

OKTOBER 2023
LILLEBÆLT VIND A/S

UMWELTVERTRÄGLICHKEITSPRÜFUNG – WINDPARK LILLEBÆLT SYD

ANHANG G1 UNTERWASSERLÄRM



COWI

OKTOBER 2023
LILLEBÆLT VIND A/S

UMWELTVERTRÄGLICHKEITSPRÜFUNG – WINDPARK LILLEBÆLT SYD

ANHANG G1 UNTERWASSERLÄRM

PROJEKTNR.

A234064

DOKUMENTNR.

A234064-ATR04-G1

VERSION:

3.0

VERÖFFENTLICHUNGSDATUM BESCHREIBUNG

27.10.2023

Technischer Bericht

AUSGEARBEITET VON

FMSZ

KONTROLLIERT VON

MNLR

GENEHMIGT VON

MEAS

INHALT

1	Einleitung	7
2	Unterwasserlärm	9
2.1	Akustische Compliance-Kriterien	11
3	Methodik	12
3.1	Szenarien	12
3.2	Modell	13
3.3	Eingangsdaten	15
4	Ergebnisse	23
4.1	Bauphase	23
4.2	Betriebsphase	26
5	Diskussion	26
6	Schlussfolgerung	27
7	Referenzen	28
	Anlage A: Lärmkarten	30

1 Einleitung

Im Auftrag von Lillebælt Vind A/S hat COWI eine Reihe von Unterwasserlärmrechnungen für den Offshore-Windpark (OWF) Lillebælt Syd durchgeführt. Das Projekt soll je nach finalem Szenario zwischen 154 und 166 MW produzieren. Der Windpark Lillebælt Syd liegt zwischen den dänischen Inseln Als und Fünen, etwa 4 km von beiden Küsten entfernt (siehe Abbildung 1). Verbunden mit der südlichen Grenze des Projektgebiets befindet sich das Natura-2000-Gebiet Nr. 197 („Flensborg Fjord, Bredgrund og farvandet omkring Als“).

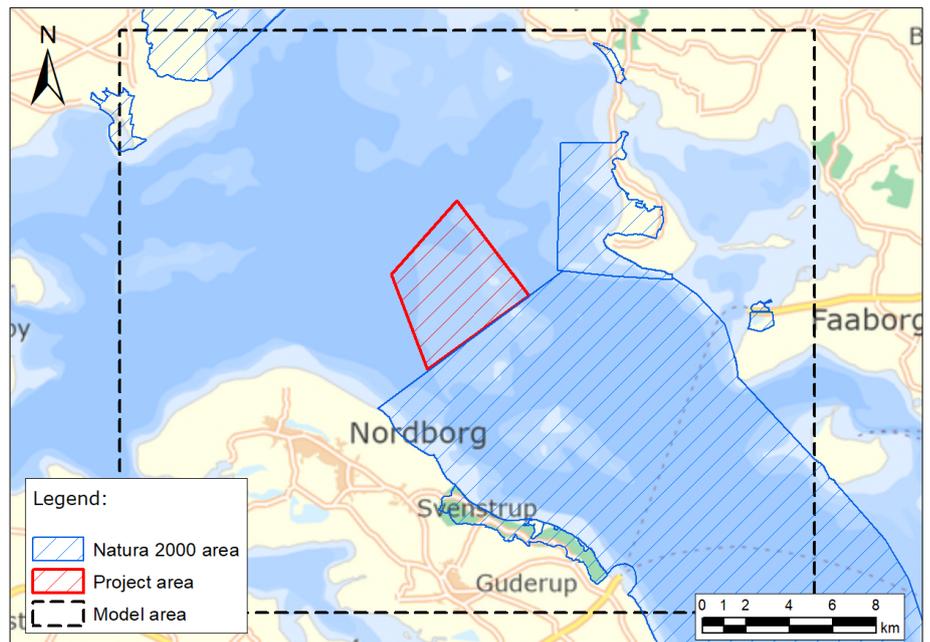


Abbildung 1 Übersichtskarte des Windparks Lillebælt Syd

Zu den modellierten Aktivitäten zählen:

- > Bauphase: Installationsgeräusche durch das Einrammen von Monopiles.
- > Betriebsphase: Lärm durch Windkraftanlagen.

Für diesen Windpark werden derzeit mehrere Szenarien in Betracht gezogen (siehe Tabelle 1). Die Szenarien reichen von 10 bis 23 Windenergieanlagen mit einer Leistung zwischen 7,2 und 15 MW.

Tabelle 1 Zusammenfassung der Szenarien. Rot: Szenarien und Parameter, die in den Berechnungen verwendet werden.

Parameter	Szenario 1	Szenario 3	Szenario 4	Szenario 5
Anzahl der Anlagen	11	14	23	10
Leistung pro Anlage (MW)	14	11	7,2	15
Gesamtleistung (MW)	154	154	165,6	150
Rotordurchmesser (m)	222	200	172	236
Monopile-Durchmesser (m)			7,5	

Da von einer ähnlichen Installation von Monopiles für alle Szenarien ausgegangen wird, wurden die Szenarien 4 und 5 aufgrund der Anzahl und Lage ihrer Anlagen für die Bauphase in Betracht gezogen. In Bezug auf Betriebslärm wurde das Szenario 5 in Betracht gezogen, da es die größten Anlagen aufweist. Es wird erwartet, dass die Auswirkungen der verbleibenden Szenarien 1 und 3 ähnlich oder geringer sind als bei den berechneten Szenarien 4 und 5.

Eine frühere Prognose des Unterwasserlärms für dieses Projekt wurde von Lloyd's Register (LR) im Mai 2018 (Lloyd's Register, 2018) durchgeführt. Diese Prognose stützte sich auf die inzwischen überholte „Richtlinie für Unterwasserlärm – Installation von Rammpfählen“ der dänischen Energieagentur (ENS) (Energistyrelsen, 2016). Im Mai 2022 hat die ENS eine neue „Richtlinie für Unterwasserlärm – Installation von Ramm- und Rüttelpfählen“ veröffentlicht (Danish Energy Agency, 2022). In diesem Bericht finden viele der gleichen Annahmen wie im LR-Bericht Anwendung, er enthält jedoch eine Berechnungsmethode, um den Anforderungen der neuesten Richtlinie der ENS zu entsprechen.

Die Ergebnisse dieser Berechnungen werden von den Spezialisten für Meeresfauna verwendet, um die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) für die betreffenden Arten durchzuführen (COWI, 2022).

2 Unterwasserlärm

Die Ausbreitung von Schall ist im Wasser effizienter als in der Luft, da die Absorption von akustischer Energie und die Möglichkeit der zylindrischen Energieausbreitung geringer ist (Kinsler, 1982). Auch die Schallgeschwindigkeit verhält sich anders im Wasser und ist viermal so hoch wie in der Luft – mit typischen Werten zwischen 1450 und 1550 m/s. Bei größeren Ausbreitungsentfernungen kann möglicherweise ein Gebiet beeinträchtigt werden, das mehrere Kilometer von einer starken Lärmquelle entfernt ist.

Die Schallausbreitung kann wie folgt vereinfacht werden:

$$L_p(r) = L_S - N_{pL}(r)$$

Gleichung 1

In Gleichung 1 ist L_p der empfangene Pegel, der von r , der Entfernung zur Quelle, abhängt. L_S ist der Quellpegel und N_{pL} ist der Ausbreitungsverlust, der auch vom Abstand zwischen Quelle und Empfänger abhängt. Alle Werte werden in Dezibel (dB) gemessen.

Mit der Berechnungssoftware wird der Ausbreitungsverlust für viele verschiedene Empfangspunkte berechnet, indem sie mehrere der in Abschnitt 3.3 beschriebenen Eingangsdaten verwendet.

Der empfangene Pegel reicht jedoch nicht aus, um die Auswirkungen von Lärm auf Meerestiere zu beurteilen, da verschiedene Tiergruppen unterschiedliche Hörsysteme haben. Die neue Richtlinie (Danish Energy Agency, 2022) beschreibt verschiedene funktionelle Hörgruppen für Meeressäuger auf Grundlage verfügbarer Daten aus Experimenten und Studien. Die Hörempfindlichkeit variiert mit der Frequenz, was beim empfangenen Pegel mithilfe von Gewichtungsfunktionen korrigiert wird, siehe Abbildung 2.

In diesen Berechnungen wurde eine Gewichtungsfunktion verwendet:

- > W_{VHF} für Schweinswale.

Darüber hinaus werden ungewichtete (lineare oder unkorrigierte) Werte für Fische, Fischeier und Fischlarven verwendet. Sofern nicht anders angegeben, gelten alle dargestellten Ergebnisse für die Arten des Schweinswals.

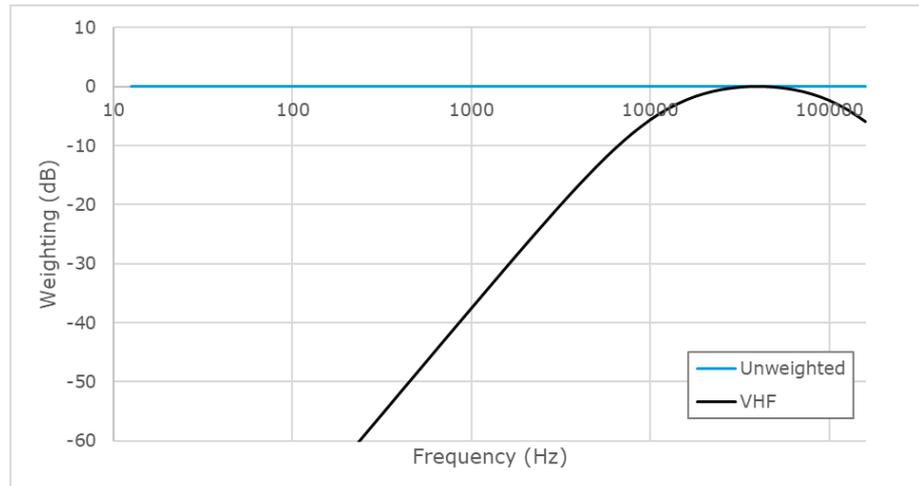


Abbildung 2 In diesem Projekt verwendete Gewichtungsfunktionen.

In Bezug auf Schweinswale zeigt Abbildung 2, dass ihr praktischer Hörbereich auf etwa 1.000 bis 150.000 Hz begrenzt ist.

Der Schalldruck ist eine Größe, die mit der Zeit schwankt. Dieser wird üblicherweise als Pegel ausgedrückt und kann je nach Art des Klangs mit unterschiedlichen Parametern dargestellt werden:

- > Für Quellen, bei denen der Schall über einen längeren Zeitraum anhält, wie z. B. Anlagengeräusche, wird in der Regel $L_{p,rms}$ (bekannt als SPL) verwendet:

$$SPL: L_{p,rms} = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{p_{RMS}}{p_{ref}} \right)$$

Gleichung 2

In Gleichung 2 steht *SPL* für Sound Pressure Level (Schalldruckpegel) und *RMS* für Root Mean Square (Quadratisches Mittel), ein statistischer Indikator für das Signal. p_{RMS} ist der RMS-Schalldruck des Schalls und p_{ref} ist der Referenzdruck (1 μ Pa in Wasser). In Luft ist der Referenzdruck 20-mal größer als in Wasser. Bei unterschiedlichen Referenzdrücken können Unterwasser- und Luftschallpegel nicht direkt verglichen werden.

- > Für Impulsschallquellen, wie z. B. Rammarbeiten, wird der Schallleistungspegel $L_{E,p}$ (bekannt als SEL) zu Vergleichszwecken bevorzugt:

$$SEL: L_{E,p} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\int_{t_5}^{t_{95}} p^2(t) dt}{E_0} \right)$$

Gleichung 3

In Gleichung 3 ist $p^2(t)$ der quadratische Momentendruck, $t_{95}-t_5$ die Zeitspanne, die 90 % der Energie des integrierten Signals enthält, und E_0 der Referenzwert von 1 μ Pa^{2s}.

Für Rammgeräusche wird SEL_{SS} (Single Strike/einzeln Schlag) verwendet. Dies entspricht einem Beobachtungszeitraum eines einzelnen Hammerschlags. Um den Pegel über mehr als einen Hammerschlag darzustellen, wird der kumulative SEL (SEL_{cum}, Symbol L_{E,cum}) verwendet:

$$SEL_{cum}: L_{E,cum} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\sum_{n=1}^N E_n}{E_0} \right)$$

Gleichung 4

In Gleichung 4 ist E_n die empfangene Schallexposition jedes Hammerschlags. Daher ist das empfangene SEL_{cum} einfach die logarithmische Addition aller während des Akkumulationszeitraums empfangenen SEL_{SS}.

Für die Bewertung der Verhaltensreaktion von Schweinswalen auf Lärm wird der über einen Zeitraum von 125 ms gemittelte SPL verwendet. Bei Hammerschlagimpulsen, die kürzer als 125 ms sind, kann dieser Schalldruckpegel direkt mit dem SEL_{SS} gemäß folgender Gleichung (Danish Energy Agency, 2022) abgeschätzt werden:

$$SPL_{125ms}: L_{p,rms,125ms} = L_{E,p} + 9dB$$

Gleichung 5

2.1 Akustische Compliance-Kriterien

Maximale Lärmgrenzwerte werden für verschiedene nachteilige Auswirkungen auf die Fauna festgelegt, wie z. B. die permanente Hörschwellenabwanderung (PTS) oder die vorübergehende Hörschwellenabwanderung (TTS), bei der ein Tier seine Hörfähigkeit dauerhaft bzw. vorübergehend verlieren würde. Tabelle 2 und Tabelle 3 stellen die in diesem Bericht berücksichtigten Lärmgrenzwerte dar:

Tabelle 2 Akustische Kriterien für Schweinswale (Danish Energy Agency, 2022).

		<i>Schwelle</i>		
<i>Spezies und Gewichtung</i>	<i>Phase/ Art des Schalls</i>	PTS	TTS	Verhaltensstörung
		SEL _{cum} , 24h (dB re 1µPa ² s)	SEL _{cum} , 24h (dB re 1µPa ² s)	
<i>Schweinswal (VHF)</i>	Bau: impulsiv	155	140	103
	Betrieb: nicht impulsiv	173	153	103

Tabelle 3 Akustische Kriterien für Fische (Andersson, 2016).

		Schwelle		
		<i>SPL</i> _{125ms} (dB re 1μPa)	<i>SEL</i> _{SS} (dB re 1μPa ² s)	<i>SEL</i> _{cum,24h} (dB re 1μPa ² s)
Art und Gewichtung	Risiko			
<i>Fisch</i> (ungewichtet)	Organschäden/Tod	207	174	204
<i>Fischeier und Fischlarven</i> (ungewichtet)	Schaden /Tod	217	187	207

3 Methodik

In diesem Abschnitt wird der Ansatz für die Berechnungen beschrieben. Es folgt eine Liste der berechneten Szenarien, der angewendeten Berechnungsmethoden und der Eingangsparameter.

3.1 Szenarien

Mit den berechneten Szenarien wird die Installation von Monopile-Fundamenten für die Windräder während der Bauphase und der zu erwartende Anlagenlärm während des Betriebs modelliert. Für diesen Bericht wurden keine anderen Lärmarten berechnet (Schiffsverkehr, Baggerarbeiten, Bohrungen usw.).

Darüber hinaus ist diese Bewertung auf die Arbeit am Schreibtisch beschränkt, ohne dass zusätzliche Daten über den Unterwasserlärmpegel oder andere Vermessungsdaten erhoben wurden.

3.1.1 Baulärm

Die Installation von Monopiles mit einem hydraulischen Schlaghammer zählt zu den Tätigkeiten, die in der neuen Richtlinie (Danish Energy Agency, 2022) beschrieben werden. Das Kriterium zur Bewertung der Lärmbelastung dieser Aktivität ist der kumulative SEL, den ein Schweinswal empfangen würde, wenn er sich von der Lärmquelle entfernt. Vier verschiedene Monopile-Positionen wurden separat berechnet. Beruhend auf den Ergebnissen dieser Berechnungen wurde in den unten beschriebenen Szenarien der Ausbreitungspfad mit dem geringsten Ausbreitungsverlust verwendet.

Innerhalb der Bauphase wurden zwei Szenarien berechnet:

Referenzfall

Dieses Szenario stellt ein Worst-Case-Szenario (WCS) ohne Lärminderung und ohne Verwendung eines akustischen Abschreckungsgeräts (ADD) dar. In der neuen Richtlinie wird dieses Szenario verwendet, um das erforderliche Mindestmaß an Lärminderung zu berechnen. Dabei wird angenommen, dass sich die Tiere beim ersten Schlag des Hammers in 200 m Entfernung vom Pfahl befinden.

Geplante Bausache

In diesem Szenario wird davon ausgegangen, dass die Aktivitäten wie geplant ausgeführt werden. Dazu gehören auch die im Referenzfall berechneten Minderungsmaßnahmen. Das Ergebnis dieser Berechnung wird verwendet, um zu entscheiden, ob die Rammaktivitäten zugelassen werden können. In diesem Fall besteht keine Vermutung hinsichtlich der anfänglichen Entfernung der Tiere, stattdessen wird berechnet, bei welcher anfänglichen Entfernung die Schweinswale eine permanente Hörschwellenabwanderung (PTS) oder einen Hörverlust erleiden würden.

3.1.2 Betriebsgeräusche

Anlagenlärm fällt nicht in den Anwendungsbereich der neuen Richtlinie (Danish Energy Agency, 2022). Daher beruht diese Beurteilung auf der vorhandenen Literatur und früheren Messungen von Anlagen. Die Prognose des Lärmpegels wurde für Szenario 5 mit allen 10 gleichzeitig betriebenen Anlagen durchgeführt.

3.2 Modell

Die Unterwasserlärmmodellierung wird mit der Software dbSea von Marshall Day Acoustics¹ durchgeführt. Mit dbSea wird die Unterwasserschallausbreitung in Abhängigkeit von Reichweite, Bathymetrie, Temperaturprofil und Salzgehaltsprofil vorhergesagt. Die Software verwendet mehrere numerische Berechnungsmethoden: Parabolgleichungsmethode, Normalmodusmethode und Raytracing-Methode. Jeder Modellierungsansatz ist für eine andere Domäne und einen anderen Frequenzbereich gültig. Die Berechnungssoftware ermöglicht es, zwei Berechnungsmethoden zu kombinieren, indem die niedrigeren Frequenzen mit einer Methode und die höheren Frequenzen mit einer anderen berechnet werden.

Folgende Modellparameter wurden in diesem Projekt verwendet:

¹ Die Berechnungen von COWI wurden in Übereinstimmung mit den von ENS, ASA und CMS veröffentlichten Richtlinien und beruhend auf den Best Practices und modernsten Methoden für die Berechnung von Unterwasserlärm durchgeführt. Darüber hinaus hat COWI sowohl die Eingangsdaten als auch die Ergebnisse kontrolliert. Der Kern der Berechnungssoftware ist jedoch eine „Blackbox“, mit der COWI die Berechnungsergebnisse lediglich anhand von Stichproben kontrollieren kann. COWI übernimmt keine Verantwortung für später festgestellte Störungen in Softwaresystemen, die sich auf die berechneten Ergebnisse und Bewertungen auswirken können. COWI hat die Software dBSea Underwater Noise Modeling, Version v2.3.0 Build 297 64bit verwendet.

- > Geometrie und Netz:
 - > Modellgröße (km): X = 32; Y= 27; Z= 0,05
 - > Auflösung des Ergebnistrasters (m): dx: 20; Dy: 20; dz= 1
 - > Schritt Quellergebnisbereich (m): 20
 - > Anzahl der radiären Transekte pro Quelle:
 - > Bauphase: 24 (15° Slice-Schrittwinkel)
 - > Betriebsphase: 18 (20° Slice-Schrittwinkel)
 - > Anzahl der berechneten Quellpositionen:
 - > Bauphase: 4
 - > Betriebsphase: 10
- > Löser:
 - > Frequenzbereich: 12,5 Hz bis 160 kHz in 1/3-Oktavbändern
 - > LF-Löser: dBSeaPE (Parabolgleichung – PE)
 - > HF-Löser: dBSeaRay (Raytracing – RT)
 - > Übergangsfrequenz zwischen NF- und HF-Lösern: 2500 – 3200 Hz

Ein realistischer WCS-Modellierungsansatz wurde verwendet, um sicherzustellen, dass die Ergebnisse unter den meisten Umständen konservativ bleiben. Daher sind die dargestellten Ergebnisse nicht als Durchschnittswerte, sondern als mögliches Maximum zu betrachten. Die konkreten Entscheidungen, die in Bezug auf diesen Ansatz getroffen wurden, sind in 3.3 und 4.1 beschrieben.

3.2.1 SEL_{cum}-Berechnung

Die neue Richtlinie (Danish Energy Agency, 2022) beschreibt eine Methodik zur Vorhersage des kumulativen SEL, den ein flüchtendes Tier empfängt. Bei dieser Berechnung wird davon ausgegangen, dass das Tier mit einer konstanten Geschwindigkeit von 1,5 m/s in einer geraden Linie von der Quelle flüchtet. Während das Tier flüchtet, empfängt es den Lärm des Schlaghammers mit einem SEL_{SS}, der sowohl vom Ausbreitungsverlust (und damit von der Reichweite bzw. Entfernung zur Quelle) als auch von der Hammerschlagenergie gemäß der Beschreibung in den Rammprotokollen abhängt.

Zu jeder Zeit, t_i [s], beträgt die Entfernung vom Tier zur Quelle:

$$r_i = r_0 + v_f \cdot t_i$$

Gleichung 6

Dabei ist r_0 die Anfangsentfernung des Tiers beim ersten Schlag des Hammers und v_f 1,5 m/s.

Einerseits nimmt der empfangene SEL_{SS} mit zunehmender Entfernung des Tiers ab, da der Übertragungsverlust in der Regel mit der Reichweite zunimmt. Andererseits wird die Hammerenergie erhöht, wenn der Pfahl in den Meeresboden eindringt, was zu einem höheren SEL_{SS} an der Quelle führt. Die drei gleichzeitigen Phänomene (Tierflucht, Ausbreitungsverlust und Rammprotokolle) werden kombiniert, um den SEL_{SS} zu berechnen, den das Tier für alle Schläge empfängt, die mit der Installation eines Monopiles in Verbindung stehen. SEL_{cum} wird demnach wie folgt berechnet:

$$SEL_{cum}: L_{E,cum} = 10 \cdot \log_{10} \sum_{i=1}^N \frac{S_i}{100} 10^{\frac{L_{S,E} - N_{PL,E}(r_i)}{10}}$$

Gleichung 7

Wobei:

- > N die Gesamtzahl der Schläge ist, die pro Monopile erforderlich sind.
- > i der Index für jeden einzelnen Schlag ist, der einberechnet wird.
- > S_i der Prozentsatz der vollen Hammerenergie ist, die für den Schlag i aufgebracht wird.
- > $N_{PL,E}$ der Übertragungsverlust ist, der von der Position des Tiers abhängt.
- > r_i die Reichweite des Tiers während jedes Schlages i wie in Gleichung 6 berechnet ist.

Gleichung 7 ist eine Modifikation von Gleichung 4 (siehe Einleitung) Dies beinhaltet auch die Möglichkeit, dass sich SEL_{SS} bei jedem Schlag i aufgrund des Rammprotokolls und der Bewegung des Tiers ändern kann.

Wie in Abschnitt 4.1 erläutert, umfasst der realistische WCS-Ansatz in diesem Fall:

- > Auswahl des radiären Transekts unter allen berechneten Quellen, mit dem Übertragungsverlust $N_{PL,E}$, der den höchsten SEL_{cum} ergibt.
- > Auswahl des Rammprotokolls, das den höchsten SEL_{cum} zur Folge hat.

3.3 Eingangsdaten

Die Software verwendet zwei Arten von Eingangsdaten: akustische Daten und Umgebungsdaten. Die akustischen Daten enthalten eine Beschreibung der Aktivitäten, ihrer Quellpegel und der Positionen von Quellen und

Empfängern. Zu den Umweltdaten zählen Bathymetrie, Wassertemperatur, Salzgehalt und geotechnische Daten, die aus Untersuchungen in der Region gewonnen wurden. Anhand der Wassersäulendaten werden auch die Schallgeschwindigkeit und die Dämpfung im Wasser geschätzt.

3.3.1 Akustische Daten

Zu den akustischen Daten zählen die Dokumentation der Quellpegel und deren Positionen. Für die Bauphase umfassen diese Daten auch das Hammerprotokoll, das beschreibt, wie sich die Hammerenergie im Laufe der Zeit entwickelt. Die Rammquellpegel stimmen mit den bisherigen Lärmberechnungen überein (Lloyd’s Register, 2018).

Empfänger- und Quellstandorte

Als Quellstandorte wurden die Positionen aus Szenario 5 gewählt. Für die Betriebsphase wurde dieses Szenario gewählt, da in diesem die größten Anlagen zum Einsatz kommen. Die Ergebnisse aus der Betriebsphase flossen anschließend in die Auswahl der Quellenstandorte für die Bauphase ein. Die Quellen, die den niedrigsten $N_{PL,E}$ zeigen, wurden berechnet. Die Standorte dieser Quellen werden in Tabelle4 vorgestellt und in Abbildung 3 veranschaulicht:

Tabelle4 In der Betriebsphase berechnete Quellenkoordinaten. Die fett gedruckten Positionen wurden ebenfalls in der Bauphase berechnet.

WEA-Kennung	Längengrad [°]	Breitengrad [°]	E [m]	N [m]	Tiefe (mMSL)
WEA01	9,871767	55,150438	555556,1	6111879,1	-20,7
WEA02	9,887200	55,104523	556604,5	6106782,2	-16,7
WEA03	9,874854	55,141254	555765,6	6110859,6	-19,0
WEA04	9,884110	55,113705	556394,4	6107801,4	-16,9
WEA05	9,853726	55,090677	554487,7	6105214,8	-19,8
WEA06	9,841380	55,127408	553650,5	6109292,6	-20,5
WEA07	9,844467	55,118225	553859,7	6108273,1	-20,9
WEA08	9,847552	55,109042	554068,8	6107253,6	-19,6
WEA09	9,850636	55,099859	554278,0	6106234,2	-16,8
WEA10	9,882378	55,122986	556270,9	6108832,8	-19,3

Alle Quellen wurden in einer Wassertiefe von 50 % modelliert.

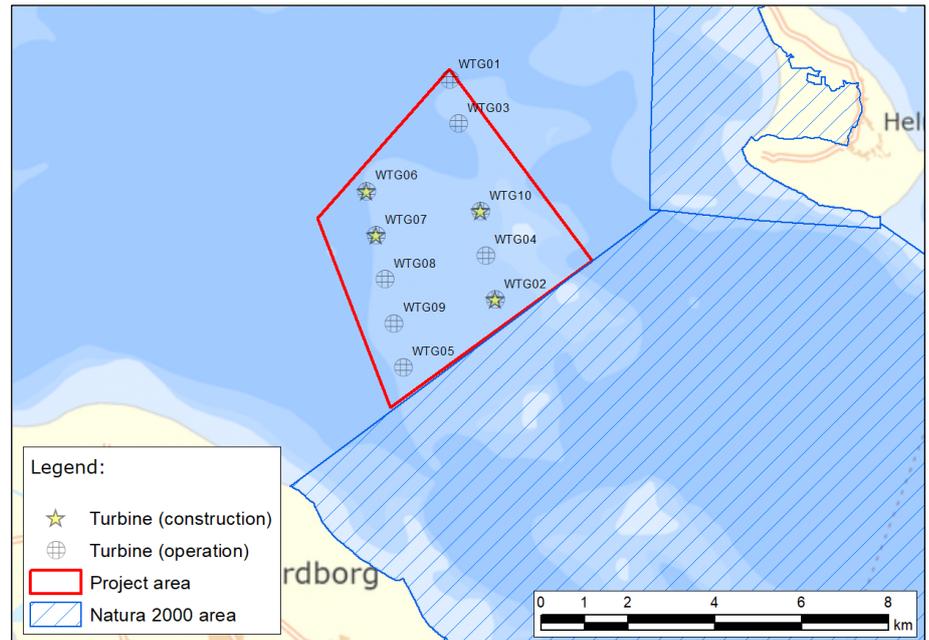


Abbildung 3 Standort der Anlagen für Szenario 5, das bei der Berechnung des Betriebslärms verwendet wird.
Der Baulärm wurde für die WEA 02, 06, 07 und 10 berechnet.

Die Empfängerstandorte machen die gesamte Domäne aus, da davon ausgegangen wird, dass Tiere überall präsent sein können. Die nahegelegenen Natura-2000-Gebiete stellen jedoch Lebensräume dar, die für Schweinswale besonders wichtig sind. Um die Ausbreitung in diesem Bereich genauer zu untersuchen, wurde auch WEA02 in die Berechnungen einbezogen.

Lärm durch Rammarbeiten

Es wird erwartet, dass der Lärm, der durch den Aufprall des Hydraulikhammers auf das metallische Monopile-Fundament erzeugt wird, den höchsten Geräuschpegel aller für dieses Projekt erforderlichen Aktivitäten erzeugen wird. Die vom Hammer erzeugten Schwingungen wandern den Monopile hinunter und werden auf das angrenzende Wasser und den Meeresboden übertragen. Diese Störungen breiten sich über Entfernungen von mehreren Kilometern in alle Richtungen aus.

Der Pegel dieser Quelle hängt von der vom Hammer benötigten Energie, den Eigenschaften des Monopiles selbst und den geotechnischen Bedingungen wie dem Bodenwiderstand des Meeresbodens ab, auf dem der Monopile installiert ist. Der Entwurfsplan für diese Aktivität wird im Bericht zur Rammfähigkeitsanalyse beschrieben (C2WIND, 2022). Dieses Dokument enthält eine Berechnung der zu erwartenden Hammerenergie und der Anzahl der Hammerschläge, die für die Installation der Fundamente des Windparks erforderlich sind. Die Gesamtparameter, die aus diesem Bericht extrahiert wurden, gehen aus Tabelle 5 hervor:

Tabelle 5 Zusammenfassung der Ergebnisse der Rammfähigkeitsanalyse

Parameter	Wert
Monopile-Durchmesser (m)	7,5
Hammermodell	MENCK MHU 3500S
Untersuchte Bohrlochstandorte	5
Maximale Hammerschlagenergie (kJ)	812–2545
Installationszeit pro Monopile (min)	63–92
Anzahl der Schläge pro Monopile	4923–7187

In (C2WIND, 2022) wurden die Rammfähigkeitsanalysen für fünf Bohrlochstandorte innerhalb des Projektgebiets mit unterschiedlichen Bodenverhältnissen und Zieleindringtiefen durchgeführt, was die großen Bereiche in Tabelle 5 erklärt. Für jeden Standort wurde eine andere Rammsequenz entworfen, um den Monopile in seine endgültige Position zu bringen. Die Protokolle zum kontrollierten Einsatz der Hammerenergie für jede Position sind in den Anhängen von (C2WIND, 2022) dargestellt und in Abbildung 4 zusammengefasst.

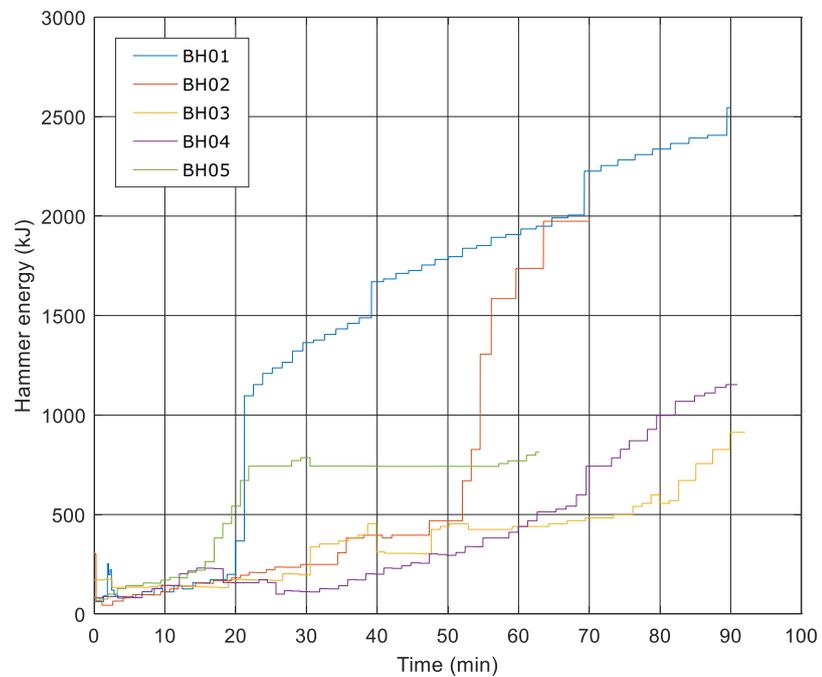


Abbildung 4 Rammprotokolle mit der Hammerenergie in Abhängigkeit von der Zeit für jede der fünf berechneten Bohrlochpositionen. Auszug aus (C2WIND, 2022).

Der Bericht (C2WIND, 2022) enthält außerdem ein weiteres Szenario namens „maximale Hammerenergie“, bei dem eine geringstmögliche Anzahl von Schlägen, die für die Installation eines Pfahls erforderlich sind, Anwendung findet. In diesem Szenario würde der Bediener des Hammers die Hammerenergie nicht erhöhen, sondern eine maximale Hammerenergie von bis zu 3016 kJ ab Rammbeginn verwenden. Im Bericht wird dieses Szenario als konservativ, jedoch als unrealistisch beschrieben. Unter dem Gesichtspunkt des Lärms wäre dieses Szenario nicht hinnehmbar, da die Gefahr besteht, dass die Lärmgrenzwerte überschritten werden, wenn das Sanftanlaufverfahren nicht angewendet wird, dies selbst bei den derzeit verfügbaren wirksamsten Minderungsmaßnahmen.

Der Quellpegel für die maximale Hammerenergie von 2545 kJ ist in Abbildung 5 dargestellt. Er entspricht den bisherigen Berechnungen in (Lloyd's Register, 2018), die einen Gesamt-SEL_{SS} von 220,5 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{m}^2\text{s}$ aufwiesen. Es wurde angenommen, dass die Frequenzen über 2 kHz um 6 dB pro Oktave abnehmen. Dies ist eine Schätzung, die auf den typischen Tendenzen von 2 kHz – 64 kHz beruht, die aus mehreren Hochfrequenzmessungen hervorgehen, die in der Literatur (De Jong & Ainslie, 2008), (Robinson, Theobald, & Lepper, 2012) und (Leunissen & Dawson, 2018) aufgeführt sind.

Die VHF-gewichteten Werte zeigen einen maximalen Pegel von 170 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{m}^2\text{s}$ im 1/3-Oktavband von 10 kHz. Tatsächlich stammt der größte Teil des Beitrags zu den VHF-gewichteten Pegeln aus dem extrapolierten Frequenzbereich. Diese Unsicherheitsquelle wird in Abschnitt 5 Diskussion untersucht.

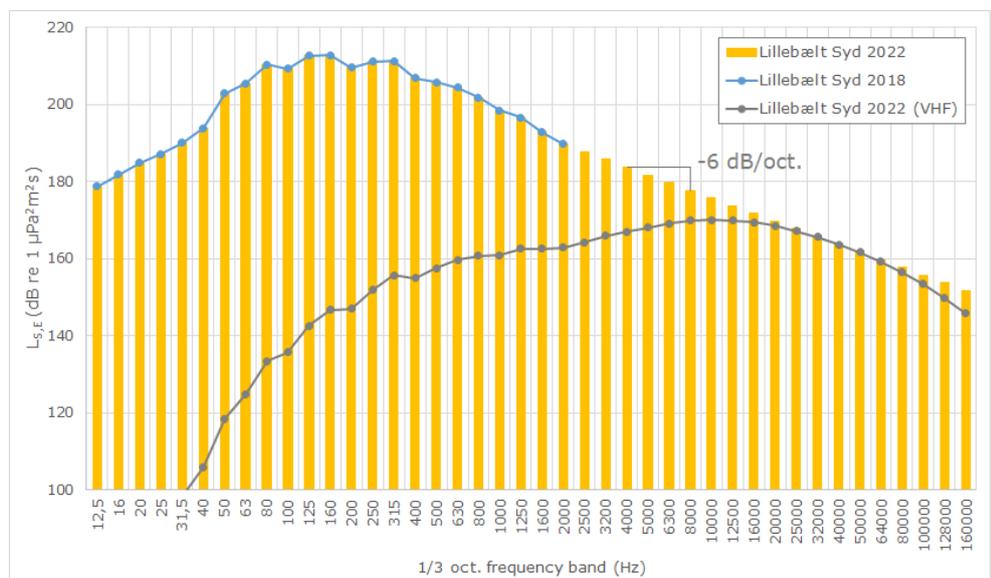


Abbildung 5 Quelle SEL_{SS} bei 1 m. Gelb: ungewichtete Pegel. Blau: ungewichtete Pegel, die im vorherigen Bericht (Lloyd's Register, 2018) verwendet wurden. Grau: VHF-gewichtete Pegel. Ungewichtete Breitbandpegel: 220.5 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{m}^2\text{s}$. VHF-gewichtete Breitbandpegel: 179.8 dB_{VHF} re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{m}^2\text{s}$. Hammerenergie: 2545 kJ.

Betriebslärm der Anlagen

Während des Betriebs stammt der von der Anlage erzeugte Lärm typischerweise aus der Gondel und hat aufgrund der mechanischen Umdrehungen im Getriebe und im Generator eine tonale Charakteristik.

Andere Lärmquellen wie die Winderregung durch Resonanzen in den Rotorblättern und im Turm können ebenfalls zur Emission von Lärm beitragen. Dieser konstruktionsbasierte Lärm wird vom Turm nach unten und über das Fundament in das umgebende Wasser übertragen.

Die meisten berichteten Messungen zeigen hauptsächlich reine Tonanteile unterhalb von 1 kHz mit niedrigeren Pegeln bei anderen Frequenzen, typischerweise 20 dB unter den tonalen Spitzen. Allerdings mangelt es in der Literatur derzeit an Messungen für große Anlagen, da die meisten veröffentlichten Messungen für Anlagen unter 6 MW gelten. Die in der Berechnung verwendeten Quellpegel wurden durch Extrapolation von Messpegeln kleinerer Anlagen ermittelt. Die bei dieser Beurteilung verwendeten Referenzen umfassen (Tougaard, Hermannsen, & Madsen, 2020) und (ITAP GmbH, 2006). Diese Pegel gehen aus Abbildung 6 hervor.

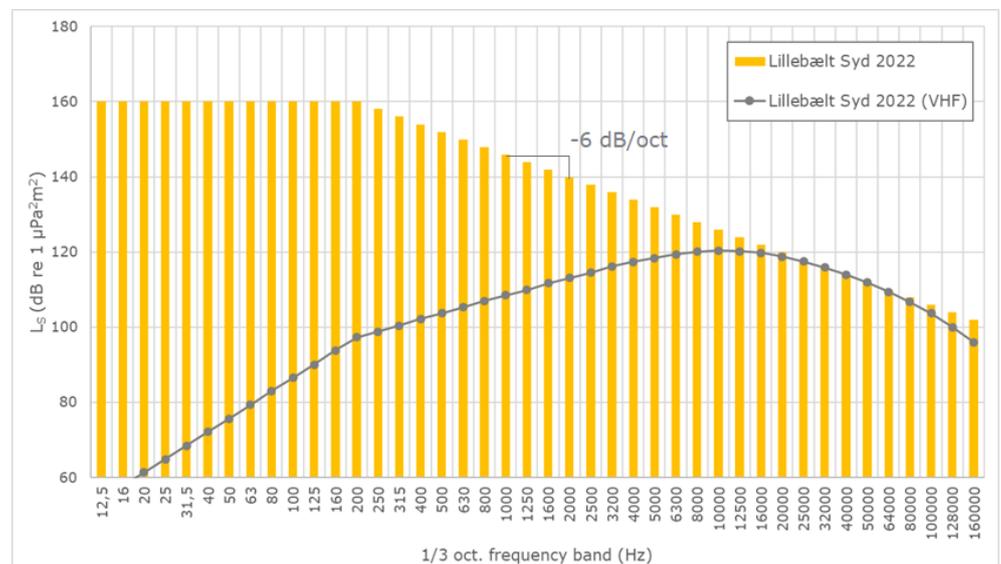


Abbildung 6 Quelle SPL bei 1 m. Gelb: ungewichtete Pegel. Grau: VHF-gewichtete Pegel. Ungewichtete Breitbandpegel: $171,7 \text{ dB re } 1 \mu\text{Pa}^2\text{m}^2$. Leistung der Anlage: 15 MW.

Hintergrundgeräusche

Die Basisschallpegel in einer Entfernung von weniger als 5 km vom Projektgebiet wurden 2018 gemessen und gehen aus (Nielsen, Sørensen, & Tougaard, 2019) hervor. Im Frequenzbereich von 10 Hz bis 10 kHz schwanken die Pegel zwischen 80 und 107 dB re $1 \mu\text{Pa}^2$.

3.3.2 Umweltdaten

Die Umweltdaten werden in der Berechnungssoftware verwendet, um die Ausbreitung von Schall im Wasser zu modellieren. Die Meerwasser- und Meeresbodenverhältnisse entsprechen den bisherigen Lärmberechnungen (Lloyd's Register, 2018).

Bathymetrie

Die Bathymetrie des Modells und die Küstenlinie sind in Abbildung 7 dargestellt. Sie erstreckt sich über eine Fläche von $32 \times 27 \text{ km}$ um das Projektgebiet. Das Netz ist nicht einheitlich und enthält ein größeres Detail im Projektbereich. Die maximale Rastergröße (Abstand zwischen

Datenpunkten) beträgt 50 m außerhalb des Projektgebiets und 5 m innerhalb des Projektgebiets.

Die Bathymetrie wurde auf Grundlage der folgenden Datensätze erstellt:

- > Farvandsvæsenet (Auflösung: 50 x 50 m).
- > Detaillierte Vermessung des Projektgebiets (Auflösung: 5 x 5 m).
- > GeoDanmark (Datafordeler).

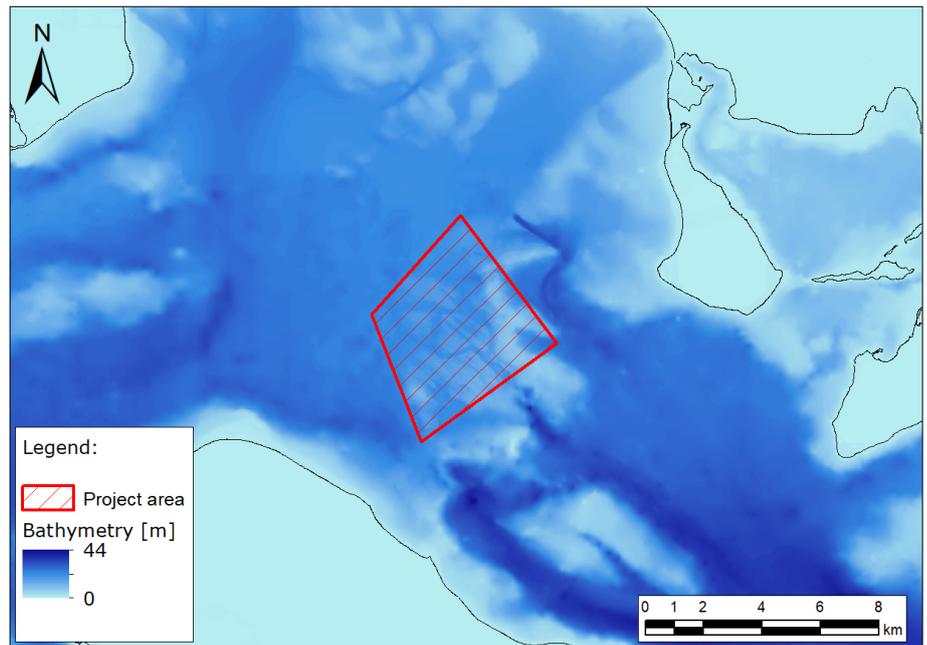


Abbildung 7 Bathymetrie-Modell. Tiefenreferenz DVR90.

Eine detailliertere Beschreibung der bathymetrischen Datenerhebung geht aus dem Bericht „Hydrografi og vandkvalitet report“ von COWI (UVP-Anhang F) hervor.

Der Tidenhub wurde bei den Berechnungen vernachlässigt, da keine signifikanten Veränderungen der Lärmergebnisse zu erwarten sind.

Meerwasserbedingungen

Das aus (Lloyd’s Register, 2018) entnommene Schallgeschwindigkeitsprofil wurde auf Grundlage historischer Messungen von Temperatur und Salzgehalt in den Gewässern südlich von Sønderborg für die Monate März bis April geschätzt.

Die mittlere Temperatur liegt zwischen 6 °C an der Oberfläche und 4 °C am Meeresboden. Der mittlere Salzgehalt liegt zwischen 16 ‰ an der Oberfläche und 18 ‰ am Meeresboden. Beruhend auf diesen Werten wurde das Schallgeschwindigkeitsprofil in Abbildung 8 in den Berechnungen verwendet.

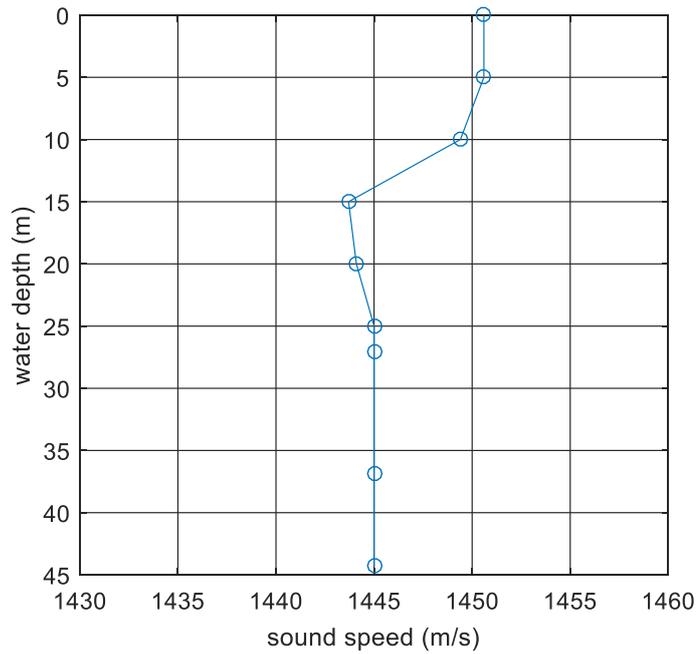


Abbildung 8 Abgeleitetes Schallgeschwindigkeitsprofil (m/s) aus (Lloyd’s Register, 2018).

Geotechnische Daten

Der Meeresboden wurde anhand von Daten modelliert, die im Rahmen geophysikalischer Untersuchungen des Gebiets gesammelt wurden, siehe Beschreibung in (Lloyd’s Register, 2018). Es wurde derselbe Ansatz wie bei den vorherigen Berechnungen verfolgt, während die folgenden Parameter im Modell verwendet wurden:

Tabelle 6 Bei den Berechnungen verwendete geotechnische Daten

Tiefe der Meeresbodenschicht [m]	Material	Geophysikalische Parameter:
0 - 2	Sand	$C_p = 1630 \text{ m/s}$ $\rho = 1850 \text{ kg/m}^3$ $\alpha = 0,4 \text{ dB}/\lambda$
2 - ∞	Moräne	$C_p = 1900 \text{ m/s}$ $\rho = 2050 \text{ kg/m}^3$ $\alpha = 0,3 \text{ dB}/\lambda$

Die Substratuntersuchung wird in „Marin habitatkortlægning“ (UVP-Anhang C) von COWI vorgestellt.

4 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Prognose beschrieben. Die grafischen Ergebnisse sind jedoch alle in Anlage A: Lärmkarten zusammengefasst und eine Zusammenfassung der Ergebnisse geht aus Abschnitt 5 hervor.

4.1 Bauphase

Das in Abschnitt 3.2.1 beschriebene Verfahren zur Berechnung des kumulativen SEL wurde unter Verwendung des mit dBSea berechneten Schallfeldes für die vier Quellstandorte und der übermittelten Rammprotokolle für die fünf in Abschnitt 3.3.1 genannten Bohrungen implementiert.

Für jede Quelle wurde die Ausbreitung in 24 radiären Richtungen berechnet, die gleichmäßig um 15° voneinander getrennt waren. Jede Richtung kann den Fluchtweg eines flüchtenden Schweinswals darstellen. Daher impliziert der WCS-Ansatz die Auswahl der Richtung, die den höchsten SEL_{cum} ergibt. Die 96 berechneten Radialen (24 pro Quelle) werden in Abbildung 9 dargestellt, wobei das ausgewählte Transektergebnis rot hervorgehoben ist. Die Werte zwischen den berechneten Bereichen wurden linear interpoliert.

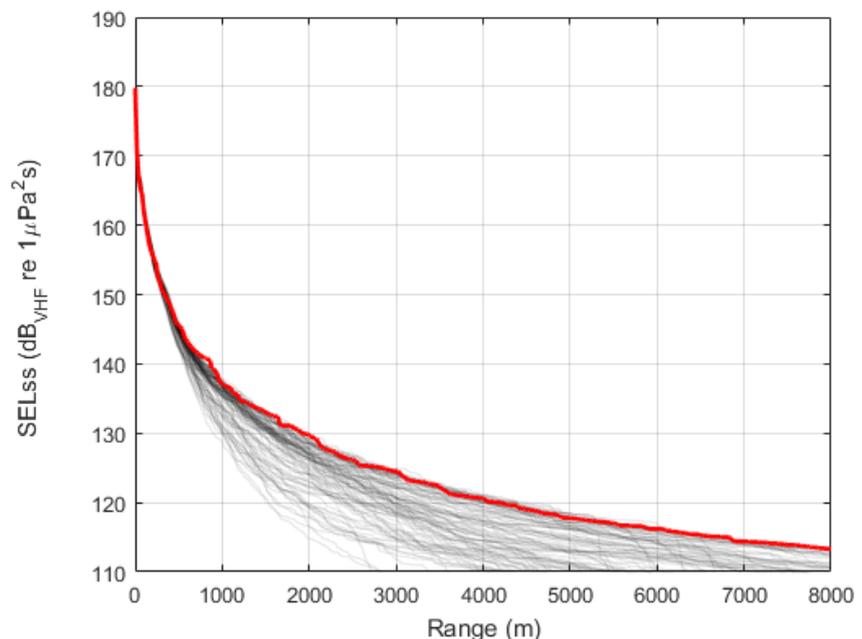


Abbildung 9 Zusammenstellung von SEL_{ss} als Funktion der Reichweite für die 96 berechneten Transekte. Rot: radiäres Transekt WEA10, 270°, der den höchsten SEL_{cum} ergibt.

Das gewählte radiäre Transekt gehört zur WEA10-Position in 270°-Richtung (West). Ein Schweinswal, der in diese Richtung flieht, empfängt einen höheren SEL_{cum} als ein anderer Schweinswal, der in eine der anderen 95 Richtungen flieht. Dieses radiäre Transekt geht aus Abbildung 10 hervor:

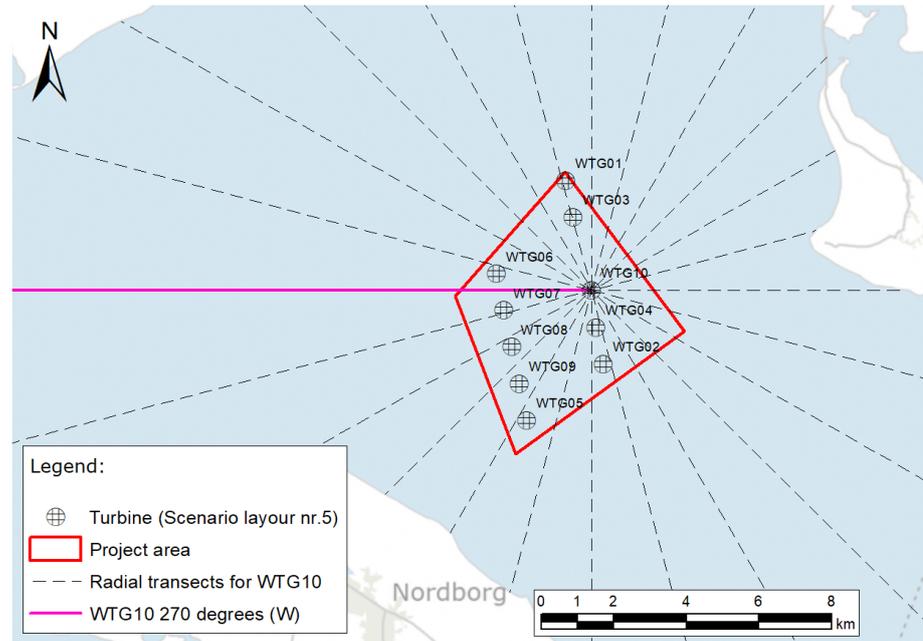


Abbildung 10 Radiäres Transekt, der in den Berechnungen verwendet wurde.

Alle Rammprotokolle wurden ebenfalls in die Berechnungen einbezogen und das Protokoll für BH03 ergab den höchsten SEL_{cum} . Daher wird der Rest der Prognose auf Grundlage des radiären Transekts 270° von WEA10 und dem BH03-Protokoll erstellt.

Im Referenzfall wird die Ausgangsposition des Schweinswals gemäß der Richtlinie bei 200 m angenommen. Ohne jegliche Minderung würde dies zu einem $LE_{cum} = 164,3 \text{ dB}_{VHF} \text{ re } 1\mu\text{Pa}^2\text{s}$ führen. Unter Berücksichtigung der PTS von $155 \text{ dB}_{VHF} \text{ re } 1\mu\text{Pa}^2\text{s}$ wäre eine Dämpfung von mindestens 9,3 dB an der Quelle erforderlich.

Beruhend auf der Schwere des Überschusses wird geschätzt, dass ein einziger großer Blasenschleier den Lärmpegel auf einen Wert unterhalb des Grenzwerts senkt. Messungen an einem einzelnen großen Blasenschleier ergeben eine Gesamtdämpfung von mindestens 10 dB (Bellmann, 2014). Der Konzessionär hat sich für die Verwendung eines doppelten großen Blasenschleiers entschieden, für den Dämpfungen zwischen 14 und 18 dB gemeldet wurden (Bellmann, 2014).

Unter Berücksichtigung einer Senkung um 15 dB wurden die Berechnungen im Rahmen der geplanten Bausache wiederholt. Die Ausgangsposition des Tiers wurde so lange wiederholt, bis die PTS erneut erreicht wurde, diesmal in einer Entfernung von 75 m von der Quelle. Diese Berechnung als Funktionsbereich ist dargestellt in Abbildung 11:

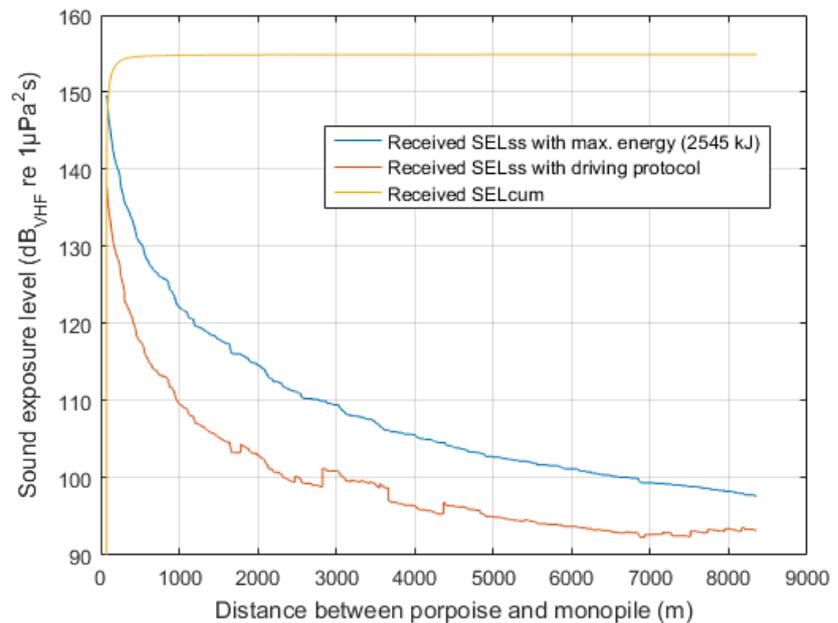


Abbildung 11 Berechnung von SEL_{cum} unter abgemilderten Bedingungen (15 dB) für einen Schweinswal mit einer anfänglichen Entfernung von 75 m. Blau: Empfangener SEL_{ss} , wenn alle Hammerschläge mit voller Energie (2945 kJ) ausgeführt wurden. Rot: Korrektur des blauen Plots mit dem aktuellen Rammprotokoll BH03. Gelb: SEL_{cum} , berechnet gemäß dem roten Plot, wie er vom Tier empfangen wird.

Die Abstände zu den Schwellenwerten (DTT) für Schweinswale in der geplanten Bausache sind dargestellt in Tabelle 7:

Tabelle 7 Schwellenwertbereiche einschließlich Risikominderung für die VHF-Gruppe. Die Schwellenwerteinheiten sind dB re $1\mu Pa^2s$ für PTS und TTS (SEL_{cum}) und dB re $1\mu Pa$ für die Verhaltensstörung (SPL_{125ms})

Gruppe	PTS	DTT	TTS	DTT	Verhaltensstörung	DTT
VHF	155	75 m	140	740 m	103	12,5 km

Abbildung 20 in Anhang A zeigt die Pufferbereiche um zwei berechnete Fundamente (WEA2 und WEA10) auf einer Karte an. Bei Schweinswalen, die sich während des Aufpralls in diesen Puffern befinden, besteht die Gefahr, dass der entsprechende Grenzwert überschritten wird.

Zu beachten ist, dass die Puffer für die beiden Fundamente zusammen im selben Diagramm dargestellt werden, auch wenn die Installationsereignisse nicht gleichzeitig stattfinden.

Die DTT für Fische, Fischeier und Fischlarven im Rahmen der geplanten Bausache sind in Tabelle 8 dargestellt:

Tabelle 8 Schwellenwertbereiche einschließlich Risikominderung für die ungewichtete Gruppe.

Auswirkung	SEL_{ss} (dB re 1µPa_{2s})²	DTT (m)
<i>Gefahr von Organschäden/Tod von Fischen</i>	174	300 m
<i>Schäden/Tod von Fischeiern und Fischlarven</i>	187	50 m

4.2 Betriebsphase

Der Anlagenlärm der 10 Windenergieanlagen bei Szenario 5 wurde berechnet. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Abbildung 21 und

Abbildung 22 Betriebslärmkarte: SP in Anlage A: Lärmkarten dargestellt.

Da es sich um einen für VHF gewichteten Schalldruckpegel handelt, liegen die Pegel kaum über dem Hintergrundpegel wie in

Abbildung 22 Betriebslärmkarte: SP. Die Schwelle für Verhaltensstörungen von $L_{p,rms,125ms}=103$ dB_{VHF} re 1 µPa ist in Rosa bei einer Entfernung von 200 m oder weniger markiert. Aufgrund der Frequenztrennung zwischen dem Emissions- und dem Hörbereich kann es sein, dass der Schweinswal das Anlagengeräusch erst in relativer Nähe des Windparks wahrnimmt.

Die niedrigen Werte bedeuten auch, dass es unwahrscheinlich ist, dass schädliche Grenzwerte erreicht werden. Bei 160 m oder weniger müsste ein Schweinswal über einen Zeitraum von 24 Stunden stationär bleiben, um den Wert für die TTS bei 153 dB_{VHF} re 1 µPa²s zu erreichen. Für die PTS bei 173 dB_{VHF} re 1 µPa²s müsste sich der statische Empfänger in einer Entfernung von 10 m oder weniger von einer Anlage befinden. Der kumulative 24-Stunden-SEL ist in Abbildung 21 dargestellt.

Es ist nicht zu erwarten, dass die ungewichteten Lärmgrenzwerte für Fische ausgelöst werden.

5 Diskussion

Für diese Berechnung gibt es mehrere unsichere Quellen. Diese werden nachstehend in zwei Kategorien vorgestellt: Eingangsdaten und Modell.

Unsicherheiten im Zusammenhang mit den Eingangsdaten:

- > Die Quellenmodellierung ist einer der wichtigsten Faktoren, die die Lärmergebnisse beeinflussen. Bei dieser Berechnung wird eine Reihe von Annahmen verwendet, die auf Literatur und früherer Berufserfahrung basieren, um die Quellpegel zu schätzen. Dennoch kann die tatsächliche Quelle aufgrund unvorhergesehener Umstände von diesen Annahmen abweichen. Um diese Unsicherheit zu minimieren, wurden die verwendeten Quelldaten umfassend mit der vorhandenen Literatur verglichen und es wurde immer eine konservative Option gewählt.

- > In der Bauphase wurden die Quellpegel aus dem Bericht (Lloyd's Register, 2018) von LR in die Berechnungen einbezogen. Diese beruhten auf empirischen Erfahrungen für die ausgelegte Hammerenergie und Pfahlgröße. Die spektralen Informationen oberhalb von 2 kHz wurden auf Grundlage bestehender Messungen des Hochfrequenzbereichs extrapoliert.
- > Für die Betriebsphase wurde der Quellpegel aus bestehenden Messungen weniger leistungsstarker Anlagen extrapoliert. Der Breitbandpegel von 171,4 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{m}^2$ wurde überschätzt, um sicherzustellen, dass alle typischen Emissionsfrequenzen beim extrapolierten Pegel von 160 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{m}^2$ angeregt werden.
- > Der allgemeine Mangel an Messdaten bei hohen Frequenzen stellt eine Unsicherheit dar, die sich mit zunehmender Verfügbarkeit neuer Informationen verringern wird. Bis dahin kann der WCS-Ansatz, der den vorhandenen Daten Sicherheitsmargen hinzufügt, zu Ergebnissen führen, die den tatsächlichen Lärmpegel überschätzen.
- > Auch Abweichungen bei anderen Eingangsdaten (Bathymetrie, Wassersäule und geotechnische Untersuchungen) können einen wichtigen Einfluss auf die Ergebnisse haben. Es wurde besonders darauf geachtet, dass die möglichen Abweichungen keine Überschreitungen der Lärmgrenzwerte auslösen.

Unsicherheiten im Zusammenhang mit dem Modell:

- > Die Variabilität des Meeresbodens entlang des Transekts wurde nicht modelliert und es wird angenommen, dass die geotechnischen Parameter mit der Entfernung konstant sind. Dies impliziert, dass z. B. Reflexionen von Felsriffen für einige Transekte vernachlässigt werden könnten.
- > Die in der neuen Richtlinie (Danish Energy Agency, 2022) beschriebene Berechnung des kumulativen SEL geht von einem Tier aus, das mit einer konstanten Geschwindigkeit von 1,5 m/s in einer geraden Linie von der Quelle flüchtet. Bei einigen Tieren ist diese Fluchtroute möglicherweise nicht verfügbar. Zum Beispiel kann es sein, dass das Tier auf Land stößt, bevor der Rammvorgang beendet ist. Die Berechnung zeigt jedoch, dass die ersten 1200 m 95 % der empfangenen Dosis ausmachen und keine der Quellpositionen näher als 2 km von der Küste entfernt ist.
- > Weitere Unsicherheiten der Berechnungsmethode entsprechen den Annahmen des Modells: flache Meeresoberfläche/Rauheit, Wegfall von Scherwellen und Schwingungen im Meeresboden. Sie sind in der wissenschaftlichen Dokumentation beschrieben, die von dBSea Ltd., UK herausgegeben wurde.

6 Schlussfolgerung

Eine Reihe von Unterwasserlärmrechnungen des Windparks Lillebælt Syd wurden mit dBSea durchgeführt. Die Eingangsdaten für das

Lärmmodell und eine Beschreibung der Berechnungsmethode werden gemäß den Anforderungen der neuen Richtlinie (Danish Energy Agency, 2022) vorgestellt. Die Ergebnisse der Berechnung und die Lärmkonturkarten sind ebenfalls in diesem Dokument enthalten. Die abschließende Bewertung der Meeresfauna ist jedoch im UVP-Hauptdokument (COWI, 2022) enthalten, dem dieses Dokument als technischer Anhang beigelegt ist.

Für die Bauphase (Einrammen von Pfählen) wird geschlussfolgert, dass die Minderungsmaßnahmen erforderlich sind, um den PTS-Wert für Schweinswale für Typ-I-Geräusche (Impulsgeräusche) ($155 \text{ dB}_{\text{VHF}} \text{ re } 1 \mu\text{Pa}^2\text{s}$) nicht zu überschreiten. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Minderung um 10 dB als ausreichend eingeschätzt wird, um die Anforderungen bezüglich der kumulativen SEL-Werte zu erfüllen. Es wird erwartet, dass diese Minderung durch einen doppelten Blasenschleier (DBBC) erreicht werden kann, es könnten jedoch auch andere Methoden verwendet werden, solange sie eine Minderung um mindestens 10 dB im relevanten Frequenzbereich (1 bis 150 kHz) ermöglichen. Es wurde eine Berechnung mit einem DBBC unter der Annahme einer Dämpfung von 15 dB aufgenommen.

Für die Betriebsphase (Anlagenlärm) wird geschlussfolgert, dass die prognostizierten Werte keine Verhaltensstörung bei Schweinswalen auslösen, außer in einer Entfernung von weniger als 200 m von den Fundamenten. Innerhalb dieser Entfernung würde ein Schweinswal nur dann eine TTS bei $153 \text{ dB}_{\text{VHF}} \text{ re } 1 \mu\text{Pa}^2\text{s}$ erreichen, wenn er über einen Zeitraum von 24 Stunden stationär bleibt. Unter ähnlichen Bedingungen würde die PTS bei $173 \text{ dB}_{\text{VHF}} \text{ re } 1 \mu\text{Pa}^2\text{s}$ erst in 10 m Entfernung erreicht werden.

7 Referenzen

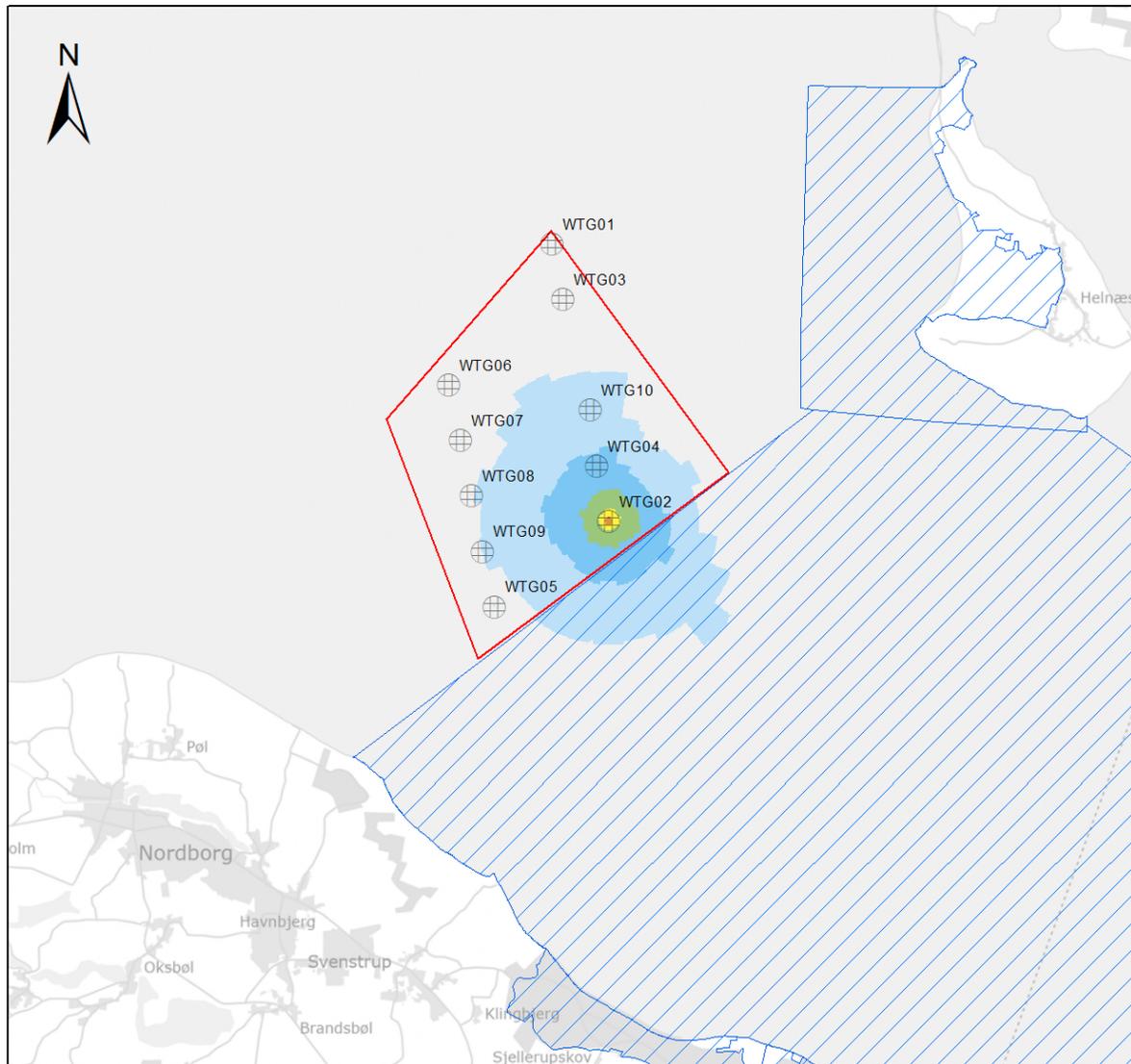
- Andersson, M. A. (2016). *A framework for regulating underwater noise during pile driving*. Stockholm: Swedish Environmental Protection Agency.
- Bellmann, M. A. (2014). Overview of existing Noise Mitigation Systems for reducing Pile-Driving Noise. *Inter-noise*. Melbourne.
- C2WIND. (2022). *Lillebælt Syd Offshore Wind Farm - Initial Monopile Design and driveability - Alm&Hamre (20010-7)*.
- COWI. (2022). *Lillebælt Syd Vindmøllepark - Miljøkonsekvensrapport for vindmøllepark og kabler til havs (In Danish)*.
- Danish Energy Agency. (2022). *Guidelines for underwater noise, Prognosis for EIA and SEA*.
- De Jong, C., & Ainslie, M. A. (2008). Underwater radiated noise due to the piling for the Q7 Offshore Wind Park. *Euronoise*. Paris.
- Energistyrelsen. (2016). *Guideline for underwater noise - Installation of impact-driven piles*.
- ITAP GmbH. (2006). *Measurement of underwater noise emitted by an offshore wind turbine at Horns Rev*.
- Kinsler, L. E. (1982). *Fundamentals of acoustics, (3rd edition)*. Wiley.

- Leunissen, E. M., & Dawson, S. M. (2018). Underwater noise levels of pile-driving in a New Zealand harbour, and the potential impacts on endangered Hector's dolphins. *Marine Pollution Bulletin*, 195-204.
- Lloyd's Register. (2018). *Piling noise prediction - Lillebælt Syd OWF*.
- Nielsen, M. L., Sørensen, P. M., & Tougaard, J. (2019). *Undervandsstøj i Indre Danske farvande 2018 (In Danish)*. Aarhus Universitet.
- Robinson, S., Theobald, P. D., & Lepper, P. A. (2012). Measurement of underwater noise generated from marine piling during construction of a UK offshore windfarm. *Proceedings of the 11th European Conference on Underwater Acoustics*. Edinburgh.
- Tougaard, J., Hermannsen, L., & Madsen, P. T. (2020). How loud is the underwater noise from operating offshore wind turbines? *The Journal of the Acoustical Society of America*, 148, 2885.

Anlage A: Lärmkarten

Liste der Abbildungen:

Abbildung 12 Baulärmkarte: Ungemilderter SEL_{SS} an Position WEA02	31
Abbildung 13 Baulärmkarte: Ungemilderter SEL_{SS} an Position WEA06	32
Abbildung 14 Baulärmkarte: Ungemilderter SEL_{SS} an Position WEA07	33
Abbildung 15 Baulärmkarte: Ungemilderter SEL_{SS} an Position WEA10	34
Abbildung 16 Baulärmkarte: Abgemilderter (15 dB) SEL_{SS} an Position WEA02	35
Abbildung 17 Baulärmkarte: Abgemilderter (15 dB) SEL_{SS} in Position WEA06	36
Abbildung 18 Baulärmkarte: Abgemilderter (15 dB) SEL_{SS} in Position WEA07	37
Abbildung 19 Baulärmkarte: Abgemilderter (15 dB) SEL_{SS} an Position WEA10	38
Abbildung 20 Baulärmkarte: Puffer zu den Hauptschwellen in Abhängigkeit von der Ausgangsposition des Schweinswals.	39
Abbildung 21 Betriebslärmkarte: $SEL_{cum\ 24h}$	40
Abbildung 22 Betriebslärmkarte: SPL	41



Project:
 A234064-004G
 Lillebælt Syd OWF

Noise propagation from:
 Impact pile driving (2545 kJ)

Sources:
 Sc.5_500m_L165

Scenario:
 Reference case (Unmitigated)

Scale (A4): 1:100.000



Legend:

- Turbine
- Project area
- Natura 2000 area

SEL_{SS} [dB] re 1 µPa²·s,
 Broadband - VHF - max-over-depth.

	< 120		160 - 170
	120 - 130		170 - 180
	130 - 140		180 - 190
	140 - 150		190 - 200
	150 - 160		> 200

Doc.nr : A234064-004G.03-0
 Date : 28-10-2022
 Prepared : FMSZ
 Checked : MNLR
 Approved : MEAS



Abbildung 12 Baulärmkarte: Ungemilderter SEL_{SS} an Position WEA02

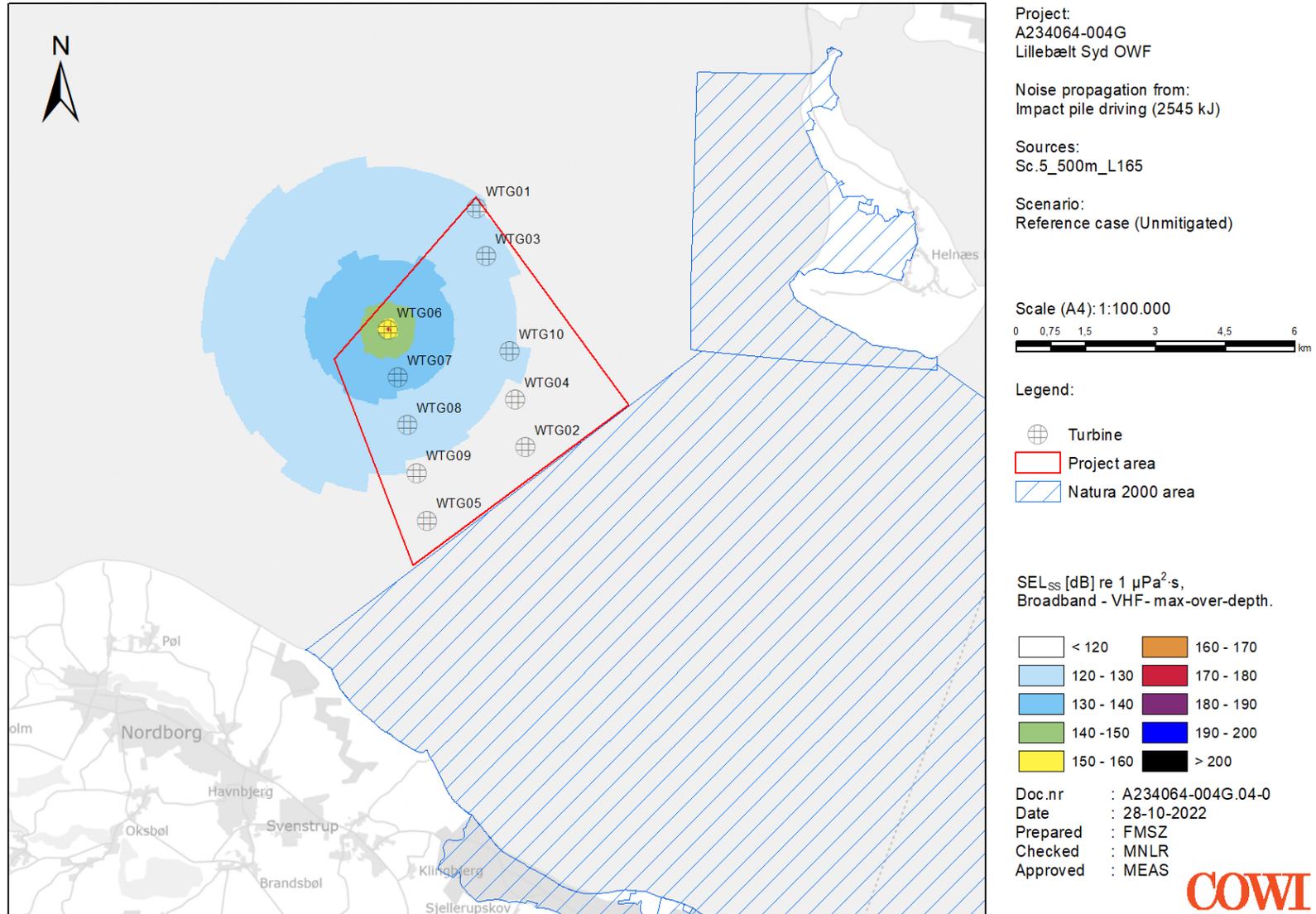
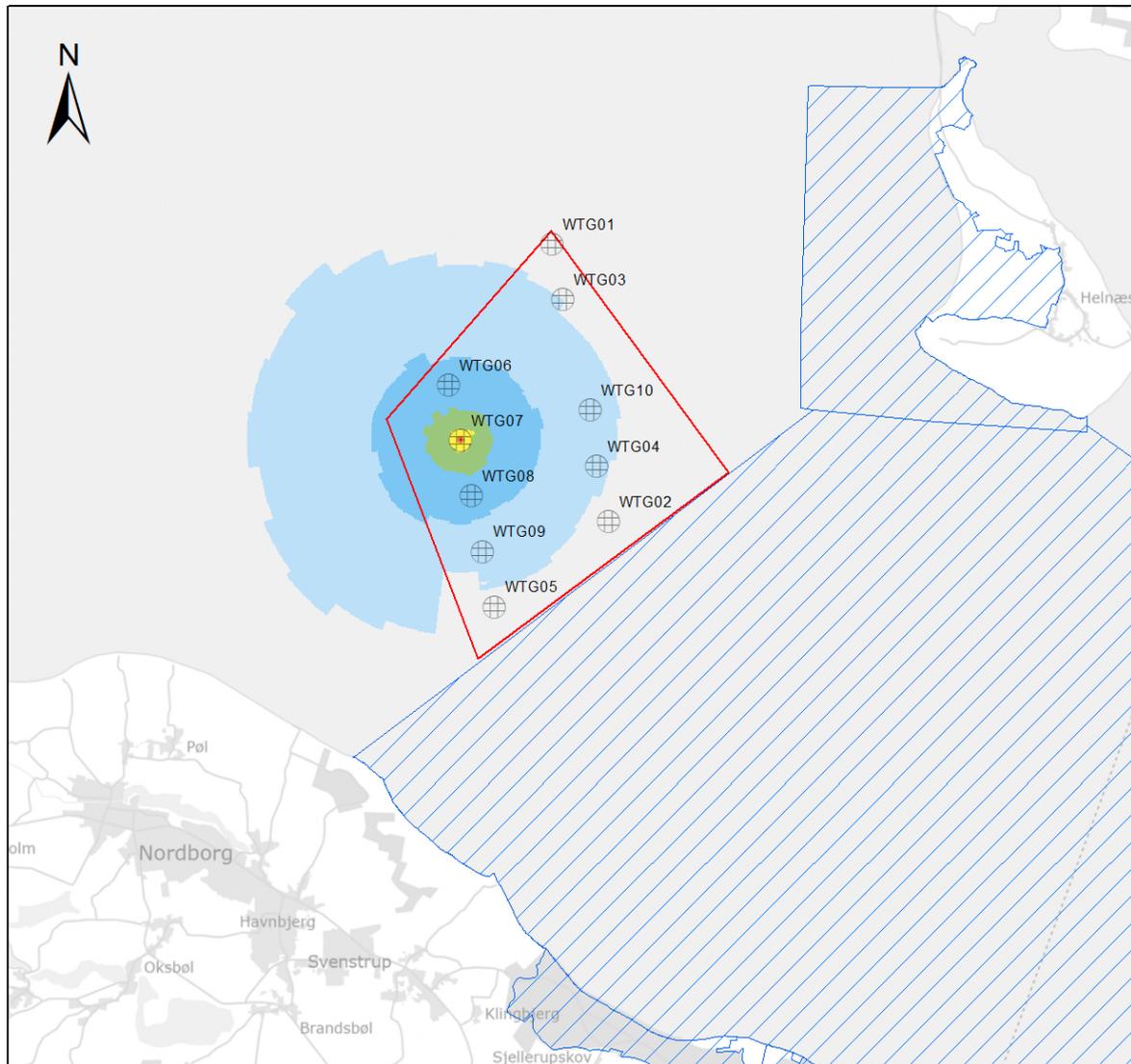


Abbildung 13 Baulärmkarte: Ungemilderter SEL_{ss} an Position WEA06



Project:
 A234064-004G
 Lillebælt Syd OWF

Noise propagation from:
 Impact pile driving (2545 kJ)

Sources:
 Sc.5_500m_L165

Scenario:
 Reference case (Unmitigated)

Scale (A4): 1:100.000



Legend:

- Turbine
- Project area
- Natura 2000 area

SEL_{SS} [dB] re 1 μPa²·s,
 Broadband - VHF - max-over-depth.

	< 120		160 - 170
	120 - 130		170 - 180
	130 - 140		180 - 190
	140 - 150		190 - 200
	150 - 160		> 200

Doc.nr : A234064-004G.05-0
 Date : 28-10-2022
 Prepared : FMSZ
 Checked : MNLR
 Approved : MEAS



Abbildung 14 Baulärmkarte: Ungemilderter SEL_{SS} an Position WEA07

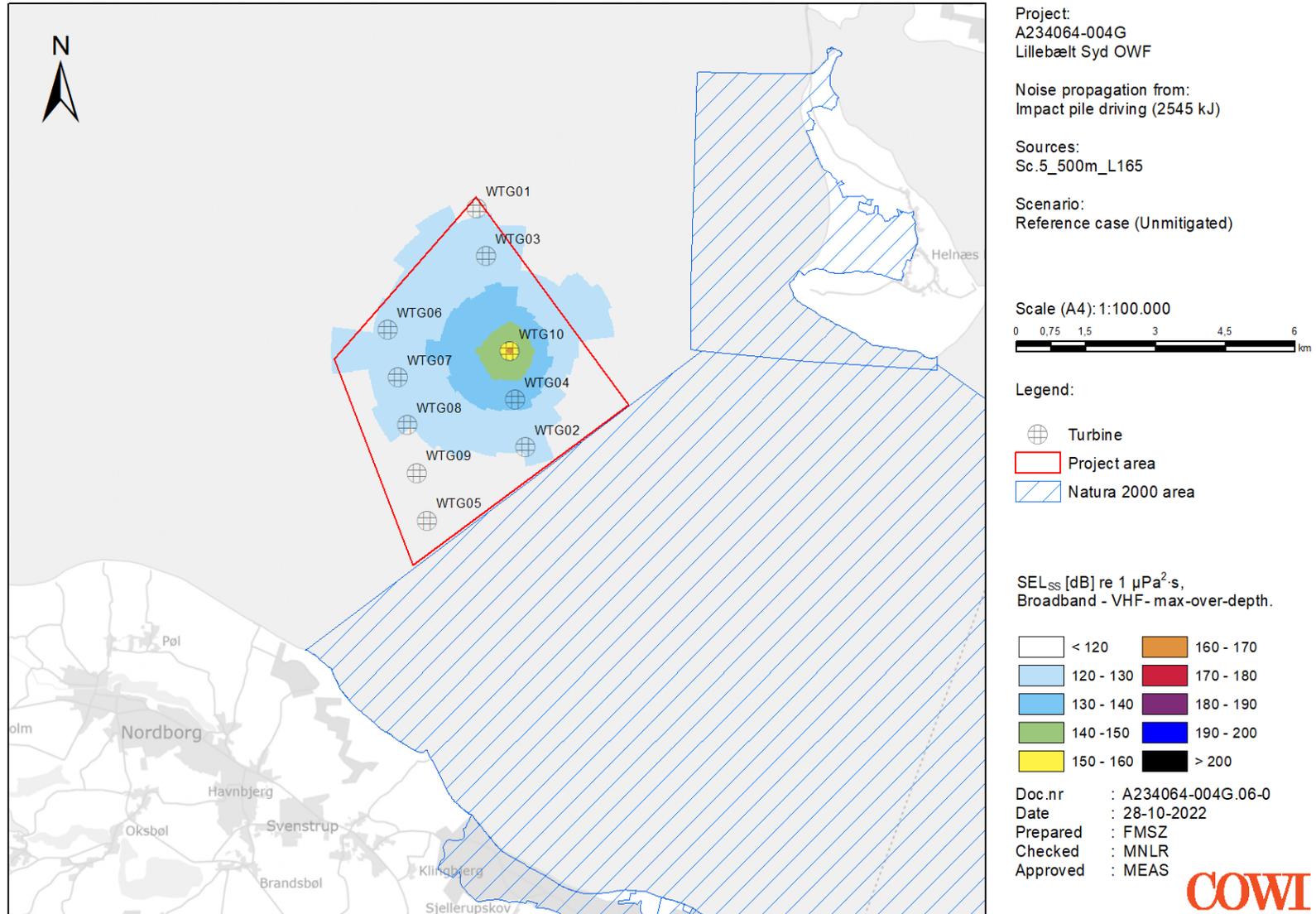


Abbildung 15 Baulärmkarte: Ungemilderter SEL_{SS} an Position WEA10

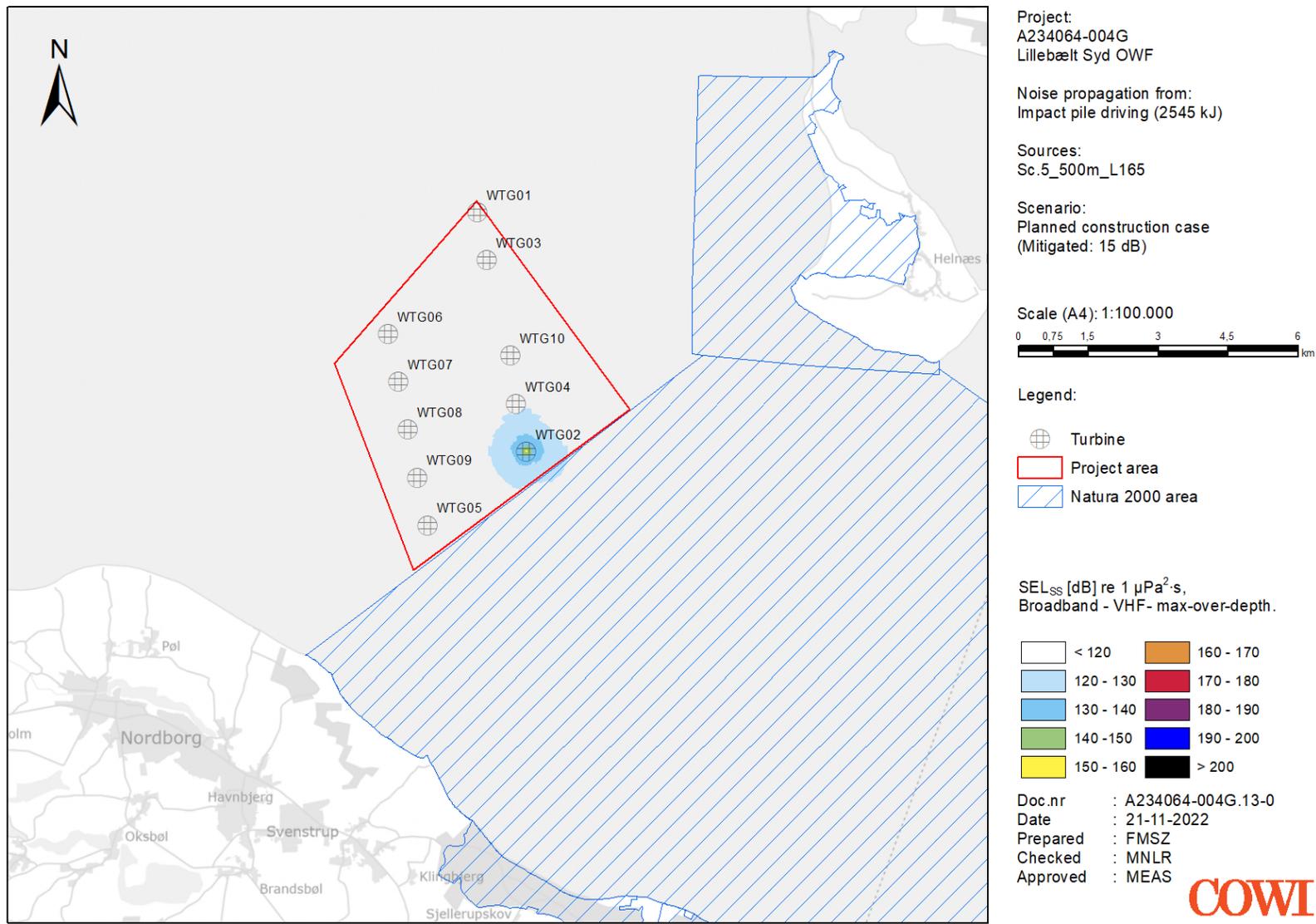


Abbildung 16 Baulärmkarte: Abgemilderter (15 dB) SEL_{SS} an Position WEA02

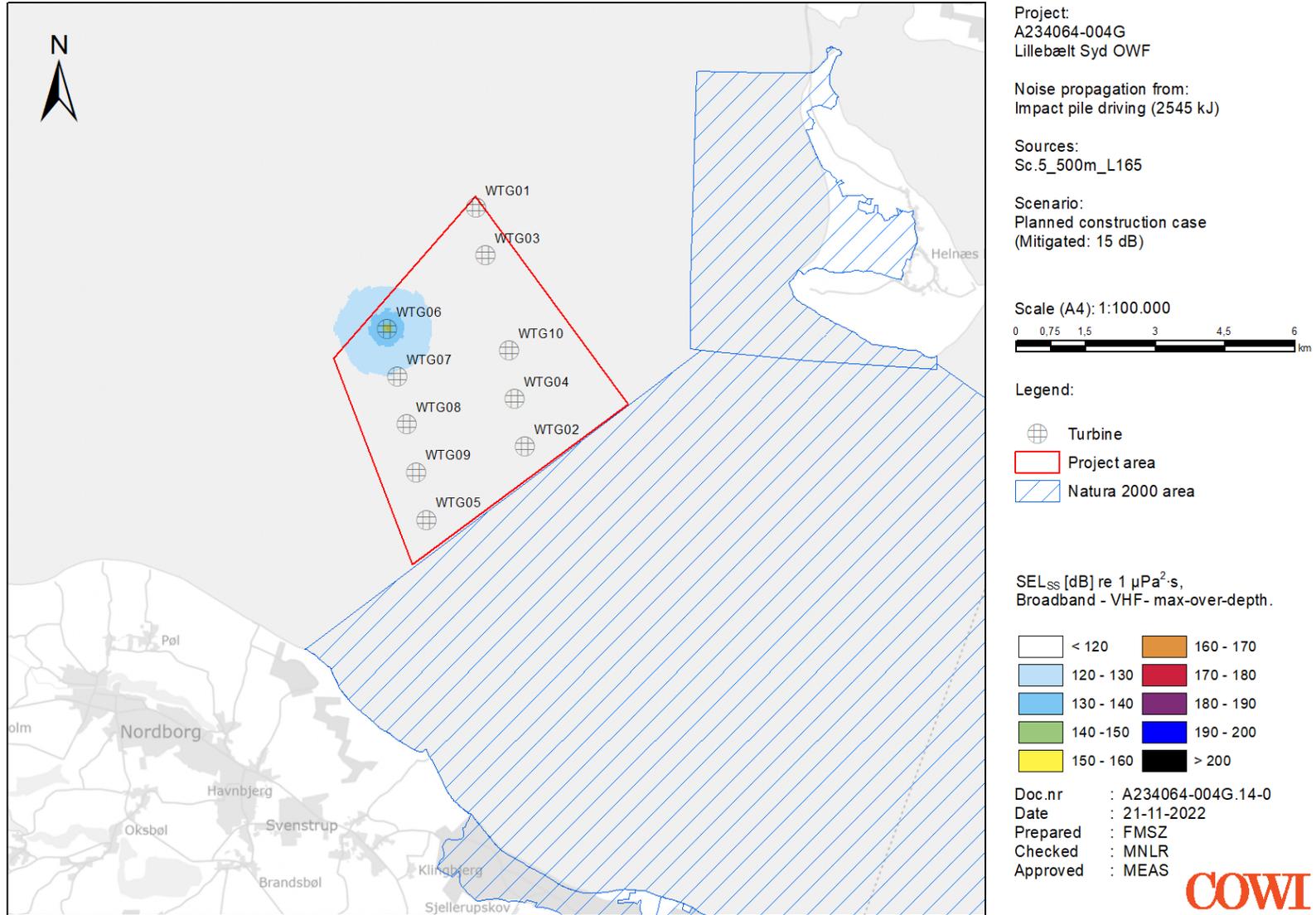


Abbildung 17 Baulärmkarte: Abgemilderter (15 dB) SEL_{ss} in Position WEA06

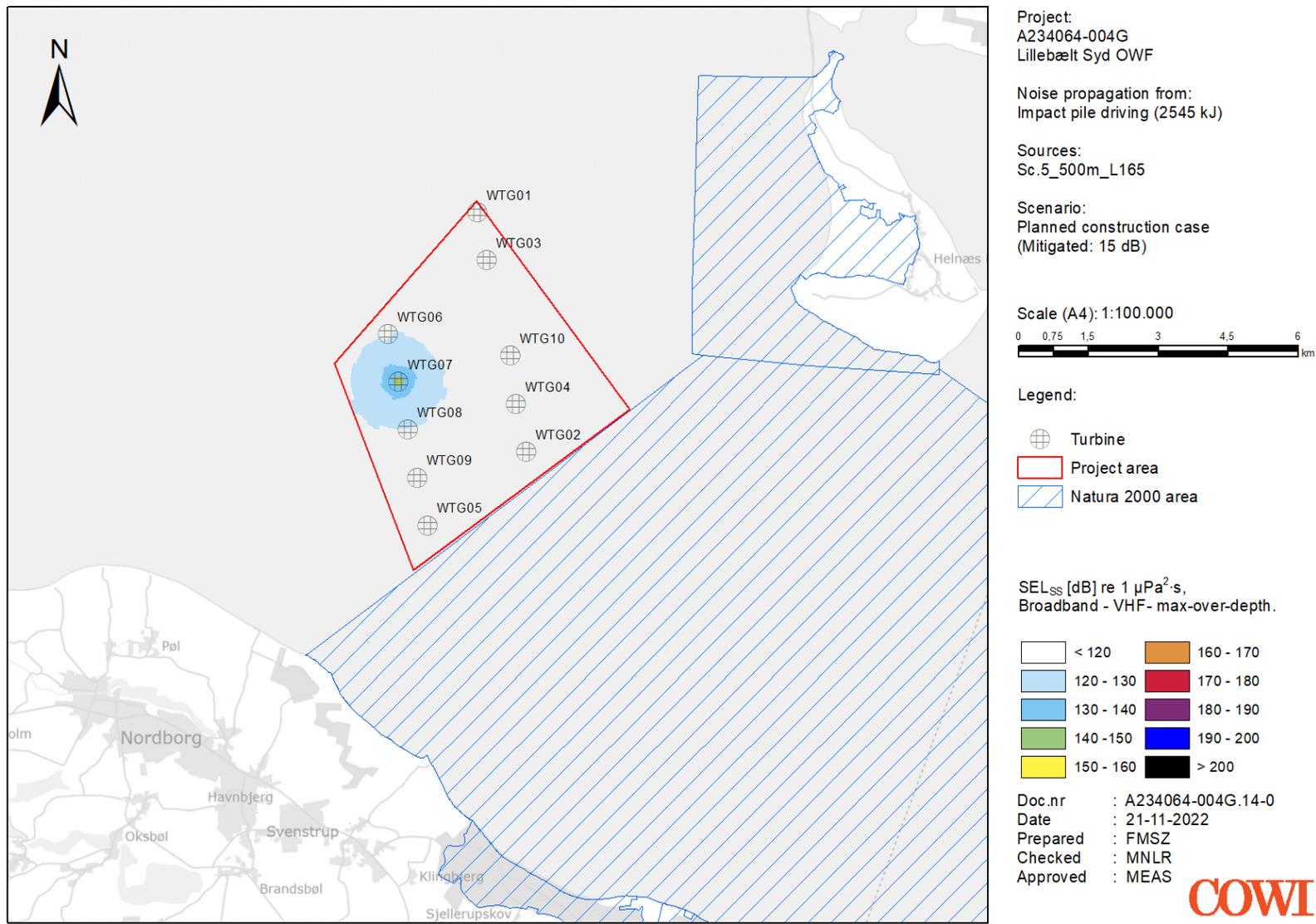


Abbildung 18 Baulärmkarte: Abgemilderter (15 dB) SEL_{ss} in Position WEA07

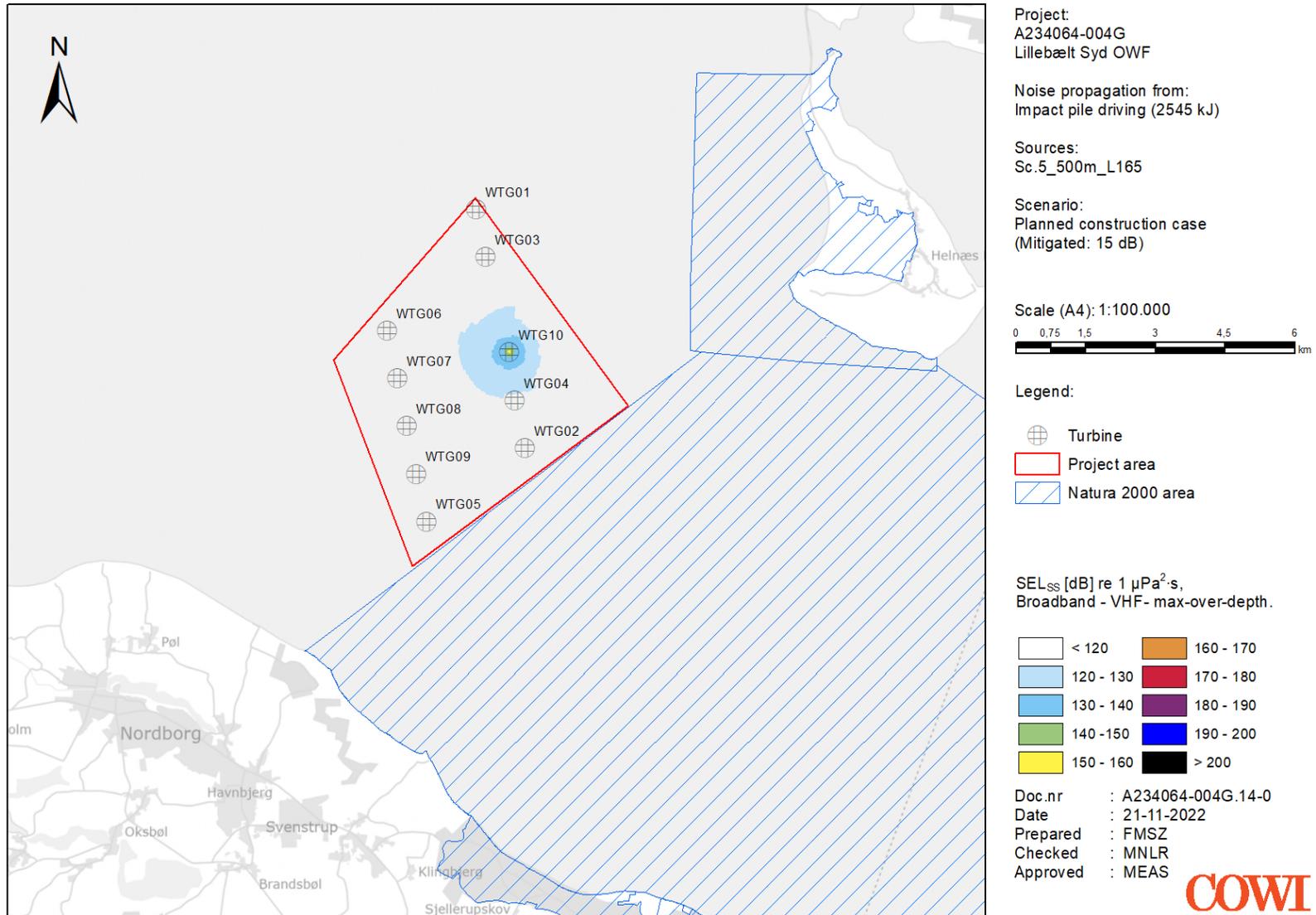


Abbildung 19 Baulärmkarte: Abgemilderter (15 dB) SEL_{ss} an Position WEA10

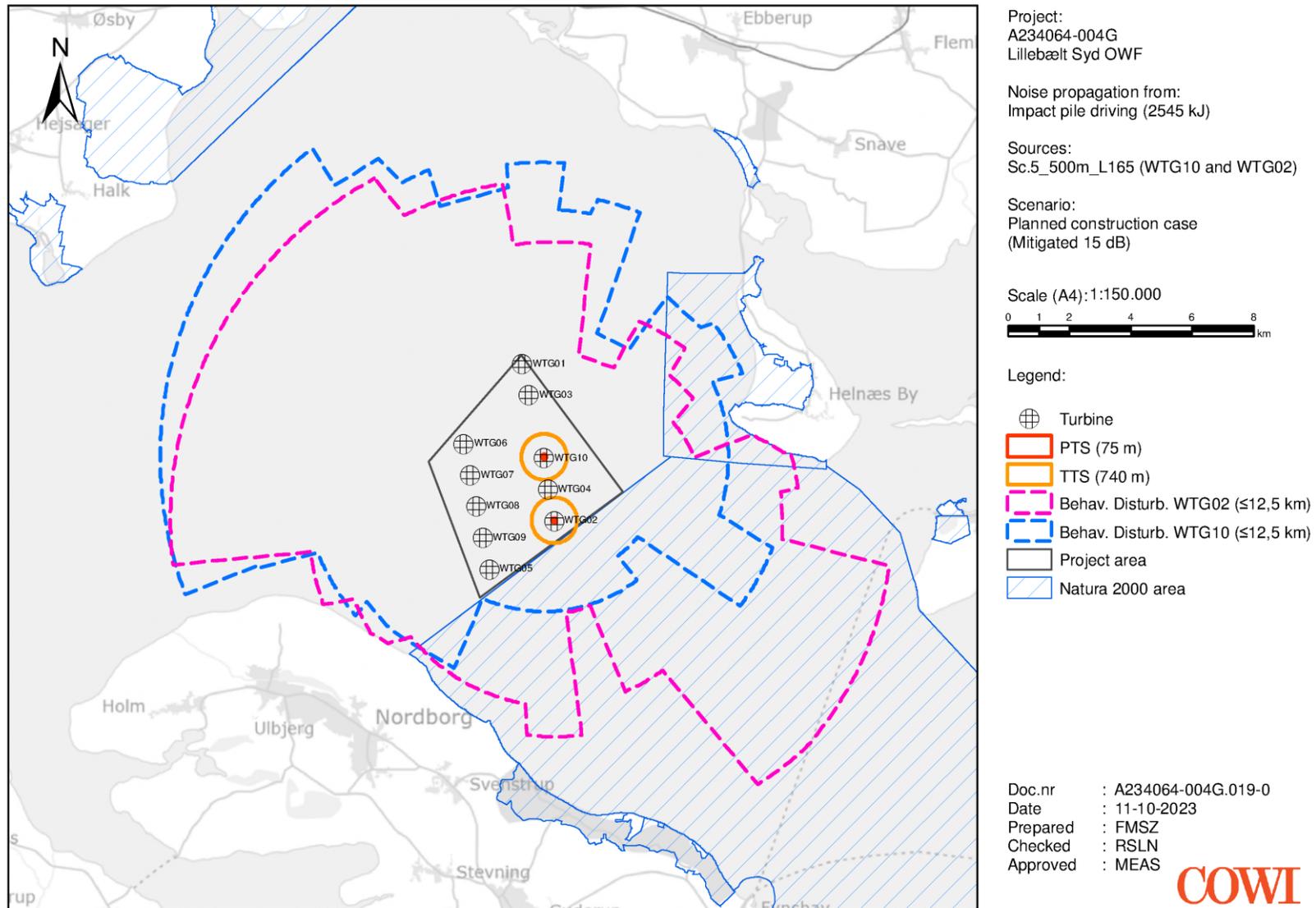


Abbildung 20 Baulärmkarte: Puffer zu den Hauptschwellen in Abhängigkeit von der Ausgangsposition des Schweinswals. Beruhend auf SEL_{cum} und SPL -Berechnungen für ein geplantes, abgemildertes (15 dB) Szenario 5. Positionen WEA02 und WEA10. PTS: >155 dB_{VHF} re $1\mu Pa^2s$, TTS: >140 dB_{VHF} re $1\mu Pa^2s$, Verhaltensstörung: >103 dB_{VHF} re $1\mu Pa$.

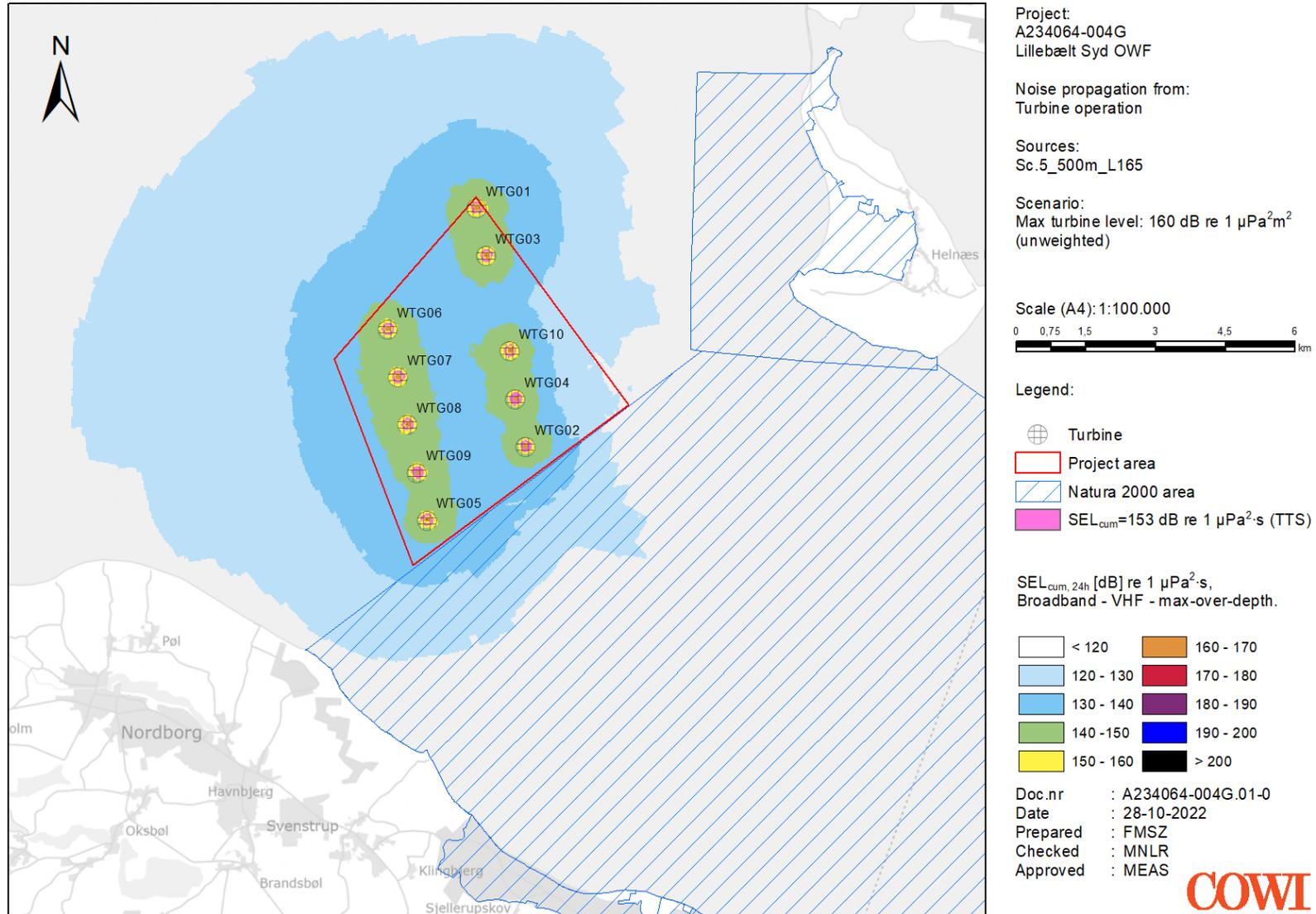
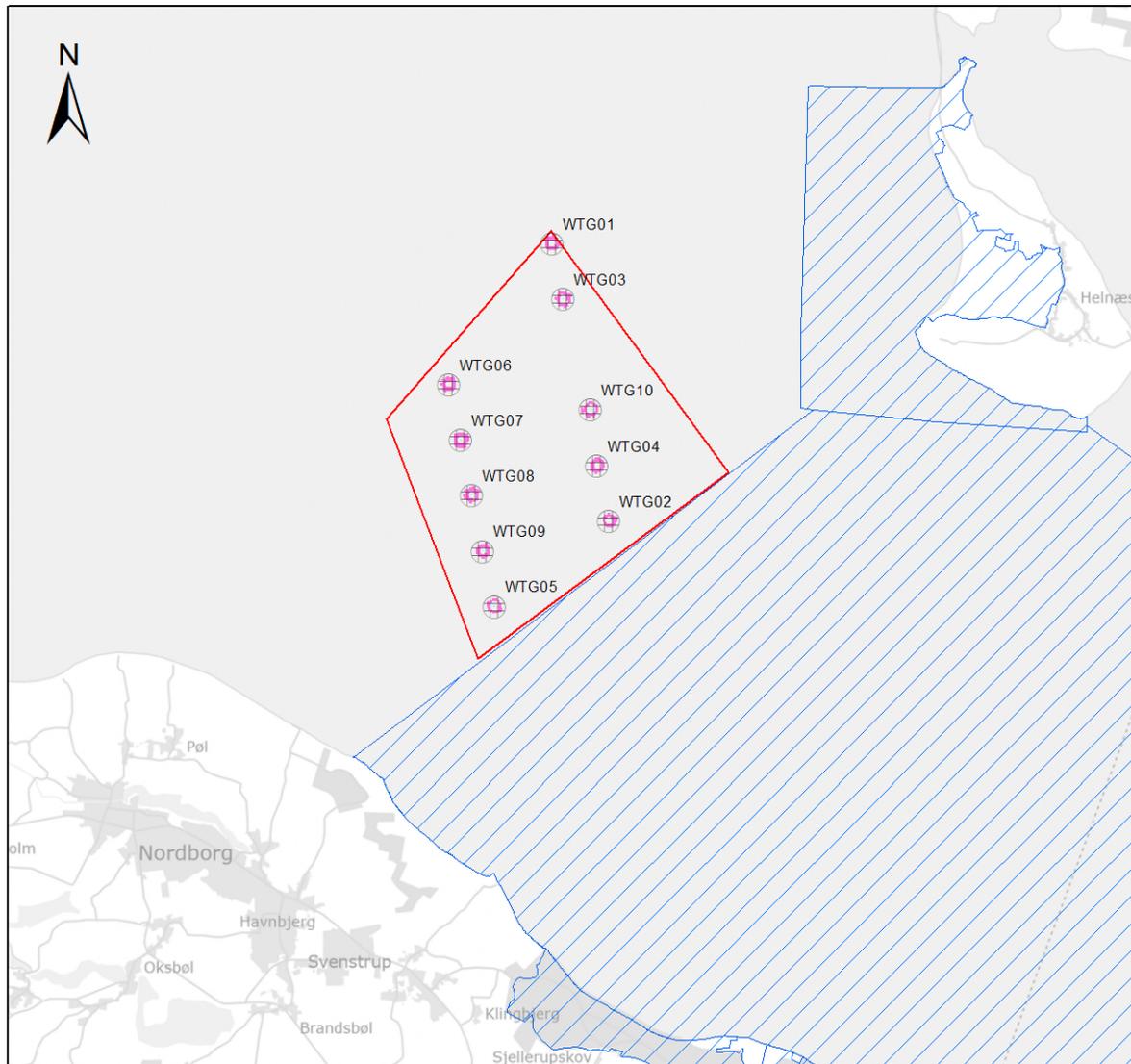


Abbildung 21 Betriebslärmkarte: SEL_{cum} 24h



Project:
 A234064-004G
 Lillebælt Syd OWF

Noise propagation from:
 Turbine operation

Sources:
 Sc.5_500m_L165

Scenario:
 Max turbine level: 160 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{m}^2$
 (unweighted)

Scale (A4): 1:100.000



Legend:

- Turbine
- Project area
- Natura 2000 area
- SPL=103 dB re 1 μPa (behavioural)

SPL [dB] re 1 μPa .
 Broadband - VHF - max-over-depth.

	< 120		160 - 170
	120 - 130		170 - 180
	130 - 140		180 - 190
	140 - 150		190 - 200
	150 - 160		> 200

Doc.nr : A234064-004G.02-0
 Date : 28-10-2022
 Prepared : FMSZ
 Checked : MNLR
 Approved : MEAS



Abbildung 22 Betriebslärmkarte: SPL



ADRESSE COWI A/S
Parallevej 2
2800 Kongens Lyngby

TEL. +45 56 40 00 00

FAX +45 56 40 99 99

WWW. cowi.dk