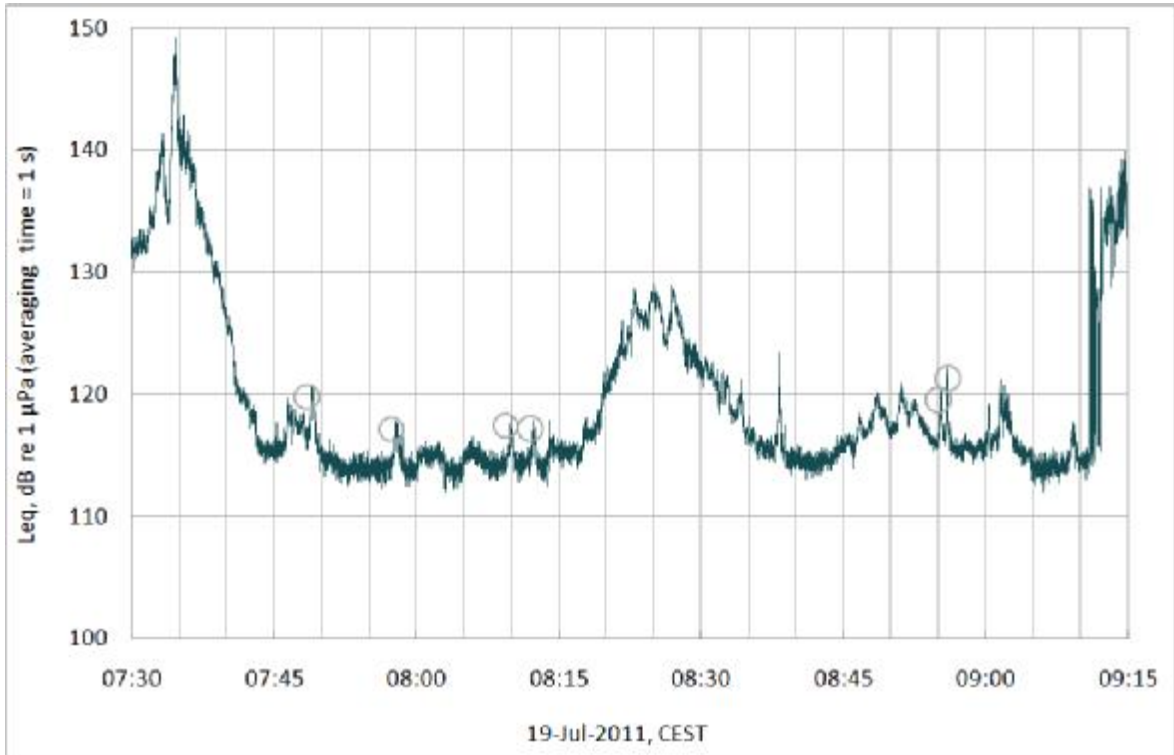


Abbildung 14. 400 m nördlich des Tunnels aufgezeichneter Breitbandschallpegel. Nur wenige der Spitzen, die laut Abbildung 7 mit dem Zugverkehr in Verbindung gebracht werden konnten, finden sich in diesem Signal wieder.

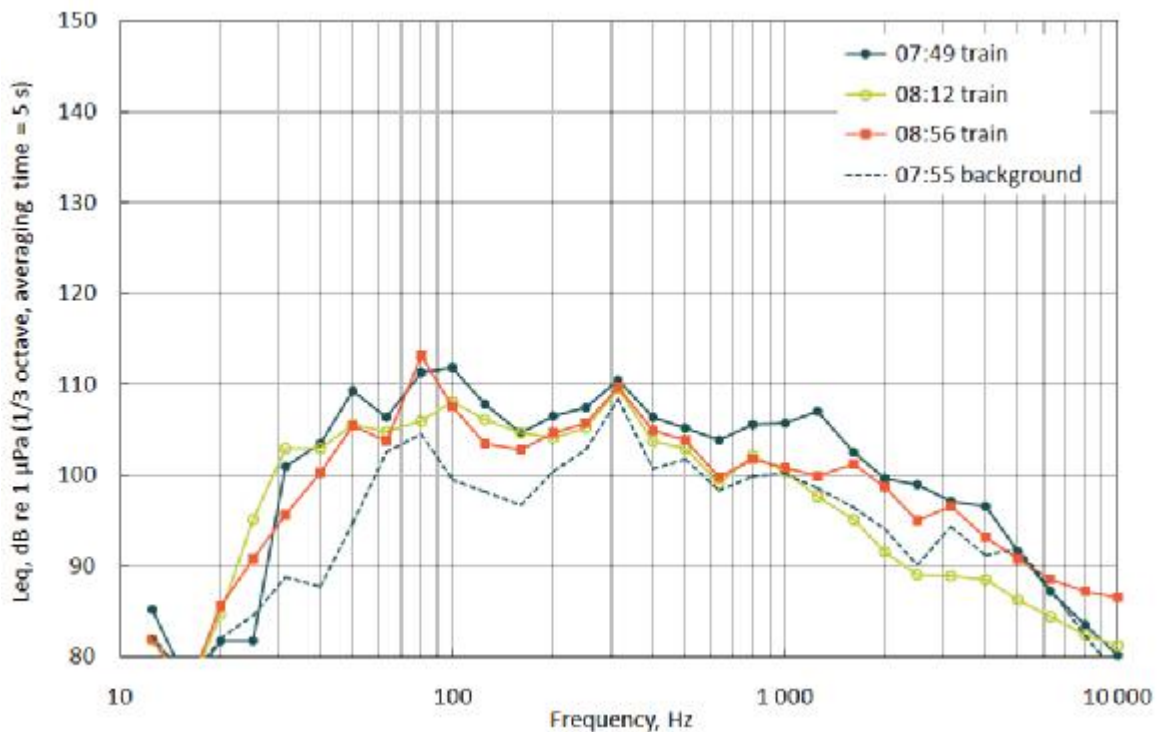


Abbildung 15. Schallspektren von Zügen im Tunnel, die 400 m nördlich des Tunnels aufgezeichnet wurden.

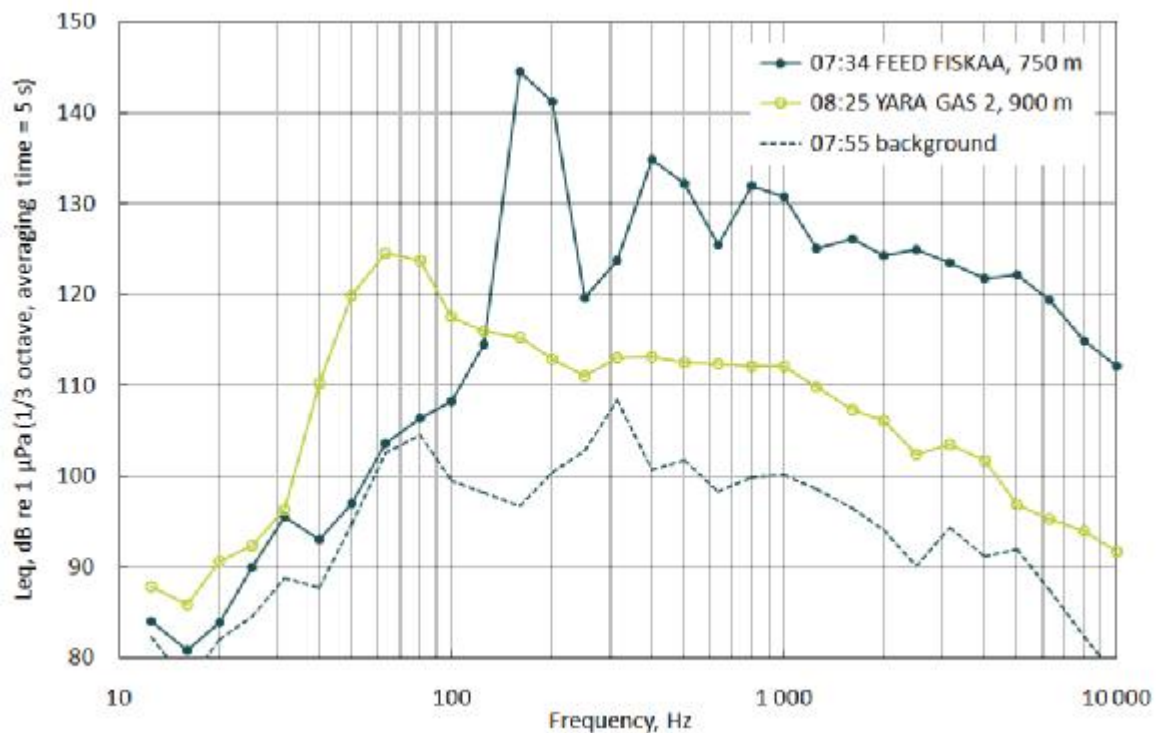


Abbildung 16. Schallspektren von Schiffen, die 400 m nördlich des Tunnels aufgezeichnet wurden.

4. Diskussion

Um die Auswirkungen der durch Zugdurchfahrten verursachten Vibrationen auf den Lärmpegel zu bewerten, wurden gleichzeitige Messungen des Unterwasserschalldrucks und der Vibrationen des Meeresbodens direkt über der Drogentunneltrasse durchgeführt.

Eine typische Zugdurchfahrt dauert rund zehn Sekunden und führt direkt über dem Tunnel zu einer Erhöhung des Geräuschpegels auf ca. 140 dB. Durchfahrten von Güterzügen führen für ca. 20 Sekunden zu einer vergleichbaren Erhöhung des Pegels. Dies wurde mit Schiffslärm verglichen, wobei die Vorbeifahrt jedes Schiffes mehrere Minuten dauert und Lärmpegel von über 140 dB in mehr als 400 m Entfernung erreichen kann.

In einer Entfernung von 50 m zu einem vorbeifahrenden Schiff kann der Schiffslärm den durch einen Zug hervorgerufenen Lärm um mehr als 20 dB überschreiten.

Schallmessungen in einer Entfernung von 400 m zum Tunnel ergaben einen Pegel von ca. 120 dB bei Durchfahrt eines Zuges. Aufgrund von Schiffslärm konnte in dieser Entfernung vom Tunnel nur ein Teil der Zugdurchfahrten eindeutig zugeordnet werden.

Autoverkehr konnte auch direkt über dem Tunnel nicht als Ursache für Vibrationen nachgewiesen werden.