

RWE

itap

Bio
Consult
SH

Technische
Universität
Berlin



Universität Stuttgart
Institut für Geotechnik



Paving the Way for Vibro Piling

Forschungsprojekt VISSKA
Abschlussbericht des Arbeitspakets 7
Ökologische Bewertung

VISSKA – Abschlussbericht AP7

Version	Datum	Beschreibung der Änderungen	Autor*innen	Revision
V0	30/06/2023	-	BioConsult SH GmbH & Co. KG: Armin Rose, Claudia Burger, Ruth Castillo, Karoline Hots, Vladislav Kosarev, Alexander Schubert, Marit Schütte, Michel Stelter, Raul Vílela	
V0.1	10/07/2023	Interne QA		Johanna Osterberg, Alexander Schubert
V0.2	30/08/2023	Umsetzung der internen QA	BioConsult SH GmbH & Co. KG: Armin Rose, Claudia Burger, Ruth Castillo, Karoline Hots, Vladislav Kosarev, Alexander Schubert, Marit Schütte, Michel Stelter, Raul Vílela	
V0.3	18/09/2023	Aktualisierung	BioConsult SH GmbH & Co. KG: Armin Rose	
V0.4	18/09/2023	Aktualisierung einiger Analysen	BioConsult SH GmbH & Co. KG: Armin Rose	
V0.5	18/12/2023	Schallkarten, Bewertung, neue Zitate	BioConsult SH GmbH & Co. KG: Armin Rose; itap GmbH: Patrick Remmers	
V1.0	14/06/2024	Finalisierung	BioConsult SH GmbH & Co. KG: Marit Schütte	

Inhalt

1. Einleitung	7
Beschreibung und Zielsetzung des Arbeitspakets 7	8
2. Methodik	9
2.1 Untersuchungsgebiet	9
2.2 Anthropogene Störungsquellen für Schweinswale	9
2.2.1 Vibrations- und Impulsrammungen mit Vergrämung	9
2.2.2 Schiffsverkehr.....	11
2.3 HiDef-Flüge	13
2.3.1 HiDef-System.....	13
2.3.2 Erfassungsaufwand der HiDef-Flüge	15
2.3.3 Dichteberechnung aus Flugtransekt-Erfassungen.....	15
2.3.4 Statistische Auswertung der Flugtransekt-Erfassungen.....	16
2.3.4.1 Gradientenanalyse: Auswirkungen durch den Bau des OWP „Kaskasi II“	16
2.3.4.2 INLA-SPDE (Integrated Nested Laplace Approximation with Stochastic Partial Differential Equations) 19	
2.3.5 Analyse der AIS-Daten im Zusammenhang mit den HiDef-Flugerfassungen.....	20
2.3.5.1 Auswertung der Daten	21
2.4 Passiv-akustische Erfassungen (PAM)	23
2.4.1 Der C-POD	23
2.4.2 Stationen und Untersuchungszeitraum.....	25
2.4.3 Datenerfassung mit C-PODs.....	26
2.4.3.1 Software	26
2.4.3.2 Chelonia-Kalibrierungsfehler	27
2.4.3.3 Detektionsparameter	27
2.4.3.4 Beschneidung des Datensatzes	29
2.4.3.5 Ausbringungszeiträume und -lücken	29
2.4.4 Statistische Auswertung der C-POD-Daten.....	29
2.4.4.1 Saisonales Auftreten	30
2.4.4.2 GAM-Analysen.....	30
3. Ergebnisse	35
3.1 HiDef-Flüge	35
3.1.1 Gradientenanalyse	35
3.1.2 INLA-SPDE-Modelle: Räumliche Verteilung der Schweinswale	37
3.1.3 Analyse der AIS-Daten im Zusammenhang mit den HiDef-Flugerfassungen.....	40

3.2	Passiv-akustisches Monitoring (PAM)	43
3.2.1	Bauphase und jahreszeitliches Auftreten der Schweinswale (Tagesdaten)	43
3.2.1.1	Phänologiekurven der Schweinswale	43
3.2.1.2	t-SNE-Analyse: Phänologische Ähnlichkeit der C-POD-Stationen.....	45
3.2.2	Anzahl Sonartrains im Gesamtzeitraum und in der Bauphase	47
3.2.3	Generalisierte Additive Modelle zu Ramm-, Schiffs- und Schalleffekten	49
3.2.3.1	Fragestellung 1: Effekte der Rammarbeiten inklusive Vergrämung	51
3.2.3.2	Fragestellung 2: Schiffs-, Schall- und Rammefekte.....	61
3.2.3.3	Fragestellung 3: Effekte aller Schiffe und des Schalls	68
3.2.3.4	Fragestellung 4: Effekte aller Schiffe und des Schalls im Nahbereich des OWP	72
3.2.3.5	Fragestellung 5: Effekte aller DP-fähigen Schiffe und des Schalls im Nahbereich des OWP	75
3.2.3.6	Fragestellung Sonar: Sonarrate als Proxy für bestimmte Schiffs- und Schallvariablen	78
3.2.4	Kumulative Effekte der Frühjahrs-Bauphase in verschiedenen Distanzklassen	79
4.	Diskussion und ökologische Bewertung	81
4.1	Der Schweinswal	81
4.1.1	Vorkommen, Phänologie und Dichte im UG	81
4.1.2	Reaktion auf Rammarbeiten mit Vergrämung.....	81
4.1.2.1	Effekte der Impulsrammungen.....	81
4.1.2.2	Effekte der Vibrationsrammungen	82
4.1.2.3	Effekte der Vergrämung.....	83
4.1.2.4	Kumulative Effekte des Windparkbaus	84
4.1.3	Reaktion auf Schiffsaktivitäten und Dauerschall.....	84
4.2	Methodenkritik	86
4.2.1	Der C-POD	86
4.2.2	HiDef-Erfassungsflüge	86
4.3	Ökologische Bewertung.....	88
5.	Literatur	90
6.	Zusammenfassung.....	98
7.	Anhang.....	102
7.1	Monatlicher AIS-Schiffsverkehr im UG	102
7.1.1	Linienvverlauf aller Schiffe mit AIS-Signal	102
7.1.2	AIS-Schiffsdichte: Mittelwert der Monatssummen pro Gitterzelle.....	109
7.2	HiDef-Flüge	113
7.2.1	Dichtekarten der Schweinswale im UG	113
7.2.1.1	Einzelflüge	113
7.2.1.2	Basisphase und Bauphase	116

7.2.2	Punktsichtungskarten der Schweinswale im UG.....	117
7.2.3	Punktsichtungskarten der Schweinswale im UG mit AIS-Daten des Flugtages	120
7.3	Schallkarten um Vibrationsbaustellen	
	Fehler! Textmarke nicht definiert.	

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
APD	<i>Acoustic Porpoise Deterrent (Vergrämungsgerät für Schweinswale)</i>
AWZ	<i>Ausschließliche Wirtschaftszone</i>
BSH	<i>Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie</i>
C-POD	<i>Cetacean Porpoise Detector von Chelonia Ltd</i>
dB	<i>Dezibel</i>
DGBS	<i>Doppelter Großer Blasenschleier</i>
DP-fähiges Schiff	<i>Schiff mit Dynamic Positioning System zum automatischen Halten der Position</i>
DP10M/d	<i>Detektionspositive 10-Minutenblöcke pro Tag</i>
EGBS	<i>Einfacher Großer Blasenschleier</i>
GAM	<i>Generalisiertes Additives Modell</i>
GAMM	<i>Generalisiertes Gemischtes Additives Modell</i>
HSD	<i>Hydroschalldämpfer</i>
OSS	<i>Offshore Substation, Umspannplattform</i>
OWEA	<i>Offshore-Windenergieanlage</i>
OWP	<i>Offshore-Windpark</i>
PAM	<i>Passiv-akustisches Monitoring mittels C-PODs</i>
positiveMinutes/h	<i>Schweinswalpositive Minuten pro Stunde</i>
PTS	<i>Permanent Threshold Shift (permanente Hörschwellenverschiebung bei Schweinswalen)</i>
REF	<i>Referenzrammung ohne Schallschutz</i>
SPL	<i>Sound Pressure Level (Maß für Dauerschall)</i>
TTS	<i>Temporary Threshold Shift (temporäre Hörschwellenverschiebung bei Schweinswalen)</i>
UG	<i>Untersuchungsgebiet</i>
UJ	<i>Untersuchungsjahr</i>
UZ	<i>Untersuchungszeitraum</i>
VGBS	<i>Verbesserter Großer Blasenschleier</i>

1. Einleitung

Im Rahmen des Forschungsprojektes VISSKA (Untersuchungen zur Vibrationsrammung in Bezug auf die Installation, die Schallemissionen und die Auswirkungen auf Schweinswale im Offshore-Windpark Kaskasi II) wurde die Einbringmethode der Vibrationsrammung umfassend vor, während und nach der Bauphase eines Offshore-Windparks (OWP) durch passiv-akustisches Monitoring (PAM mittels C-PODs), Flugtransekt-Erfassungen (HiDef-Flüge) und Schallmonitoring (Hydrofone) begleitet. Hierbei lag das Augenmerk u. a. auf der Einbringung des Gründungskörpers sowie auf den Auswirkungen der Schallentwicklung auf die Meeresumwelt am Beispiel des Schweinswals (*Phocoena phocoena* Linnaeus 1758) als Indikatorart für die Bewertung der anthropogenen Schalleinträge. Dabei sollte geprüft werden, ob das Vibrationsrammverfahren hinsichtlich der Installationsdauer und der Schalleinträge ins Wasser eine schallarme und naturverträgliche Alternative zur derzeit marktüblichen Methode des Impulsrammverfahrens darstellt. Zusätzlich sollte der Einfluss von Schiffslärm als typische Quelle von Dauerschall auf die Anwesenheit von Schweinswalen untersucht werden.

Das Projekt VISSKA begleitete den Bau des OWP „Kaskasi II“, der in der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) der Nordsee außerhalb von Natura 2000-Gebieten im Vorranggebiet Windenergie „Südlich Amrumbank“ (östliche Deutsche Bucht) im Gebiet N-4 (BSH 2023) ca. 33 km nordwestlich von Helgoland liegt. Für diesen OWP wurden zwischen dem 09.03.2022 und dem 20.09.2022 insgesamt auf einer Fläche von ca. 17,4 km² 38 Offshore-Windenergieanlagen (OWEA) mit einer Gesamtkapazität von 342 MW sowie eine Umspannplattform (OSS) gegründet. Der komplette Netzanschluss erfolgte Mitte Dezember 2022.

Der für September 2021 geplante Start der Fundamentinstallationen konnte aufgrund von Lieferschwierigkeiten einer Hauptkomponente nicht gehalten werden. Aufgrund dessen konnten die umfangreichen VISSKA-Messungen während des Installationsprozesses des OWP „Kaskasi II“ erst im März 2022 starten. Durch diesen zeitlichen Projektverzug wurde ein zweites Errichterschiff gechartert, um parallele Installationen der Monopiles zu ermöglichen. Trotz intensiver Marktrecherchen konnte kein weiteres Schiff identifiziert werden, welches den speziell gefertigten Vibrationshammer hätte bedienen können. Somit kam bei nur wenigen Fundamenten das Vibrationsverfahren zur Anwendung und bei diesen auch nur anteilig, da mit dieser Methode nicht die volle Eindringtiefe erreicht wurde und sich daher immer Impulsrammungen anschlossen.

Letztendlich wurden zwischen dem 09.03.2022 und dem 29.04.2022 insgesamt 25 Fundamente (24 OWEA und eine OSS) eingebracht, hiervon 19 Fundamente ausschließlich per Impulsrammverfahren und 6 Fundamente anteilig im Vibrationsverfahren. Von Anfang Mai 2022 bis Ende August 2022 erfolgte aufgrund der Nähe des OWP „Kaskasi II“ zum FFH-Gebiet „Sylter Außenriff“ gemäß dem Schallschutzkonzept (BMU 2013) zum Schutz der Schweinswale während der besonders sensiblen Fortpflanzungszeit eine Installationspause. Zwischen dem 03.09.2022 und dem 20.09.2022 wurden die restlichen 14 Monopiles im Impulsrammverfahren gegründet. Die Auswertungen zum hier behandelten Arbeitspaket 7 (AP7) des Projekts VISSKA beziehen sich jedoch ausschließlich auf den ersten Installationszyklus mit anteiligen Vibrationsrammungen (die Frühjahrskampagne).

Beschreibung und Zielsetzung des Arbeitspakets 7

Ursprüngliches Ziel des AP7 war es, durch Analysen und Modellierungen der digitalen Flug- und C-POD-Daten mögliche Reaktionen der Schweinswale auf die Bauarbeiten des OWP „KASKASI II“ zu erkennen und die bei früheren Untersuchungen erhaltenen Meidungsdistanzen der Schweinswale hinsichtlich Impulsrammungen mit der Reaktion der Tiere auf Vibrationsrammungen zu vergleichen, sowie diese zu bewerten.

Da nur 6 Monopiles mittels Vibrationsrammung eingebracht wurden und diese auch nur bis zu einer gewissen Tiefe einvibriert werden konnten, woraufhin die Endtiefe mittels Impulsrammungen erreicht wurde, konnten nur begrenzt Aussagen bezüglich der Auswirkungen von Vibrationsrammungen auf die Anwesenheit von Schweinswalen getroffen werden. Aufgrund des veränderten Installationsprozesses wurde der Fokus des AP7 auf eine vergleichende Evaluierung der Auswirkungen von Schiffslärm und Vibrationsrammungen (Dauerschallquellen) sowie Impulsrammungen (Impulsschallquelle) gelegt. Folgende Fragen galt es zu beantworten:

- Welchen Einfluss hat die Fundament-Installationsmethode (Impuls- bzw. Vibrationsrammung) auf die Entwicklung der Schweinswal-Detektionsraten im Verlauf des Installationsprozesses?
- Welchen Einfluss haben Impuls- und Vibrationsrammung unter Berücksichtigung der Schiffsaktivität auf die Detektionsraten der Schweinswale?
- Wie wirkt sich die Lautstärke im Umfeld der C-PODs (tief- und hochfrequenter Lärm) auf die Detektionsrate der Schweinswale aus?
- Wie verhält sich die Schweinswal-Detektionsrate zur Distanz des nächsten Schiffes (alle Schiffe bzw. Schiffe mit DP-System)?
- Wie wirkt sich die Anzahl der Bauschiffe (alle Schiffe bzw. speziell solche mit DP-System) im Umkreis von 5 km auf die Detektionsrate und Dichte der Schweinswale aus?

Die in der Gesamtvorhabenbeschreibung (GVB) für das AP7 festgelegten Ergebnisse E 7.1 („Teilkapitel zur Auswirkung von Vibrationsrammschall und weiteren Parametern auf die Anwesenheit von Schweinswalen in Abhängigkeit der jeweiligen Dauerschallbelastung am jeweiligen C-POD-Standort“), E 7.2 („Teilkapitel zur Auswirkung von Schiffsverkehr auf die Anwesenheit von Schweinswalen in Abhängigkeit der ermittelten Lautstärke am jeweiligen C-POD“) und E 7.3 („Teilkapitel zum Effekt der Vibrationsrammung auf absolute Dichten von Schweinswalen in Abhängigkeit zur Distanz zur Baustelle auf Basis einer Gradientenanalyse“) bekamen daher einen anderen Schwerpunkt. Die Beantwortung der neuen Fragestellungen erfolgte im Rahmen des vorliegenden Ergebnisberichtes mittels GAM-, INLA-SPDE-, und Gradientenanalysen. Für die GAM-Analysen der C-POD-Daten wurden diese Fragen weiter konkretisiert, sodass sie modellbezogen beantwortet werden konnten (vgl. Kapitel 3.2.3).

2. Methodik

2.1 Untersuchungsgebiet

Der OWP „Kaskasi II“ liegt in der östlichen Deutschen Bucht innerhalb des Gebietes N-4 des Flächenentwicklungsplans 2023 für die deutsche Nord- und Ostsee (BSH 2023). In direkter räumlicher Nähe befinden sich die bereits in Betrieb genommenen OWP „Amrumbank West“, „Nordsee Ost“ und „Meerwind Süd/Ost“ des Windpark-Clusters „Nördlich Helgoland“. Die Gesamtkapazität der Anlagen beträgt 342 MW. Die Fläche des OWP „Kaskasi II“ umfasst insgesamt ca. 17,4 km², wobei die Wassertiefe im Untersuchungsgebiet (UG) zwischen ca. 18 m und 26 m liegt. Etwa 4 km nördlich des OWP „Kaskasi II“ befindet sich das Natura 2000-Gebiet „Sylter Außenriff“ (vgl. Abbildung 1). Im Osten beginnt in ca. 2 km Entfernung das EU-Vogelschutzgebiet „Östliche Deutsche Bucht“, welches sich ebenso wie das Natura 2000-Gebiet ab ca. 4 km Entfernung in nördlicher Richtung fortsetzt.

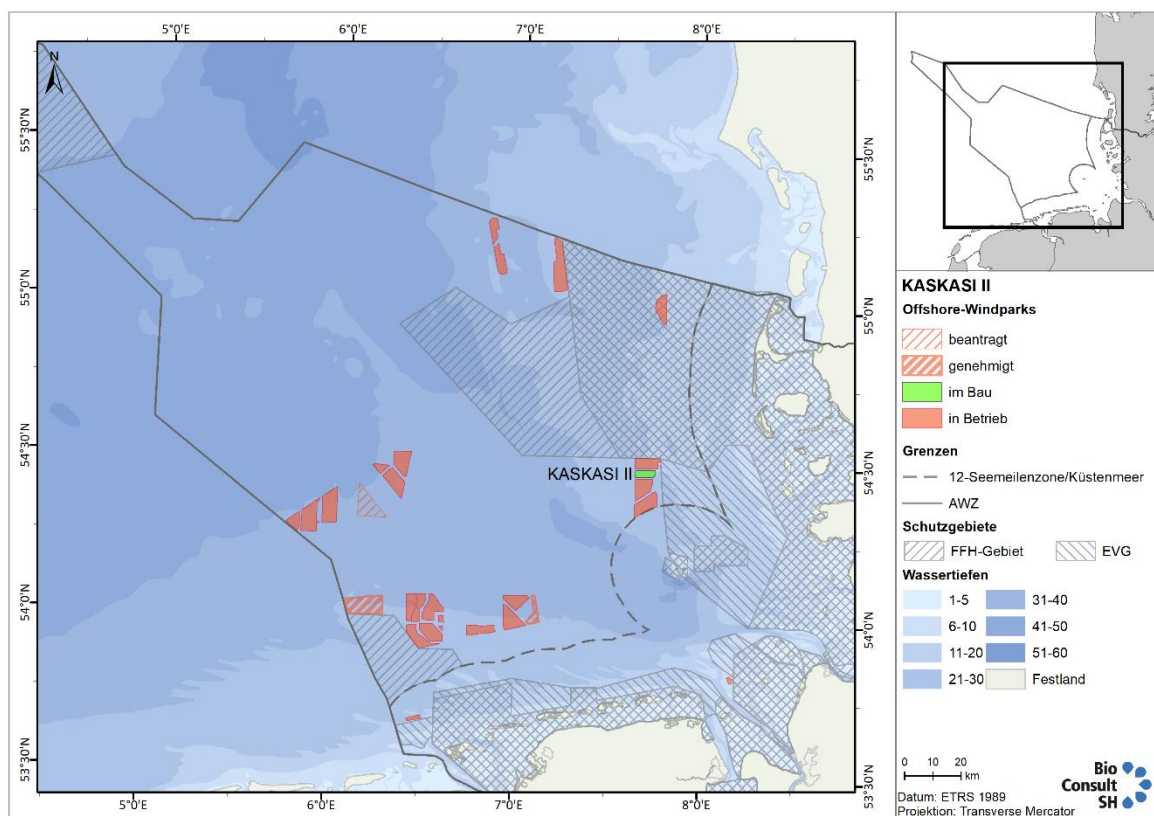


Abbildung 1: Lage des Offshore-Windparks „Kaskasi II“ in der Deutschen Bucht (Nordsee).

2.2 Anthropogene Störungsquellen für Schweinswale

2.2.1 Vibrations- und Impulsrammungen mit Vergrämung

Die Bauarbeiten für den OWP „Kaskasi II“ begannen nach mehrmaliger Verschiebung aufgrund von Verfügbarkeitsengpässen der technischen Ausstattung des Errichterschiffes zur Vibrationsrammung am 09.03.2022. Innerhalb des Untersuchungszeitraumes (UZ) des Projektes VISSKA wurden bis zum 29.04.2022 insgesamt 24 OWEA und die OSS installiert. Hierbei wurden 18 OWEA sowie die OSS ausschließlich im Impulsrammverfahren, sechs OWEA zudem anteilig im Vibrationsverfahren gegründet (Tabelle 1). Die Lage der mit Vibrationsrammungen gegründeten OWEA ist dem itap-Bericht zum AP6 zu entnehmen (ITAP GMBH 2023).

VISSKA – Abschlussbericht AP7

Tabelle 1: Übersicht der einzelnen Rammphasen für die 24 OWEA und die OSS der Frühjahrs-Kampagne: Pfahl-Nr. (bzw. OSS: K00), Datum und Zeitraum der Rammungen (mehrere Rammphasen für einen Pfahl bzw. die OSS möglich), Rammtyp (imp: Impulsrammung; vib: Vibrationsrammung; grau), Zeitraum Acoustic Porpoise Deterrent-(APD-)Beginn vor Rammbeginn (APDB vRB) bzw. APD-Ende nach Rammbeginn (APDE nRB; falls bereits vor Rammbeginn beendet: „vRB!“) in Stunden:Minuten (Format hh:mm), Schallpegel der Rammungen in 750 m Distanz (imp: SEL₀₅; vib: SPL; beide in dB) sowie das für die GAM-Analysen verfügbare Zeitfenster in Stunden vor und nach der jeweiligen Rammphase (Start hrw-; Ende hrw+); Zeiten in UTC.

Pfahl	Rammbeginn	Rammende	Typ	APDB vRB	APDE nRB	SEL ₀₅ 750 m	SPL 750 m	Start hrw-	Ende hrw+
K12	09.03.2022 22:59	10.03.2022 00:23	imp	00:56	00:10	163		48	56
K14	13.03.2022 10:46	13.03.2022 11:36	vib	01:22	00:09		151	24	5
K14	13.03.2022 18:15	13.03.2022 19:57	imp	01:14	00:15 vRB!	155		0	6
K14	14.03.2022 06:21	14.03.2022 07:01	imp	04:03	00:06	156		0	14
K30	15.03.2022 00:07	15.03.2022 00:34	vib	01:56	00:09		159	0	0
K30	15.03.2022 02:10	15.03.2022 02:27	vib	00:44	00:07		155	0	3
K30	15.03.2022 07:44	15.03.2022 09:42	imp	01:14	00:04	160		0	72
K26	21.03.2022 06:05	21.03.2022 06:32	vib	01:36	00:08		153	66	4
K00	21.03.2022 13:09	21.03.2022 13:54	imp	01:18	00:05	154		0	5
K26	21.03.2022 20:31	21.03.2022 21:47	imp	01:14	00:05	159		0	3
K00	22.03.2022 01:53	22.03.2022 04:34	imp	00:42	00:04	153		0	1
K00	22.03.2022 07:38	22.03.2022 07:38	imp	00:47	00:09	157		0	0
K11	22.03.2022 10:48	22.03.2022 11:33	vib	01:49	00:09		166	0	3
K11	22.03.2022 16:22	22.03.2022 17:34	imp	00:43	00:05	160		0	15
K05	23.03.2022 09:20	23.03.2022 10:38	vib	00:04	01:12		163	0	2
K05	23.03.2022 15:43	23.03.2022 17:44	imp	01:07	00:02	160		0	36
K25	25.03.2022 23:23	26.03.2022 00:11	vib	01:14	00:08		161	16	2
K25	26.03.2022 04:31	26.03.2022 05:45	imp	00:57	00:03	159		0	36
K21	28.03.2022 05:33	28.03.2022 08:20	imp	00:59	00:04	159		10	36
K13	30.03.2022 01:54	30.03.2022 03:35	imp	01:19	00:19 vRB!	159		3	13
K29	30.03.2022 18:31	30.03.2022 19:44	imp	01:17	00:04	158		0	72
K28	05.04.2022 13:09	05.04.2022 14:55	imp	01:49	00:05	179		63	72
K19	11.04.2022 10:00	11.04.2022 11:21	imp	01:12	00:04	166		65	36
K20	14.04.2022 06:32	14.04.2022 07:34	imp	01:10	02:00	163		29	0
K20	14.04.2022 08:10	14.04.2022 08:32	imp	02:48	00:22	161		0	18
K10	15.04.2022 03:53	15.04.2022 05:08	imp	00:36	00:08	163		0	13
K09	15.04.2022 19:47	15.04.2022 21:04	imp	00:34	00:10	158		0	36
K01	18.04.2022 07:23	18.04.2022 09:12	imp	00:32	00:07	155		20	11
K16	18.04.2022 22:21	18.04.2022 23:38	imp	00:41	02:08	155		0	14
K18	19.04.2022 16:29	19.04.2022 17:39	imp	01:34	00:07	158		0	36
K17	22.04.2022 04:47	22.04.2022 05:51	imp	00:41	00:28	157		22	36
K27	25.04.2022 05:43	25.04.2022 07:15	imp	00:30	00:16	160		35	13
K06	25.04.2022 22:37	25.04.2022 23:56	imp	00:52	00:10	160		0	36
K07	28.04.2022 11:23	28.04.2022 12:59	imp	00:58	00:04	157		22	13
K33	29.04.2022 03:39	29.04.2022 05:22	imp	00:59	00:11	159		0	11

VISSKA – Abschlussbericht AP7

Pfahl	Rammbeginn	Rammende	Typ	APDB	APDE	SEL ₀₅	SPL	Start	Ende
				vRB	nRB	750 m	750 m	hrw-	hrw+
K34	29.04.2022 18:59	29.04.2022 20:30	imp	01:03	00:06	158		0	72

Um Schweinswale gezielt aus einem bestimmten Bereich zu vertreiben („vergrämen“), kamen sogenannte Vergrämungsmaßnahmen zum Einsatz. Vor 2017 wurden Sealscarer in Kombination mit Pingern zur Vergrämung von Schweinswalen eingesetzt. Experimentelle Untersuchungen zur Wirksamkeit des Sealscarers zeigten eine deutliche Meidereaktion von Schweinswalen in Entfernungen bis zu 7,5 km (BRANDT ET AL. 2013b; BIOCONSULT SH ET AL. 2019; VOß ET AL. 2023b). Aufgrund dieses unbeabsichtigt großen Habitatverlusts für Schweinswale bei Einsatz der Sealscarer/Pinger-Kombination (vgl. VOß ET AL. 2023a) wird seit 2017 im Vorfeld von Offshore-Rammarbeiten ein speziell auf die Höreigenschaften des Schweinswals angepasstes Vergrämungssystem¹ (im Folgenden als APD-System bezeichnet) verwendet. Das Vergrämungsgerät führt verlässlich zu einer Vergrämung nahezu aller Schweinswalen aus dem Nahbereich (etwa 750 m) und zu einer Meidereaktion bis in maximal 2,5 km Distanz (VOß ET AL. 2023b).

Der Einsatz des APD-Systems erfolgte nach folgendem Verfahren, wobei es in Einzelfällen durch technische Probleme zu größeren Abweichungen kam (Tabelle 1):

- 40 Minuten vor dem ersten Rammschlag (Soft Start): APD-System wird ins Wasser gelassen;
- 30 Minuten vor dem ersten Rammschlag (Soft Start): Aktivierung APD-System;
- Nach dem ersten Rammschlag (Soft Start): sofortiges Abschalten des APD-Systems;
- 5 Minuten nach dem ersten Rammschlag (Soft Start): APD-System wird aus dem Wasser geholt.

Werden die Rammarbeiten für mehr als 40 Minuten unterbrochen, erfolgte eine Wiederholung der Vergrämung nach folgendem Verfahren:

- 30 Minuten vor der erneuten Rammung: Aktivierung APD-System;
- Nach dem ersten Rammschlag der erneuten Rammung: sofortiges Abschalten des APD-Systems;
- 5 Minuten nach dem ersten Rammschlag der erneuten Rammung: APD-System wird aus dem Wasser geholt.

Da Rammung und Vergrämung zeitlich sehr dicht beieinander lagen, war es in den stundengenauen Analysen nicht möglich, deren Effekte zu trennen.

2.2.2 Schiffsverkehr

Die Installationsarbeiten für den Offshore-Windpark „Kaskasi II“ waren mit der gleichzeitigen Anwesenheit mehrerer Schiffe im Gebiet vor, während und nach den Rammphasen verbunden (ITAP GMBH 2023). Von potenziell besonderer Relevanz für die Schweinswale waren hierbei Offshore-Service-Schiffe mit automatischem Positionierungssystem, dem sogenannten Dynamic Positioning System (DP-System). Das bei „Kaskasi II“ eingesetzte DP2-System verfügt über zwei redundante Positionierungssysteme, wodurch der Ausfall eines Systems kompensiert werden kann. DP-Systeme können die Schiffsbewegungen entsprechend der von Sensoren gemessenen externen Einflüsse wie Wind, Wellen und Strömungen kompensieren. Auf diese Weise kann ein Schiff unter ständigem Einsatz von Azimuth-Thrustern seine exakte Position

¹ Die Firmen Van Oord Offshore B.V. und Seamarco haben gemeinschaftlich ein Vergrämungssystem speziell für Schweinswale, Fische, Robben und Schildkröten mit unterschiedlichen Frequenzen und Lautstärken entwickelt und getestet. Mithilfe dieser Module können einzelne Tierarten aufgrund der gewählten Frequenzbereiche und Lautstärken gezielt aus einem Gefährdungsbereich vergrämt werden. Die Rechte an diesem Vergrämungsgerät hat Van Oord Offshore an die Firma ACE Aquatec abgegeben, die dieses System als FaunaGuard Porpoise am Markt anbietet. Die Firma Seamarco vertreibt ein vergleichbares Vergrämungssystem unter der Bezeichnung Acoustic Porpoise Deterrent (APD).

halten. Jedoch führen diese Thruster zu einer starken tief-, mittel- und hochfrequenten Schallbelastung in der Umgebung eines solchen Schiffes (FISCHER 2000). Dieser Dauerschall und die Geräusche anderer Schiffe konnten einen in dieser Studie zu quantifizierenden Einfluss auf die Anwesenheit und das Verhalten von Schweinswalen im UG ausüben. Es wurden daher nicht nur die Effekte aller Schiffe, sondern auch die speziellen Auswirkungen der DP-fähigen Schiffe im Nahbereich des Windparks auf Schweinswale untersucht.

Der Schiffsverkehr ist als durchschnittliche Schiffsanzahl pro Gitterzelle (250 m mal 250 m), basierend auf den im UG aufgenommenen AIS-Signalen, dargestellt. Dabei wird zwischen der Frühjahrs-Bauphase bzw. Eingriffsphase (März bis April 2022) und der Basisphase (Juni 2021 bis Februar 2022) unterschieden (Abbildung 2 und Abbildung 3). Um für die unterschiedlich langen Zeiträume der beiden Phasen zu korrigieren, wurden zunächst die Durchschnittswerte pro Gitterzelle pro Monat kalkuliert und anschließend der Mittelwert pro Zelle über alle Monate der jeweiligen Phase berechnet. Während der Basisphase gab es im UG durchschnittlich weniger Schiffsverkehr als während der Bauphase. Dies galt nicht nur für das Baugebiet des OWP „Kaskasi II“, sondern auch für die anderen drei OWPs des Clusters „Nördlich Helgoland“ (Abbildung 2 und Abbildung 3). AIS-Karten der einzelnen Erfassungsmonate (Quelle: havbase.no) sowie der Schiffsdichten über alle Zweimonats-Zeiträume (im UG aufgenommene AIS-Signale) finden sich im Anhang (Abbildung 73 bis Abbildung 91). Im Gegensatz zu den hier gezeigten grob aufgelösten Karten verwenden die Modelle im Bericht die exakten minutengenauen AIS-Signale.

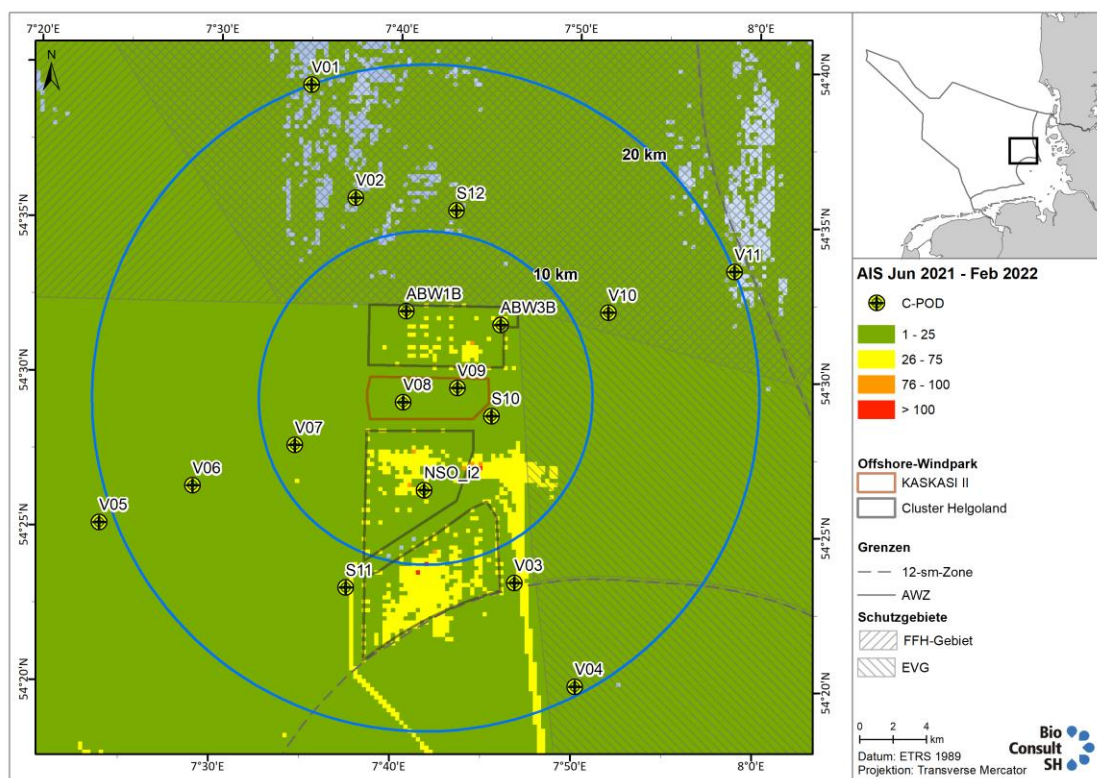


Abbildung 2: Mittelwert aller Monatssummen an Schiffen pro Gitterzelle (siehe Erläuterungen im Text) im UG während der Basisphase (Juni 2021 bis Februar 2022).

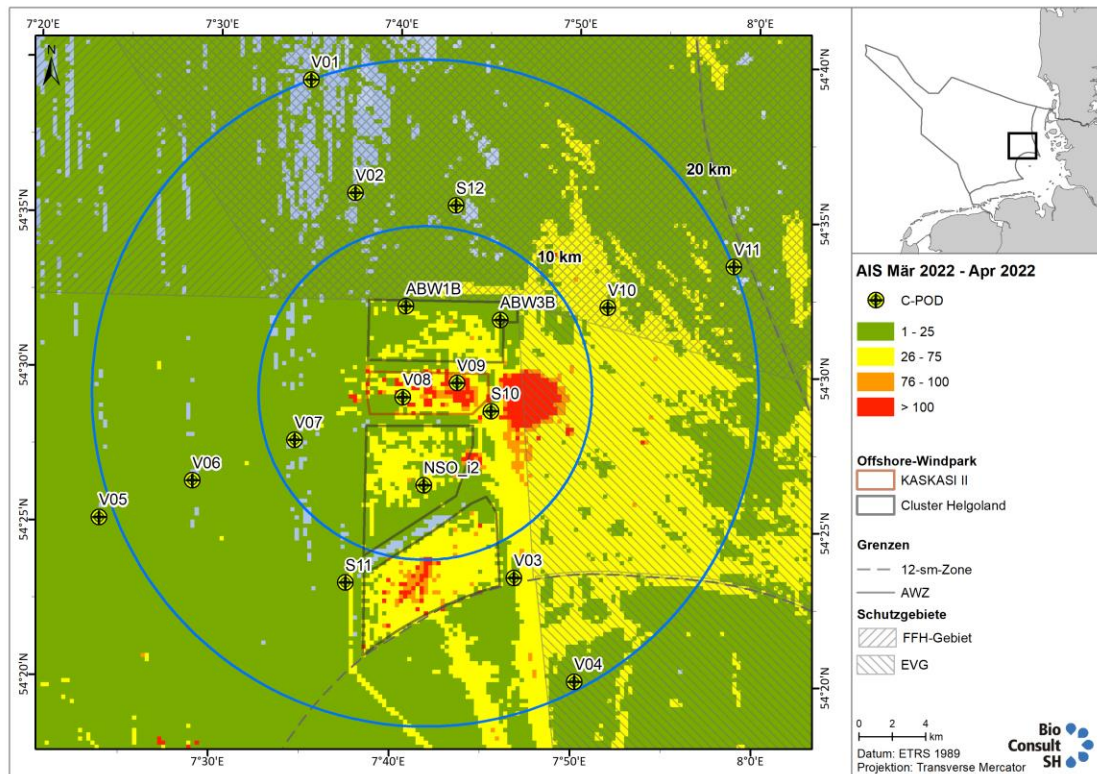


Abbildung 3: Mittelwert aller Monatssummen an Schiffen pro Gitterzelle im UG während der Frühjahrs-Bauphase (März bis April 2022).

2.3 HiDef-Flüge

2.3.1 HiDef-System

Die Flugtransekt-Erfassungen im Untersuchungsgebiet zu den Auswirkungen des OWP „Kaskasi II“ erfolgten mittels der digitalen HiDef-Methode, die bessere Erfassungsergebnisse liefert als die Sichtflugmethode (ŽYDELIS ET AL. 2019). Hierfür wurde ein zweimotoriges hochflügeliges Propellerflugzeug (Partenavia P 68) bei einer Flughöhe von 549 m eingesetzt. Das Flugzeug war mit einer Vorrichtung ausgestattet, die aus vier hochauflösenden Video-Kamerasystemen bestand und eine Auflösung von 2 cm an der Meeresoberfläche erzielte. Das Erfassungssystem wurde von der Firma HiDef (<https://www.hidefsurveying.co.uk>) entwickelt und wird seit vielen Jahren erfolgreich für die Erfassung von Seevögeln und marinen Säugetieren eingesetzt. Die Kameras sind hierbei nicht senkrecht nach unten, sondern in leicht nach vorne oder hinten geneigter Position ausgerichtet. Abhängig vom Sonneneinfall wird das Kamerasystem möglichst zur sonnenabgewandten Seite geschwenkt.

Die Kameras 2 & 3 deckten je einen Streifen von 129 m Breite ab (Streifen 2 & 6 sowie 3 & 7 in Abbildung 4), während die Kameras 1 & 4 je einen Streifen von 143 m abdeckten (Streifen 1 & 5 sowie 4 & 8 in Abbildung 4). Die vier Streifen-Paare hatten einen Abstand von 20 m zueinander, woraus sich eine effektive Streifenbreite von 544 m auf einem Gesamtstreifen von 604 m ergab.

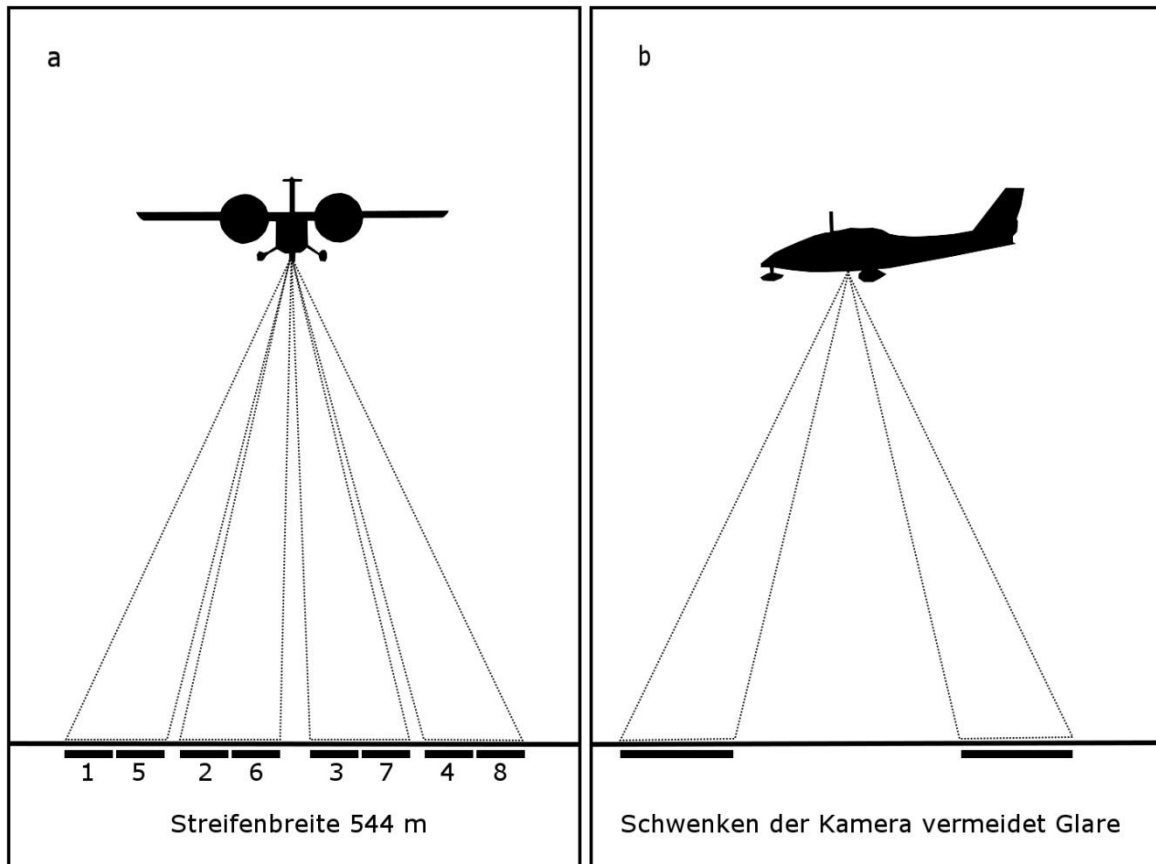


Abbildung 4: Das HiDef-Kamerasystem: Die vier Kameras decken bei einer Flughöhe von 549 m eine effektive Streifenbreite von 544 m Meeresoberfläche ab (a: Frontalansicht; b: Seitenansicht).

Das Flugzeug flog mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von etwa 220 km/h (120 Knoten). Ein GPS-Gerät (Garmin GPSMap 296) zeichnete dabei jede Sekunde (ca. 60 m) die Position auf. Die Position wurde später mit den einzelnen Bilddateien und mit den Objektsichtungen verknüpft. Die Aufnahmen wurden zur späteren Kontrolle und Analyse auf mobilen Festplatten gespeichert.

Die HiDef-Videodateien mit einer Bildrate von sieben Bildern je Sekunde wurden von geschultem Personal mithilfe der Software StreamPix (Sky Blue Microsystems GmbH) begutachtet und die gesichteten Tiere markiert. Im ersten Schritt der Qualitätskontrolle wurden 20 % der Bilddateien von einer zweiten Person begutachtet. Bei einer Übereinstimmung von ≥ 90 % der gesichteten Objekte wurden die Bilder für eine weitere Analyse freigegeben. Wurde eine Übereinstimmung von weniger als 90 % erzielt, mussten die Bilddateien erneut begutachtet werden. Nicht auswertbare Videoabschnitte (aufgrund von Gegenlicht oder Wolken) wurden markiert und flossen nicht in die Auswertung ein. In regelmäßigen Abständen (alle 500 Bilder, ca. alle 70 Sek.) wurden Seegang, Lichtreflexionen und Wassertrübung anhand der Bilddateien bestimmt.

Die markierten Objekte wurden nach Freigabe durch den ersten Schritt der Qualitätskontrolle von erfahrenen Experten auf Art- bzw. Artengruppenniveau bestimmt. Die Bestimmungssicherheit auf Art- und Artengruppenniveau wurde durch eine Wahrscheinlichkeitseinstufung („possible“, „probable“, „definite“) festgehalten. In einem zweiten Schritt der Qualitätskontrolle wurden 20 % der auf Artniveau bestimmten Objekte von einem zweiten Gutachter bestimmt. Alle Diskrepanzen zwischen erstem und zweitem Bestimmungsprozess wurden von einem dritten Gutachter nachbestimmt. Bei einer Übereinstimmung von ≥ 90 % der bestimmten Objekte wurden die erhobenen Daten für die weitere Analyse freigegeben. Wurde eine Übereinstimmung von weniger als 90 % erzielt, mussten systematische Fehler (z. B. Probleme bei der Bestimmung bestimmter Artengruppen) behoben bzw. alle gesichteten Objekte erneut bestimmt werden.

2.3.2 Erfassungsaufwand der HiDef-Flüge

Für das Projekt „VISSKA“ wurden insgesamt 5 digitale Flugtransekt-Erfassungen ausgewertet. Das jeweilige Datum der einzelnen Flugtransekt-Erfassungen, die zurückgelegte Transektstrecke, der Erfassungsaufwand, der Abdeckungsgrad pro Flugerfassung sowie Angaben zur Flug-Durchführung während einer Rammphase sind Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2: Übersicht der für das Projekt „VISSKA“ ausgewerteten digitalen Flugtransekt-Erfassungen aus dem UZ von Juni 2021 bis April 2022; angegeben sind die zurückgelegte Transektstrecke, der Erfassungsaufwand, der Abdeckungsgrad und die Flug-Durchführung während einer Rammphase.

Datum	Während Vibrations-Rammaktivitäten	Transektstrecke [km]	Erfassungsaufwand [km ²]	Abdeckungsgrad [%]
25.06.2021		1.111,46	601,03	15,36
18.07.2021		1.120,42	482,69	12,33
07.03.2022		1.026,54	553,22	14,13
22.03.2022	K11	1.110,20	568,90	14,54
23.03.2022	K05	1.118,61	589,18	15,05

2.3.3 Dichteberechnung aus Flugtransekt-Erfassungen

Analysen zum Vorkommen der marinen Säuger im und um das Baugebiet des OWP „Kaskasi II“ wurden basierend auf den Daten des gesamten Erfassungsbereichs von 544 m Breite durchgeführt, sodass sich der Erfassungsaufwand insgesamt aus der unter auswertbaren Bedingungen zurückgelegten Flugstrecke multipliziert mit 544 m errechnete.

Standardmäßig wurden die absolute Anzahl gesichteter Schweinswale inklusive Kälber, der Kälberanteil in Prozent sowie die Schweinswaldichte jeweils pro Flug ermittelt. Da sich manche Individuen so tief unterhalb der Wasseroberfläche befinden, dass sie sich der Erfassung aus der Luft entziehen, sind bei der Berechnung absoluter Dichten von Schweinswalen Korrekturfaktoren anzuwenden. Für diesen sogenannten Verfügbarkeitsfehler (BORCHERS 2003) stehen für Schweinswale Daten von TEILMANN et al. (2013) zur Verfügung (vgl. Tabelle 3). Diese Korrekturfaktoren wurden anhand der Aufenthaltsrate besonderer Schweinswale in den oberen zwei Metern der Wassersäule im Bereich der Nord- und Ostsee bestimmt. Tabelle 3 stellt die monatspezifischen Aufenthaltswahrscheinlichkeiten in den obersten zwei Metern der Wassersäule in der Nordsee dar, also dem Bereich, der vom Flugzeug aus eingesehen werden kann. Für die digitale Erfassungsmethode wurden somit zur Dichteberechnung von Schweinswalen die gezählten Individuen hinsichtlich der monatspezifische Aufenthaltswahrscheinlichkeit korrigiert, der erhaltene Wert auf eine definierte Fläche bezogen (Ind./km²) und diese Dichten kartografisch dargestellt (siehe Anhang: Abbildung 92 bis Abbildung 98). Die genaue Verteilung der einzelnen Sichtungen von Schweinswalen pro Flug wird im Anhang in Form von Punktsichtungskarten gezeigt (Abbildung 99 bis Abbildung 103).

Tabelle 3: Aufenthaltswahrscheinlichkeiten von Schweinswalen in der oberen Wassersäule (0 bis 2 m Tiefe) nach TEILMANN et al. (2013) in Abhängigkeit vom Beobachtungsmonat.

Monat	Aufenthaltswahrscheinlichkeit in 0 bis 2 m Tiefe
Januar	0,492
Februar	0,425
März	0,525
April	0,615
Mai	0,573
Juni	0,553
Juli	0,570
August	0,517
September	0,450
Oktober	0,453
November	0,463
Dezember	0,499

2.3.4 Statistische Auswertung der Flugtransekt-Erfassungen

2.3.4.1 Gradientenanalyse: Auswirkungen durch den Bau des OWP „Kaskasi II“

Um zu überprüfen, ob Schweinswale eine Reaktion (Meidung) während der Eingriffsphase zeigten und um den Störradius abzuschätzen, wurde eine statistische Auswertung der Häufigkeit der Schweinswale in Abhängigkeit der Entfernung zur Eingriffsfläche durchgeführt (im Folgenden als Gradientenanalyse bezeichnet). Ziel dieser Analyse ist es, den Einfluss des Eingriffs auf die Verteilung der Schweinswale zu modellieren und damit den potentiellen Lebensraumverlust während des Baus des OWP zu ermitteln. Als statistische Methode zur Durchführung der Gradientenanalyse wurden neben einem nicht-parametrischen Test zum Vergleich von groben Abstandsklassen auch Generalisierte Additive Modelle (GAMs) berechnet, eine Form der Regressionsanalyse zur Modellierung nicht-linearer Zusammenhänge (WOOD 2006).

Der nicht-parametrische Test weist auf mögliche Unterschiede im Vorkommen von Schweinswalen in Bezug auf den Abstand zum OWP hin und kann gerichtete Effekte auf einer vergleichsweise groben Skala darstellen. Das GAM weist hingegen eine feinere Skalierung auf und ermöglicht ein detaillierteres Bild eines möglichen Effektes. Die gemeinsame Betrachtung beider Methoden ist eine robuste Vorgehensweise, um mögliche Effektreichweiten zu evaluieren.

Für die Gradientenanalyse wurden drei Flugerfassungen vor Baubeginn (25.06.2021, 18.07.2021 und 07.03.2022) als Basiserfassung berücksichtigt, zwei weitere Flugerfassungen wurden der Eingriffsphase zugeordnet (K11: 22.03.2022 und K05: 23.03.2022; Tabelle 2). Die Auswertung erfolgte dabei getrennt nach Basisphase und Eingriffsphase.

Berechnung der Sichtungsraten pro Abstandsband

Für die Analyse der baubedingten Effekte war die Vergleichbarkeit der Daten in unterschiedlichen Abständen zum OWP Voraussetzung. Dementsprechend musste für alle Erfassungen der Erfassungsaufwand, also die auswertbare Flugtransektstrecke, relativ zum Abstand vom OWP berechnet werden. Dazu wurden zunächst die Fläche des OWP und die Fläche um den OWP in 10 m-Bänder unterteilt (Abbildung 5). Der Erfassungsaufwand innerhalb der Bänder variierte, da unterschiedlich lange Teilstücke der Transekte in

diesen enthalten waren (z. B. bei senkrechter Kreuzung ca. 10 m Transektstrecke, bei parallel zum Band verlaufender Transektstrecke teils mehrere Kilometer lange Teilstücke).

Im zweiten Schritt wurden die zuvor ermittelten 10 m-Bänder zu Abstandsbändern zusammengefasst, die einen gleichen Erfassungsaufwand, also die gleiche auswertbare Transektstrecke aufwiesen. Für die Gewährleistung der Vergleichbarkeit zwischen den beiden Phasen (Basiserfassungen und Eingriffsphase), wurde der aufsummierte Erfassungsaufwand für jedes einzelne Band auf 25 km festgelegt. Die Breite der auf diese Weise generierten Abstandsbänder war somit vom Erfassungsaufwand in der jeweiligen Entfernung zum Vorhabengebiet „Kaskasi II“ abhängig. Aufgrund der über die Entfernung exponentiell wachsenden Fläche der 10 m-Bänder, mussten bei zunehmender Distanz zum Zentrum des OWP weniger 10 m-Bänder aufsummiert werden, um Abstandsbänder mit einem jeweiligen Gesamterfassungsaufwand von 25 km je Phase zu erhalten (vgl. Abbildung 5). Die Breite der Abstandsbänder verringerte sich somit potenziell mit wachsender Entfernung, wobei der Erfassungsaufwand aller Bänder relativ gesehen konstant blieb. Auf diese Weise konnten Individuenzahlen zwischen den Abstandsbändern direkt miteinander verglichen werden.

Abstandsklassen und nicht-parametrischer Test

Die Sichtungsraten in verschiedenen Abständen zum OWP wurden miteinander verglichen. Dafür wurde der Datensatz in folgende Abstandsklassen unterteilt: 10-m-Bänder, deren Mittelpunkte innerhalb des OWP lagen („OWP“), sowie 10-m-Bänder, deren Mittelwerte im Bereich von 0-2 km, 2-4 km, 4-6 km, 6-8 km, 8-10 km und 10-12 km Distanz zum OWP lagen.

Die am weitesten entfernte Abstandsklasse (10-12 km) wurde standardmäßig als Referenzklasse gewertet und statistisch mit allen anderen Abstandsklassen durch einen nicht-parametrischen Wilcoxon-Mann-Whitney-Rangsummentest (U-Test) verglichen. Allerdings zeigten die Ergebnisse des PAM zumindest bei Impulsrammungen mitunter größere Effektreichweiten als 12 km. Die beiden Flüge der Bauphase fanden jedoch während zweier Vibrationsrammungen statt, die möglicherweise geringere Effektreichweiten hatten als die Impulsrammungen (wobei allerdings zwischen den beiden Vibrationsrammphasen an zwei aufeinander folgenden Flugtagen eine Impulsrammphase lag). Insgesamt war davon auszugehen, dass es sich bei der 10-12 km-Abstandsklasse nicht um eine echte unbeeinflusste Referenz handelte, sondern hier eine weniger stark beeinflusste Abstandsklasse mit potenziell stärker beeinflussten Klassen verglichen wurde.

Als Interpretationshilfe wurde für jede Phase der prozentuale Anteil der Sichtungsraten (von der Gesamtsichtungsraten) innerhalb jeder Abstandsklasse berechnet. Auf diese Weise wurde ein zahlenmäßiger Vergleich der Anteile erleichtert.

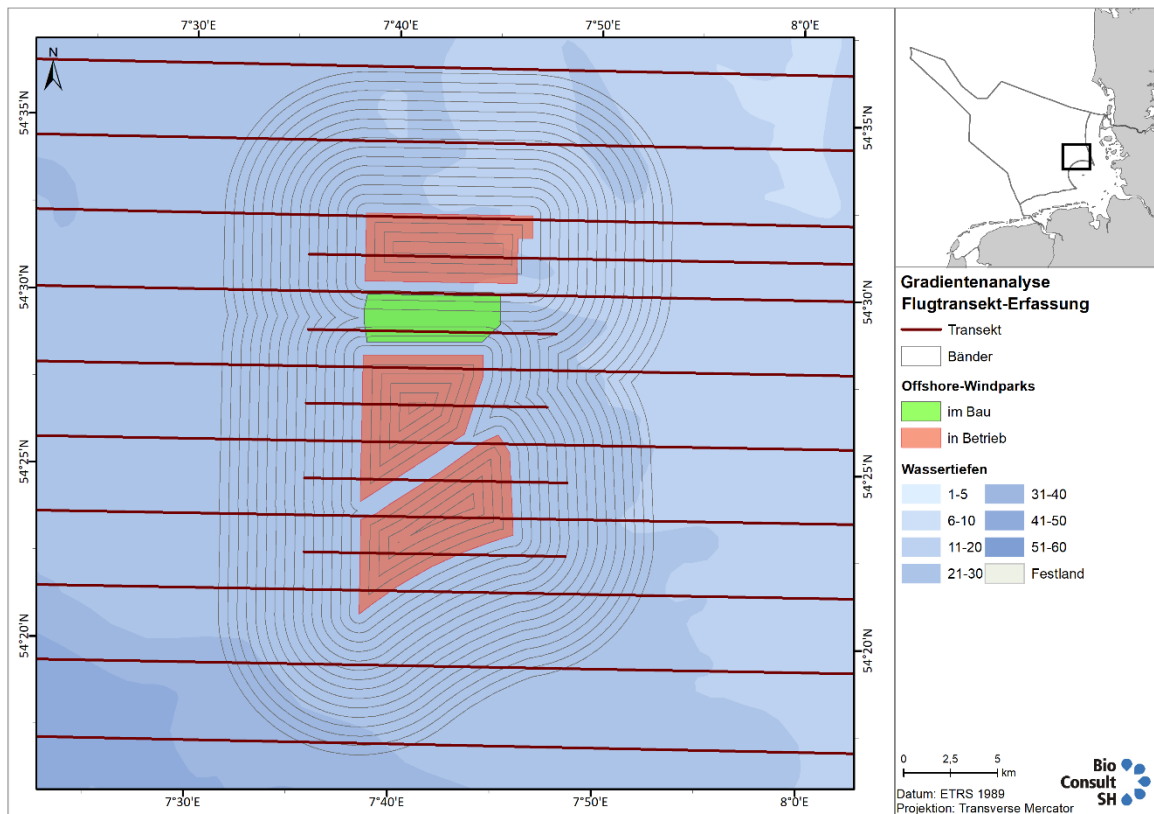


Abbildung 5: Beispielhafte Darstellung der Abstandsbänder mit gleichem Erfassungsaufwand, innerhalb derer die jeweiligen HiDef-Flugsichtungen zusammengefasst wurden, sowie der Verlauf der für die Gradientenanalyse betrachteten Flugtransekte im UG.

Statistische Auswertung mittels GAM

In einem zweiten Ansatz wurden die 10-m-Bänder gemäß der oben beschriebenen Methode in Abstandsbänder gleichen Erfassungsaufwandes (25 km) zusammengefasst. Diese unterschiedlich breiten Abstandsbänder dienten als Datengrundlage für die GAM-Analysen

Die Daten wurden in R 4.1.1 (R CORE TEAM 2021) ausgewertet, wobei GAMs (Funktion *gam()* aus dem R Paket *mgcv* (Wood 2017)) mit negativ-binomialer Verteilung der abhängigen Variable errechnet wurden. Als abhängige Variable wurde die aufsummierte Anzahl der Individuen (bzw. Sichtungen) pro Abstandsbänder herangezogen. Die Erklärungsvariable war die mittlere Distanz des jeweils betrachteten Abstandsbänder zum OWP. Die Anzahl der Knotenpunkte in den GAMs wurde aufgrund der relativ geringen Anzahl an Datenpunkten auf $k=3$ festgelegt (KEELE 2008; ZUUR 2009). Alle Modelle wurden mit Hilfe diagnostischer Plots validiert.

Die Anzahl der Datenpunkte (Abstandsbänder von 25 km Erfassungsaufwand mit Sichtungen) für die Berechnung des GAMs variierte in den verschiedenen Phasen aufgrund der jeweils unterschiedlichen Gesamterfassungstrecke. In Abhängigkeit vom Erfassungsaufwand wurden 47 Datenpunkte für die Basisphase bzw. 32 Datenpunkte für die Eingriffsphase generiert. Die Anzahl der generierten Datenpunkte, n , findet sich über der Darstellung jedes Modells.

Sofern die Modelle einen signifikanten Regressionsverlauf zwischen der Anzahl erfasster Individuen und der Distanz zum OWP zeigten, wurde die Glättungskurve des Modells mit 95 %-Konfidenzintervallen dargestellt. Zeigte die Kurve einen gerichteten Anstieg der Sichtungszahlen mit zunehmendem Abstand zum OWP und erreichte dieser ein Maximum/Plateau innerhalb des Betrachtungsbereichs, konnte ein Meidebereich, abhängig von den Konfidenzintervallen des Modells, bestimmt werden. Der geschätzte

Meideabstand wurde anhand des unteren Konfidenzintervalls festgelegt. Zusätzlich wurde, sofern möglich, derjenige Bereich innerhalb der Konfidenzintervalle festgelegt, in dem 50 % der Tiere (abhängig vom modellierten Maximalwert) im betrachteten Gebiet vorhanden waren.

Da jedoch nur wenige Flüge vorlagen, die zudem lediglich einige Stunden dieser Flugtage abdeckten, waren die Ergebnisse deutlich stärker von stochastischen Abweichungen betroffen als die des durchgängigen passiv-akustischen Monitorings (PAM). Die Aussagekraft des PAM war daher als besser einzustufen.

2.3.4.2 INLA-SPDE (*Integrated Nested Laplace Approximation with Stochastic Partial Differential Equations*)

Modellierungsansatz

Neben der Gradientenanalyse (nicht-parametrischen Tests und GAMs) wurde ein räumlich-expliziter Bayesianischer Modellierungsansatz gewählt, der latente Gauß-Modelle (LGMs) und die Integrated Nested Laplace-Approximation (INLA, RUE ET AL. 2009) verwendet. Dieser erlaubt eine genauere Abschätzung der Modell-Konfidenzintervalle und berücksichtigt potenzielle räumliche Autokorrelationen innerhalb des Datensatzes. Um diese in punktbezogenen Daten zu berücksichtigen, wurden stochastische partielle Differentialgleichungen (SPDE, stochastic partial differential equations) verwendet (LINDGREN ET AL. 2011).

Der SPDE-Ansatz stellt einen kontinuierlichen räumlichen Prozesses – z.B. eines latenten stationären Gauss-Feldes (GF) – mittels einer Matèrn-Kovarianzfunktion als diskret indiziertem räumlichem Zufallsprozess dar (RUE & HELD 2005). Dieser Ansatz ist recheneffizient und berücksichtigt gleichzeitig die räumlich-zeitliche Interdependenz und Autokorrelation in den Daten. Das INLA-SPDE ist daher eine sehr gut geeignete Methode für das komplexe Problem der Quantifizierung von Meidungseffekten aufgrund von Offshore-Windparks auf Basis digitaler Erfassungen (VILELA ET AL. 2021).

Für das gesamte UG wurde ein verfeinertes räumliches Delaunay-Netz (VILELA ET AL. 2021) mit einem maximalen Abstand von 2 km zwischen den Knoten erstellt (Abbildung 6). Um Randeffekte zu vermeiden, wurde um den Vorhersagebereich herum ausreichend Fläche hinzugefügt (LINDGREN ET AL. 2011). Zudem wurde ein 1 km-Puffer um das Cluster „Nördlich Helgoland“ gelegt, um die bereits während der Basisphase verringerten Sichtungsraten in den umliegenden Windparks, die sich in der Betriebsphase befanden, nicht einfließen zu lassen.

Räumliche Verteilungsmodelle vor und während des Baus

Für die Basisphase und Eingriffsphase wurden zwei separate räumliche Modelle entwickelt, um auf die räumliche Verteilung der Schweinswale vor und während des Eingriffs schließen zu können. Dabei wurden alle verfügbaren Sichtungen sowie der Erfassungsaufwand der jeweiligen Flüge in das entsprechende Modell integriert (Abbildung 6).

Joint-Likelihood-Modell

Um eine Bewertung der Veränderung der Verteilung vor und während des Baus des OWP „Kaskasi II“ vorzunehmen, wurde ein Joint-Likelihood-Modell erstellt: Die Differenz zwischen dem allgemeinen (auf den Gesamtdatensatz bezogenen) und dem spezifischen (auf den Datensatz nach dem Eingriff bezogenen) Likelihood-Term wurde als Maß für die Veränderung der räumlichen Verteilung verwendet. Die Konfidenzintervalle (Q0,025 und Q0,975) des sich ergebenden log10 der „Posterior“-Verteilung (der „Intensity“) wurden verwendet, um die Grenzen statistisch signifikanter (positiver und negativer) Veränderungen zwischen beiden Zeiträumen abzuschätzen.

Meidungseffekte durch den Windpark

Die Bereiche signifikanter Veränderungen zwischen der Basis- und Eingriffsphase, die sich aus dem Multi-Likelihood-Modell ergaben, wurden verwendet, um die äußere Grenze des durch die Aktivitäten im Zeitraum der beiden Vibrationsrammungen betroffenen Areals festzulegen (wobei bei der Interpretation zu bedenken war, dass zwischen diesen beiden Vibrationsrammphasen auch noch Impulsrammungen bei K11 stattfanden). So wurde die durchschnittliche Effektdistanz aus allen tatsächlichen Entfernungswerten abgeleitet, bei denen jeweils die äußere Grenze einer signifikanten Abnahme lag.

Alle Analysen wurden mit dem Programm R 3.2.3 (R CORE TEAM 2019) unter Verwendung des Pakets *inlabru* (BACHL ET AL. 2019) durchgeführt, das speziell für die Modellierung der räumlichen Verteilung und Veränderung ökologischer Erfassungsdaten entwickelt wurde.

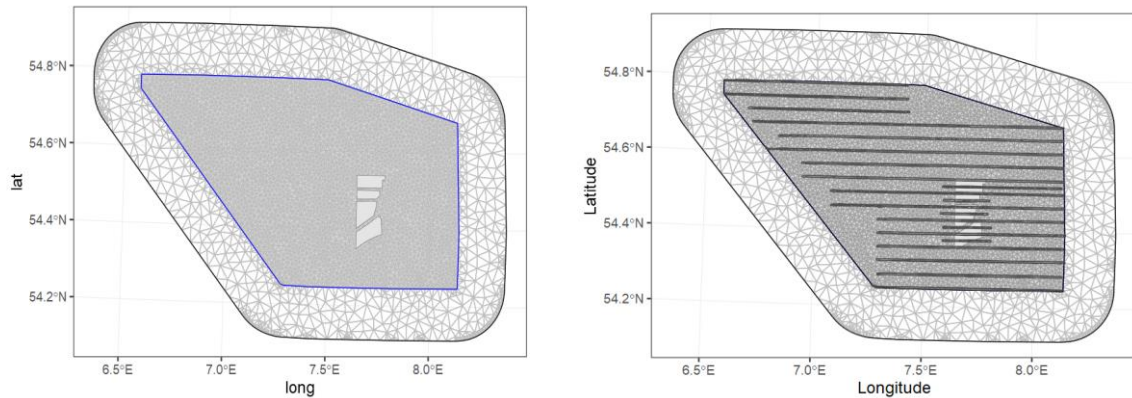


Abbildung 6: Links: Verfeinertes räumliches Delaunay-Netz (Bereich innerhalb des blauen Polygons); eingezeichnet sind die vier OWPs des Clusters „Nördlich Helgoland“. Rechts: Erfassungsaufwand der fünf Flüge.

2.3.5 Analyse der AIS-Daten im Zusammenhang mit den HiDef-Flugerfassungen

Für die Analyse des Schiffsverkehrsaufkommens wurde ein minutengenauer Datensatz mit AIS-Daten für das gesamte Untersuchungsgebiet (Abbildung 7; siehe auch Anhang: Abbildung 104 bis Abbildung 108) inklusive des Fluguntersuchungsgebietes verwendet. Die Daten umfassten außerdem den Zeitraum der fünf Flugerfassungen, sowie den Zeitraum bis zu fünf Stunden davor. Alle Berufsschiffe über 300 BRZ und seit 2014 auch alle Fischereifahrzeuge über 15 m Länge sind verpflichtet, eine AIS-Anlage zu betreiben (INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION 2002; EUROPEAN COMMISSION 2014). Kleinere Fahrzeuge sowie Freizeitboote sind oft nicht damit ausgestattet und konnten daher in dieser Analyse nicht berücksichtigt werden.

Die einzelnen GPS-Positionen der Schiffe konnten in ArcGIS zu Tracks verbunden werden, wodurch eine genaue Verschneidung der AIS-Daten mit den HiDef-Daten möglich war. Die Schiffe der Bauflotte waren im Datensatz separat gekennzeichnet. Die Analyse beschränkte sich jedoch auf generelle Effekte von Schiffen auf Schweinswale. Weitergehende Auswertungen war aufgrund der Datenlage (im Baufeld keine Schweinswalsichtungen während aller HiDef-Flüge) mit der vorliegenden Methode nicht möglich.

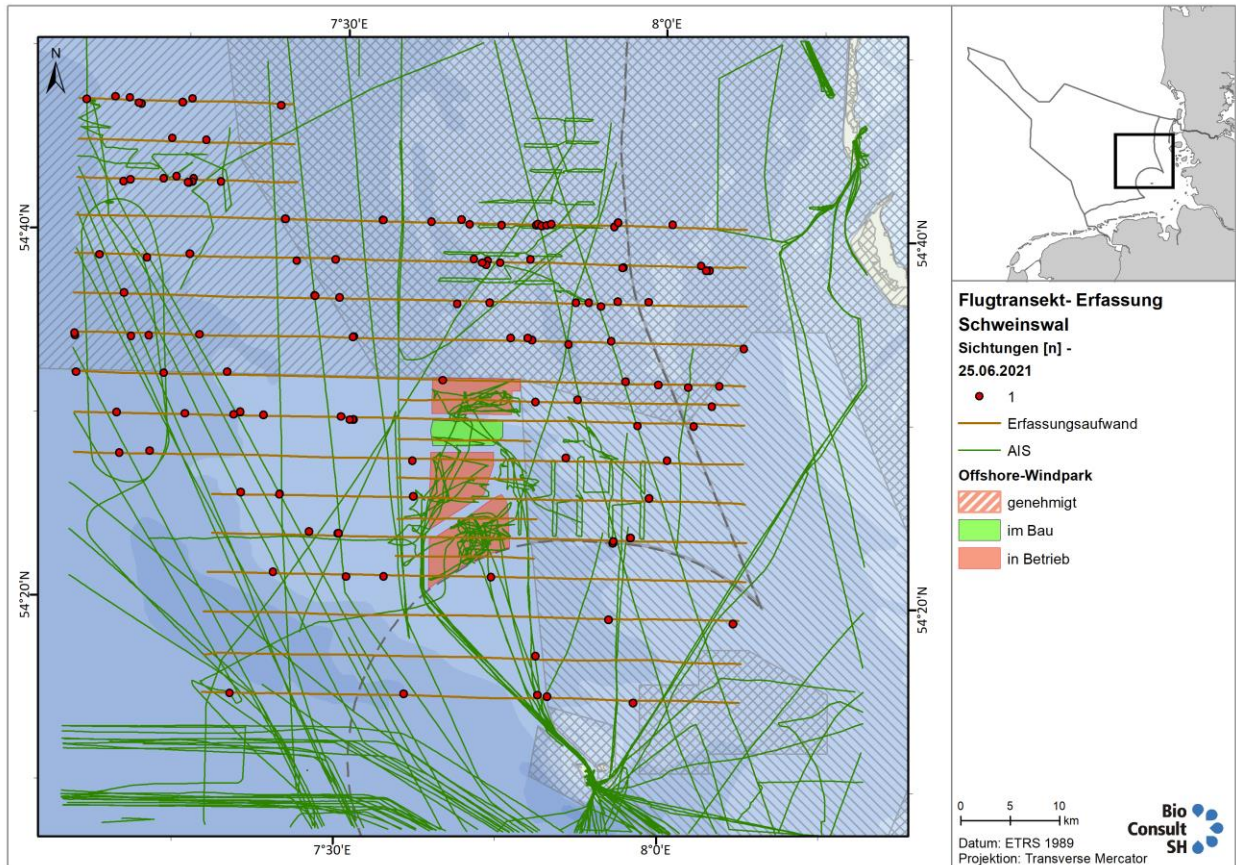


Abbildung 7: Beispielhafte Darstellung der AIS-Daten für einen Flugerfassungstag (25.06.2021), mit Schweinswalsichtungen.

2.3.5.1 Auswertung der Daten

Die Auswertung folgt dem Vorgehen von BURGER ET AL. (2019) zu Seetauchern in der Deutschen Bucht. Prinzipiell ist diese Analyseform aber für jede Tierart geeignet, da es nur um Verteilungsmuster geht. Für die entsprechende Analyse wurden zunächst die Schweinswaldaten mit den Schiffsdaten in ArcGIS verschnitten. Dazu wurden die Flugtransekte in Abschnitte mit einer Trassenlänge von 1 km (Kompromiss zwischen räumlicher Genauigkeit einerseits und einer nicht zu niedrigen Sichtungszahl pro Trasse andererseits) unterteilt und für jeden dieser Abschnitte die Schweinswaldichte (Ind./km²) berechnet (Abbildung 8). Falls der Erfassungsaufwand für eine Zelle zu gering war (<0,10 km²), wurde diese verworfen. Für jeden 1 km Abschnitt wurden, vom Zentrum ausgehend, Radien zwischen 1 und 5 km gezogen (1 km, 2 km, 3 km, 4 km und 5 km), für welche die Schiffsdaten berücksichtigt wurden (Abbildung 8). Diese Radien wurden verwendet, um die Reichweite des Effekts zu untersuchen. Es wurden alle Schiffe berücksichtigt, die zwischen 0 (also dem Zeitpunkt des Überflugs) bzw. zwei Stunden vor Erfassung und dem Zeitpunkt der Flugerfassung in der betrachteten Zelle vorkamen (0 h, 1 h, 2 h). Damit konnte auch eine mögliche Störung durch Schiffe berücksichtigt werden, die bereits vor dem Überflug stattfand.

Für die Transektabschnitte von 1 km Länge wurden die folgenden Kovariablen extrahiert: Anzahl der Schiffe, Zeit seit der letzten Schiffspassage, Schiffsgeschwindigkeit, Schiffslänge und die Interaktion zwischen Breiten- und Längengrad, um zusätzliche geografische Variationen zu berücksichtigen. Die Daten wurden mittels Generalisierter Additiver Modelle (GAM) bzw. Generalisierter Gemischter Additiver Modelle (GAMM) in R (R CORE TEAM 2018) unter Verwendung des Pakets *mgcv* (WOOD 2015) und der Funktion *gam()* bzw. *gamm()* analysiert.

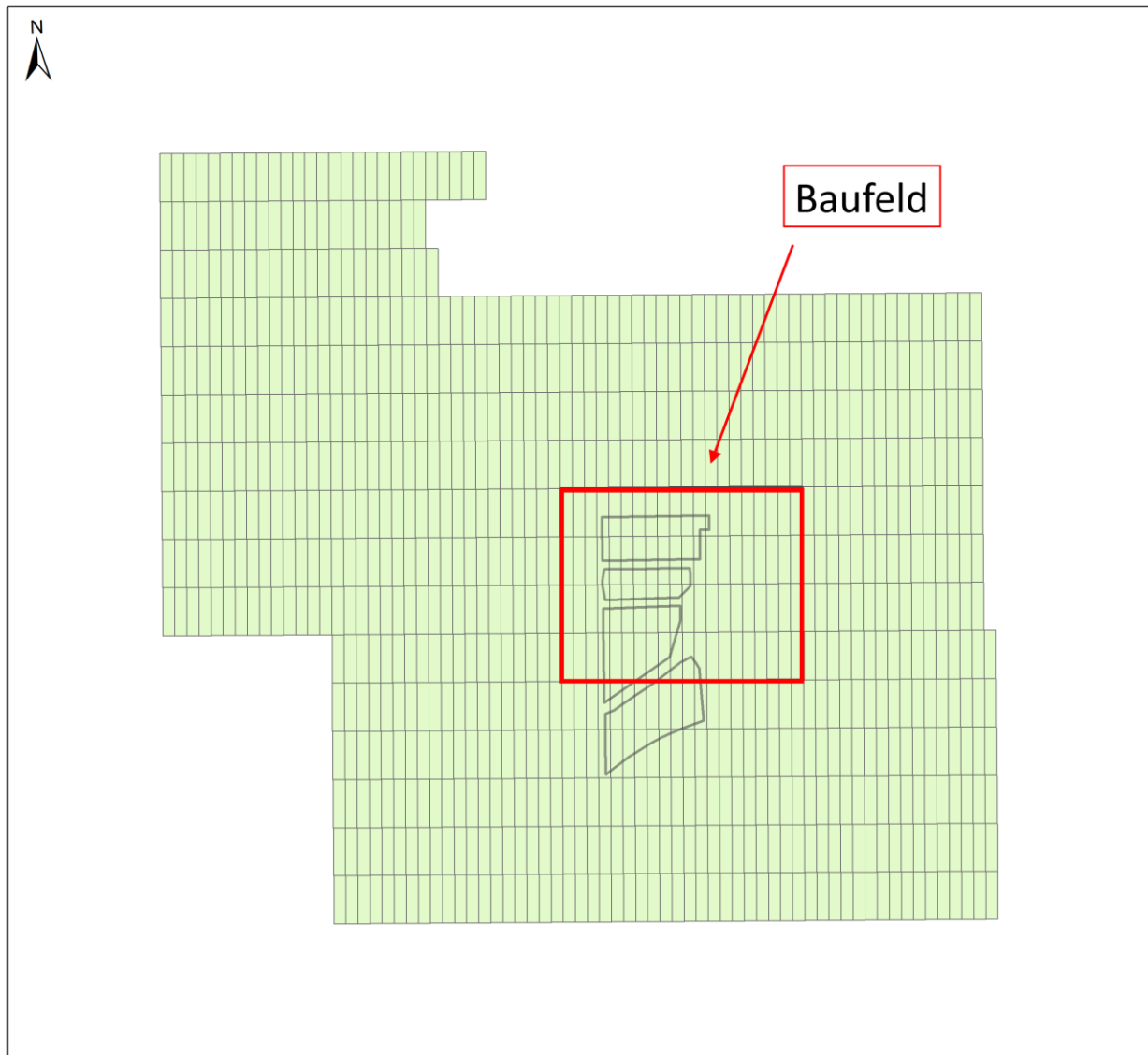


Abbildung 8: Zellen im Untersuchungsgebiet, die zur Berechnung der Schweinswaldichte verwendet wurden und von denen ausgehend die Radien für die Schiffsdaten gezogen wurden. In Rot ist ein Bereich markiert, der als „Baufeld“ bezeichnet wird, da hier erhöhte Aktivität von Bauschiffen zu erwarten war.

Es wurden zwei verschiedene Modelle erstellt, die nacheinander für alle Radien zwischen 1 km und 5 km und Zeiträume zwischen 0 h und 2 h angewendet wurden. Das erste Modell (Modell 1) wurde konstruiert, um Veränderungen in der Abundanz von Schweinswalen in Abhängigkeit von der Anzahl der Schiffe zu beschreiben. Zunächst wurde ein Anfangsmodell mit der Anzahl der anwesenden Schiffe als linearer Effekt und Datum als „random effect“ erstellt, um Unterschiede zwischen den einzelnen Flugterminen zu berücksichtigen. Es wurden Modelle mit unterschiedlichen Strukturen verglichen, um das beste Modell zu identifizieren. Als Korrelationsstruktur wurde die Form „corARMA(form=~1|Transekt,p=1)“ gewählt. Die Darstellung der Modellresiduen mit den Funktionen *acf* (autocorrelation function) und *pacf* (partial autocorrelation function) (Paket stats; R CORE TEAM 2018) zeigte dabei nur geringe Probleme mit Autokorrelation. Für die Anpassung des Modells wurde weiterhin eine negative Binomialverteilung gewählt.

Das zweite Modell (Modell 2) wurde erstellt, um Veränderungen in der Abundanz von Schweinswalen in Abhängigkeit zu der Zeitspanne vor der Erhebung (max. 2 Stunden vorher) und zu bestimmten Merkmalen der anwesenden Schiffe zu beschreiben. Im Einzelnen enthielt das Modell hierbei eine Glättungsfunktion (Thin Plate Spline Smoother) für die Schiffsvariablen "Zeit seit dem letzten Schiff", "Schiffslänge" und

"Schiffsgeschwindigkeit". So konnte untersucht werden, ob beispielsweise besonders große oder schnell-fahrende Schiffe zu einer stärkeren Meidung führten. Die weitere Struktur des Modells entsprach der von Modell 1. Auch hier wurde Datum als „random effect“ verwendet.

2.4 Passiv-akustische Erfassungen (PAM)

Schweinswale orientieren sich anhand von Echolokalisation mit Hilfe kurzer, hochfrequenter, engbandiger Klicklaute, die sie nahezu kontinuierlich aussenden (AU ET AL. 1999; AKAMATSU ET AL. 2007; WISNIEWSKA ET AL. 2012, 2016). Dies können einzelne Klicks sowie Klickabfolgen (Trains) sein, die aus mehreren nacheinander ausgesandten Klicks bestehen. Einzelne Klicklaute haben eine durchschnittliche Dauer von 77 μ s und werden mit einer Spitzenfrequenz von ca. 130 kHz und einer Lautstärke von 157-169 dB ausgesendet (TEILMANN ET AL. 2002; VILLADSGAARD ET AL. 2007). Das Hörvermögen von Schweinswalen umfasst Frequenzen von 16 Hz bis 140 kHz, wobei das beste Hörvermögen zwischen 100 kHz und 140 kHz liegt (KASTELEIN ET AL. 2002, 2015). Anhand der reflektierten Schallwellen taxieren Schweinswale ihre Umgebung, spüren ihre Beute auf und kommunizieren untereinander (KOSCHINSKI ET AL. 2008; VERFUSS ET AL. 2009; CLAUSEN ET AL. 2011).

Über die Kommunikation zwischen Schweinswalen ist jedoch noch relativ wenig bekannt (SØRENSEN ET AL. 2018). Allerdings zeigten CLAUSEN et al. (2011), dass die kurzen, hochfrequenten Klicklaute, die zum Aufspüren der Beute genutzt werden, auch der Kommunikation mit Artgenossen dienen können.

Für die passiv-akustischen Erfassungen des Forschungsvorhabens VISSKA kamen an 17 Stationen insgesamt bis zu 21 C-PODs (vgl. Abbildung 9) zum Einsatz (an den beiden Dauer-Messstationen (=BSH-Stationen) S11 und S12 aus Gründen der Ausfallkompensierung drei redundante C-PODs, von denen zu jedem Zeitpunkt nur einer für die Auswertungen genutzt wurde), mit welchen die Klicktrains der Schweinswale detektiert wurden.



Abbildung 9: C-PODs bereit für die Ausbringung (links) sowie ein geöffneter C-POD (rechts).

2.4.1 Der C-POD

Die passiv-akustische Erfassung der Habitatnutzung durch Schweinswale erfolgte anhand von C-PODs. Ein C-POD zeichnet die hochfrequenten Echolokationssignale von Schweinswalen mit Hilfe eines eingebauten Hydrofons in einer Entfernung von bis ca. 300 m auf. C-PODs bestehen aus einer ca. 67 cm langen Plastikröhre, an deren einem Ende sich das Hydrofon befindet (vgl. Abbildung 9). Direkt darunter befinden sich

ein Verstärker und ein elektronischer Filter. Das Hydrofon zeichnet omnidirektional alle Lautereignisse mit einer Klickcharakteristik im Frequenzbereich von 20 kHz bis 160 kHz auf. Hauptfrequenz, Frequenzverlauf, Lautdauer, Intensität (in 8-bit-Schritten), Bandbreite und Hüllkurve des Frequenzspektrums werden für jeden einzelnen Klick gespeichert. Insgesamt zehn 1,5 V D-Batterien versorgen das Gerät mit ausreichender Spannung für mindestens sechs Wochen. Über SD-Karten steht eine einfach auszulesende Speichereinheit von bis zu 4 GB zur Verfügung. Die Geräte sind vom Hersteller auf der Hauptfrequenz von Schweinswalklicks (130 kHz) kalibriert und auf einen gleichen Hörschwellenwert eingestellt (± 3 dB). Schweinswale senden ihre Klicklaute stark nach vorne gerichtet in einem Schallkegel mit einem horizontalen Öffnungswinkel von 13° und einem vertikalen Öffnungswinkel von 11° aus (KOBELITZ ET AL. 2012). Das bedeutet, dass C-PODs die Anwesenheit von Schweinswalen nur aufzeichnen können, wenn diese Klicklaute aussenden, in geeigneter Entfernung zum Gerät schwimmen und ihren Kopf zeitweise in Richtung des Hydrofons gerichtet halten. Die Aufzeichnung von Schweinswalklicks wird daher wesentlich durch die Aktivität des Tieres, die Entfernung und den Schwimmwinkel zum C-POD beeinflusst. Nach Vorgabe verschiedener Filter wandelt ein C-POD die Schallwellen in digitale Daten um und speichert diese auf einer SD-Karte ab.

C-PODs liefern folgende wesentlichen Informationen über die Tiere:

- An-/Abwesenheit von Schweinswalen an einem Standort;
- relative Dichte der Tiere an einem Standort über das Maß „schweinswalpositive Zeiteinheit“;
- möglicher Aufschluss über verschiedene Verhaltensweisen durch eine Analyse der Klickabfolgen in hoher zeitlicher Auflösung.

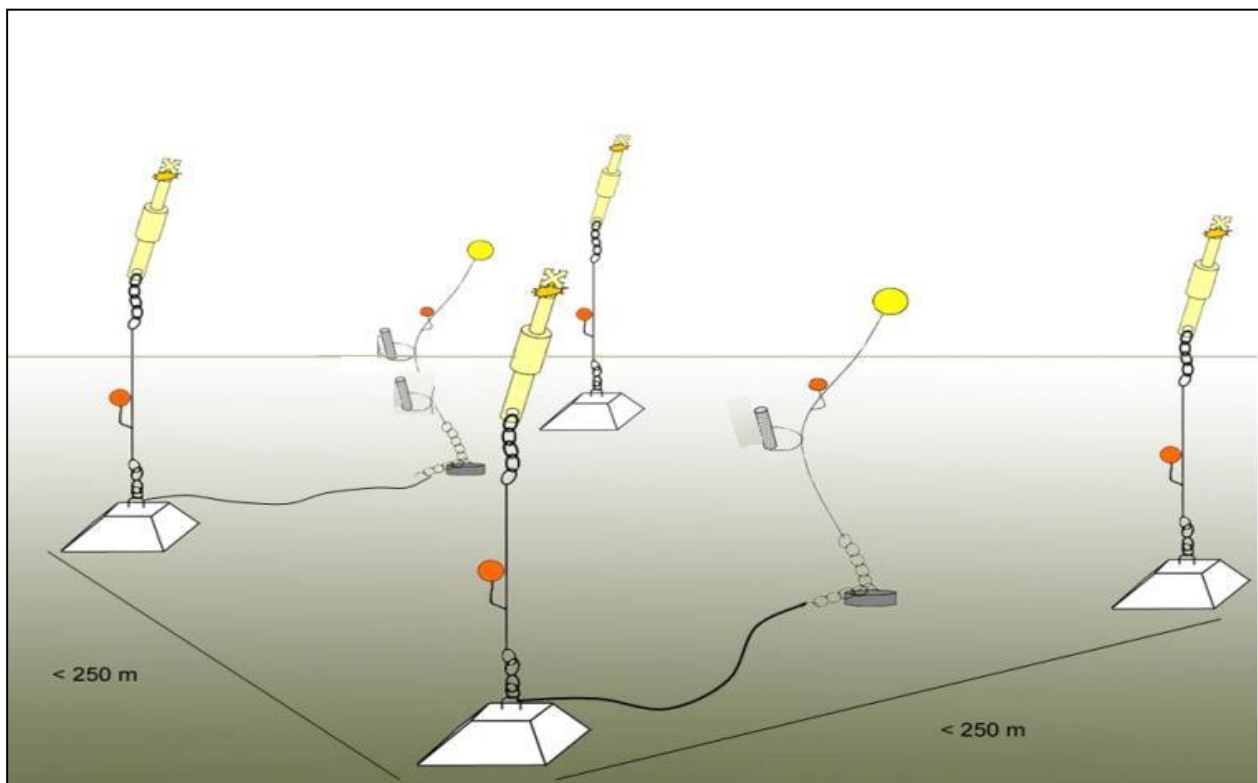


Abbildung 10: Skizze des Verankerungssystems für die BSH-Stationen (Zeichnung: Honnef/Gauger).

Das Verankerungssystem der BSH-Stationen S11 und S12 ist skizzenhaft in Abbildung 10 dargestellt. Diese Dauer-Messstationen wurden mit vier Warnspieren (6 m lang) markiert, die jeweils mit Blinklicht ausgestattet und mit großen Ankersteinen (600 kg) fixiert wurden. Die vier Warnspieren markieren ein Quadrat mit ca. 250 m Seitenlänge. An zwei Spieren wurde über eine Bodenleine ein kleiner, etwa 90 kg schwerer Ankerstein befestigt, von welchem ein Seil zu einem gelben Ball (Markerball) an der Wasseroberfläche

führt. In dieses Seil wurde etwa 5 m über Grund jeweils ein C-POD eingehängt. An einer Position wurde ca. 15 m darüber (also 20 m über Grund) ein zweiter C-POD eingehängt. An den Dauer-Messtationen wurden also insgesamt drei C-PODs installiert. Die kleinen Ankersteine liegen innerhalb des von den Spieren markierten Quadrates.

Im Unterschied zu den BSH-Stationen bestanden die Einzel-Stationen jeweils aus nur einer Warnspiere, einem Verankerungssystem mit einem Ankerstein und einem Markerball, in dessen Seil der C-POD eingehängt wurde (vgl. Abbildung 11). Dies erlaubte einen Gerätewechsel ohne Bergung der gesamten Verankerung.

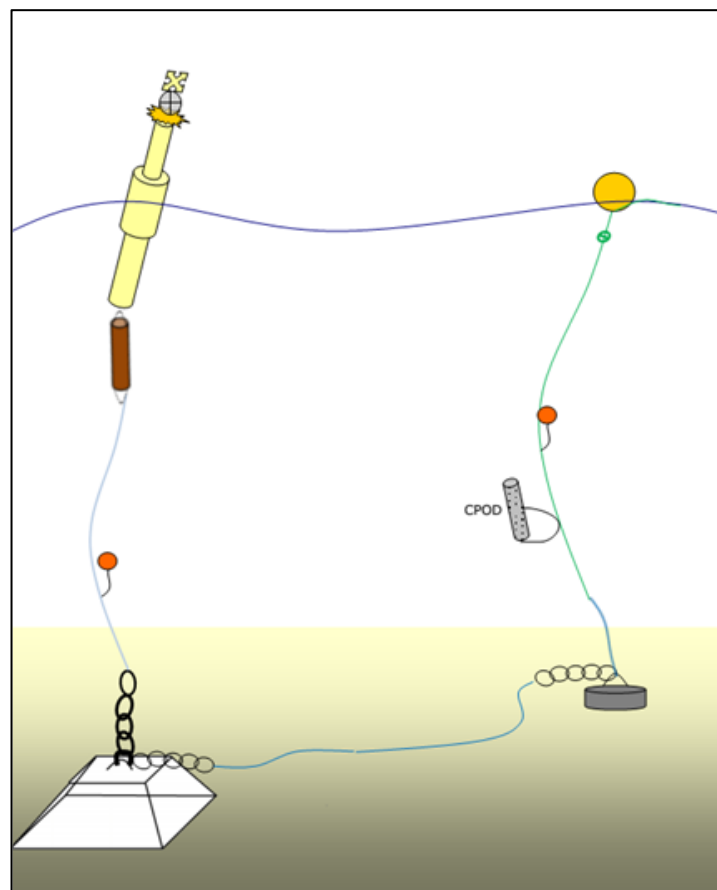


Abbildung 11: Skizze des Verankerungssystems für die Einzel-Stationen (Zeichnung: Honnef/Gauger).

2.4.2 Stationen und Untersuchungszeitraum

Es wurden Daten von insgesamt 17 C-POD-Stationen analysiert (Abbildung 12). Hiervon waren 15 Einzel-Stationen mit nur jeweils einem Gerät besetzt. Mit jeweils 3 C-PODs versehen waren hingegen die BSH-Stationen S11 und S12. Da die Daten dieser beiden Stationen ohne großen Mehraufwand eingebunden werden konnten, war es möglich, die ursprünglich geplante Zahl von 15 POD-Stationen auf 17 zu erhöhen. Dies verbesserte die Genauigkeit der Analysen im mittleren Distanzbereich zum Windpark.

Für die Erstellung von Phänologiekurven, die zur Einschätzung der Schweinswal-Entwicklung in einem längeren Zeitraum vor der OWP-Errichtung und während der Bauarbeiten dienen, sowie zur Ermittlung der Anzahl an Sonartrains an den einzelnen Stationen, wurden C-POD-Daten vom 04.06.2021 bis zum 16.05.2022 ausgewertet. Die GAM-Analysen zu Ramm- und Schiffseffekten während der Bauphase benötigten hiervon nur die Datensätze aus dem Zeitraum der Bauarbeiten. Ausgewertet wurde dabei der Zeitraum vom 03.03.2022 bis zum 30.04.2022.

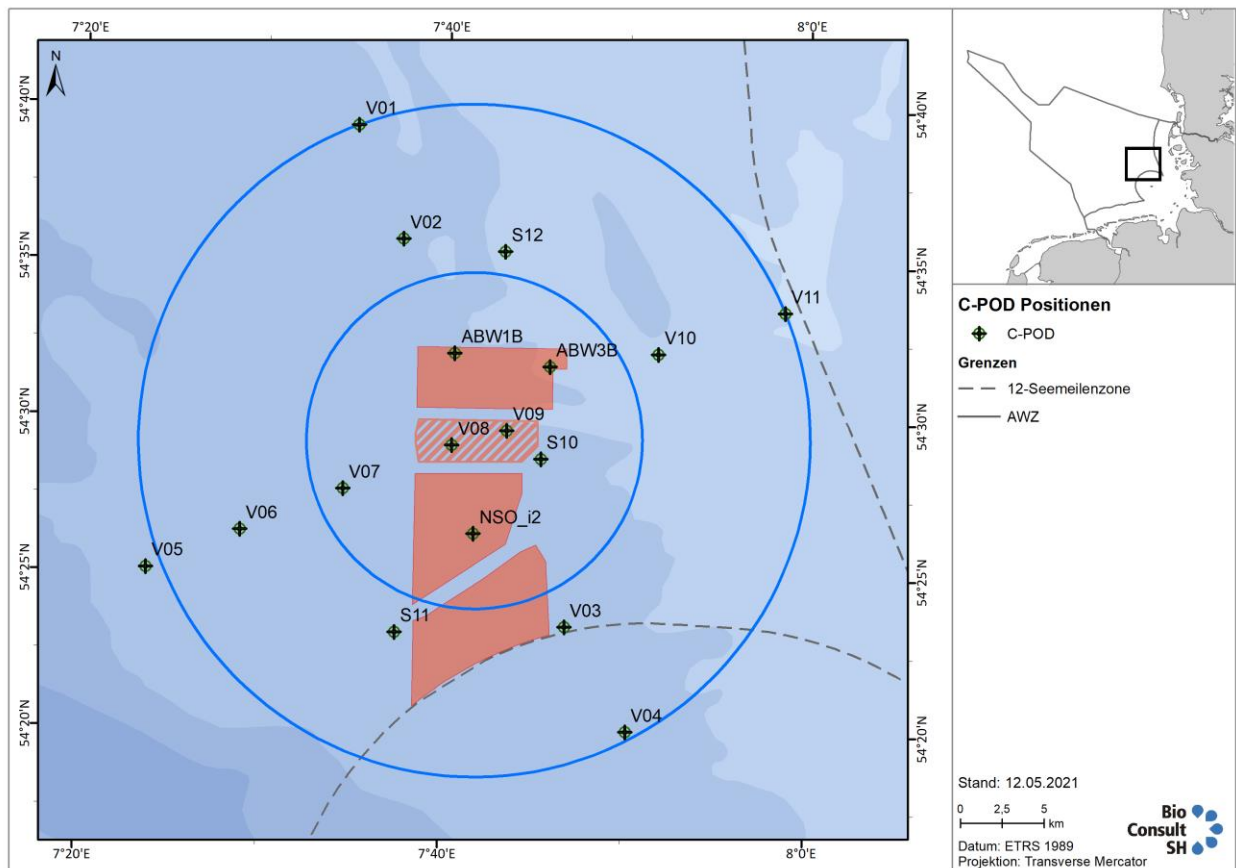


Abbildung 12: Positionen der C-POD-Stationen im UG; Ringe: 10 km und 20 km Distanz vom OWP-Zentrum.

2.4.3 Datenerfassung mit C-PODs

2.4.3.1 Software

Die Signale wurden von den C-PODs in Echtzeit aufgezeichnet, sodass es durch die zeitliche Auflösung der Klicks möglich war, Klicktrains von Schweinswalen mithilfe eines in der Software CPOD.exe (Chelonia Ltd., UK) enthaltenen Algorithmus zu identifizieren. Die anschließende Datenanalyse wurde ausschließlich mit der Version CPOD V2.045.exe durchgeführt. In die statistische Datenauswertung floss der Parameter NBHF (Narrow Band High Frequency: im UG nur Schweinswale) mit der Variable SpClass ein. Es wurde der KERNO Classifier angewandt.

Die von C-PODs aufgezeichneten Laute können neben den Klicklauten von Schweinswalen von einer Vielzahl anderer Schallquellen stammen. Die Auswertungssoftware untersucht die vom Gerät gespeicherten Lautinformationen in einem ersten Schritt auf das Vorhandensein von Klicktrains. In einem zweiten Schritt sucht der Algorithmus innerhalb dieser Klicktrains nach bestimmten Eigenschaften und Mustern und nutzt dazu sämtliche aufgezeichneten Merkmale eines Lautereignisses wie Bandbreite, Frequenzspektrum oder Schallintensität. Der Algorithmus gliedert die aufgezeichneten Daten anhand typischer Lautmuster in folgende Kategorien: Schweinswale, Delfine, Bootssonare und Tonfolgen unbekanntem Ursprungs. Die Klicktrains wurden innerhalb ihrer Kategorie von der Software in vier verschiedene Qualitätsklassen mit abnehmender Wahrscheinlichkeit eingeteilt (Tabelle 4).

Tabelle 4: Qualitätsklassen für Klicktrains von Schweinswalen inkl. ihrer Definition.

Qualitätsklasse	Definition
<i>high</i>	Klicktrains, die mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit Schweinswallaute sind.
<i>moderate</i>	Kurze Klicktrains, die wahrscheinlich Schweinswallaute sind.
<i>low</i>	Klicktrains mit Lautmustern, die möglicherweise Schweinswallaute sind, aber aufgrund ihres vom Ideal abweichenden Musters auch anderen Ursprungs sein können.
<i>doubtful</i>	Klicktrains, die aufgrund ihrer Länge oder ihres zeitlichen Musters eher technischen Ursprungs sind. Es kann aber nicht ausgeschlossen werden, dass sich darunter auch Klicktrains von Schweinswalen befinden, deren ausgestoßene Laute das Hydrofon nur teilweise, aus großer Entfernung oder in einem ungünstigen Winkel treffen.

Zur weiteren Auswertung wurden nur Schweinswal-Klicktrains herangezogen, die den beiden besten Qualitätsklassen (*high* und *moderate*) zugeordnet wurden. Damit wurde weitestgehend verhindert, dass fälschlicherweise als Schweinswale klassifizierte Laute in die Auswertung mit einfließen. Die durch den Algorithmus nicht identifizierten echten Schweinswal-Klicktrains sind theoretisch über die Zeit konstant und für alle Positionen gleich, sofern sich die Sensitivität der Geräte an den verschiedenen Positionen nicht unterscheidet. Laut Herstellerangaben liegt der maximale Unterschied in der absoluten Empfindlichkeit bei 130 kHz bei nur 3 dB, was normalerweise einen nur geringen Effekt aufgrund unterschiedlicher Geräte-Sensitivitäten erwarten lässt, welcher zusätzlich durch das randomisierte Wechseln der C-PODs zwischen verschiedenen Positionen weitestgehend nivelliert wird.

2.4.3.2 Chelonia-Kalibrierungsfehler

Das PAM wurde mittels C-PODs durchgeführt, die von der Firma Chelonia Ltd bezogen wurden. Um die Datengüte zu gewährleisten, wurden standardmäßig alle eingesetzten C-PODs vor, während (alle zwei Jahre) sowie nach ihrer Ausbringung kalibriert. Die Kalibrierung der für die VISSKA-Studie eingesetzten C-PODs erfolgte hierbei durch den Hersteller Chelonia Ltd.

Am 02.03.2022 wurde BioConsult SH von Chelonia Ltd darüber informiert, dass es etwa ab dem 30.04.2019 (und somit bereits vor Beginn des Projektes) bei der Kalibrierung der C-PODs bzw. den anschließenden Einstellungen zu Fehlern gekommen ist. Chelonia Ltd gab an, seitdem die SD-Karten der C-PODs mit fehlerhaften Einstellungen bespielt zu haben. Nach Überprüfung aller Rohdaten wurde von BioConsult SH festgestellt, dass die SD-Karten sogar bereits ab Oktober 2018 fehlerhaft bespielt worden waren.

Standardmäßig speichern C-PODs nur solche tonalen Signale (inklusive Schweinswal-Klicks), die entsprechend den jeweiligen spezifischen Einstellungen einen Filter passiert haben. Mindestens fünf Klicks sind erforderlich, um einen Klicktrain bilden zu können, der hierbei den im letzten Kapitel genannten Art- und Qualitätskriterien zugeordnet wird. Durch die fehlerhaften Einstellungen wurden allerdings nur dann Signale aufgezeichnet, wenn mindestens neun tonale Signale in enger Abfolge auftraten. Dadurch wurden im Vergleich zur Standardeinstellung insgesamt weniger Schweinswal-Trains aufgezeichnet. Die Detektionsraten wichen umso stärker ab, je feiner aufgelöst ein Detektionsparameter war. So war beispielsweise die Rate detektionspositiver Tage weniger stark betroffen als detektionspositive 10-Minutenblöcke.

Um einen in sich konsistenten Datensatz zu bekommen, wurden die Rohdaten der korrekt kalibrierten C-PODs mit denselben fehlerhaften Einstellungen wie auch die von Chelonia inkorrekt kalibrierten C-PODs ausgewertet. So blieben alle studieninternen Daten direkt miteinander vergleichbar. Dies hatte gleichzeitig den Vorteil, dass weniger Fehlklassifikationen von Klicks auftraten, da bei einer Mindestzahl von neun Klicks pro Train die Zuordnung zu einer Artklasse (z.B. Schweinswal) sicherer war als bei fünf Klicks.

2.4.3.3 Detektionsparameter

Die Daten wurden in der Datenbank PODIS jeweils nach der Ausbringung bzw. vor der Bergung auf die nächste volle Stunde geschnitten, um einen Einfluss der Ein- und Ausbringungsarbeiten auf die Daten zu vermeiden. Anschließend wurden die Daten je nach Fragestellung und verwendetem Datensatz sowie Auswertungsparameter unterschiedlich analysiert. Hierbei wurden skriptbasierte Berechnungen mit der Software R (R CORE TEAM 2021) durchgeführt. Die in Tabelle 5 gelisteten Parameter wurden je nach Fragestellung ausgewertet.

Tabelle 5: Liste der aus den C-POD-Aufzeichnungen verwendeten Detektionsparameter.

Parameter	Erläuterung
%DP10M/Zeiteinheit	DP10M = Schweinswal-Detektionspositive 10-Minutenblöcke: Dieser Parameter gibt prozentual an, innerhalb wie vieler 10-Minutenblöcke einer bestimmten Zeiteinheit (Tag/Monat/Untersuchungszeitraum/Hell- oder Dunkelphase etc.) mindestens eine Schweinswalregistrierung auftrat. Dieser Parameter wurde für Phänologiekurven in einer Auflösung von Tagen verwendet. Er gibt an, innerhalb wie vieler der 144 verfügbaren 10-Minutenblöcke eines 24-Stunden-Tages mindestens eine Schweinswalregistrierung auftrat. Mit dem häufig verwendeten, tagesgenauen Parameter %DP10M/d wird ein guter Kompromiss zwischen einer einerseits zeitlich möglichst hohen Auflösung zur Erkennung von Trends und Unterschieden zwischen Stationen und andererseits einer zeitlich ausreichend groben Auflösung bezüglich einer Nivellierung der Sensitivitätsunterschiede verschiedener Geräte erzielt.
positiveMinutes/h	positiveMinutes = Minuten mit Schweinswal-Detektionen: Dieser Parameter zeigt an, wie viele Minuten mit Schweinswal-Detektionen innerhalb einer Erfassungsstunde auftraten. Er kann Werte von 0 bis 60 annehmen und bot eine ausreichend feine zeitliche Auflösung, um mittels GAM-Analysen die Effekte von Rammarbeiten und Schiffsaktivitäten auf Schweinswale zu untersuchen.
SP10M, SP10M_rate, Sonartrains	SP10M = Sonar-Detektionspositive 10-Minutenblöcke: Der erste Parameter gibt als Wert zwischen 0 und 100 an, innerhalb wie vieler 10-Minutenblöcke einer Stunde mindestens ein Sonar-Klicktrain registriert wurde. Als stündliche Rate mit möglichen Werten zwischen 0 und 1 wird dieser Parameter unter der Bezeichnung <i>SP10M_rate</i> in den GAMs verwendet. Die Gesamtzahl der Sonartrains wird als Parameter für das Schiffsaufkommen an den Stationen verwendet. Alle drei Parameter sind Indikatoren für Sonarsignale emittierende Schiffsaktivitäten in der näheren Umgebung eines C-PODs.
allClx/Zeiteinheit	allClx = alle aufgezeichneten Klicks (aus allen Geräuschquellen): Wenn dieser Parameter einen Wert von 3.000.000 (tagesgenaue Auflösung) bzw. 125.000 (stundengenaue Auflösung) überschritt, wurde definiert, dass die Auswirkungen der Stör- und Hintergrundgeräusche auf die Qualität des Datensatzes so groß waren, dass der entsprechende Tag bzw. die entsprechende Stunde nicht auswertbar war.
minutesOverflow/Zeiteinheit	minutesOverflow = Minuten mit Überschreitung des Datenlimits: Bezeichnet die Anzahl der Minuten, während derer das sekundenbezogene Aufzeichnungslimit von 4.096 Klicks überschritten wurde. Überschritt dieser Parameter einen Wert von 200 (tagesgenaue Auflösung) bzw. von 8 (stundengenaue Auflösung), wurde definiert, dass die Auswirkungen der Stör- und Hintergrundgeräusche auf die Qualität des Datensatzes so groß waren, dass der entsprechende Tag bzw. die entsprechende Stunde nicht auswertbar war.

2.4.3.4 Beschneidung des Datensatzes

Es ist bekannt, dass der Gesamtgeräuschpegel einen Einfluss auf die Schweinswal-Detektionsraten haben kann (CLAUSEN ET AL. 2018). Es wurde daher bei den tagesgenauen bzw. stundengenauen Analysen ein duales Kriterium zur Noisebereinigung angewandt (Tagesdaten: ≤ 3 Mio. allClx/d und ≤ 200 minutesOverflow/d; Stundendaten: ≤ 125.000 allClx/h und ≤ 8 minutesOverflow/h). Indem auf diese Weise stark geräuschbelastete Datensätze ausgeschlossen wurden, in denen Schweinswal-Detektionen in stärkerem Maße maskiert sein konnten, sollten die Auswirkungen der Stör- und Hintergrundgeräusche auf die Qualität der Analysen minimiert werden. Zudem wurden nur Tage oder Stunden mit einem vollständigen Datensatz (1.440 Aufzeichnungs-Minuten pro Tag bzw. 60 Aufzeichnungs-Minuten pro Stunde) analysiert. Durch die genannten Maßnahmen wurden 8,5 % (544 von 6.381) der tagesbezogenen sowie 2,6 % (621 von 24.008) der stundenbasierten Datensätze aus den jeweiligen Untersuchungszeiträumen exkludiert.

Weitere Datensätze wurden bei bestimmten Generalisierten Additiven Modellen dadurch ausgeschlossen, dass Werte für bestimmte Schiffs-, Schall-, Ramm- oder Umweltparameter (siehe Sektion 2.4.4.2.1) nicht immer vorlagen. Das Ausmaß hing hierbei vom verwendeten Variablen- und C-POD-Satz des jeweiligen Modells ab.

2.4.3.5 Ausbringungszeiträume und -lücken

Zwar konnten aufgrund von Geräteausfällen nicht im gesamten Studienzeitraum an allen C-POD-Stationen Daten erhoben werden; jedoch lagen immerhin aus dem Zeitraum der Bauarbeiten im März und April 2022 Daten von allen Stationen vor (Abbildung 13).

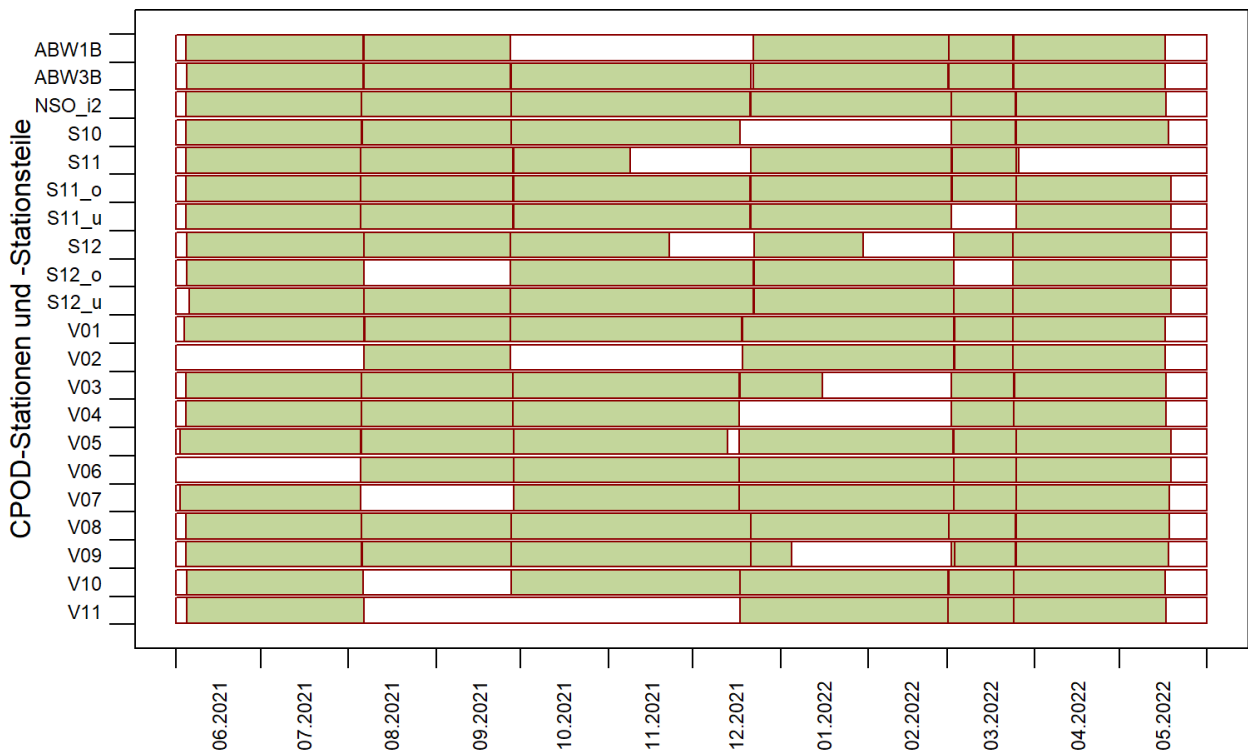


Abbildung 13: Zeiträume mit Daten an den 17 C-POD-Stationen im Untersuchungsgebiet; bei den BSH-Stationen S11 und S12 sind alle drei Stationsteile dargestellt.

2.4.4 Statistische Auswertung der C-POD-Daten

2.4.4.1 Saisonales Auftreten

Um eventuelle Auswirkungen des gesamten Baugeschehens auf das saisonale Auftreten der Schweinswale zu analysieren, wurde für jede C-POD-Position der prozentuale Anteil der detektionspositiven 10-Minuten-Einheiten pro Tag (%DP10M/d) für den Untersuchungszeitraum ermittelt. Hiermit wurden mittels der Software *R* (Paket *stats*; R CORE TEAM 2021) Phänologiekurven der Schweinswal-Detektionsraten für alle C-POD-Stationen erstellt. Bei den beiden BSH-Stationen S11 und S12 wurde immer nur einer der drei redundanten Stationsteile pro C-POD-Station ausgewählt. Priorität hatte der Stationsteil mit den meisten nach Noisebereinigung verfügbaren Tagesdatensätzen im Gesamtzeitraum. Die Phänologien wurden über eine Loess-Regression (*R*-Paket *stats*; R CORE TEAM 2021) mit einer Bandbreite (= *span*) von 0,0137 (Berechnung eines 5-Tage-Fensters mit stärkerem Einfluss der zentraleren Tage) geglättet. Eventuelle Datenlücken, bedingt durch zu starke Störgeräusche oder Geräteausfall, blieben bei der Darstellung erhalten.

Die Ähnlichkeit der C-POD-Stationen hinsichtlich des phänologischen Auftretens der Schweinswale wurde über einer t-SNE-Analyse (t-Distributed Stochastic Neighbour Embedding) ermittelt. Diese Analyse basiert auf dem Machine Learning (*R*-Paket *tSNE*: VAN DER MAATEN & HINTON 2008; DONALDSON 2016). Als Ähnlichkeitsmaß wurde hierbei die Cosine Similarity verwendet. Es flossen nur solche Tage in die Ähnlichkeitsanalysen ein, an denen Daten aller C-POD-Stationen vorlagen.

2.4.4.2 GAM-Analysen

Generalisierte Additive Modelle (GAMs) wurden mit dem *R*-Paket *mgcv* (WOOD 2015) errechnet, um zu bewerten, welche Faktoren die Werte der Schweinswal-Detektionsrate im stundenbasierten Datensatz am besten erklärten. Dieser Modelltyp wurde aufgrund seiner Flexibilität gewählt, da auch nicht-parametrische Funktionen einfließen können (WOOD 2017).

Im Falle einer starken Korrelation (Kollinearität) zweier Ko-Variablen (hier definiert: über 0,5) wurde die biologisch aussagekräftigste ausgewählt (ZUUR ET AL. 2010). Die GAMs wurden zudem auf Multikollinearität (O'BRIEN 2007) (verwendeter Index: *IND2*; ULLAH et al. 2019) sowie Konkurvität (AMODIO ET AL. 2015) überprüft, während die Normalität der einzelnen Erklärungsvariablen anhand von Histogrammen überprüft wurde (ZUUR ET AL. 2009).

Die zeitliche Autokorrelation in den Modellresiduen wurde mit einem Durbin-Watson-Test (PINHEIRO & BATES 2000) bewertet, der in allen Modellen eine signifikante Autokorrelation anzeigte (*p*-Wert unter 0,05). Infolgedessen wurde die Detektionsrate (*positiveMinutes*) aus der Stunde zuvor (*DPHt*) als Proxy für die zeitliche Autokorrelation in das Modell aufgenommen. Zudem wurde in jedem GAM ein *rho*-Wert festgelegt, der dem sogenannten *AR1*-Korrelationsparameter entsprach. Da zudem in der *bam*-Funktion der Parameter *discrete* auf TRUE gesetzt wurde, wurde hier das *AR*-Modell auf die Prädiktor-Residuen (*working residuals*) angewandt und entsprach somit einer *GEE*-Approximation. Der räumlichen Autokorrelation wurde über Einbindung der Stations-Koordinaten in die jeweiligen Modelle Rechnung getragen.

Um *Overfitting* zu minimieren, wurden die Glättungskurven (*Splines*) so modifiziert, dass sie auf die Nullfunktion schrumpfen und somit aus dem Modell herausgefiltert werden konnten, wobei der *Double-Penalty*-Ansatz (MARRA & WOOD 2011) gewählt wurde. Hierbei wurde der Gammawert im *select*-Argument der *bam*-Funktion auf 1,4 gesetzt (gemäß Empfehlung von WOOD 2017). Schließlich erfolgte die Auswahl des am besten erklärenden Modells unter Anwendung einer *Backward Selection* bei sequenziellem Ausschluss nicht-signifikanter Variablen mit dem höchsten *p*-Wert (ZUUR ET AL. 2009). In Ausnahmefällen wurden nicht-signifikante Erklärungsvariablen im Modell belassen, sofern es sich um solche von wesentlichem Interesse handelte (hier speziell: Zeit und Entfernung zur Baustelle bei der Evaluierung von Vibrations-Rammeffekten).

2.4.4.2.1 Variablen

Es wurde eine Reihe von Variablen (Tabelle 6 bis Tabelle 9) auf ihre Verwendbarkeit in den GAMs geprüft und bei ausreichend geringer Kollinearität mit anderen Variablen je nach Fragestellung in den initialen Modellen eingesetzt.

Als abhängige Variable wurde die stundenaufgelöste Schweinswal-Detektionsrate *positiveMinutes* gewählt (Tabelle 6), die einen guten Kompromiss zwischen zeitlicher Genauigkeit und genügend Schweinswal-Detektionen pro Zeiteinheit darstellt. Hierbei wurde aufgrund der *Overdispersion* der Daten eine Quasipoisson-Fehlerstruktur der abhängigen Variablen angenommen. Als Methode zur Abschätzung der Glättungsparameter (*smoothing parameters*) wurde *fREML* (*fast restricted/residual/reduced maximum likelihood approach*) ausgewählt.

Tabelle 6: Für die GAM-Analysen verwendeter abhängiger Schweinswal-Detektionsparameter.

Parameter-Typ	Variable	Anzahl PODs	Zeitliche Auflösung	Quelle	Beschreibung [Einheit]
Schweinswal	<i>positiveMinutes</i>	17	1 Stunde	C-POD	Schweinswal-positive Minuten pro Stunde: abhängige Variable! [Integer: 0 bis 60]

Die geografische Position der C-POD-Stationen (*POD_x*, *POD_y*) floss als Tensorprodukt in die Modelle ein, um eine eventuelle räumliche Autokorrelation zu berücksichtigen, während die Detektionsrate aus der Stunde zuvor (*DPHt*) geeignet war, die zeitliche Autokorrelation zu verringern (Tabelle 7).

Tabelle 7: Liste der für die GAM-Analysen verwendeten Parameter zur Korrektur einer möglichen räumlichen und zeitlichen Autokorrelation der Daten.

Parameter-Typ	Variable(n)	Anzahl PODs	Zeitliche Auflösung	Quelle	Beschreibung [Einheit]
Zeitliche Autokorrelation	<i>DPHt</i>	17	1 Stunde	C-POD	Wert von <i>positiveMinutes</i> in der vorherigen Zeitstunde an einem C-POD [Integer: 0 bis 60]. Zusätzlich zu <i>DPHt</i> wurde zur Korrektur der zeitlichen Autokorrelation in jedem GAM ein bestimmter <i>rho</i> -Wert festgelegt.
Räumliche Autokorrelation	<i>POD_x</i> , <i>POD_y</i>	17	1 Stunde	C-POD	Geografische Länge und Breite (WGS84) eines C-PODs; immer als Tensorprodukt [kontinuierlicher Dezimalwert]

Als Erklärungsvariablen für die Schweinswal-Detektionsrate wurden einerseits verschiedene potenziell schweinswalrelevante Umweltparameter für jede C-POD-Station und jeden Zeitschritt aus der Copernicus-Datenbank (www.copernicus.eu) extrahiert, darunter die Tiefe und Tiefenvariabilität im Umfeld des C-PODs, die täglichen Werte für den Salzgehalt, die Chlorophyll- α - und Phytoplankton-Konzentration, sowie die Oberflächentemperatur-Anomalie. Außerdem wurden der Datenbank die stündlichen bzw. viertäglichen Werte der Geschwindigkeit und Richtung der Oberflächenströmung bzw. des Windes entnommen (Tabelle 8).

Tabelle 8: Liste der für die GAM-Analysen berücksichtigten Umweltparameter.

Parameter-Typ	Variable	Räumliche Auflösung	Zeitliche Auflösung	Mess-tiefe	URL
Bathymetrie	<i>depth_average, depth_sd_of25nodes</i>	~ 250 m	Studie	-	http://portal.emodnet-hydrography.eu/
Temperatur	<i>SST_anom_inter</i>	0.25 x 0.25 Grad	1 Tag	0 m	http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/
Strömung	<i>curr_speed, curr_dir</i>	~ 7 km	1 Stunde	0 m	http://www.myocean.eu/ (http://marine.copernicus.eu/)
Wind	<i>wind_speed, wind_dir</i>	2.5 x 2.5 Grad	6 Stunden	10 m	http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/
Phytoplankton	<i>phyto, chl</i>	~ 7 km	1 Tag	0 m	http://www.myocean.eu/ (http://marine.copernicus.eu/)
Salinität	<i>dm_sal</i>	~ 7 km	1 Tag	0 m	http://www.myocean.eu/ (http://marine.copernicus.eu/)

Für die Studie von besonderem Interesse als Eklärungsvariablen waren die Schall-, Schiffs-, Ramm- und Zeitparameter. Diese betrafen einerseits das tages- und jahreszeitliche Auftreten der Schweinswale (*h*, *yday*), andererseits die von den Tieren (teils den C-PODs) potenziell wahrnehmbaren Geräusch- und Störquellen (Tabelle 9).

Tabelle 9: Liste der für die GAM-Analysen berücksichtigten Schall-, Schiffs-, Ramm- und Zeitparameter.

Parameter-Typ	Variable	Anzahl PODs	Zeitliche Auflösung	Quelle	Beschreibung [Einheit]
Schall	<i>spl_unweighted_max</i>	6	1 Stunde	itap	Maximum des nicht frequenzgewichteten Schallpegels SPL [dB]
Schall	<i>spl_125Hz_max</i>	6	1 Stunde	itap	Maximum des tieffrequenten (125 Hz) Schallpegels SPL [dB]
Schall	<i>spl_VHF_weighted_max</i>	6	1 Stunde	itap	Maximum des nach dem Schweinswal-Hörspektrum gewichteten Schallpegels SPL [dB]
Schall	<i>allClx_minus_positiveClx</i>	17	1 Stunde	C-POD	Sonstige vom C-POD aufgezeichnete Klicks, die keine Schweinswal-Klicks waren: ein Maß für die Geräuschbelastung am C-POD [Integer: 0 bis 245.760]
Schiff	<i>n_all_ships</i>	6	1 Stunde	AIS	Anzahl aller Schiffe in 5 km Umkreis um C-POD [Integer]
Schiff	<i>all_ships_dist_min</i>	6	1 Stunde	AIS	Distanz des zum C-POD nächstgelegenen Schiffes unter Berücksichtigung aller Schiffe in 5 km Umkreis um C-POD [Dezimalwert, km]
Schiff	<i>all_ships_speed_max</i>	6	1 Stunde	AIS	Geschwindigkeit des schnellsten Schiffes unter Berücksichtigung aller Schiffe in 5 km Umkreis um C-POD [Dezimalwert, kn]
Schiff	<i>n_DP_faehig_ships</i>	6	1 Stunde	AIS	Anzahl aller DP-fähigen Schiffe in 5 km Umkreis um C-POD [Integer]

VISSKA – Abschlussbericht AP7

Parameter-Typ	Variable	Anzahl PODs	Zeitliche Auflösung	Quelle	Beschreibung [Einheit]
Schiff	<i>DP_faehig_ships_dist_min</i>	6	1 Stunde	AIS	Distanz des zum C-POD nächstgelegenen DP-fähigen Schiffes unter Berücksichtigung aller DP-fähigen Schiffe in 5 km Umkreis um C-POD [Dezimalwert, km]
Schiff	<i>DP_faehig_ships_speed_max</i>	6	1 Stunde	AIS	Geschwindigkeit des schnellsten DP-fähigen Schiffes unter Berücksichtigung aller DP-fähigen Schiffe in 5 km Umkreis um C-POD [Dezimalwert, kn]
Schiff	<i>SP10M_rate</i>	17	1 Stunde	C-POD	Am C-POD erfasste Rate der sonarpositiven 10-Minutenblöcke pro Stunde mit Werten von 0 bis 1 [diskontinuierlicher Dezimalwert]
Rammung	<i>hrw</i> (= hour relative to work)	17	1 Stunde	-	Stunde relativ zu Zeitstunde(n) der Rammphase (Vergrämung & Rammarbeiten = hrw0). Zuordnung je nach Dauer des Zeitraums zwischen zwei Rammphasen nach der folgenden Priorisierung: 1) 0-36h: während und nach der Rammung (hrw0 bis hrw+36); 2) 37-60h: zusätzlich vor Rammphase bis 24h vor FaunaGuard (hrw-24 bis hrw-1; 3) 61-96h: zusätzlich bis 72h nach Rammung (hrw+37 bis hrw+72); 4) 96-144h: zusätzlich vor Rammphase bis 72h vor FaunaGuard (hrw-72 bis hrw-25). Immer als Tensorprodukt gemeinsam mit <i>dist</i> verwendet [Integer: -72 bis +72]
Rammung	<i>dist</i>	17	1 Stunde	-	Distanz des C-PODs zur Baustelle; immer als Tensorprodukt gemeinsam mit <i>hrw</i> [Dezimalwert, km]
Zeit	<i>h</i>	17	1 Stunde	-	Tagesstunde [Integer: 0 bis 23]
Zeit	<i>yday</i>	17	1 Tag	-	Jahrestag [Integer: 1 bis 365]

Aufgrund von zu starker Kollinearität (Abbildung 14) wurden von diesen Variablen die folgenden bei der Modellbildung ausgeschlossen:

- *depth_average* und *depth_sd_of25nodes* wiesen eine starke Kollinearität mit den Koordinaten der C-POD-Stationen *POD_x* und *POD_y* auf. Letzteres Variablenpaar floss trotz hohem Korrelationswert als Tensorprodukt gemeinsam in die Modelle ein, um auf räumliche Autokorrelation korrigieren zu können.
- *dm_sal* und *chl* korrelierten stark mit *phyto*; letztere Variable wurde weiter verwendet, da sie von diesen dreien die direkteste biologische Verbindung (Nahrungsnetz) zum Auftreten der Schweinswale hatte.

VISSKA – Abschlussbericht AP7

- *SST_anom_inter* korrelierte stark mit *yday*. Letztere Variable blieb erhalten, weil sie über das phänologische Auftreten am einfachsten interpretierbar war.
- Der Gesamtschall (*spl_unweighted_max*) wurde aus Gründen der Multikollinearität verworfen. Um die Effekte von hochfrequentem (*spl_VHF_weighted_max*) und tieffrequentem Schall (*spl_125Hz_max*) besser auftrennen zu können, wurden diese beiden komplementären Variablen beibehalten, nicht aber der Gesamtschall.

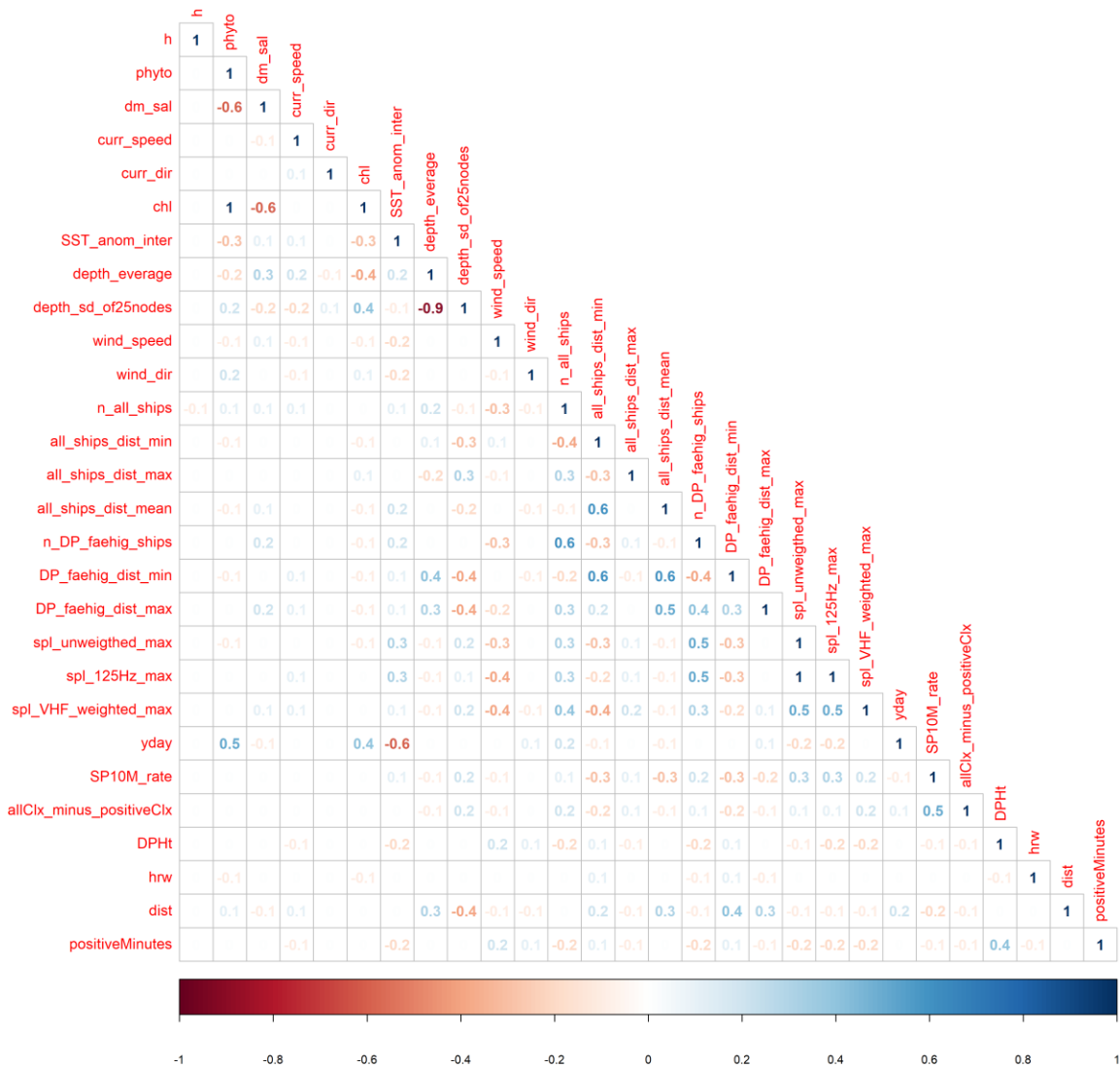


Abbildung 14: Korrelationsmatrix der initial für GAM-Analysen berücksichtigten Variablen (Variablenpaare mit R^2 -Werten über 0,5 wurden generell nicht gemeinsam in Modellen verwendet).

Die verfügbaren Stunden relativ zur Rammphase (*hrw*) waren nicht gleichmäßig verteilt. Es gab umso weniger Rammphasen pro *hrw*, je weiter eine solche Stunde zeitlich vor oder nach der Rammphase (*hrw*=0) lag. Ursache hierfür war, dass nach einer gewissen Zeit bereits die nächste Rammung startete, sodass die wünschenswerten 72 h vor bis 72 h nach einer Rammphase in der Praxis nie erreicht wurden. Daher waren die GAM-Analysen umso verlässlicher, je näher *hrw* an 0 lag. Wie groß das Zeitfenster für die jeweiligen Rammphasen war, ist Tabelle 1 zu entnehmen.

3. Ergebnisse

3.1 HiDef-Flüge

3.1.1 Gradientenanalyse

Die Gradientenanalyse ergab sowohl für die Untersuchung der Basis-, als auch für die Eingriffsphase zunehmende Individuenzahlen von Schweinswalen mit zunehmendem Abstand zum OWP „Kaskasi II“ (Abbildung 15). Die GAMs für die Basis- und Eingriffsphase erklärten 37,3 % bzw. 24,5 % der Varianz in den Daten.

Bezüglich der Basisphase zeigte der nicht-parametrische Test der Abstandsklassen signifikant geringere Individuenzahlen in einem Abstand bis 2 km von der Fläche „Kaskasi II“ relativ zur Referenzklasse „10-12 km“ (Abbildung 15). Das GAM wies hier ebenfalls ein signifikantes Regressionsmuster der Anzahl von Schweinswalen und der Distanz zu der geplanten Windparkfläche auf ($p = 0$). Die Glättungskurve des GAM stieg bis zu einer Entfernung von ca. 6 km an und nahm bei noch größeren Distanzen wieder ab (Abbildung 15). Auf Grundlage der Analyse ergab sich ein Meideabstand von 3,8 km (Konfidenzintervall 2,7 km bis 7,3 km) zur während der Basisphase noch im Planungsstadium befindlichen Windparkfläche (Abbildung 15). Der 50 %-Wert (die Distanz, bei der 50 % der Sichtungen des modellierten Maximalwertes erreicht wurden) datierte auf einen Abstand von 1,4 km (Konfidenzintervall 0,3 bis 2,5 km) zur OWP-Grenze.

Hinsichtlich der Eingriffsphase des OWP „Kaskasi II“ ergab die Analyse ebenfalls einen – allerdings schwächeren – Anstieg der Schweinswalzahlen mit zunehmender Entfernung zum Baugebiet (Abbildung 15). Das GAM wies ein signifikantes Regressionsmuster ($p = 0.008$) der Anzahl beobachteter Schweinswale und der Entfernung zum Windpark nach. Es ließ sich allerdings aufgrund eines fehlenden Plateaus keine Meidedistanz berechnen. Für die Abstandsklassen bis in eine Entfernung von 6 km wurden zwar etwas geringere Sichtungsraten als in größeren Distanzen verzeichnet, die unteren Distanzklassen unterschieden sich aufgrund der insgesamt geringen Zahl gesichteter Individuen und der damit verbundenen geringen Power der Tests jedoch nicht signifikant von der Referenzklasse „10-12 km“ (Wilcoxon-Test, $p > 0.5$; Abbildung 15). Der bereits vor dem Windparkbau an den Flugtagen bestehende Gradient war folglich während der Flüge der Eingriffsphase nicht stärker geworden. Somit lässt sich mittels Gradientenanalyse auf Basis der insgesamt wenigen untersuchten HiDef-Flüge (Basisphase: 3; Eingriffsphase: 2) kein negativer Effekt der Vibrationsrammungen nachweisen.

Schweinswal Flugerfassungen

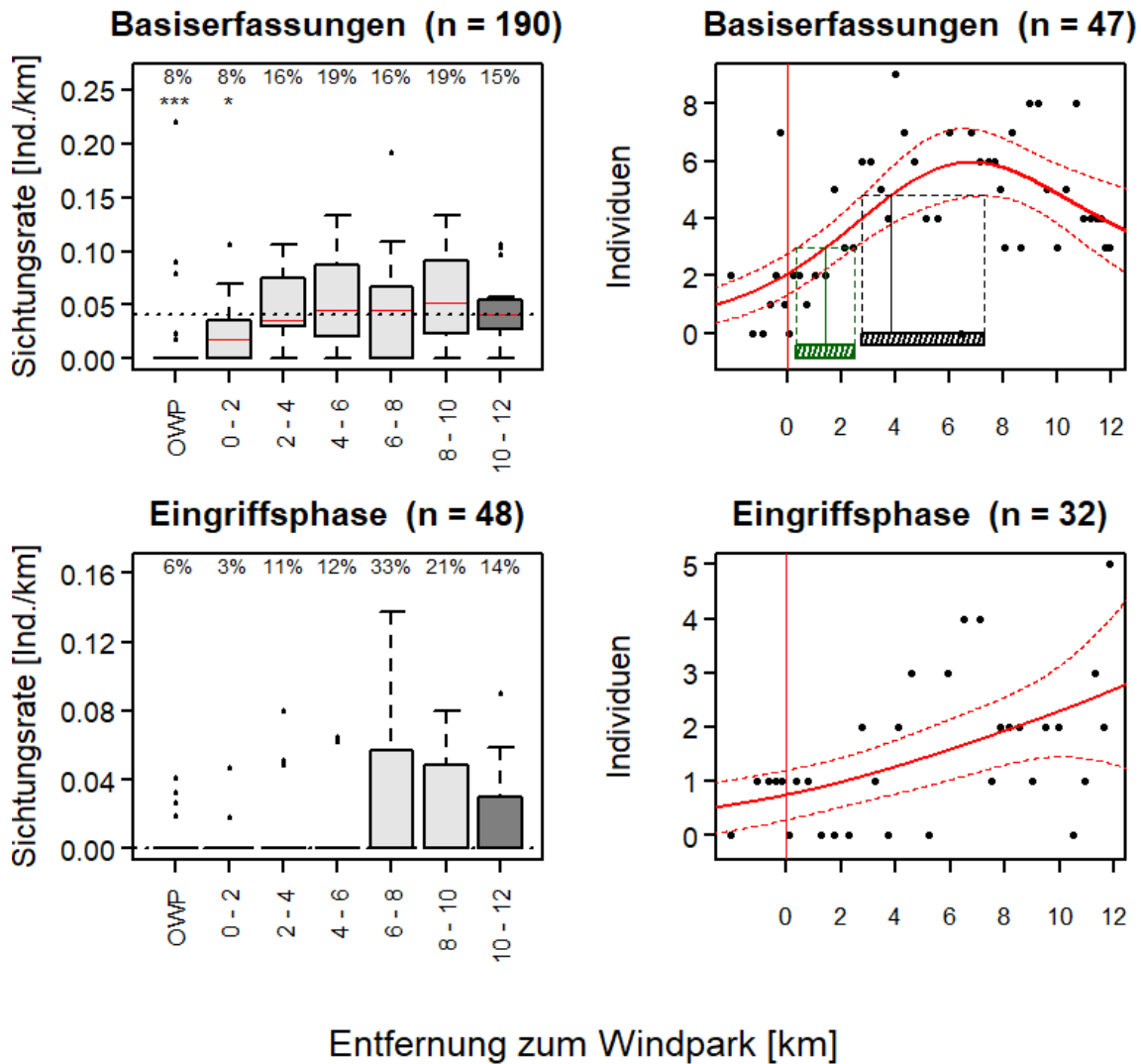


Abbildung 15: Ergebnisse der Gradientenanalyse zur Windpark-Meidung: Links: nicht-parametrischer Test der 2-km-Abstandsklassen (in km Entfernung zur Windparkgrenze bzw. im OWP) gegenüber der Referenzklasse (10-12 km); prozentuale Anteile der einzelnen Abstandsklassen an der Gesamt­sichtungsrate über den Boxplots; darunter Signifikanzniveaus des Wilcoxon-Tests (Signifikanzlevel: *** $p < 0,001$, ** $p < 0,01$, * $p < 0,05$); Median der Referenzklasse (dunkelgrau) als gestrichelte Linie dargestellt. Rechts: Modellierung der Individuenzahl im Verhältnis zur Entfernung zum Windpark in km; GAM (rote Linie) mit 95 % Konfidenzintervall (gestrichelte rote Linie) sowie maximaler Meidebereich (schwarz schraffiert) mit geschätztem Meideabstand (schwarze Linie); dargestellt ist außerdem der Bereich, in dem 50 % der Individuen abhängig vom Maximalwert im betrachteten Gebiet auftraten (grün schraffiert), zusätzlich dazu der ermittelte Modellwert (grüne Linie); die rote vertikale Linie zeigt die Windparksgrenze. Das „n“ über den Boxplots (links) bezeichnet die Gesamtzahl an Individuen, die in die Analyse einfließen, während das „n“ über den GAMs (rechts) die Zahl der Datenpunkte (Abstandsbänder mit einem bestimmten Erfassungsaufwand mit Sichtungen) angibt.

3.1.2 INLA-SPDE-Modelle: Räumliche Verteilung der Schweinswale

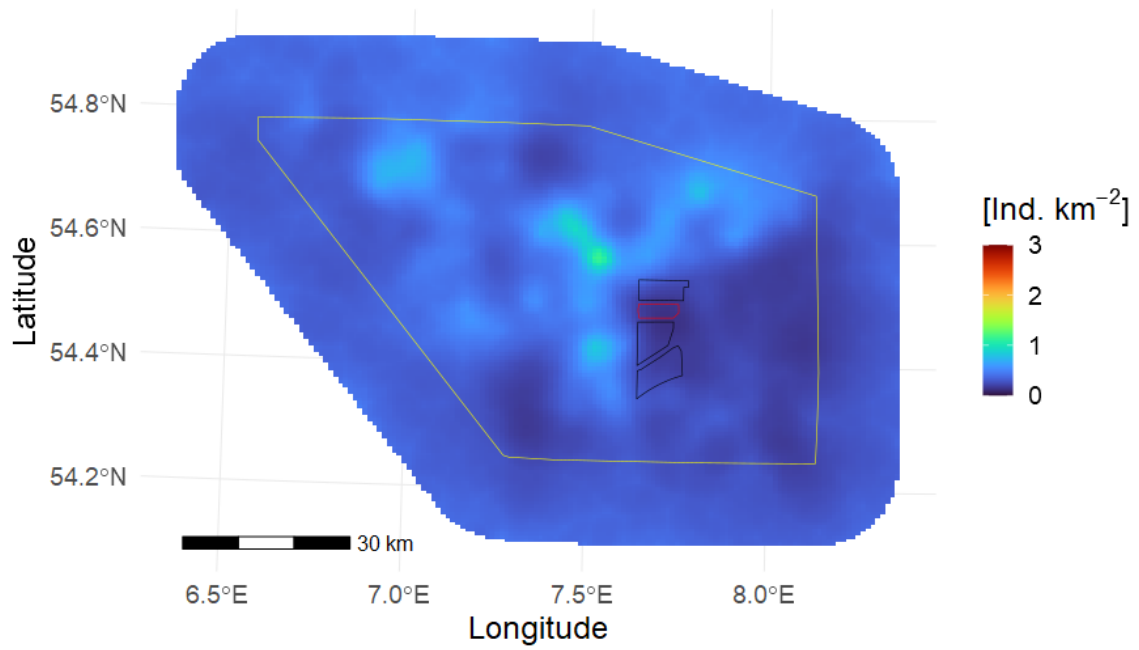
Die anhand des räumlich-zeitlichen INLA-SPDE-Modells für die Basisphase basierend auf drei Flügen (Juni 2021, Juli 2021, März 2022) errechneten Schweinswaldichten lagen über das gesamte UG gesehen zu meist unter 1 Ind./km², wobei lokal leicht erhöhte Dichten nordwestlich des Clusters „Nördlich Helgoland“ auftraten (Abbildung 16). Auffällig waren die recht niedrigen Dichten im gesamten Clustergebiet, in dem sich während der Basisphase bereits drei OWPs in Betrieb befanden (inklusive erhöhten Schiffsverkehrs für Wartungsarbeiten, Abbildung 2).

Für die Bauphase ergab sich, basierend auf zwei an zwei aufeinander folgenden Tagen im März 2022 erfolgten Flügen, ein Hotspot mit hohen Dichten von über 3 Ind./km² an einem gut 40-50 km nordwestlich des Clusters „Nördlich Helgoland“ gelegenen Areal (Abbildung 16). Im Gegensatz dazu zeigte sich eine Zone geringer Dichten von weit unterhalb 1 Ind./km² im weiteren Umfeld rund um den OWP „Kaskasi II“.

Beim Abgleich beider Modelle ergab sich in der Bauphase gegenüber der Basisphase einerseits eine Abnahme der Schweinswaldichten im nördlichen und östlichen Umfeld des Clusterkomplexes, andererseits eine Zunahme in weiter entfernt gelegenen Arealen im Nordwesten und Südwesten des Untersuchungsgebietes (Abbildung 17). Im Clustergebiet selbst gab es nur eine geringe Dichteabnahme, was der Tatsache geschuldet war, dass die Dichten dort bereits während der drei Flüge der Basisphase, die der Betriebsphase der drei umliegenden OWPs entspricht, gering waren. Daher wurde dieses Gebiet inklusive eines Puffers von 1 km für die Errechnung von Effektreichweiten der Vibrationsrammungen ausgeschlossen.

Über die Region, in der ein signifikanter Rückgang der Schweinswalbestände von der Basisphase hin zur Eingriffsphase erkennbar war (Abbildung 18), ließ sich die mittlere Entfernung zwischen den Grenzen dieser Region und dem Gebiet, in dem sich die vier Windparks befinden, berechnen. Die mittlere Entfernung der möglichen Auswirkungen der Eingriffsphase betrug 12,89 km (95 % CI: 12,00 bis 13,77; Abbildung 19). Hierbei war zu bedenken, dass zwischen den beiden Vibrationsrammphasen während der Flüge am 22.03.2022 und 23.03.2022 zudem noch Impulsrammungen bei K11 stattfanden, deren Effekte hier nicht ausgeklammert werden konnten. Ungeachtet dessen waren auch die SPL₀₅-Schallwerte der Impulsrammungen selbst im Umfeld der Baustellen beachtlich hoch.

Basisphase
LGCP fit to Points



Eingriffsphase
LGCP fit to Points

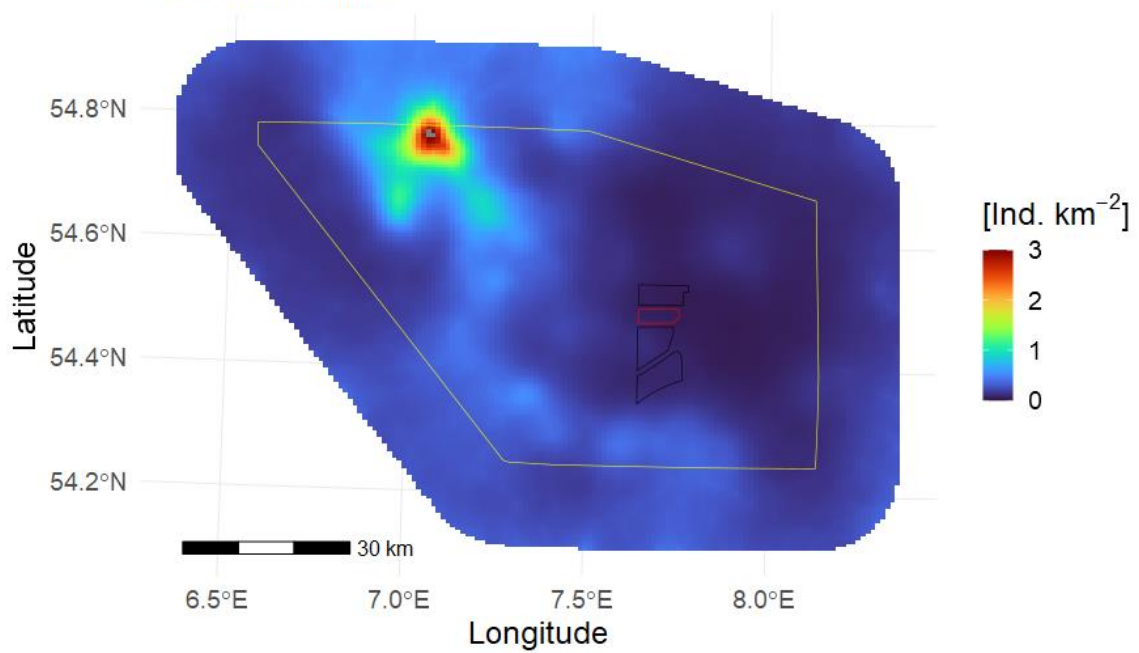


Abbildung 16: Mittlere a-posteriori räumliche Wahrscheinlichkeitsverteilung von Schweinswalen vor (oben) und während des Baus des OWP "Kaskasi II" (unten). Im Hintergrund sind die OWPs (schwarze und rote Polygone) eingezeichnet.

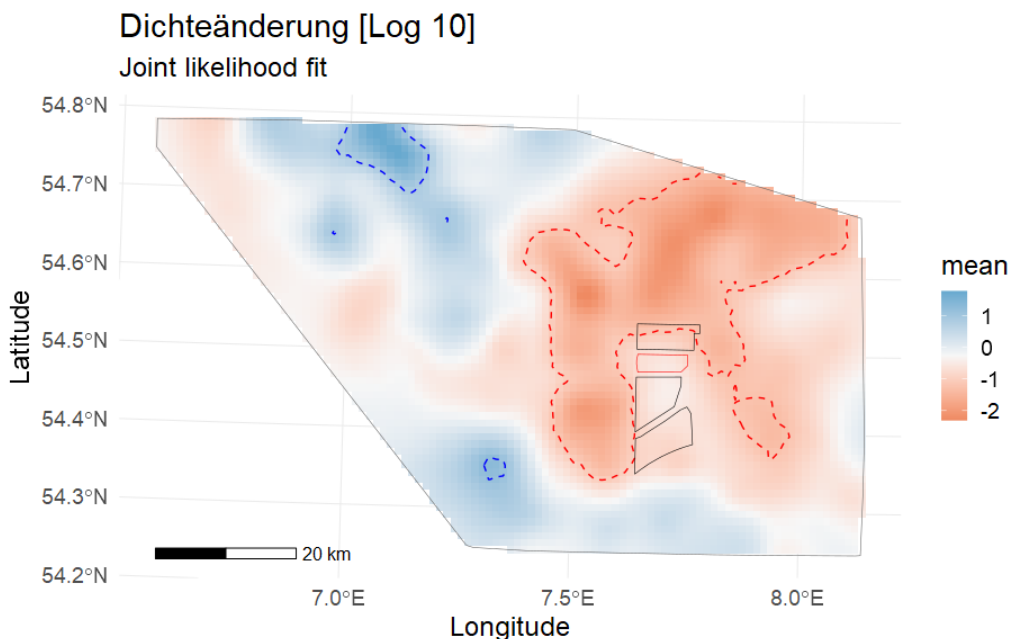


Abbildung 17: Änderungsrate zwischen beiden Perioden (vor und während des Baus des OWPs „Kaskasi II“; vgl. Abbildung 16) unter Verwendung eines Joint-Likelihood-Modells. Rot interpolierte Bereiche weisen auf einen Rückgang der Schweinswal-Dichte hin, während eine Zunahme der Dichte in Blau dargestellt ist. Signifikante Abnahmen und Zunahmen in der Verteilung sind durch gestrichelte Linien gekennzeichnet. Die Dichteänderung erfolgt im logarithmischen Maßstab.

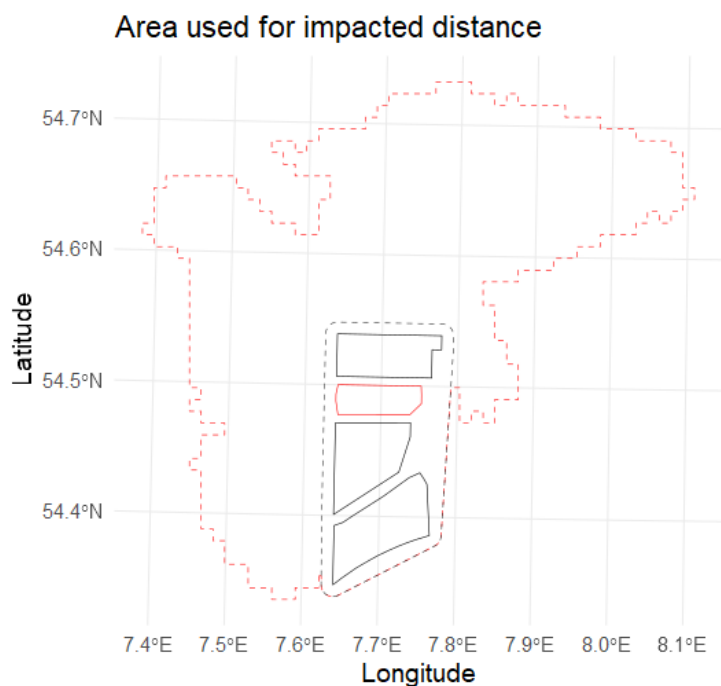


Abbildung 18: Gebiet mit signifikantem Rückgang in der Verteilung der Schweinswale (rote gestrichelte Linie, siehe Abbildung 17). Die Distanzen von der signifikanten Grenzlinie zur Cluster-Außengrenze (umgeben von einem Puffer von 1 km; grau gestrichelte Linien) wurden berechnet, um die mittlere Entfernung der möglicherweise durch den Bau verursachten Meideffekte abzuschätzen.

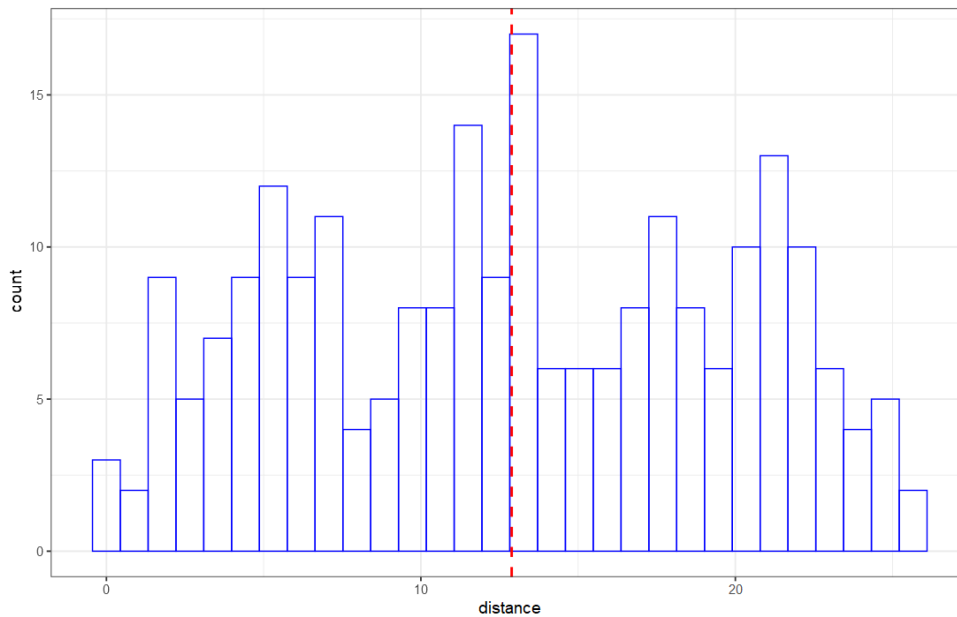


Abbildung 19: Histogramm der Entfernungen (km) zwischen den Grenzen des Gebiets mit signifikant geringeren Dichten (Abbildung 18) und der 1 km-Pufferlinie um den Cluster „Nördlich Helgoland“. Die gestrichelte rote Linie zeigt den Mittelwert (12,89 km).

3.1.3 Analyse der AIS-Daten im Zusammenhang mit den HiDef-Flugerefassungen

Die Analyse der AIS-Daten ergab erhöhte Schiffsanzahlen pro Zelle im Bereich des Baufeldes im Vergleich zu außerhalb desselben (Abbildung 20). Dabei wurde allerdings nicht nach Schiffstyp unterschieden. Monatliche AIS-Karten von Schiffstypen (Abbildung 82, Abbildung 83) zeigten aber, dass es sich im Bereich des Baufeldes hauptsächlich um Bauschiffe sowie Wartungsschiffe der benachbarten OWP handelte. Der Unterschied in der Schiffsanzahl war vor allem an den beiden Flugtagen mit Vibrationsrammungen besonders groß.

Die Analyse mittels GAMM (Modell 1) zeigte einen negativen Zusammenhang zwischen der Abundanz von Schweinswalen und der Anzahl der Schiffe in einem Radius von 5 km um den jeweiligen Transektabschnitt bei einem Zeitfenster bis 2 Std. vor der HiDef-Erfassung ($p < 0.05$). Dabei zeigte sich ein ähnliches Muster für alle 5 Erfassungen mit jeweils ansteigenden Schweinswal-Abundanzen bei abnehmender Schiffsanzahl (Abbildung 21).

Im zweiten Modell wurden bestimmte Merkmale der Schiffe und deren mögliche Effekte auf Schweinswale betrachtet. Dafür wurden nur schiffspositive Zellen der 5 Flüge ausgewertet ($n=452$). Das Modell 2 beinhaltet Schiffsgeschwindigkeit, Schiffslänge und die Zeit seit der letzten Schiffspräsenz, diese jeweils als „smoother“. Keine der Variablen zeigte einen signifikanten Effekt auf die Schweinswaldichten (alle $p > 0.05$, Abbildung 22).

VISSKA – Abschlussbericht AP7

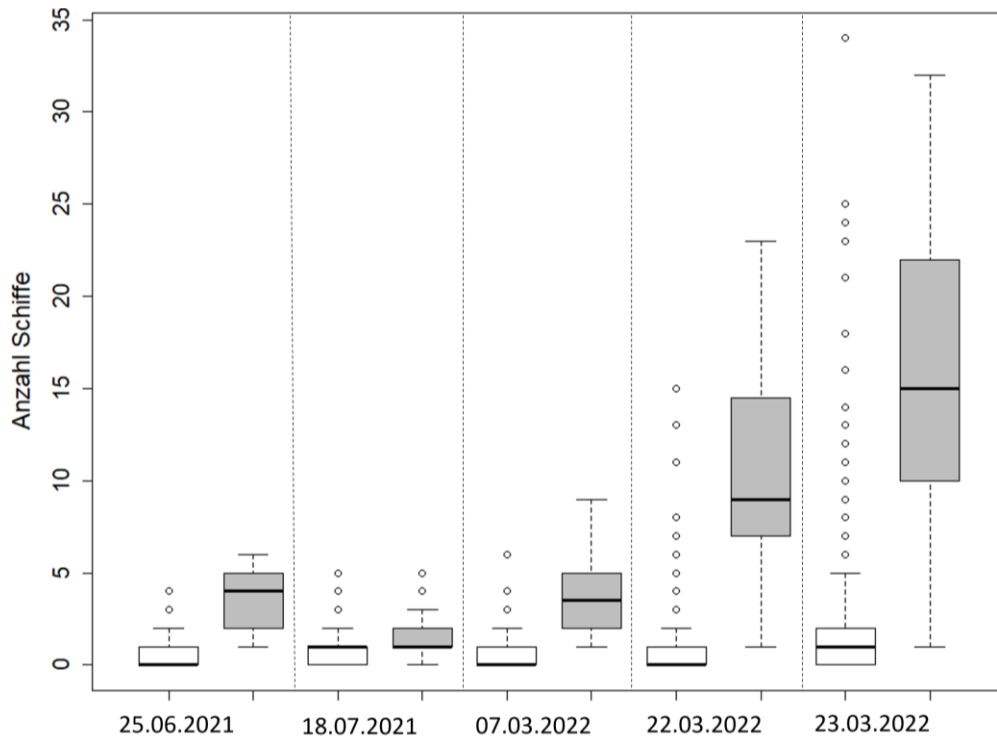


Abbildung 20: Boxplot zur Anzahl Schiffe pro Rasterzelle für die Bereiche außerhalb (weiß) und innerhalb (grau) des Baufelds, für die 5 HiDef-Erfassungsflüge. 22.&23.03.2022: Vibrationsrammungen.

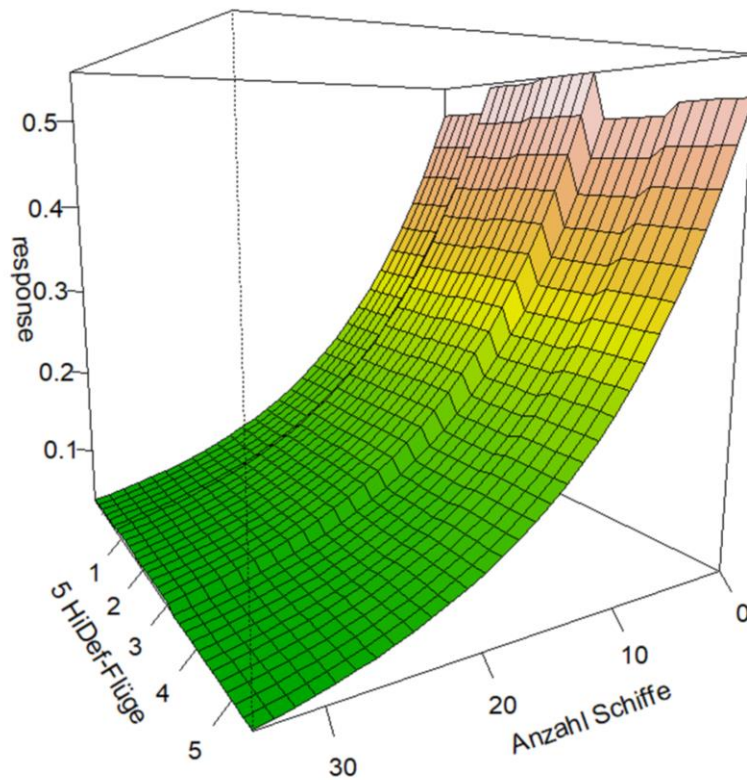


Abbildung 21: Effekt der Anzahl Schiffe auf die Schweinswaldichte („response“). Der Kurvenverlauf ist für jede der 5 HiDef-Erfassungen dargestellt.

VISSKA – Abschlussbericht AP7

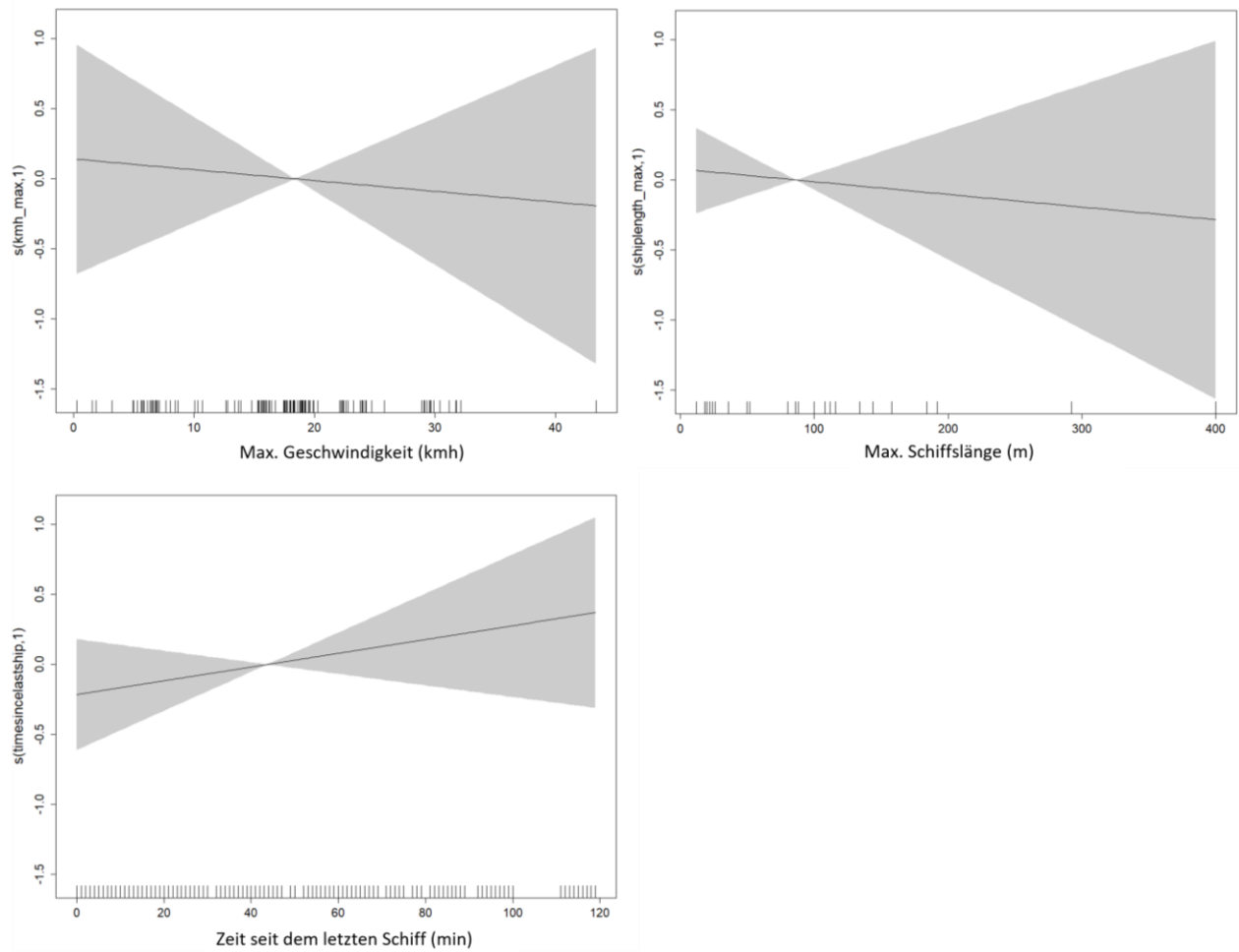


Abbildung 22: Ergebnisse aus Modell 2. Die nichtsignifikanten Effekte von Geschwindigkeit, Schiffslänge und Zeit seit der letzten Schiffspräsenz (bis 2 Std.) sind dargestellt.

3.2 Passiv-akustisches Monitoring (PAM)

3.2.1 Bauphase und jahreszeitliches Auftreten der Schweinswale (Tagesdaten)

3.2.1.1 Phänologiekurven der Schweinswale

Aus den täglichen Schweinswal-Detektionsraten $\%DP10M/d$ wurden Phänologiekurven erstellt. Diese wurden gemäß der Position der C-PODs relativ zum Windpark (Nahbereich [OWP-Inneres bis einschließlich Rand], nördlich, östlich, südlich, westlich des OWP) in verschiedenen Plots dargestellt, wobei die einzelnen Rammphasen als Linien aufgetragen wurden (Abbildung 23 bis Abbildung 27).

Insgesamt war das durch die C-PODs detektierte Vorkommen der Tiere starken kurz- bis mittelfristigen (Tage bis Wochen) Fluktuationen unterworfen, wobei jedoch kein besonderes jährliches Maximum zu erkennen war. Im Nahbereich des OWP „Kaskasi II“ schienen die Detektionsraten während der intensiveren Rammphasen im März sowie Mitte bis Ende April 2022 allerdings geringer zu sein als im gesamten Erfassungszeitraum zuvor (Abbildung 23). Auch an allen anderen C-POD-Stationen außerhalb des Nahbereiches waren die Raten während dieser beiden 2-3-wöchigen Phasen herabgesetzt, wobei das Ausmaß mitunter etwas geringer war als bei den windparknahen Stationen (Abbildung 24 bis Abbildung 27). Bei den späteren Analysen der Ramm- und Schiffseffekte galt es, das insgesamt fluktuierende Auftreten der Schweinswale zu berücksichtigen.

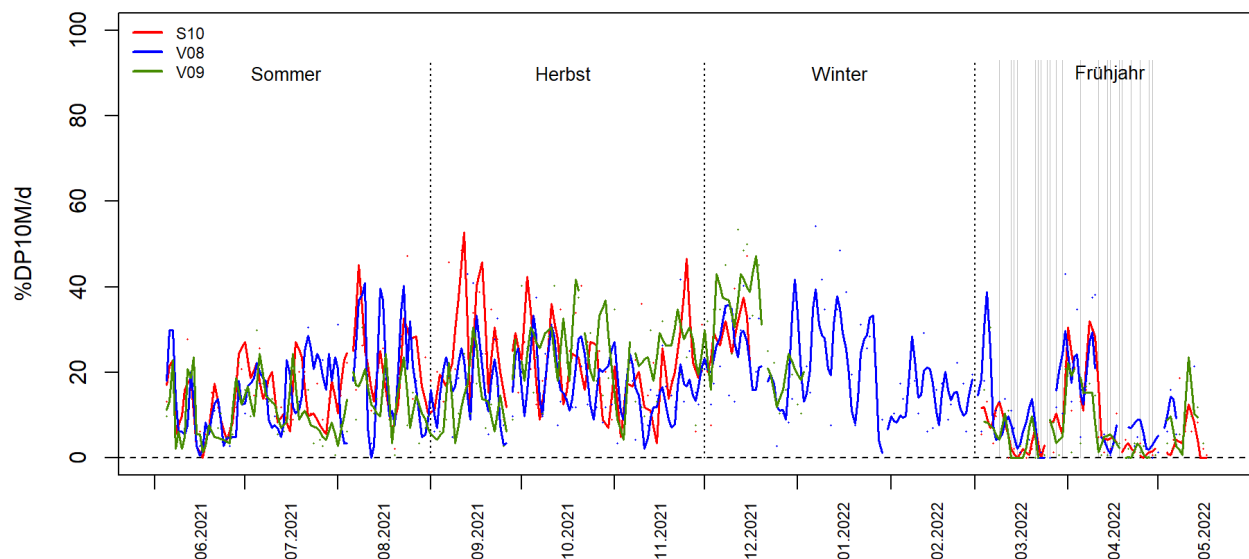


Abbildung 23: Verlauf der tagesgenauen Detektionsrate $\%DP10M/d$ an den im **Nahbereich** des OWP „Kaskasi II“ gelegenen C-POD-Stationen (S10, V08, V09) mit Einzelwerten (Punkte) und Loess-Glättungskurven (Linien: Mittelung über 5 Tage bei stärkerer Gewichtung zentraler Werte); durchgezogene vertikale Linien zeigen Rammtage; gestrichelte vertikale Linien indizieren Jahreszeitengrenzen.

VISSKA – Abschlussbericht AP7

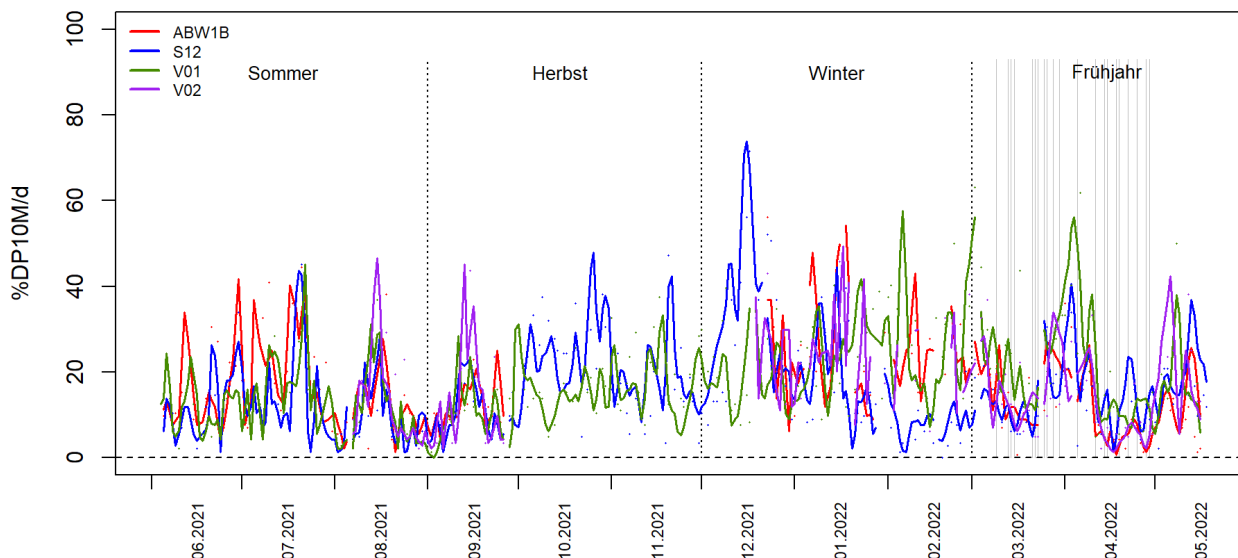


Abbildung 24: Verlauf der tagesgenauen Detektionsrate %DP10M/d an den **nördlich** des OWP „Kaskasi II“ gelegenen C-POD-Stationen (ABW1B, S12, V01, V02) mit Einzelwerten (Punkte) und Loess-Glättungskurven (Linien: Mittelung über 5 Tage bei stärkerer Gewichtung zentraler Werte); durchgezogene vertikale Linien zeigen Rammtage; gestrichelte vertikale Linien indizieren Jahreszeitengrenzen.

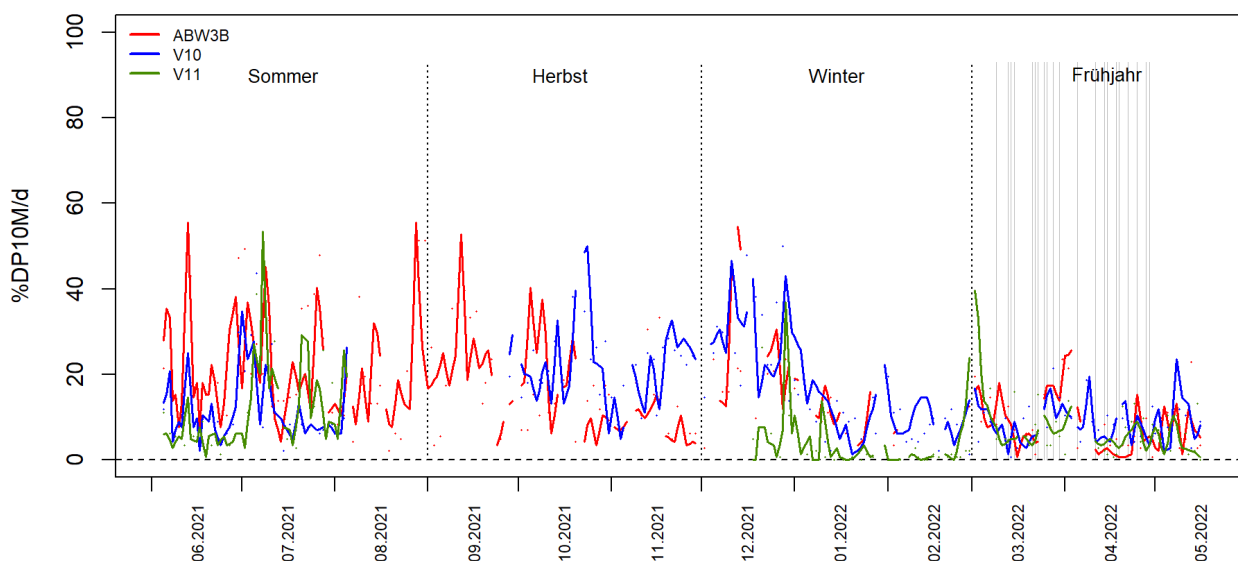


Abbildung 25: Verlauf der tagesgenauen Detektionsrate %DP10M/d an den **östlich** des OWP „Kaskasi II“ gelegenen C-POD-Stationen (ABW3B, V10, V11) mit Einzelwerten (Punkte) und Loess-Glättungskurven (Linien: Mittelung über 5 Tage bei stärkerer Gewichtung zentraler Werte); durchgezogene vertikale Linien zeigen Rammtage; gestrichelte vertikale Linien indizieren Jahreszeitengrenzen.

VISSKA – Abschlussbericht AP7

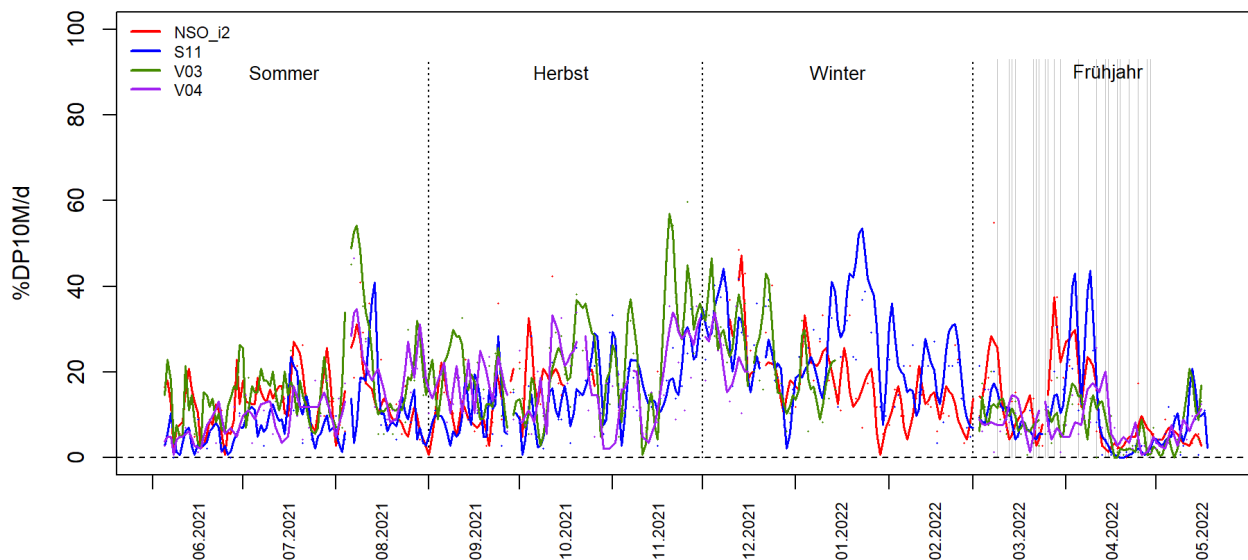


Abbildung 26: Verlauf der tagesgenauen Detektionsrate %DP10M/d an den **südlich** des OWP „Kaskasi II“ gelegenen C-POD-Stationen (NSO_i2, S11, V03, V04) mit Einzelwerten (Punkte) und Loess-Glättungskurven (Linien: Mittelung über 5 Tage bei stärkerer Gewichtung zentraler Werte); durchgezogene vertikale Linien zeigen Rammtage; gestrichelte vertikale Linien indizieren Jahreszeitengrenzen.

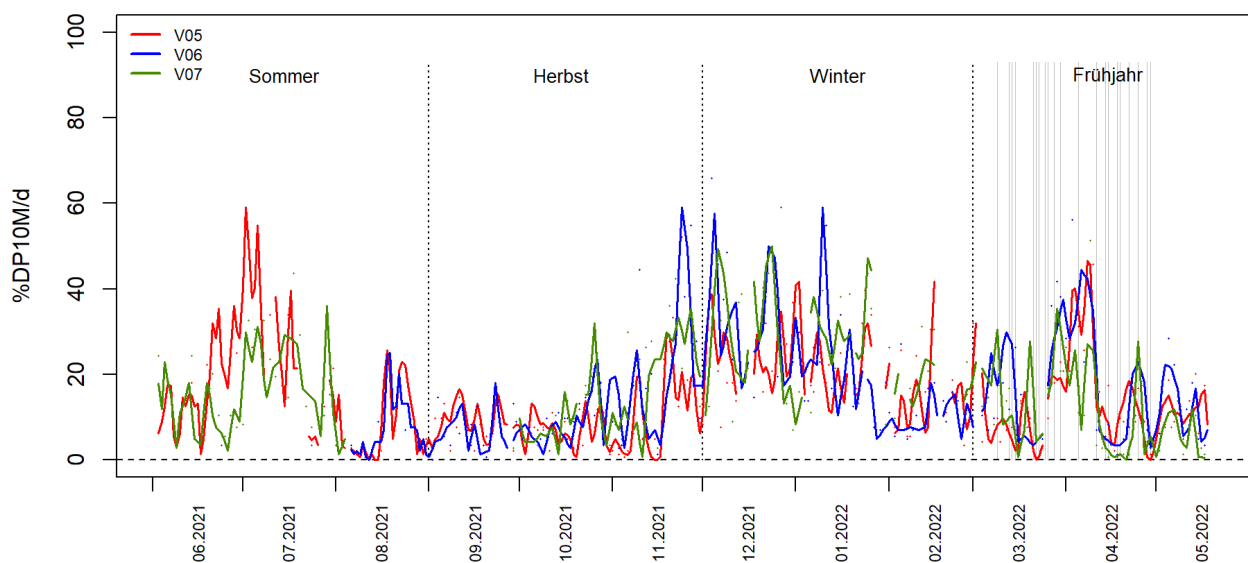


Abbildung 27: Verlauf der tagesgenauen Detektionsrate %DP10M/d an den **westlich** des OWP „Kaskasi II“ gelegenen C-POD-Stationen (V05, V06, V07) mit Einzelwerten (Punkte) und Loess-Glättungskurven (Linien: Mittelung über 5 Tage bei stärkerer Gewichtung zentraler Werte); durchgezogene vertikale Linien zeigen Rammtage; gestrichelte vertikale Linien indizieren Jahreszeitengrenzen.

3.2.1.2 t-SNE-Analyse: Phänologische Ähnlichkeit der C-POD-Stationen

Um die Ähnlichkeit der C-POD-Stationen bezüglich ihrer Phänologieverläufe darzustellen, wurde eine t-SNE-Ähnlichkeitsanalyse durchgeführt (Abbildung 28). Diese war insofern eingeschränkt, als in diese nur solche Tage einfließen konnten, von denen C-POD-Daten aller Stationen vorlagen, was überwiegend den für diese Untersuchung wesentlichen Zeitraum der Bauarbeiten im März und April 2022 betraf (vgl. Abbildung 13).

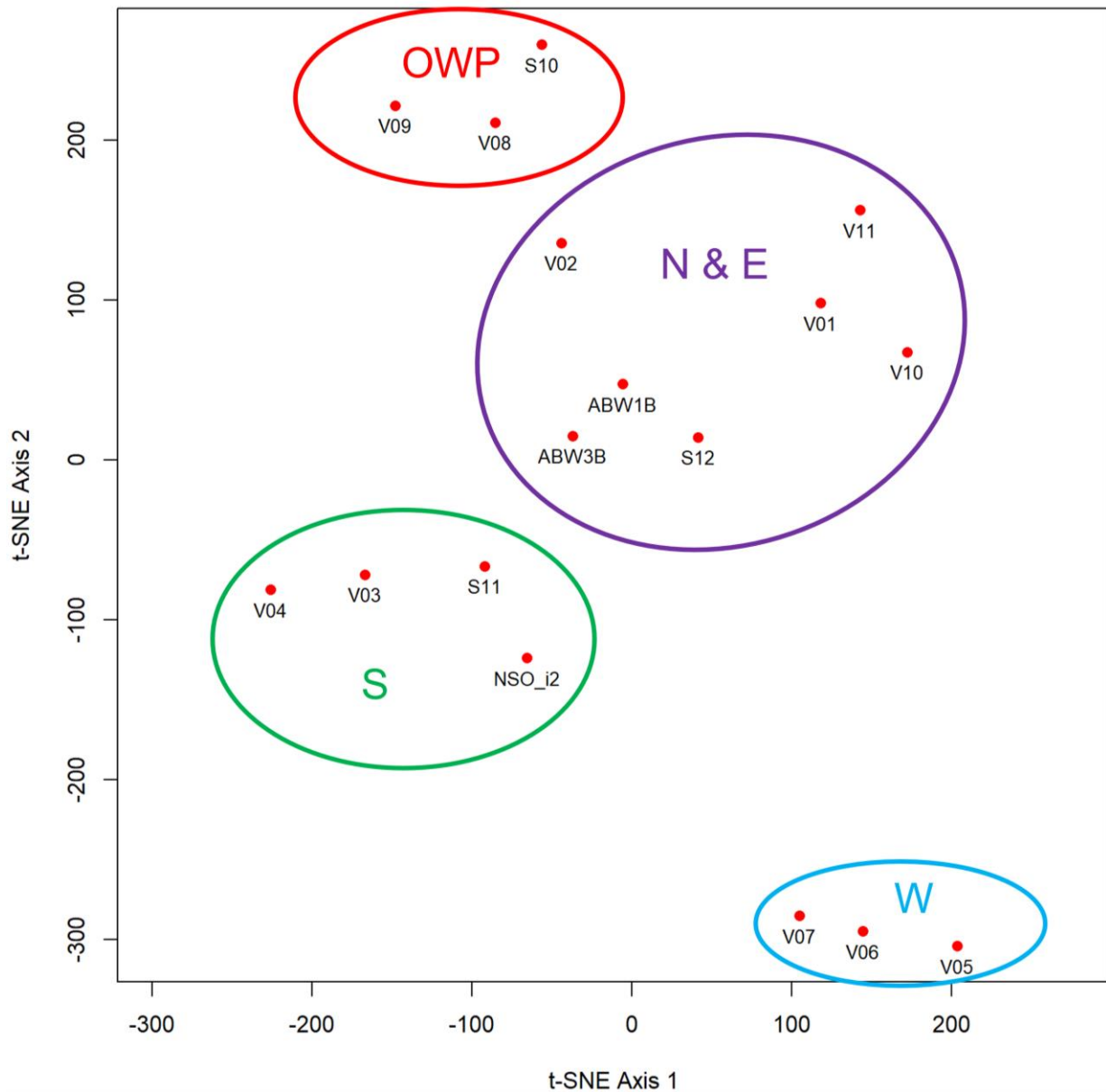


Abbildung 28: Ähnlichkeit der Schweinswal-Phänologien (%DP10M/d) an den C-POD-Stationen nach t-SNE-Analyse (Similaritätsmaß: Cosine Similarity; verwendet wurden nur solche Tage, an denen von allen C-POD-Stationen Daten vorlagen; dies waren ausschließlich Tage der Monate März bis Mai 2022). Stationen mit ähnlichen Schweinswal-Phänologien liegen im Plot näher beieinander. Dies waren oft auch räumlich näher beieinander liegende C-PODs, im Plot durch Farben und Großbuchstaben indiziert (OWP: im oder direkt am OWP „Kaskasi II“; N & E: nördlich und östlich des Windparks; S: südlich des OWP; W: westlich des OWP).

Die Aufteilung der Stationen nach Position relativ zum OWP aus dem letzten Kapitel spiegelte sich überwiegend auch in der phänologischen Ähnlichkeit wider. Nicht klar voneinander trennbar waren hier lediglich die Stationen nördlich und östlich des Windparks. Das näherungsweise kreuzförmige Probenahme-Design erwies sich demnach als vorteilhaft, weil es geeignet war, räumliche Unterschiede des Schweinswal-Auftretens im Untersuchungsgebiet adäquat abzudecken.

3.2.2 Anzahl Sonartrains im Gesamtzeitraum und in der Bauphase

Sowohl über den gesamten Untersuchungszeitraum hinweg (inklusive Bauphase), aber mehr noch während der Bauphase der Frühjahrskampagne wurden die mit Abstand meisten Sonartrains (von Schiffen emittierte und von den C-PODs aufgezeichnete und durch die Software CPOD.exe als solche identifizierte Sonarsignale) an den drei Stationen im Nahbereich des OWP „Kaskasi II“ (S10, V08, V09) erfasst. Von diesen dreien wiesen wiederum die direkt im Windpark positionierten C-PODs V08 und V09 die höchsten Werte auf. Da dieses Ergebnis mit dem in den AIS-Daten verzeichneten hohen Schiffsaufkommen übereinstimmte, konnten die am C-POD erfassten Sonardaten als Indikator für den Schiffsverkehr angesehen werden (Genauerer dazu: siehe Kapitel 3.2.3.6).

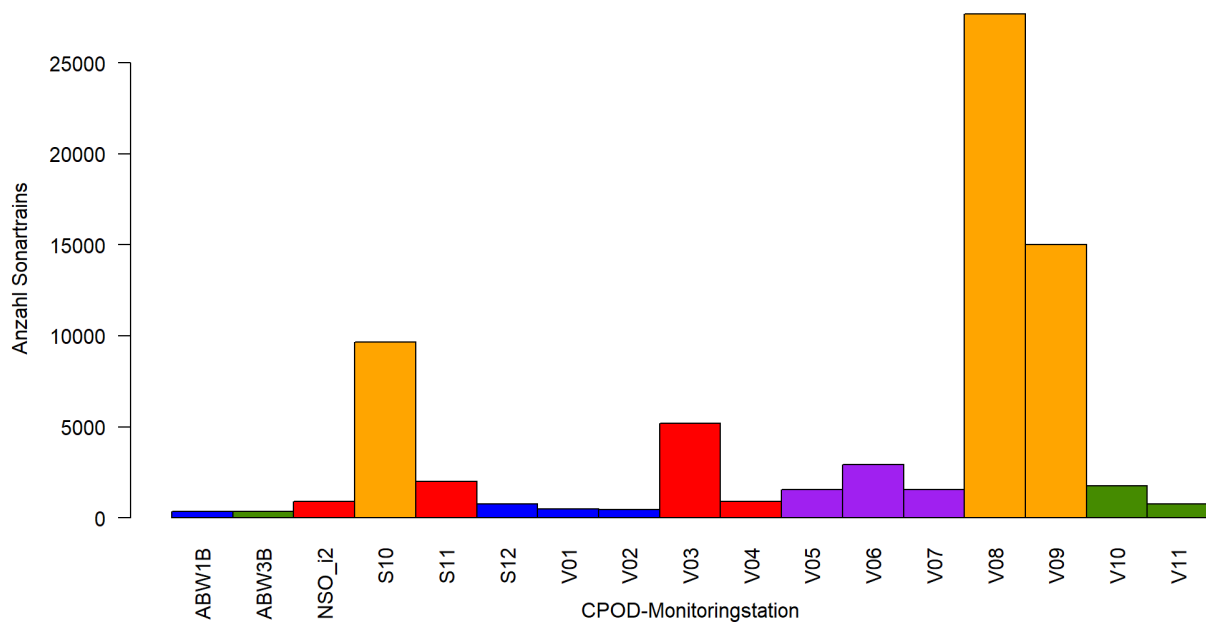


Abbildung 29: Anzahl pro Station erfasster Sonartrains **im gesamten Untersuchungszeitraum** (Juni 2021 bis Mai 2022; orange: Nahbereich OWP; blau: nördlich, grün: östlich, rot: südlich, lila: westlich des OWP).

VISSKA – Abschlussbericht AP7

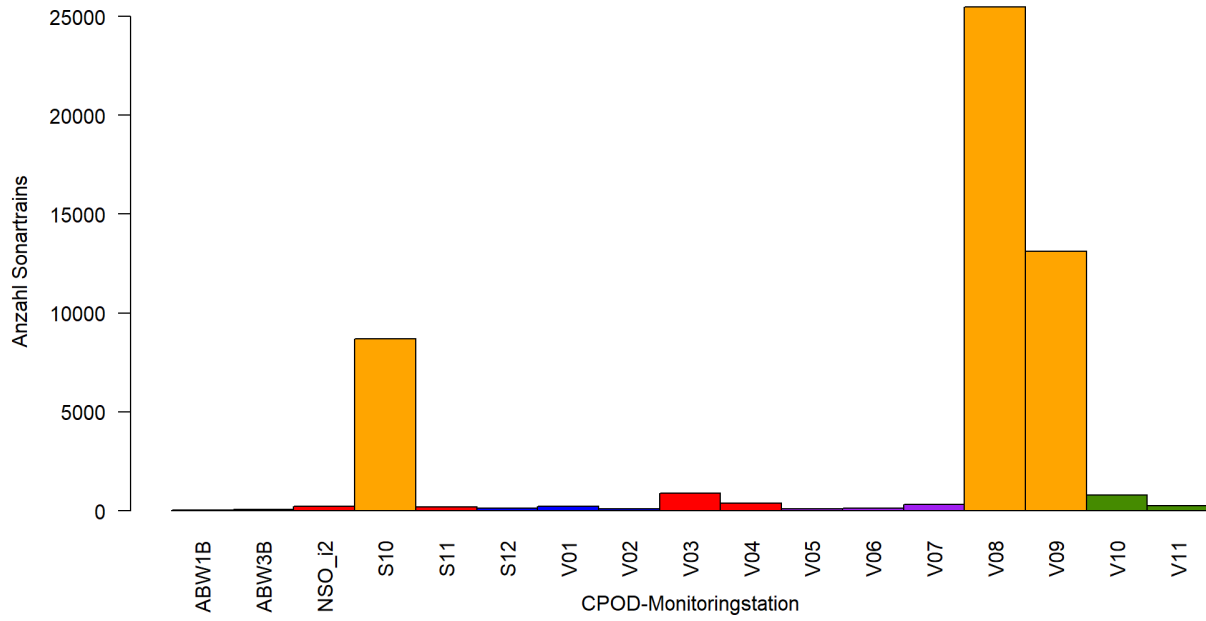


Abbildung 30: Anzahl erfasster Sonartrains **während der Bauphase** (März bis April 2022; orange: Nahbereich OWP; blau: nördlich, grün: östlich, rot: südlich, lila: westlich des OWP).

3.2.3 Generalisierte Additive Modelle zu Ramm-, Schiffs- und Schalleffekten

Die vorgenommenen GAM-Analysen dienten dazu, die im Projektantrag im Gesamtkontext formulierten Untersuchungsziele in Form von explizit formulierten Fragestellungen zu beantworten und hierbei Kombinationen aus Umwelt-, Schiffs- und Schallparametern in Hinblick auf deren Erklärungspotenzial der Schweinswal-Detektionsraten zu analysieren. Da Ramm- und Schiffseffekte zeitweise gemeinsam auftraten und somit auch kumulierte Auswirkungen auf die Schweinswale nicht ausgeschlossen werden konnten, wurde die im Antrag formulierte separate Betrachtung zwischen Auswirkungen der Vibrationsrammungen (Teilkapitel E 7.1) und Effekten des Schiffsverkehrs (Teilkapitel E 7.2) verworfen. In den Modellen zu Rammeffekten wurden, soweit Daten vorhanden waren, auch Schiffsvariablen eingebunden, für die der stundenbasierte Datensatz auf Zeiträume rund um die Rammungen geschnitten wurde (hrw-72 bis hrw+72), Fragestellungen 1 und 2). Für die Analysen zu potenziellen Effekten des Schiffverkehrs und Schalls wurde ein durchgängiger stundenbasierter Datensatz verwendet (Fragestellungen 3, 4 und 5).

Fragestellungen der GAMs:

- 1) Welche Effekte hatten die Vibrations- und Impulsrammungen (getrennt und gemeinsam; inklusive Vergrämung) unter Berücksichtigung von Zeit- und Umweltparametern auf die Detektionsraten der Schweinswale? Hierzu als erweiterte Fragestellung 1a: Welche Effekte hatten die Impulsrammungen unter verschiedenen Schallschutz-Konfigurationen (Sektion 3.2.3.1)?
- 2) Welche Effekte hatten die Vibrations- und Impulsrammungen (getrennt und gemeinsam) in Kombination mit der Anzahl der Schiffe im 5 km Umkreis um die C-PODs, dem hoch- und tieffrequenten Schallpegel, der Sonarrate am C-POD sowie Zeit- und Umweltparameter auf die Detektionsraten der Schweinswale (Sektion 3.2.3.2)?
- 3) Welche Effekte hatte im gesamten UG die Anzahl an Schiffen, die Distanz des nächsten Schiffes, die maximale Geschwindigkeit eines Schiffes (für alle Schiffsparameter gilt: Schiffe in bis zu 5 km Distanz um die C-PODs), der hoch- und tieffrequente Schallpegel, die Sonarrate am C-POD sowie Zeit- und Umweltparameter auf die Detektionsraten der Schweinswale (Sektion 3.2.3.3)?
- 4) Welche Effekte hatten im Nahbereich des OWP „Kaskasi II“ die Anzahl an Schiffen, die Distanz des nächsten Schiffes, die maximale Geschwindigkeit eines Schiffes (für alle Schiffsparameter gilt: Schiffe in bis zu 5 km Distanz um die C-PODs), der hoch- und tieffrequente Schallpegel, die Sonarrate am C-POD sowie Zeit- und Umweltparameter auf die Detektionsraten der Schweinswale (Sektion 3.2.3.4)?
- 5) Welche Effekte hatten im Nahbereich des OWP „Kaskasi II“ die Anzahl an DP-fähigen Schiffen, die Distanz des nächsten DP-fähigen Schiffes, die maximale Geschwindigkeit eines DP-fähigen Schiffes (für alle Schiffsparameter gilt: Schiffe in bis zu 5 km Distanz um die C-PODs), der hoch- und tieffrequente Schallpegel, die Sonarrate am C-POD sowie Zeit- und Umweltparameter auf die Detektionsraten der Schweinswale (Sektion 3.2.3.5)?

Je nach Fragestellung wurden ein bis mehrere GAMs errechnet, die im Folgenden vorgestellt werden (Tabelle 10). Ein weiteres GAM („Sonar“ in Tabelle 10) diente zur Eruiierung der besten Erklärungsmöglichkeit der mittels C-PODs erhaltenen Sonarrate durch andere Schiffs- und Schallvariablen. Dies hatte zum Ziel, die Interpretierbarkeit dieser Rate, deren genaues Verhältnis zum Schiffsaufkommen in der Umgebung bisher noch nicht bekannt war, zu verbessern (Sektion 3.2.3.6).

VISSKA – Abschlussbericht AP7

Tabelle 10: Spezifikationen der finalen GAMs zu den einzelnen Fragestellungen (außer 1a: siehe Tabelle 11) vom Beginn des Kapitels 0; Signifikanzlevel: ***: $p < 0.001$; **: $p < 0.01$; *: $p < 0.05$; ns: nicht signifikant; Variablen mit grau unterlegten Feldern fließen nicht in das entsprechende initiale Modell einer Fragestellung ein; Erläuterungen zu den Variablen in Sektion 2.4.4.2.1 sowie zu den Parametern rho und Gamma in Sektion 2.4.4.2; Rammtypen in der Kopfzeile: Imp: Impulsrammung; Vib: Vibrationsrammung („um Rammungen herum“ bedeutet, dass nur Daten von maximal 72 Stunden vor bis 72 Stunden nach Rammphasen verwendet wurden).

Fragestellung	1			2			3	4	5	Sonar
	Imp,Vib	Imp	Vib	Imp,Vib	Imp	Vib	März-April 2022	März-April 2022	März-April 2022	März-April 2022
<i>positiveMinutes</i> (abh. Variable 1)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
<i>SP10M</i> (abh. Variable 2)										x
<i>DPHt</i> (smooth; zeitl. Autokorr.)	***	***	***	***	***	***	***	***	***	
Tensorprodukt von <i>POD_x</i> und <i>POD_y</i> (räuml. Autokorrelation)	***	***	***	***	***	ns	***	ns	ns	***
<i>yday</i> (smooth)	***	***	ns	***	***	ns	***	***	***	
<i>h</i> (cyclic smooth)	***	***	***	***	***	***	***	***	***	
<i>wind_speed</i> (smooth)	***	***	ns	ns	ns	ns	***	***	**	
<i>wind_dir</i> (cyclic smooth)	***	***	ns	**	***	ns	ns	ns	***	
<i>curr_speed</i> (smooth)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
<i>curr_dir</i> (cyclic smooth)	***	***	***	***	***	ns	ns	ns	ns	
<i>phyto</i> (smooth)	***	***	***	***	*	**	***	***	***	
<i>spl_125Hz_max</i> (smooth)				*	ns	ns	**	ns	ns	***
<i>spl_VHF_weighted_max</i> (smooth)				***	***	***	***	***	***	**
<i>allClx_minus_positiveClx</i> (smooth; bs="ad")	***	***	***	***	***	***	***	***	***	
<i>n_all_ships</i> (smooth)				***	***	ns	**	*		ns
<i>all_ships_dist_min</i> (smooth)							**	***		***
<i>all_ships_speed_max</i> (smooth)							ns	ns		ns
<i>n_DP_faehig_ships</i> (smooth)									**	
<i>DP_faehig_dist_min</i> (smooth)									***	
<i>DP_faehig_speed_max</i> (smooth)									ns	
<i>SP10M_rate</i> (smooth)				***	***	***	***	***	***	
Tensorprodukt von <i>hrw</i> und <i>dist</i>	***	***	***	***	***	***				
Gamma (Overfitting-Reduktion)	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
rho (AR1; Autokorrelation)	0,012	0,012	0,013	0	0	0,055	0,040	0,090	0,096	0,041
Deviance explained %	58,4	58,6	61,1	57,5	56,6	71,0	39,4	58,2	63,6	43,3
Anzahl Stundendaten	21.503	19.178	2.325	7.212	6.422	790	5.053	3.900	3.671	5.053
Anzahl Fundamente	25	25	6	25	25	6	25	25	25	25
Anzahl C-PODs	17	17	17	6	6	6	6	3	3	6

Tabelle 11: Spezifikationen der finalen GAMs zu Fragestellung 1a zu den Effekten bei Impulsrammungen mit unterschiedlichen Schallschutz-Systemen (NMS): HSD: Hydroschalldämpfer; EGBS: Einfacher Großer Blasenschleier; DGBS: Doppelter Großer Blasenschleier; VGBS: Verbesserter Großer Blasenschleier; weitere Erläuterungen: siehe Tabelle 10.

Fragestellung Schallschutz (NMS)	1a		
	REF	DGBS, HSD	VGBS, EGBS, HSD
<i>positiveMinutes</i> (abh. Variable 1)	x	x	x
<i>SP10M</i> (abh. Variable 2)			
<i>DPHt</i> (smooth; zeitl. Autokorr.)	***	***	***
Tensorprodukt von <i>POD_x</i> und <i>POD_y</i> (räuml. Autokorrelation)	***	***	***
<i>yday</i> (smooth)	<i>ns</i>	***	***
<i>h</i> (cyclic smooth)	***	***	***
<i>wind_speed</i> (smooth)	***	*	<i>ns</i>
<i>wind_dir</i> (cyclic smooth)	***	**	***
<i>curr_speed</i> (smooth)	*	*	<i>ns</i>
<i>curr_dir</i> (cyclic smooth)	***	***	***
<i>phyto</i> (smooth)	*	<i>ns</i>	***
<i>spl_125Hz_max</i> (smooth)			
<i>spl_VHF_weighted_max</i> (smooth)			
<i>allClx_minus_positiveClx</i> (smooth; bs="ad")	***	***	***
<i>n_all_ships</i> (smooth)			
<i>all_ships_dist_min</i> (smooth)			
<i>all_ships_speed_max</i> (smooth)			
<i>n_DP_faehig_ships</i> (smooth)			
<i>DP_faehig_dist_min</i> (smooth)			
<i>DP_faehig_speed_max</i> (smooth)			
<i>SP10M_rate</i> (smooth)			
Tensorprodukt von <i>hrw</i> und <i>dist</i>	***	***	***
Gamma (Overfitting-Reduktion)	1,4	1,4	1,4
rho (AR1; Autokorrelation)	0	0	0,02
Deviance explained %	60,3	58,1	59,6
Anzahl Stundendaten	2.061	8.885	5.515
Anzahl Fundamente	1	12	9
Anzahl C-PODs	17	17	17

3.2.3.1 Fragestellung 1: Effekte der Rammarbeiten inklusive Vergrämung

Für die Modelle der Fragestellung 1 zu den Effekten der Vibrations- und Impulsrammungen konnten Daten aller 17 POD-Stationen verwendet werden. Da die Auswertungen zeitstundengenau vorgenommen wurden, waren Effekte der vorherigen Vergrämungsmaßnahmen bei den Rammstunden (=hrw0) mit enthalten. Die Zeit relativ zu hrw0 und die Distanz zur Baustelle wurden zusammen mit den anderen Erklärungsvariablen (außer den Schiffs- und Schallparametern, die nur für 6 C-PODs vorlagen) in die GAMs eingebunden. Es lag somit ein größtmöglicher Datensatz zur Ermittlung von Rammeffekten vor. Hierbei wurde unterschieden nach den Effekten aller Rammungen sowie den separaten Effekten der Impulsrammungen und Vibrationsrammungen. Bei den Impulsrammungen wurden zudem die Effekte unter verschiedenen Schallschutz-Konfigurationen (NMS) untersucht.

3.2.3.1.1 Effekte aller Rammungen beider Rammtypen

Zunächst wurden die Effekte aller Rammungen beider Rammtypen unter Berücksichtigung weiterer Variablen untersucht (Abbildung 31).

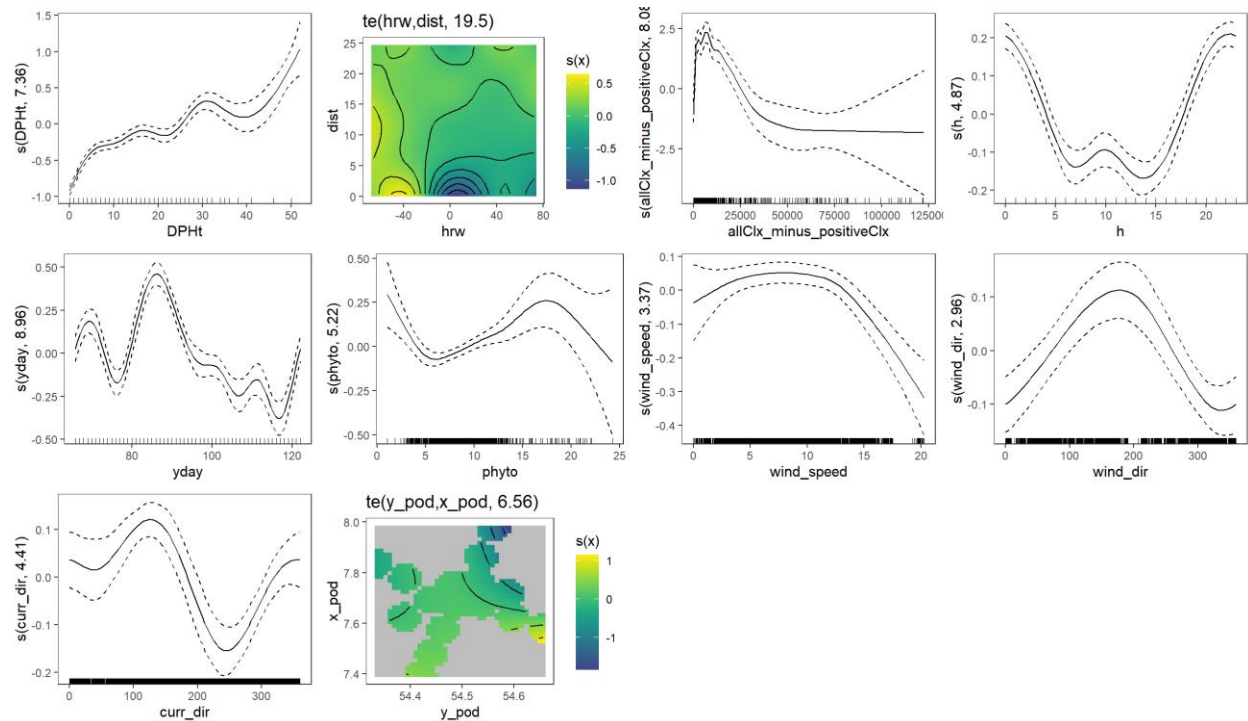


Abbildung 31: GAM-Plot zu Fragestellung 1 (Vibrations- und Impulsrammungen): Darstellung der modellierten stundenbasierten Schweinswal-Detektionsrate positiveMinutes in Bezug auf alle signifikanten Erklärungsvariablen (vgl. Tabelle 10); die standardmäßige Beschriftung der GAM-Gesamtplots nennt auf der y-Achse zwar den Namen der Erklärungsvariablen, jedoch stellt diese Achse bei singulären Variablen (nicht aber bei Tensorprodukten) hier und bei allen folgenden Gesamtplots stets die abhängige Variable um einen Mittelwert von 0 dar.

Von zentralem Interesse waren hierbei die Auswirkungen der Rammphase, im Speziellen die Effekte der Distanz zur Baustelle in Kombination mit der Zeit relativ zu Rammung und Vergrämung, auf die Schweinswal-Detektionsrate. Hierbei zeigten sich ein inkohärentes Bild. Negative Effekte schienen mit zunehmender Entfernung früher einzusetzen, was üblichen Effektmustern widersprach (Abbildung 32). Hierbei war jedoch zu beachten, dass in zeitlich weiter vor oder nach den Rammungen liegenden hrw-Stunden oft nur einige wenige Rammphasen den Plot dominierten; ebenso wiesen die entfernten Stationen bereits in den Monaten vor der Bauphase niedrigere Detektionsraten als die inneren Stationen auf (vgl. Tabelle 12). Berücksichtigte man bei der Interpretation daher nur solche Isolinien im Plot, die negative Effekte zeigten, welche mit größerer Entfernung gleichzeitig oder später einsetzten als in der Nahdistanz, erhielt man negative Effekte bis in ca. 7-12 km Entfernung (die Isolinien lassen hier allerdings viel Interpretationsspielraum). Im Nahbereich dauerten diese mindestens bis 30-35 h nach den Rammphasen an. Ein erneute Abnahme ab ca. 60 h nach Rammende hatte vermutlich andere Ursachen als die vorhergehenden Rammungen. Auch gab es für den Zeitbereich ab hrw+37 nur noch sehr wenige Daten.

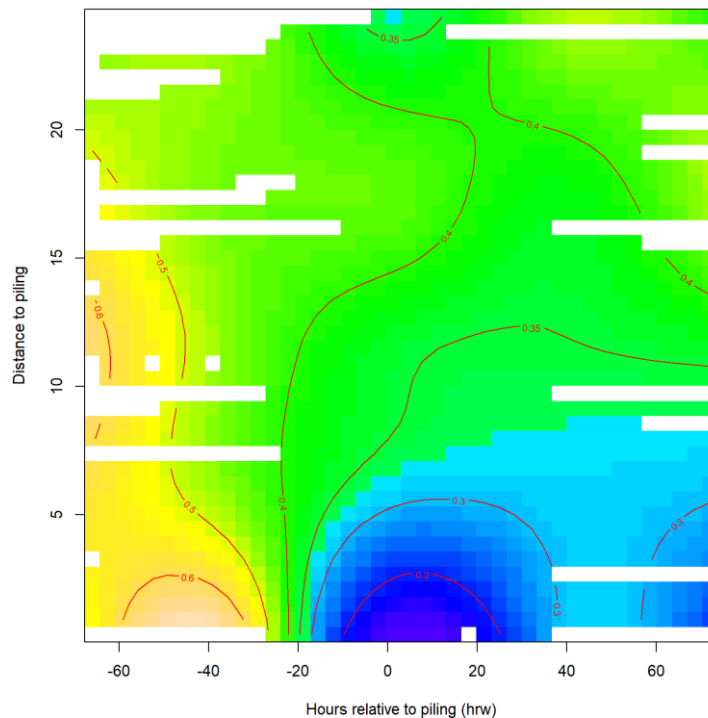


Abbildung 32: GAM-Plot zu Fragestellung 1 (Vibrations- und Impulsrammungen): kombinierte Effekte der Zeit relativ zur Rammphase ($hrw=0$) und der Distanz zur Baustelle auf die stundenbasierte Schweinswal-Detektionsrate *positiveMinutes*; weiße Bereiche indizieren größere Datenlücken.

Auf die Effekte der Umwelt-, Zeit- und Gesamtgeräusch-Variablen soll hier anhand des größten Datensatzes stellvertretend für alle weiteren GAMs eingegangen werden, da sich generelle Muster ergaben, die sich am ehesten über die gemeinsame Interpretation von allen Modellen in Tabelle 10 und Tabelle 11 sowie den Kurven aus Abbildung 31 erschließen. Nur bei stärkeren Abweichungen von diesen Grundmustern wird in den weiteren Modellen auf diese zusätzlichen Variablen eingegangen.

Im Untersuchungszeitraum der Bauphase (März bis April 2022) waren die Schweinswale überwiegend abend- und nachtaktiv (Variable h ; höchste Werte zwischen 18 Uhr und 2 Uhr). Ein Teil des phänologischen Musters spiegelt sich in $yday$ wider; allerdings konnte diese Variable durch die Glättungsfunktion nicht die kurzfristigen Schwankungen auf der Ebene von 1-3 Tagen einfangen, sodass diese rascheren Fluktuationen teilweise immer noch bei den Rammeffekten einfließen. Die in fast allen Modellen signifikante Phytoplankton-Variablen $phyto$ zeigte ein uneinheitliches Muster. Die Windgeschwindigkeit $wind_speed$ führte oberhalb von ca. 10-13 Knoten zu abnehmenden Detektionsraten, war aber nur in einigen Modellen signifikant. Gleiches galt für die Windrichtung, wobei südliche Winde ($wind_dir$ von ca. 190 Grad) mit den höchsten Detektionsraten einhergingen. Auch die Strömungsrichtung war nur in einigen Modellen signifikant, wobei die höchsten Detektionsraten bei einer Strömung nach Südosten ($curr_dir$ von ca. 130 Grad), die geringsten bei einer westlichen Strömung ($curr_dir$ von ca. 260 Grad) auftraten. Die Strömungsgeschwindigkeit $curr_speed$ war in keinem Modell signifikant. Die Variable $allClx_minus_positiveClx$ (alle Klicks ohne Schweinswalklicks), welche alle vom C-POD aufgezeichneten und in Form von Klicks unterschiedlichen Ursprungs registrierten Geräusche umfasste, zeigte einen heterogenen Verlauf. Das generelle Muster war hierbei, dass einem starken Anstieg der Detektionsraten bei geringen bis moderat hohen Klickraten bei noch höherer Geräuschbelastung ein ebenso starker Abfall der Detektionsraten folgte. In einer lauten Umgebung konnte also ein Maskierungseffekt eingetreten sein, bei dem Schweinswalklicks durch andere Geräusche überdeckt wurden, sodass die Detektionsraten bei hoher Geräuschbelastung möglicherweise zu niedrig ausgefallen sein konnten.

3.2.3.1.2 Effekte der Impulsrammungen

Zunächst wurden die Effekte aller Impulsrammungen gemeinsam untersucht. Eine weitere Unterteilung der Impulsrammungen nach bestimmten Konfigurationen des *Noise Mitigation Systems* (NMS) erfolgt in den nachfolgenden drei Untersektionen. Die Anzahl der Datensätze pro Konfiguration war allerdings oft so gering, dass die kurz- bis mittelfristigen natürlichen Fluktuationen der Tiere im UG teilweise zu nicht eindeutigen bzw. widersprüchlichen Effektzeiten und -radien führten. Daher wurden bei den NMS-Modellen Konfigurationen mit zu wenigen Rammphasen ausgeschlossen (jedoch nicht die wichtige Referenzrammung).

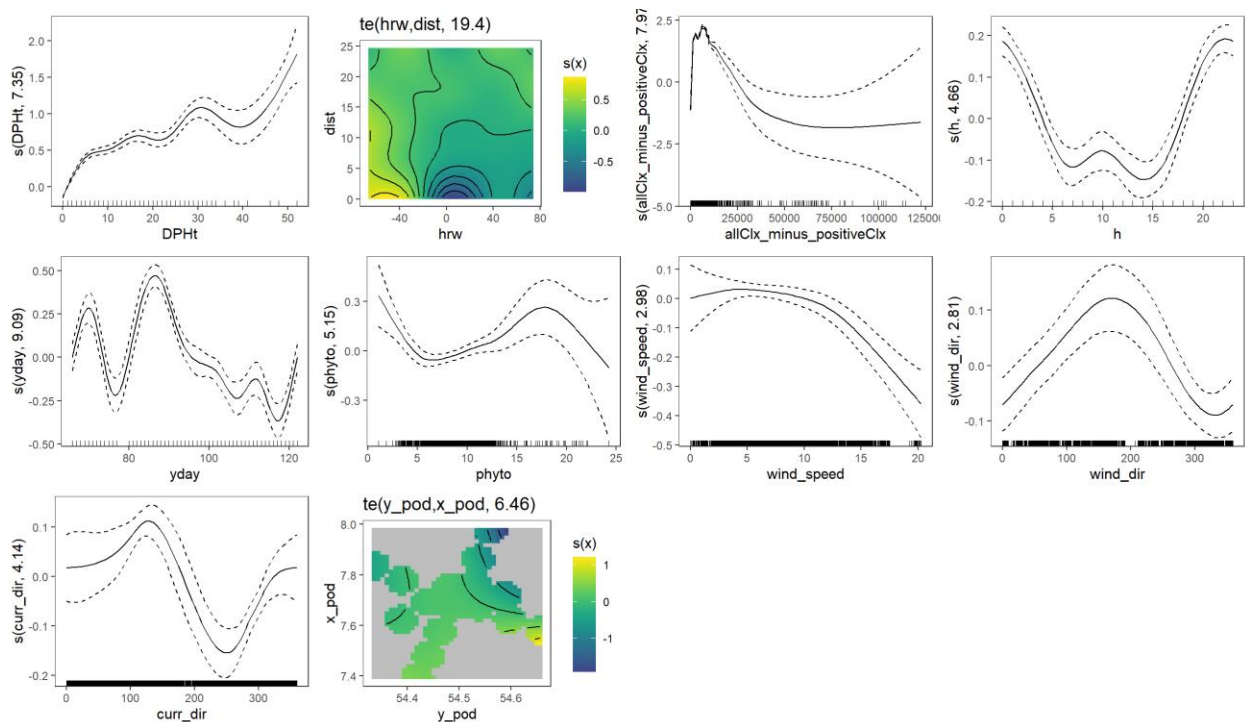


Abbildung 33: GAM-Plot zu Fragestellung 1 (Impulsrammungen): Darstellung der modellierten stundenbasierten Schweinswal-Detektionsrate positiveMinutes in Bezug auf alle signifikanten Erklärungsvariablen (vgl. Tabelle 10).

Da der überwiegende Teil der Rammarbeiten Impulsrammungen umfasste, ähnelt das Modell aller Impulsrammphasen (Abbildung 33) stark dem vorherigen Gesamtmodell (Abbildung 31). Impuls-Rammefekte reichten bis in ca. 7-14 km Entfernung von der Baustelle, begannen ca. 15-20 h vor Rammstart und dauerten bis mindestens 30-40 h nach den Rammphasen an (Abbildung 34). Für die *hrw*-Stunden weit nach der Rammung (ab *hrw*+37) gibt es kaum Daten, weshalb dieser Bereich mit großen Unsicherheiten behaftet ist.

VISSKA – Abschlussbericht AP7

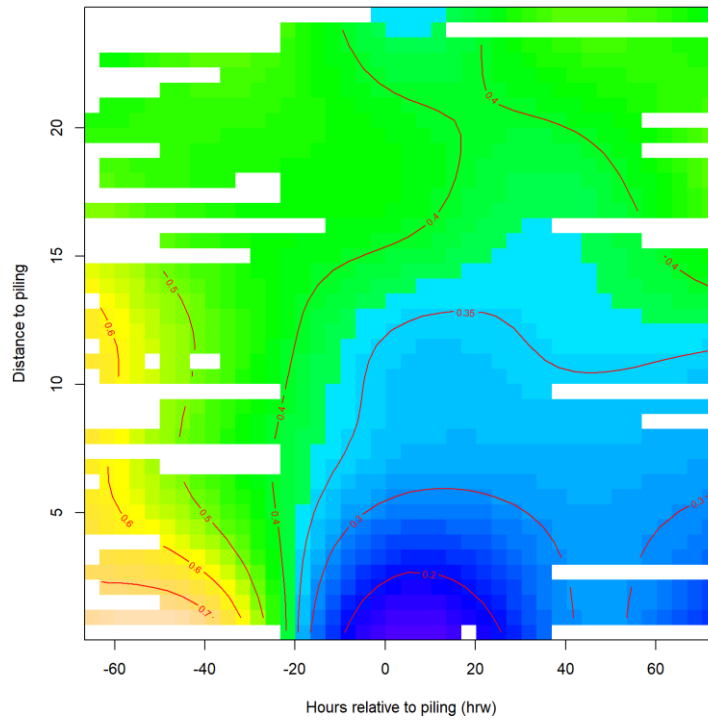


Abbildung 34: GAM-Plot zu Fragestellung 1 (Impulsrammungen): kombinierte Effekte der Zeit relativ zur Rammphase ($hrw=0$) und der Distanz zur Baustelle auf die stundenbasierte Schweinswal-Detektionsrate `positiveMinutes`; weiße Bereiche indizieren größere Datenlücken.

3.2.3.1.2.1 Impulsrammungen ohne Schallschutz (Referenz)

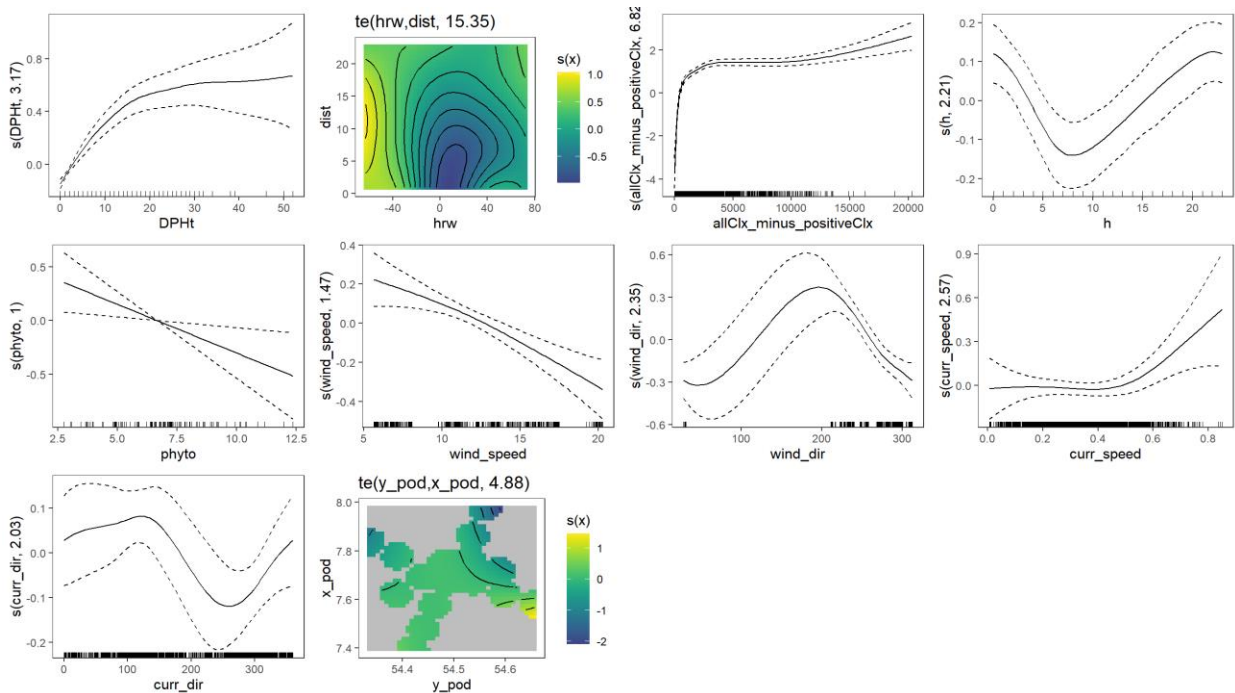


Abbildung 35: GAM-Plot zu Fragestellung 1a (Impulsrammungen: Referenz): Darstellung der modellierten stundenbasierten Schweinswal-Detektionsrate `positiveMinutes` in Bezug auf alle signifikanten Erklärungsvariablen (vgl. Tabelle 11).

Nur ein Pfahl wurde zu Referenzzwecken ohne Schallschutz gerammt (K28). Das Modell dazu liefert Abbildung 35. Es gab mehrere Tage um diese Rammung herum keine anderen Rammarbeiten, sodass ein weites Zeitfenster für das Modell zur Verfügung stand. Hierbei fiel die Rammphase jedoch in eine Zeit mit stärkeren Fluktuationen der Schweinswale, ein Geschehen, das auch zu anderen Zeiten ohne Rammungen des Öfteren im UG auftrat.

Auffallend waren die starken und weitreichenden Effekte der Referenzrammung (Abbildung 36). In kürzester Distanz dauerten diese bis ca. 35-40 h nach der Rammphase an. Die Effektreichweite betrug mindestens 15 km, möglicherweise sogar über 20 km. Genauer ließ sich dies aufgrund des kleinen Datensatzes (n=1) jedoch nicht eingrenzen.

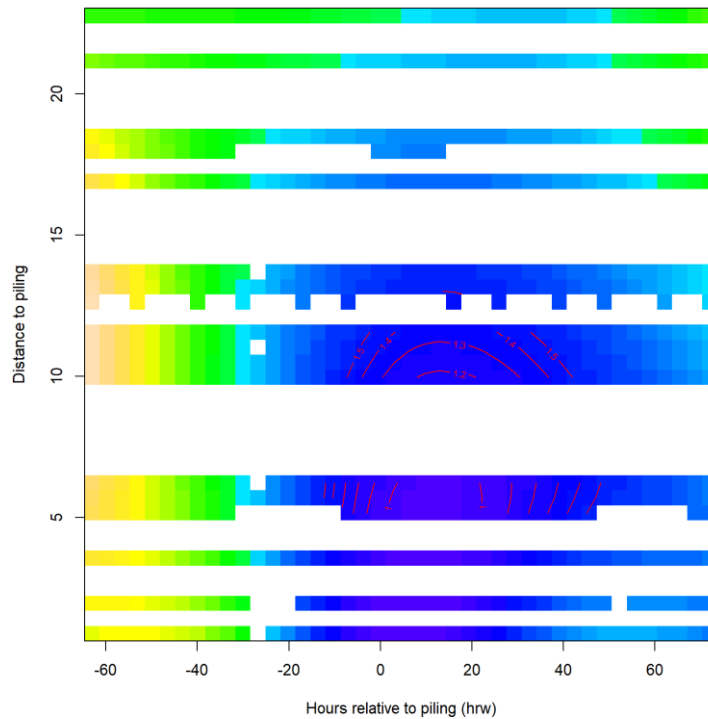


Abbildung 36: GAM-Plot zu Fragestellung 1a (Impulsrammungen: Referenz): kombinierte Effekte der Zeit relativ zur Rammphase (hrw=0) und der Distanz zur Baustelle auf die stundenbasierte Schweinswal-Detektionsrate positiveMinutes; weiße Bereiche indizieren größere Datenlücken.

3.2.3.1.2.2 Impulsrammungen Schallschutz: DGBS & HSD

Bei insgesamt zwölf Fundamenten fanden die Rammungen mit Doppeltem Großem Blasenschleier (DGBS) und Hydroschalldämpfer (HSD) als Schallschutz-System statt. Die Schweinswal-Detektionsraten nahmen nach der Rammung immer weiter ab, wobei diese Abnahme nicht weiter als 12 km weit reichte (Abbildung 38). Jedoch gab es auch hier ab *hrw*+37 nur noch sehr wenige Daten, was dieses wenig plausible Ergebnis erklären könnte.

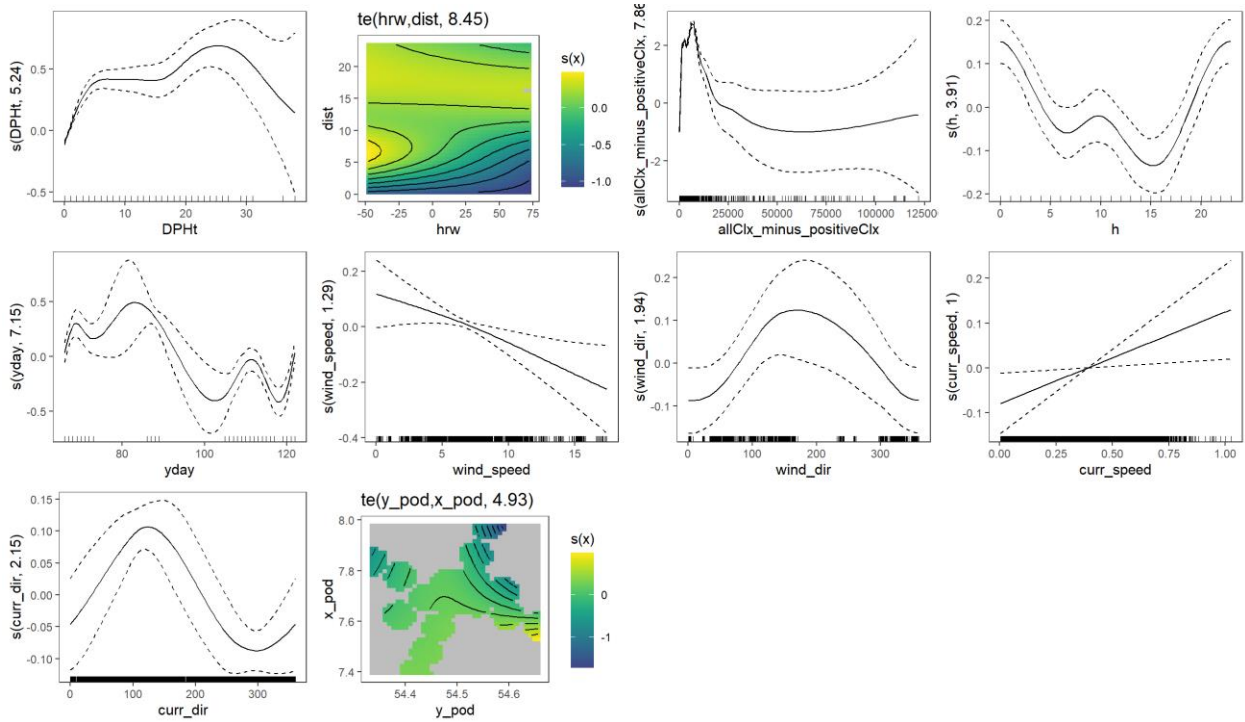


Abbildung 37: GAM-Plot zu Fragestellung 1a (Impulsrammungen mit Schallschutz: DGBS & HSD): Darstellung der modellierten stundenbasierten Schweinswal-Detektionsrate positiveMinutes in Bezug auf alle signifikanten Erklärungsvariablen (vgl. Tabelle 11).

VISSKA – Abschlussbericht AP7

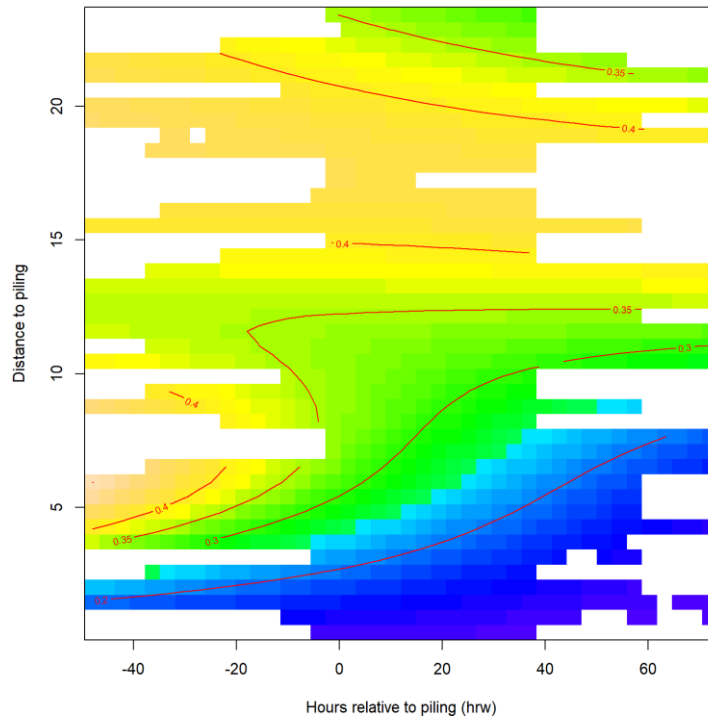


Abbildung 38: GAM-Plot zu Fragestellung 1a (Impulsrammungen mit Schallschutz: DGBS & HSD): kombinierte Effekte der Zeit relativ zur Rammphase (hrw=0) und der Distanz zur Baustelle auf die stundenbasierte Schweinswal-Detektionsrate positiveMinutes; weiße Bereiche indizieren größere Datenlücken.

3.2.3.1.2.3 Impulsrammungen mit Schallschutz: VGBS, EGBS & HSD

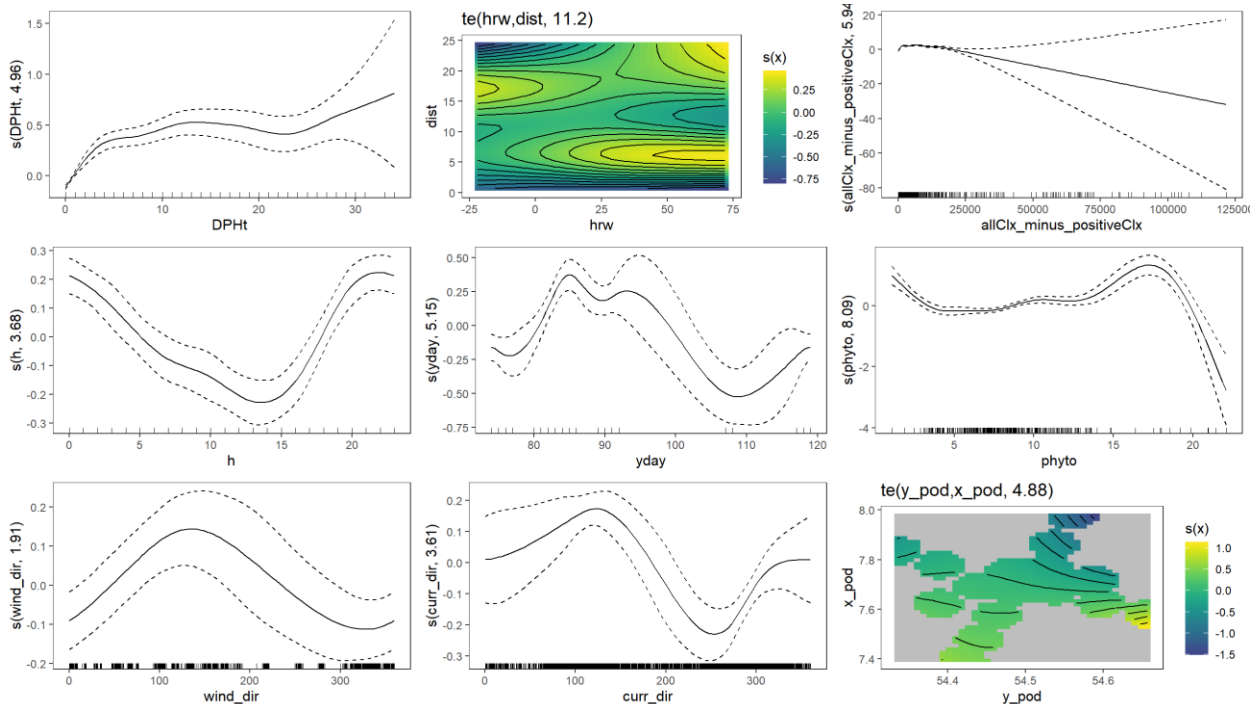


Abbildung 39: GAM-Plot zu Fragestellung 1a (Impulsrammungen mit Schallschutz: VGBS, EGBS & HSD): Darstellung der modellierten stundenbasierten Schweinswal-Detektionsrate positiveMinutes in Bezug auf alle signifikanten Erklärungsvariablen (vgl. Tabelle 11).

Bei insgesamt neun Rammbaustellen (inklusive der OSS) wurde die Rammungen mit Verbessertem Großem Blasenschleier (VGBS), Einfachem Großem Blasenschleier (EGBS) und Hydroschalldämpfer (HSD) als Schallschutz-System durchgeführt. Das Gesamtmodell zeigt Abbildung 39. Bezüglich der Rammeffekte ergab sich ein heterogenes, schwer zu interpretierendes Bild (Abbildung 40); offenbar schienen diese aber nicht weitreichend gewesen zu sein.

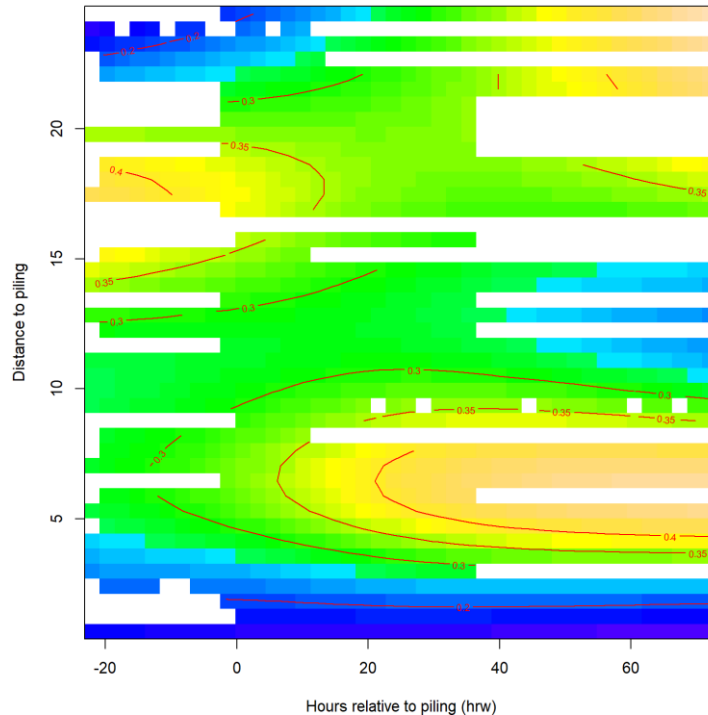


Abbildung 40: GAM-Plot zu Fragestellung 1a (Impulsrammungen mit Schallschutz: VGBS, EGBS & HSD): kombinierte Effekte der Zeit relativ zur Rammphase ($hrw=0$) und der Distanz zur Baustelle auf die stundenbasierte Schweinswal-Detektionsrate $positiveMinutes$; weiße Bereiche indizieren größere Datenlücken.

3.2.3.1.3 Effekte der Vibrationsrammungen

Bezüglich der sechs Vibrationsrammungen gab es nach $hrw+5$ keine weiteren verfügbaren Stunden nach den Rammungen, weil bereits wenige Stunden nach den Vibrationsrammungen die Bauarbeiten mit Impulsrammungen fortgesetzt wurden.

Beim Tensorprodukt aus der Stunde relativ zur Rammphase hrw und der Distanz zur Baustelle $dist$ ergaben sich negative Effekte des Einvibrierens in Verbindung mit der vorherigen Vergrämung ab ca. 10-20 h vor der Rammphase, welche zum Datenende bei $hrw+5$ bis in ca. 4-6 km Distanz reichten, zu der Zeit aber noch im Zunehmen begriffen zu sein schienen (blauer Bereich unten rechts in Abbildung 42). Die übrigen Effektmuster im Plot waren räumlich und zeitlich nicht den Vibrationsrammungen zuzuordnen.

VISSKA – Abschlussbericht AP7

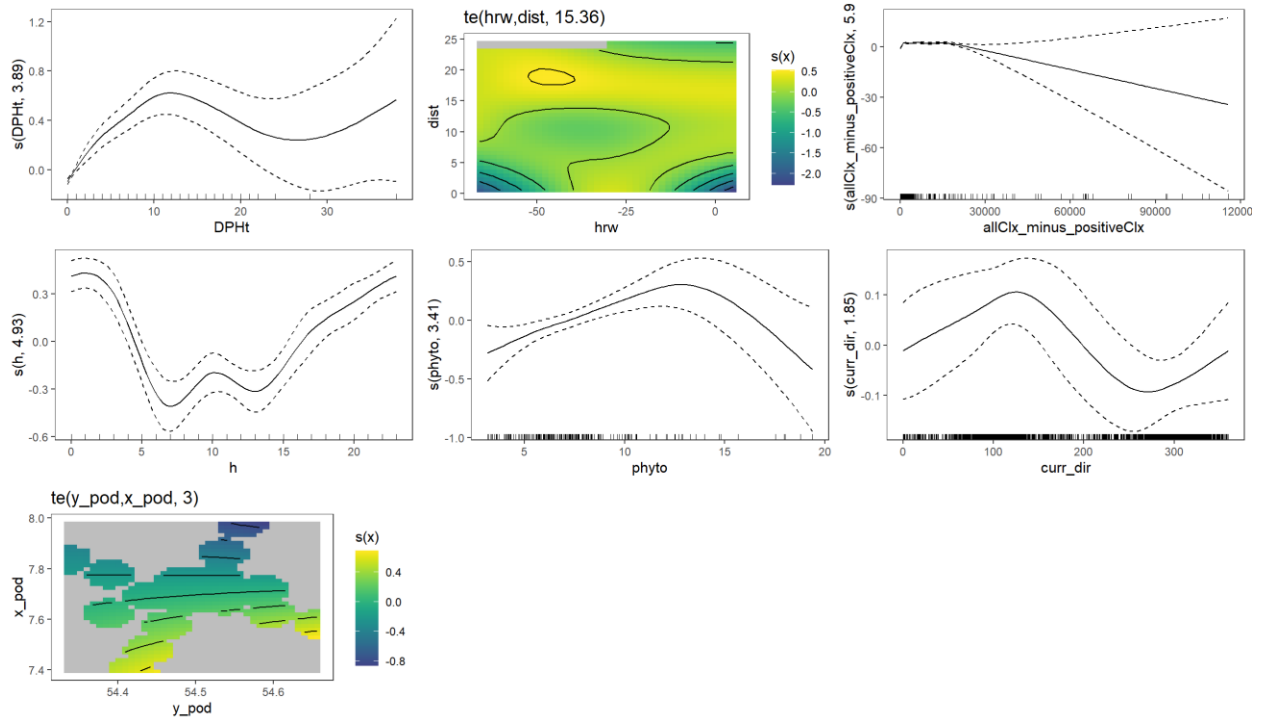


Abbildung 41: GAM-Plot zu Fragestellung 1 (Vibrationsrammungen): Darstellung der modellierten stundenbasierten Schweinswal-Detektionsrate positiveMinutes in Bezug auf alle signifikanten Erklärungsvariablen (vgl. Tabelle 10).

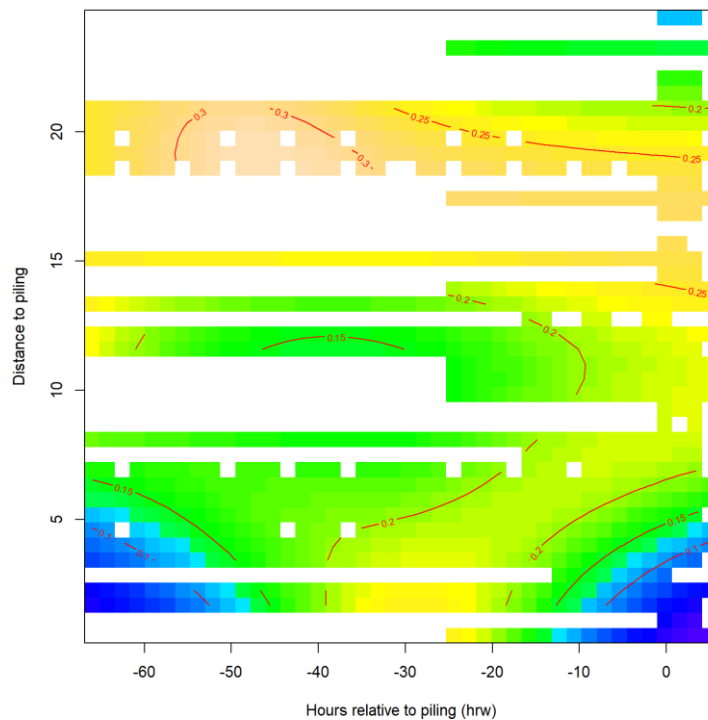


Abbildung 42: GAM-Plot zu Fragestellung 1 (Vibrationsrammungen): kombinierte Effekte der Zeit relativ zur Rammphase (hrw=0) und der Distanz zur Baustelle auf die stundenbasierte Schweinswal-Detektionsrate positiveMinutes; weiße Bereiche indizieren größere Datenlücken.

3.2.3.2 Fragestellung 2: Schiffs-, Schall- und Rammeffekte

Für die Modelle der Fragestellung 2 lagen von insgesamt 6 C-POD-Stationen vom *itap* modellierte Schall-daten gemeinsam mit AIS-Daten aller Schiffe in 5 km Umkreis um einen C-POD herum vor. Nur von diesen 6 C-PODs konnten bei dieser Fragestellung die Rammparameter und anderen Erklärungsvariablen verwendet werden, um die Schiffs-, Schall- und Rammeffekte auf die Detektionsraten der Schweinswale zu untersuchen. Der Datensatz war also kleiner als bei der vorherigen Fragestellung, umfasste dafür aber mehr von den für die Studie relevanten, schiffsbezogenen Variablen. Um auch die Absenz von Schiffen ($n_{all_ships}=0$) zu erfassen, wurden für diese Modelle die von einer Schiffspräsenz abhängigen Variablen $all_ships_dist_min$ und $all_ships_speed_max$ weggelassen. Diese wurden aber bei den direkt auf Schiffs-effekte abzielenden Fragestellungen 3-5 wieder eingebunden.

3.2.3.2.1 Schiffs-, Schall- und Rammeffekte: alle Rammungen

Band man die verfügbaren Schiffsparameter in die Modelle ein, ergaben die zeitlichen und räumlichen Effekte von Rammung und Vergrämung kein schlüssiges Muster, da erst weit nach der Rammphase in gut 10 km Entfernung die scheinbar stärksten negativen Effekte auftraten, allerdings nicht im Nahbereich (Abbildung 44).

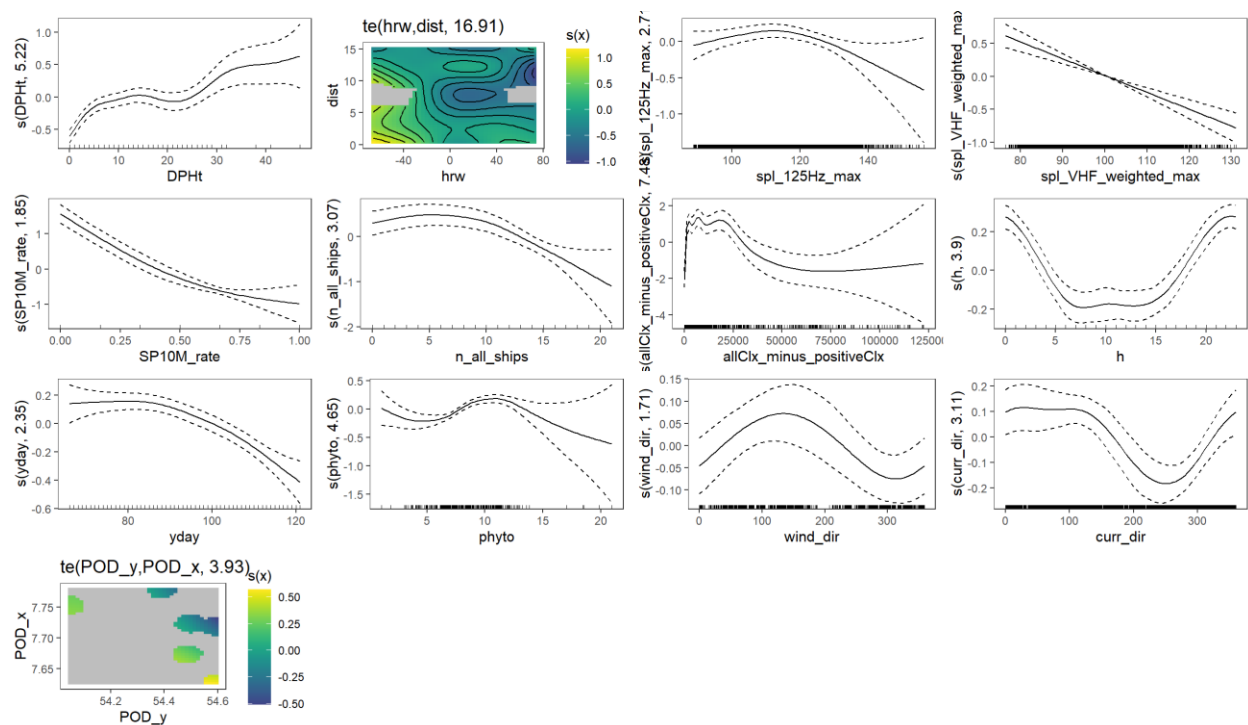


Abbildung 43: GAM-Plot zu Fragestellung 2 (alle Rammungen): Darstellung der modellierten stundenbasierten Schweinswal-Detektionsrate positiveMinutes in Bezug auf alle signifikanten Erklärungsvariablen (vgl. Tabelle 10).

Plausibler war das Bild bei den Schiffs- und Schallvariablen. Ein stärkerer hoch- und tieffrequenter Schallpegel ($spl_VHF_weighted_max$, spl_125Hz_max) ging mit einer geringeren Schweinswal-Detektionsrate einher (Abbildung 43; siehe auch Abbildung 46), wobei der Effekt des hochfrequenten Schalls stärker war (Tabelle 10). Weiterhin führte eine zunehmende Anzahl an Schiffen aller Art im Umkreis von 5 km um einen C-POD (n_{all_ships}) zu weniger Detektionen, wobei der Effekt aber erst oberhalb von ca. 7-10 Schiffen eintrat (Abbildung 43; vgl. auch Abbildung 45). Auch in diesem Modell führte eine höhere Sonarrate $SP10M_rate$ zu weniger Detektionen (Abbildung 43; siehe auch Abbildung 45).

VISSKA – Abschlussbericht AP7

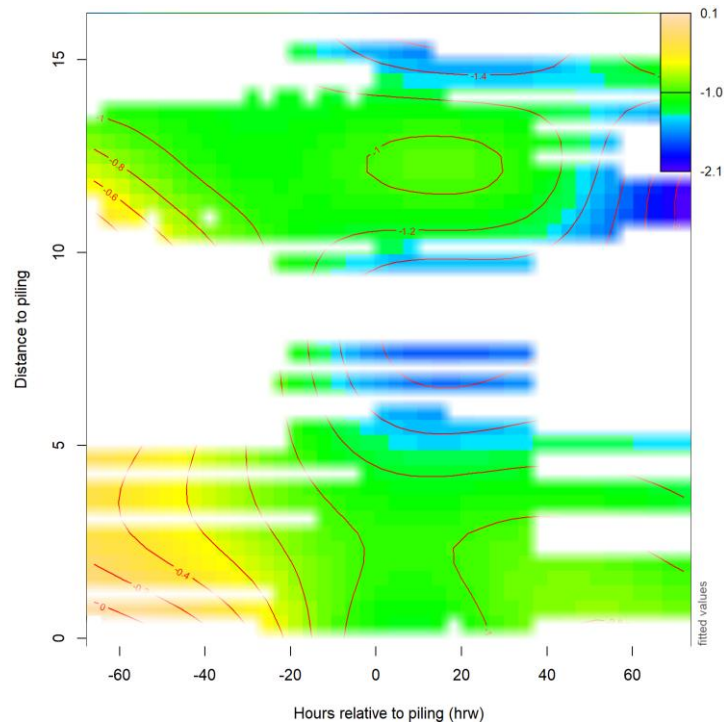


Abbildung 44: GAM-Plot zu Fragestellung 2 (alle Rammungen): kombinierte Effekte der Zeit relativ zur Rammphase ($hrw=0$) und der Distanz zur Baustelle auf die stundenbasierte Schweinswal-Detektionsrate *positiveMinutes*; weiße Bereiche indizieren größere Datenlücken.

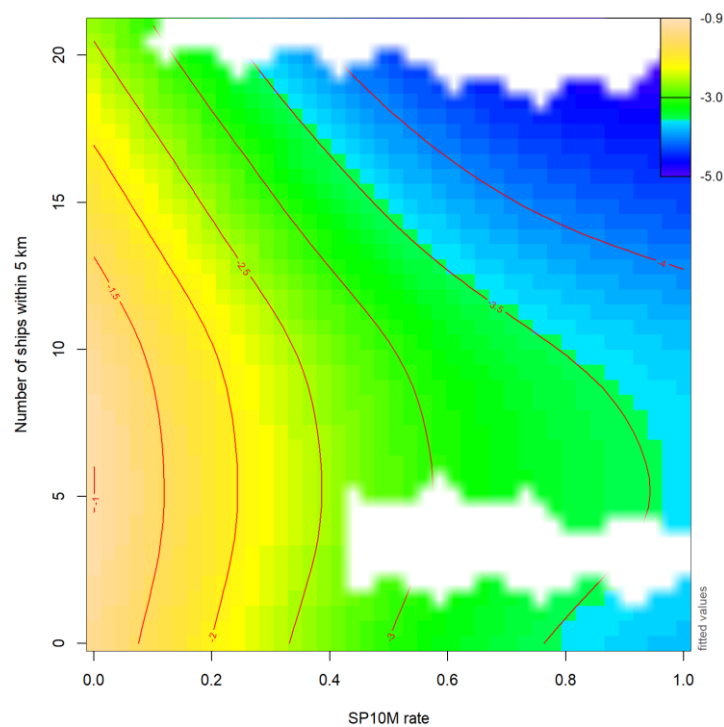


Abbildung 45: GAM-Plot zu Fragestellung 2 (alle Rammungen): 2D-Darstellung der Effekte der Anzahl der Schiffe in 5 km Umkreis um den C-POD und der Sonarrate am C-POD (*SP10M_rate*) auf die stundenbasierte Schweinswal-Detektionsrate *positiveMinutes*; weiße Bereiche indizieren größere Datenlücken.

VISSKA – Abschlussbericht AP7

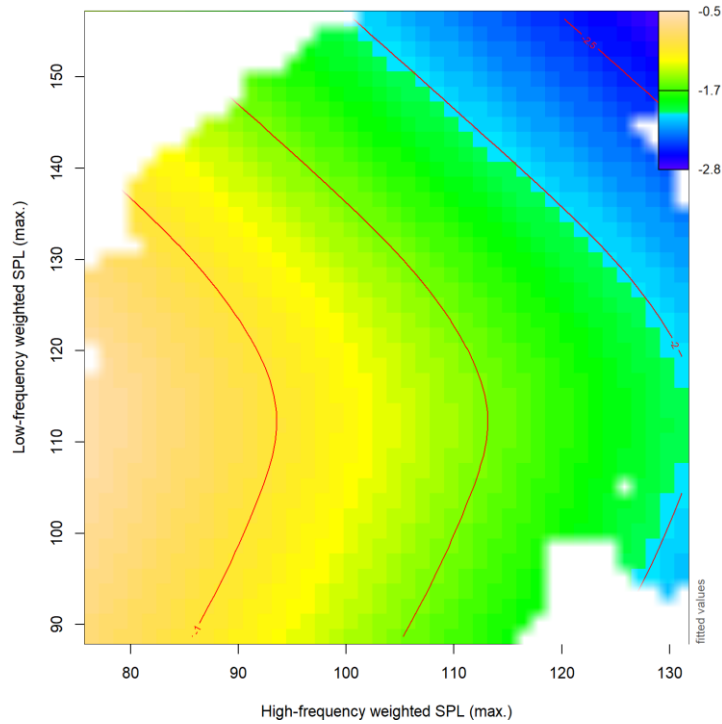


Abbildung 46: GAM-Plot zu Fragestellung 2 (alle Rammungen): 2D-Darstellung der Effekte des hoch- und tieffrequenten Schalls am C-POD ($spl_VHF_weighted_max$, spl_125Hz_max ; in dB) auf die stundenbasierte Schweinswal-Detektionsrate $positiveMinutes$; weiße Bereiche indizieren größere Datenlücken.

3.2.3.2.2 Schiffs-, Schall- und Rammeffekte: Impulsrammungen

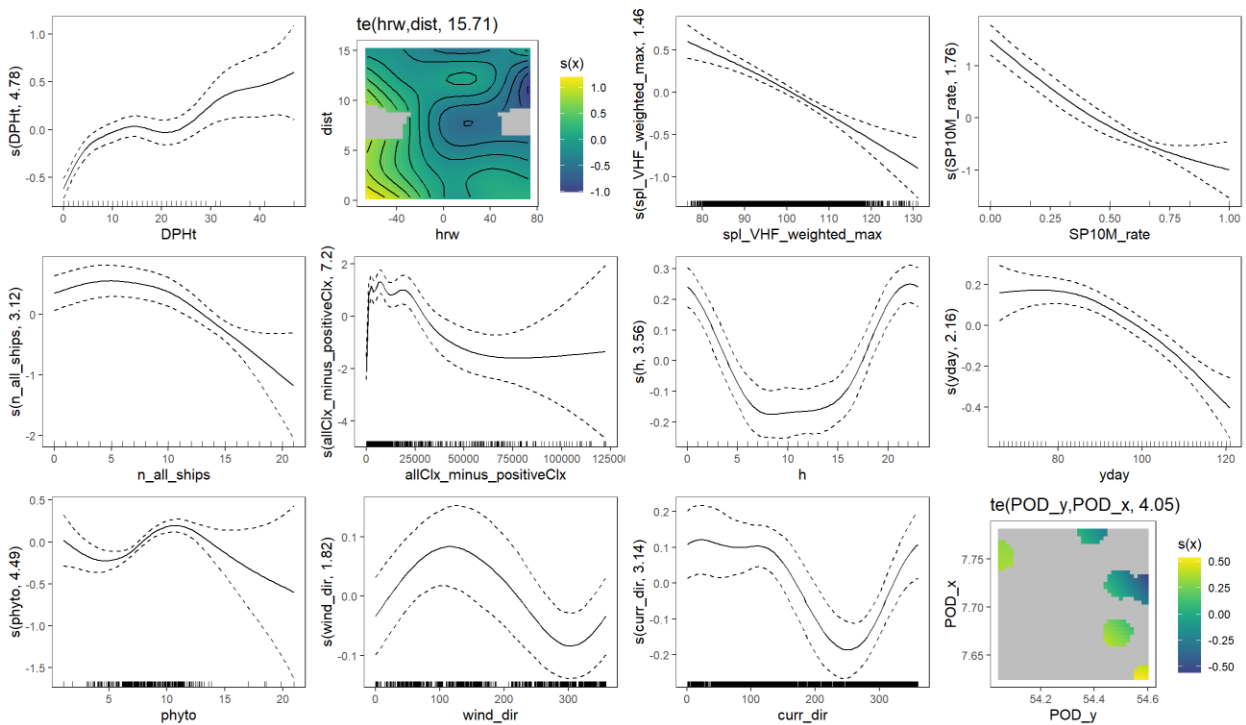


Abbildung 47: GAM-Plot zu Fragestellung 2 (Impulsrammungen): modellierte stundenbasierte Schweinswal-Detektionsrate $positiveMinutes$ in Bezug auf alle signifikanten Erklärungsvariablen (vgl. Tabelle 10).

Beim Untermodell für die Impulsrammphasen (Abbildung 47 bis Abbildung 50) gab es keinen signifikanten Effekt des tieffrequenten Schalls mehr. Wie im vorigen Modell gab es Inkonsistenzen durch stärkere Effekte in zunehmender Distanz von den Rammungen. Da der Datensatz eine große Übereinstimmung mit dem beider Rammtypen besaß, waren die Effekte denen des vorherigen Modells recht ähnlich.

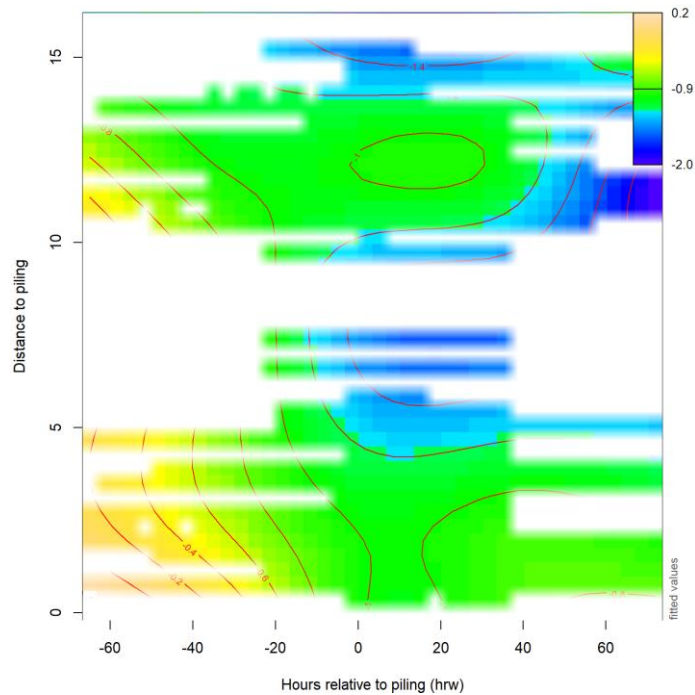


Abbildung 48: GAM-Plot zu Fragestellung 2 (Impulsrammungen): kombinierte Effekte der Zeit relativ zur Rammphase ($hrw=0$) und der Distanz zur Baustelle auf die stundenbasierte Schweinswal-Detektionsrate positiveMinutes; weiße Bereiche indizieren größere Datenlücken.

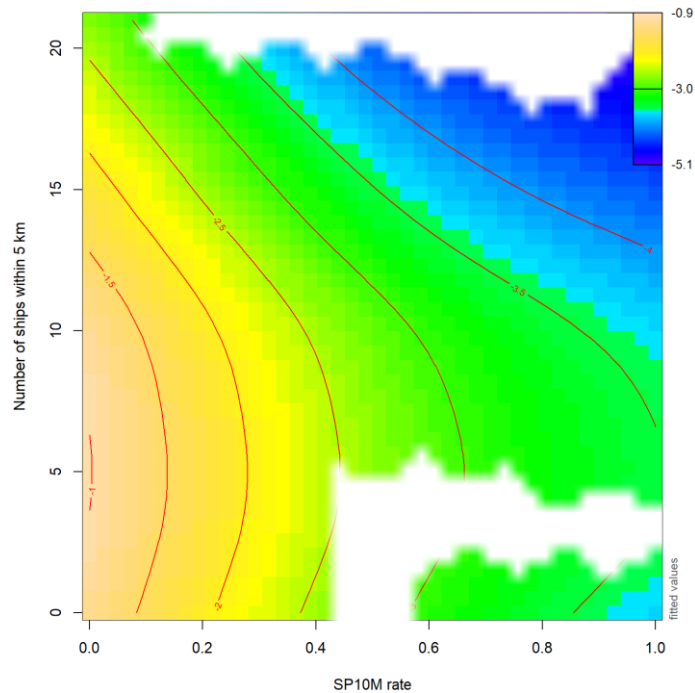


Abbildung 49: GAM-Plot zu Fragestellung 2 (Impulsrammungen): 2D-Darstellung der Effekte der Anzahl der Schiffe in 5 km Umkreis um den C-POD und der Sonarrate am C-POD (SP10M_rate) auf die stundenbasierte Schweinswal-Detektionsrate positiveMinutes; weiße Bereiche indizieren größere Datenlücken.

VISSKA – Abschlussbericht AP7

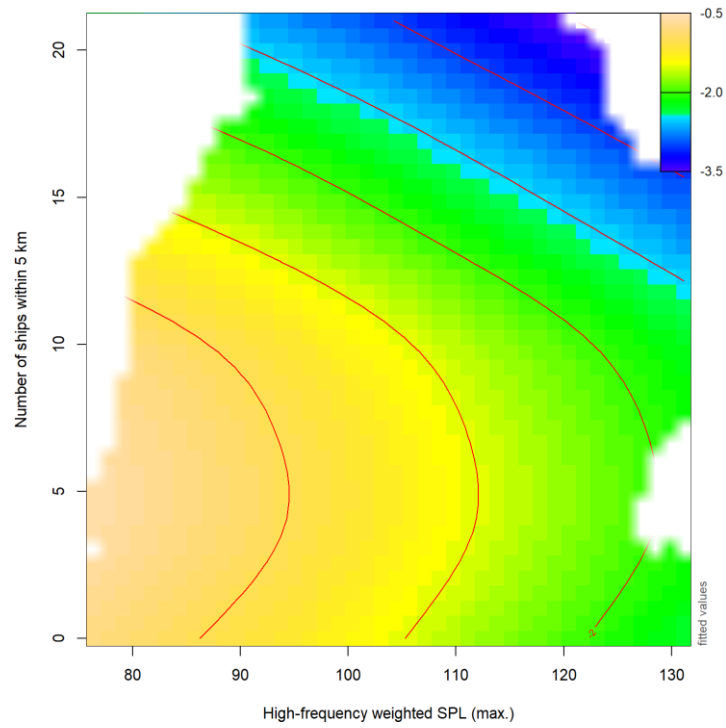


Abbildung 50: GAM-Plot zu Fragestellung 2 (Impulsrammungen): 2D-Darstellung der Effekte der Anzahl der Schiffe in 5 km Umkreis um den C-POD und des hochfrequenten Schalls am C-POD ($spl_VHF_weighted_max$ in dB) auf die stundenbasierte Schweinswal-Detektionsrate $positiveMinutes$; weiße Bereiche indizieren größere Datenlücken.

3.2.3.2.3 Schiffs-, Schall- und Rammeffekte: Vibrationsrammungen

Das Untermodell für die Vibrationsrammungen basierte auf dem kleinsten Stundendatensatz aller Modelle ($n=790$). Entsprechend groß waren die Datenlücken. Die Effekte des Tensorprodukts von der Stunde relativ zur Rammphase hrw und der Distanz zur Baustelle $dist$ schienen insgesamt nicht sehr stark gewesen zu sein, allerdings fällt – wie schon im entsprechenden Rammereffekt-Modell ohne AIS- und Schallvariablen – auch hier der dunkle Bereich unten rechts im Plot auf (Abbildung 52). Negative Effekte schienen ca. 10-15 h vor der Rammphase begonnen und bis zum Datenende 5 h nach der Rammphase noch zugenommen zu haben, wobei sich die Effekte zu dieser Zeit offenbar bis in ca. 2-4 km Distanz erstreckten.

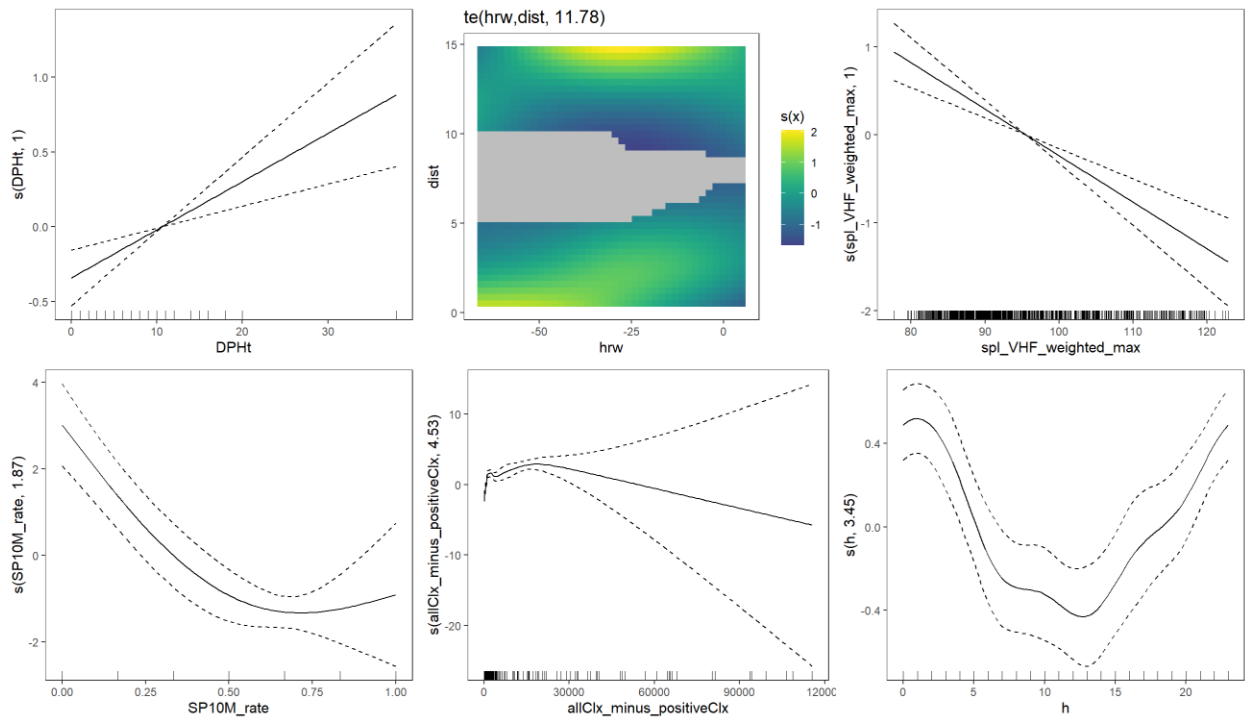


Abbildung 51: GAM-Plot zu Fragestellung 2 (Vibrationsrammungen): modellierte stundenbasierte Schweinswal-Detektionsrate positiveMinutes in Bezug auf signifikante Erklärungsvariablen (außer Tensorprodukt von hrw und $dist$; vgl. Tabelle 10).

VISSKA – Abschlussbericht AP7

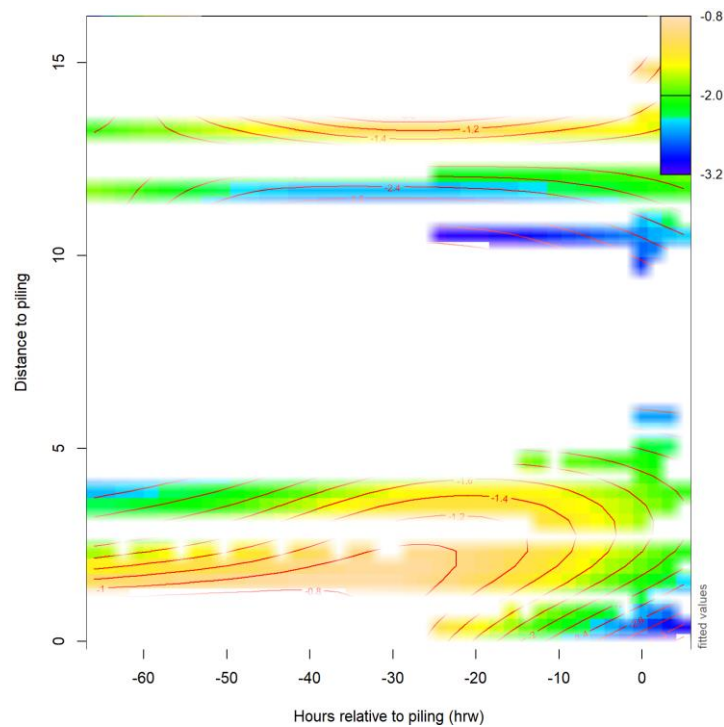


Abbildung 52: GAM-Plot zu Fragestellung 2 (Vibrationsrammungen): kombinierte Effekte der Zeit relativ zur Rammphase ($hrw=0$) und der Distanz zur Baustelle auf die stundenbasierte Schweinswal-Detektionsrate $positiveMinutes$; weiße Bereiche indizieren größere Datenlücken.

Signifikante Schiffs- und Schallvariablen waren hier der hochfrequente Schallpegel im besten Hörbereich der Schweinswale ($sp_VHF_weighted_max$) und die Sonarrate ($SP10M_rate$). Beide gingen mit verringerten Detektionsraten einher (Abbildung 51). Auffällig war, dass die Maxima des hochfrequenten Dauerschallpegels in der Umgebung der C-PODs (von diesen lagen V02, V03 und S12 aber nicht in Baustellennähe) beim Stundendatensatz der Vibrationsrammungen kaum über 120 dB hinaus kamen (Abbildung 53), während beim Datensatz der Impulsrammungen mitunter 130 dB erreicht wurden (Abbildung 50).

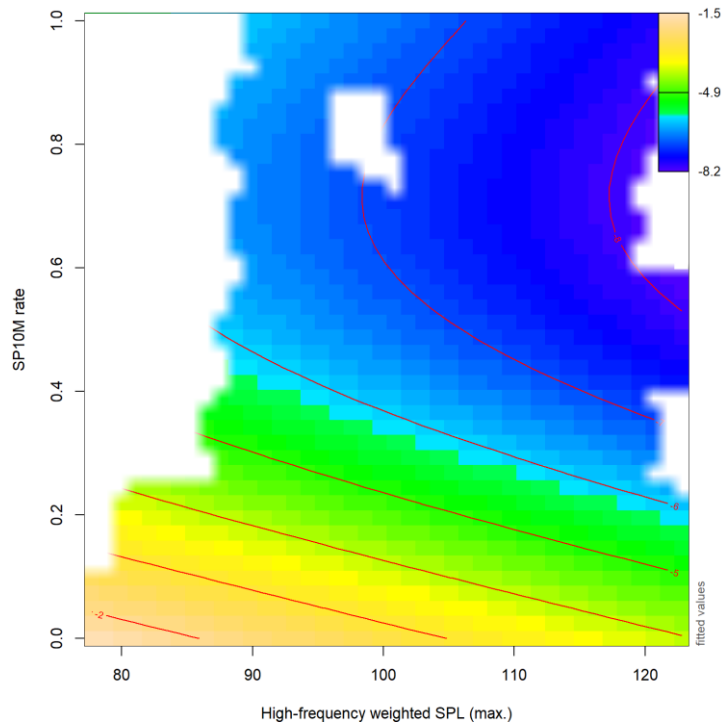


Abbildung 53: GAM-Plot zu Fragestellung 2 (Vibrationsrammungen): 2D-Darstellung der Effekte der Sonarrate (*SP10M_rate*) und des hochfrequenten Schalls am C-POD (*spl_VHF_weighted_max* in dB) auf die stundenbasierte Schweinswal-Detektionsrate *positiveMinutes* (auf Mittelwert 0 skaliert); weiße Bereiche indizieren größere Datenlücken.

3.2.3.3 Fragestellung 3: Effekte aller Schiffe und des Schalls

In dieses und die folgenden beiden Modelle wurden keine Rammvariablen (*hrw* & *dist*) eingebunden, um die Schiffs- und Schalleffekte separat zu evaluieren. Für das Modell der Fragestellung 3 lagen für insgesamt 6 C-POD-Stationen (V02, V03, V08, V09, S10, S12) vom *itap* modellierte Schalldaten gemeinsam mit AIS-Daten aller Schiffe in 5 km Umkreis um einen C-POD vor. Diese wurden zusammen mit den anderen Erklärungsvariablen in ein GAM eingebunden, um Schall- und Schiffseffekte auf die Detektionsraten der Schweinswale zu untersuchen. Das finale GAM basierte auf den genannten 6 Stationen (Abbildung 54), wobei durch die Einbindung der signifikanten Schiffsvariablen *all_ships_dist_min*, die die Anwesenheit von Schiffen erforderte, nur Stundendaten mit mindestens einem Schiff einfließen.

Hochfrequenter (*spl_VHF_weighted_max*; Abbildung 58) und tieffrequenter Dauerschall (*spl_125Hz_max*; Abbildung 57) sowie die Sonarrate *SP10M_rate* (Abbildung 59) führten zu einer Abnahme der Schweinswal-Detektionsraten. Hierbei war der Effekt des tieffrequenten Schalls schwächer als der des hochfrequenten Schalls und der Sonarrate (vgl. Tabelle 10).

Als besonders interessant erwiesen sich die beiden AIS-Schiffsvariablen. Hier zeigte sich eine Abnahme der Detektionsraten, die sich ab einer Anzahl von ca. 10 Schiffen im Umkreis von 5 km um einen C-POD noch einmal verstärkte (*n_all_ships*; Abbildung 55). Den größten Effekt auf die Schweinswal-Detektionsrate schienen hierbei die Schiffe in einer Distanz von bis zu 2 km um einen C-POD herum zu haben (*all_ships_dist_min*; Abbildung 56). Oberhalb dieser Entfernung war der Einfluss der Schiffe auf Schweinswale hingegen offenbar nur noch gering.

VISSKA – Abschlussbericht AP7

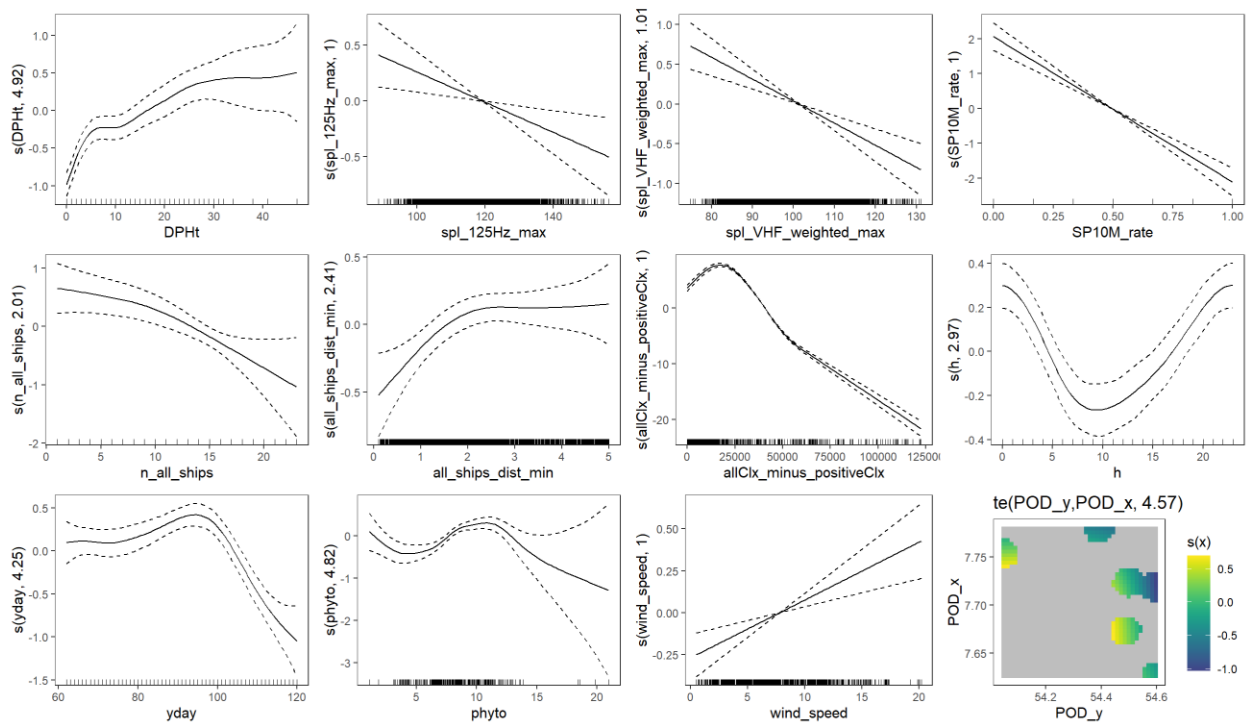


Abbildung 54: GAM-Plot zu Fragestellung 3: Darstellung der modellierten stundenbasierten Schweinswal-Detektionsrate positiveMinutes in Bezug auf alle signifikanten Erklärungsvariablen (vgl. Tabelle 10).

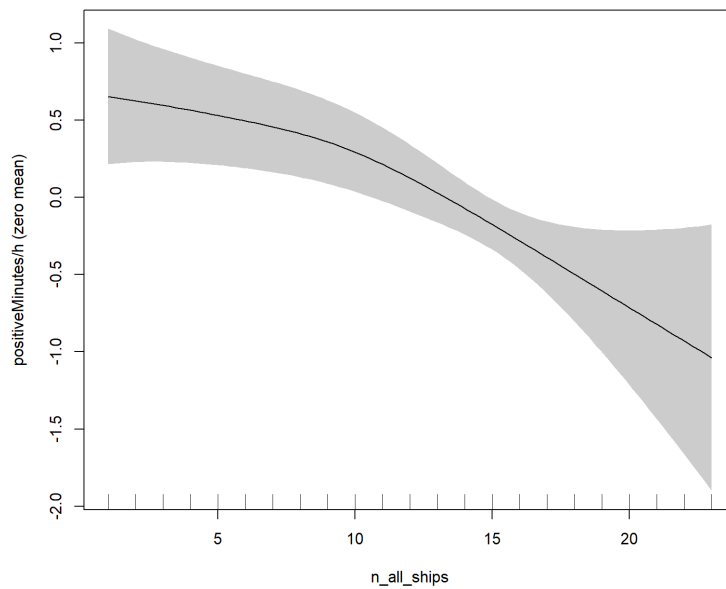


Abbildung 55: GAM-Plot zu Fragestellung 3: Effekt der Anzahl aller Schiffe in 5 km Umkreis um den C-POD (n_{all_ships}) auf die stundenbasierte Schweinswal-Detektionsrate positiveMinutes.

VISSKA – Abschlussbericht AP7

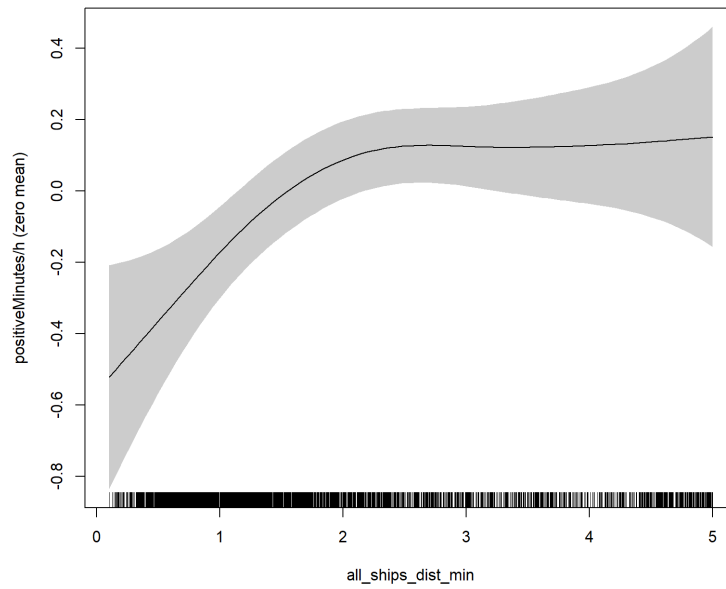


Abbildung 56: GAM-Plot zu Fragestellung 3: Effekt der Distanz des nächstgelegenen Schiffes in 5 km Umkreis um den C-POD (*all_ships_dist_min*) auf die stundenbasierte Schweinswal-Detektionsrate *positiveMinutes*.

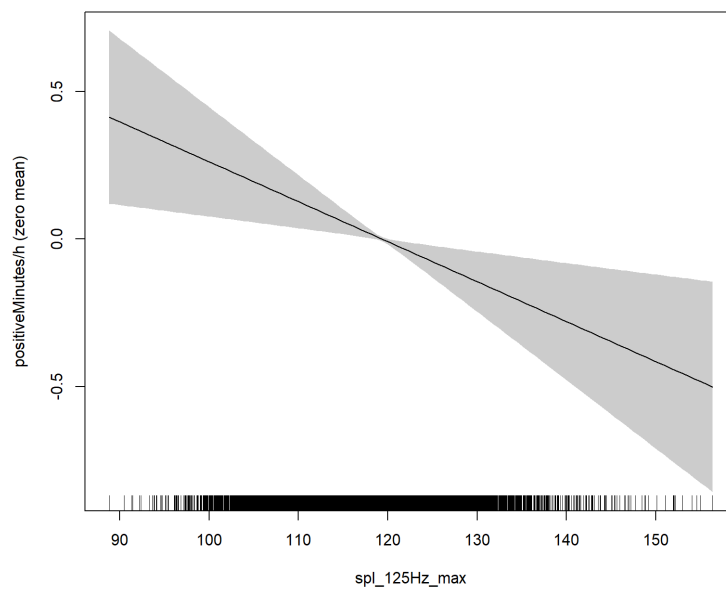


Abbildung 57: GAM-Plot zu Fragestellung 3: Effekt des tieffrequenten Schalls am C-POD (*spl_125Hz_max* in dB) auf die stundenbasierte Schweinswal-Detektionsrate *positiveMinutes*.

VISSKA – Abschlussbericht AP7

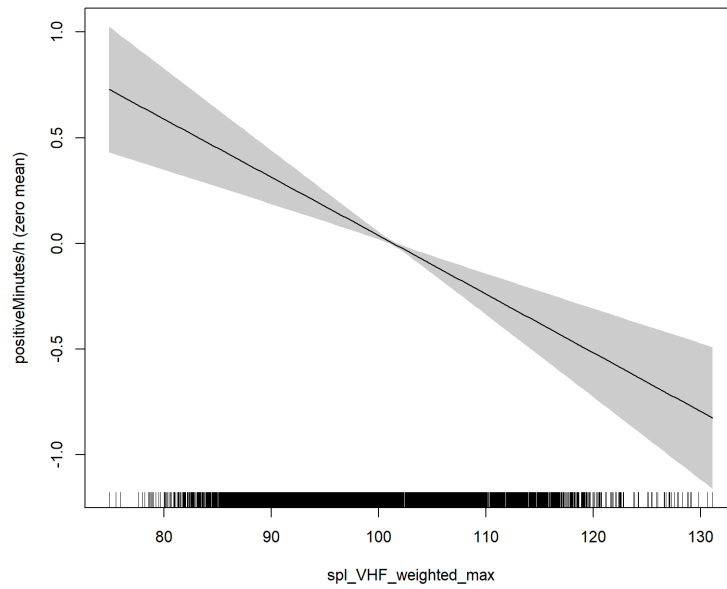


Abbildung 58: GAM-Plot zu Fragestellung 3: Effekt des hochfrequenten Schalls am C-POD ($spl_VHF_weighted_max$ in dB) auf die stundenbasierte Schweinswal-Detektionsrate $positiveMinutes$.

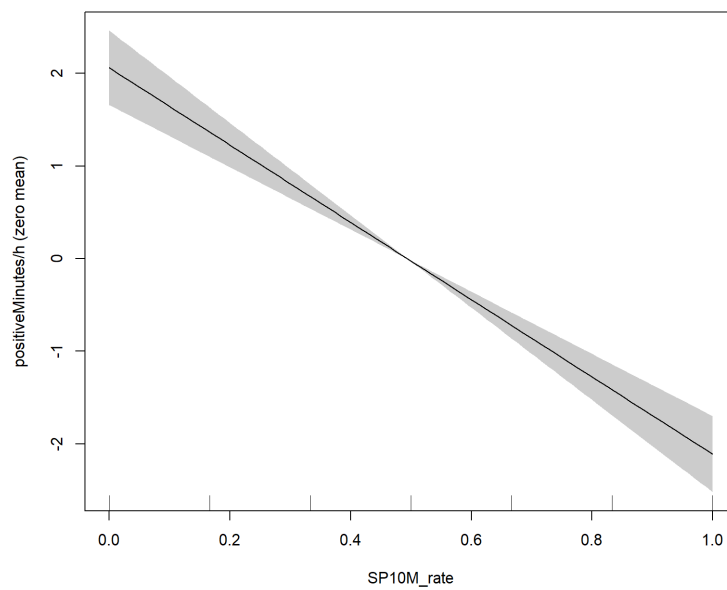


Abbildung 59: GAM-Plot zu Fragestellung 3: Effekt der Sonarrate am C-POD ($SP10M_rate$) auf die stundenbasierte Schweinswal-Detektionsrate $positiveMinutes$.

3.2.3.4 Fragestellung 4: Effekte aller Schiffe und des Schalls im Nahbereich des OWP

Für dieses Modell der Fragestellung 4 wurden hinsichtlich der 3 C-POD-Stationen im Nahbereich des OWP (V08, V09, S10) die AIS-Daten aller Schiffe in 5 km Umkreis um einen C-POD gemeinsam mit Schalldaten und anderen Erklärungsvariablen in ein GAM eingebunden. Auf diese Weise sollten Schall- und Schiffseffekte im Nahbereich des Windparks auf die Detektionsraten der Schweinswale untersucht werden. Es flossen Stundendaten mit mindestens einem Schiff ein.

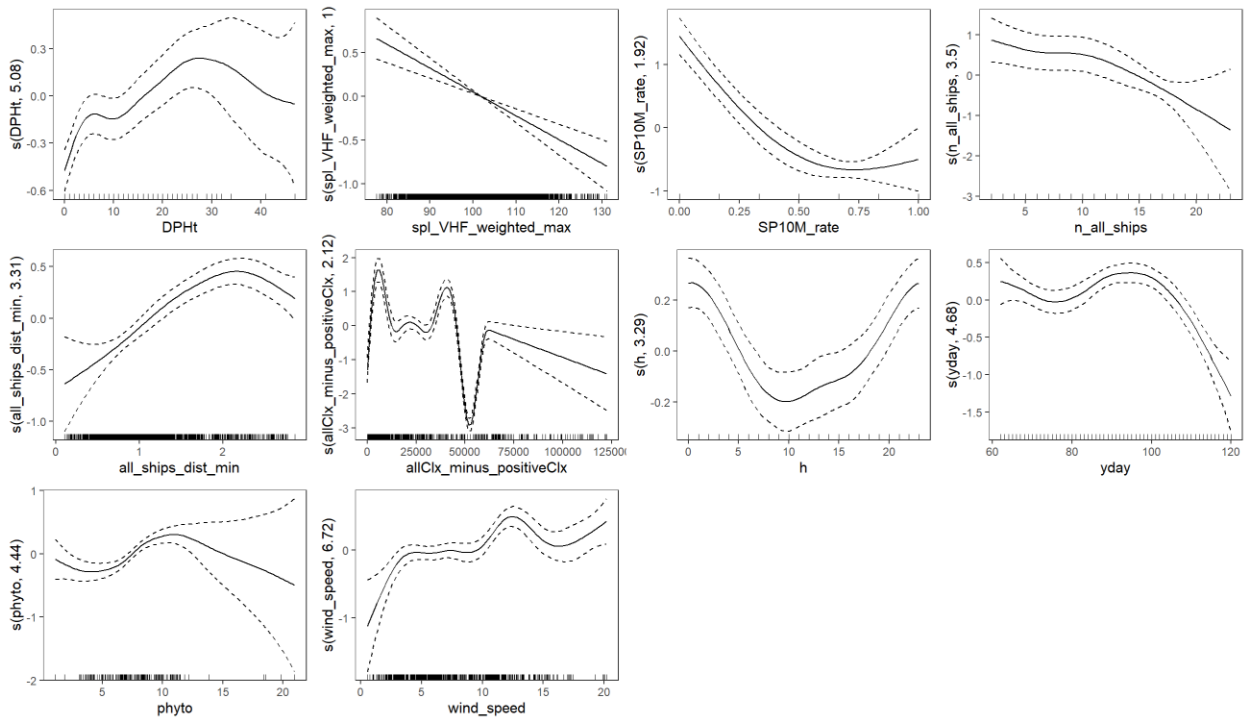


Abbildung 60: GAM-Plot zu Fragestellung 4: Darstellung der modellierten stundenbasierten Schweinswal-Detektionsrate positiveMinutes in Bezug auf alle signifikanten Erklärungsvariablen (vgl. Tabelle 10).

Da es sich hierbei um einen Unterdatensatz des letzten Modells handelt (mit mehr als einem Dreiviertel der Datensätze des vorigen Modells bei nur halb so vielen C-PODs, was den starken Schiffsverkehr in Windparknähe verdeutlicht), sind die Ergebnisse relativ ähnlich. Jedoch fielen aufgrund der geringen Anzahl an Stationen deren Koordinaten als nicht mehr signifikant aus dem Modell (Abbildung 60). Zudem war die Schiffsdichte in der Nähe des Windparks so hoch, dass das nächste Schiff niemals weiter als 3 km vom C-POD entfernt war. Dennoch ist zu erkennen, dass die Schweinswal-Detektionsraten auch hier lediglich bis zu Distanzen von knapp über 2 km zum nächsten Schiff verringert waren (Abbildung 62). Ebenso verringerte sich die Detektionsrate bei mehr als 10 Schiffen im Umkreis von 5 km um einen C-POD stärker als bis zu diesem Wert (Abbildung 61). Eine hohe Sonarrate (*SP10M_rate*) ging mit geringeren Detektionsraten einher, wobei die komplette Abnahme bereits bis zu Werten von 0,5 erfolgte (Abbildung 64). Auch hatte ein starker hochfrequenter Schallpegel (*spl_VHF_weighted_max*) einen klar negativen Effekt auf die Detektionsraten (Abbildung 63).

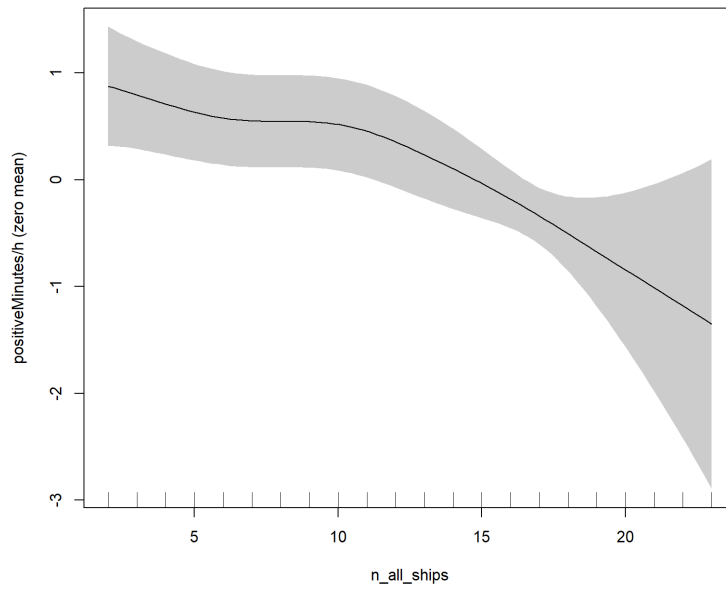


Abbildung 61: GAM-Plot zu Fragestellung 4: Effekt der Anzahl aller Schiffe in 5 km Umkreis um den C-POD (n_all_ships) auf die stundenbasierte Schweinswal-Detektionsrate $positiveMinutes$.

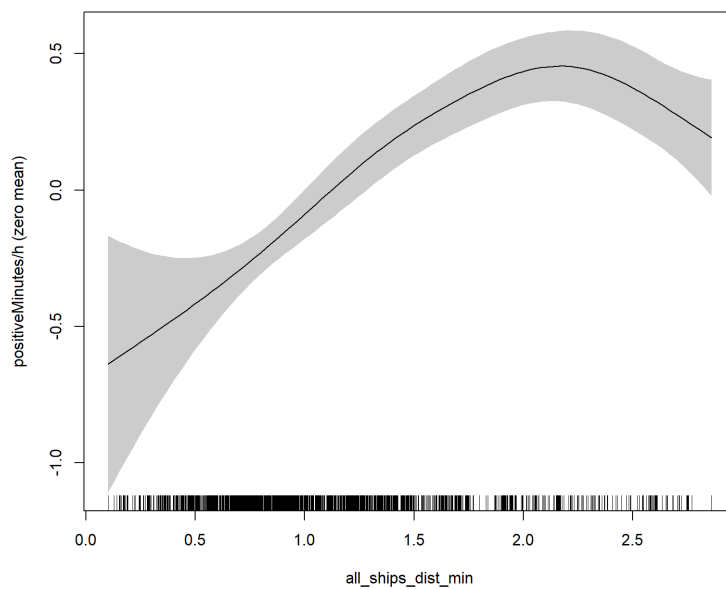


Abbildung 62: GAM-Plot zu Fragestellung 4: Effekt der Distanz des nächstgelegenen Schiffes in 5 km Umkreis um den C-POD ($all_ships_dist_min$) auf die stundenbasierte Schweinswal-Detektionsrate $positiveMinutes$; da im Baufeld relativ viele Schiffe unterwegs waren, lag die minimale Distanz eines Schiffes bei diesem Datensatz nicht über 3 km.

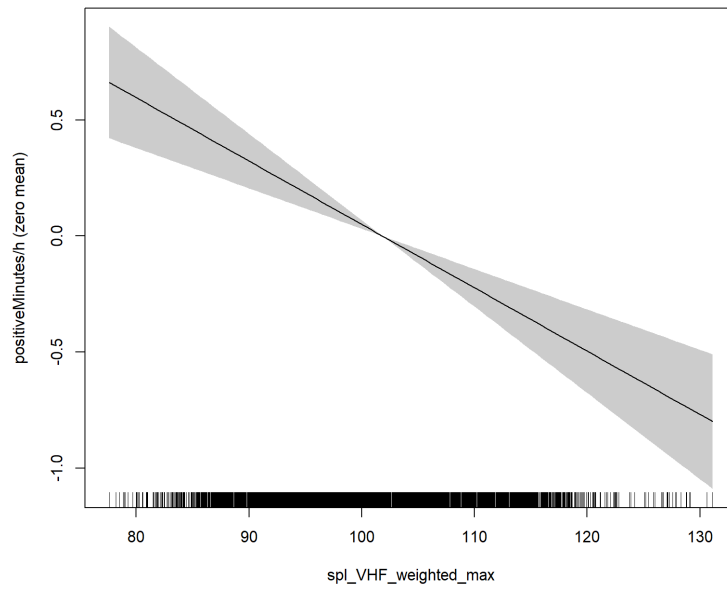


Abbildung 63: GAM-Plot zu Fragestellung 4: Effekt des hochfrequenten Schalls am C-POD (*spl_VHF_weighted_max* in dB) auf die stundenbasierte Schweinswal-Detektionsrate *positiveMinutes*.

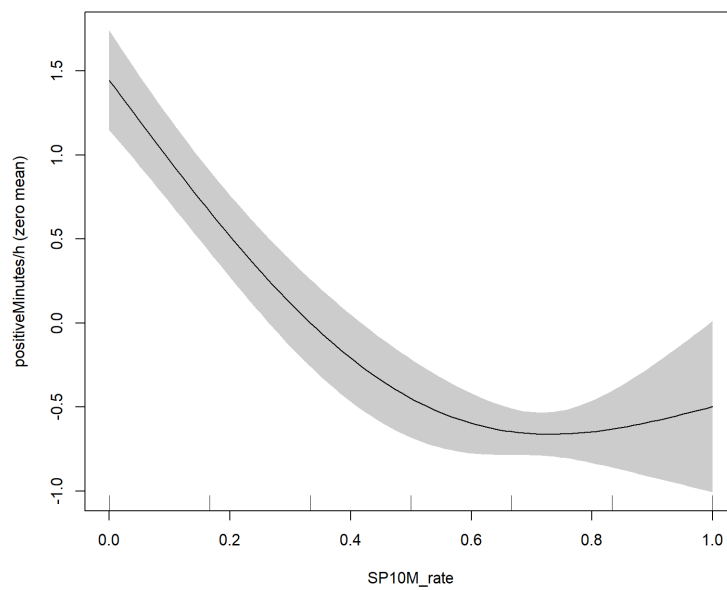


Abbildung 64: GAM-Plot zu Fragestellung 4: Effekt der Sonarrate am C-POD (*SP10M_rate*) auf die stundenbasierte Schweinswal-Detektionsrate *positiveMinutes*.

3.2.3.5 Fragestellung 5: Effekte aller DP-fähigen Schiffe und des Schalls im Nahbereich des OWP

Für das Modell der Fragestellung 5 wurden hinsichtlich der 3 C-POD-Stationen im Nahbereich des OWP (V08, V09, S10) die AIS-Daten der DP-fähigen Schiffe in 5 km Umkreis um einen C-POD gemeinsam mit Schalldaten und anderen Erklärungsvariablen in ein GAM eingebunden, um die Effekte der besonders schallintensiven DP-fähigen Schiffe und des Schalls im Nahbereich des Windparks auf die Detektionsraten der Schweinswale zu evaluieren. Die von einer Schiffspräsenz abhängige Variable *all_ships_speed_max* war nicht signifikant und wurde während der Modellselektion ausgeschlossen, während *n_DP_faehig_ships* und *DP_faehig_dist_min* signifikant waren.

Im finalen Modell (Abbildung 65) ging eine zunehmende Anzahl DP-fähiger Schiffe (*n_DP_faehig_ships*) mit einer abnehmenden Schweinswal-Detektionsrate einher, wobei maximal 6 solcher Schiffe gleichzeitig in 5 km Umkreis um einen C-POD präsent waren (Abbildung 66). Ähnlich war der Effekt des hochfrequenten Dauerschalls (*spl_VHF_weighted_max*; Abbildung 68), während tieffrequenter Dauerschall nun nicht mehr signifikant war. Die Effekte des nächsten DP-fähigen Schiffes (*DP_faehig_dist_min*) reichten bis in 3 km Entfernung, während die Effekte über alle Schiffe gesehen nur bis in ca. 2 km Distanz reichten (siehe vorheriges Modell). Die Form der Abnahme der Detektionsrate bei steigender Sonarrate *SP10M_rate* (Abbildung 69) verhielt sich hingegen wie im vorherigen Modell.

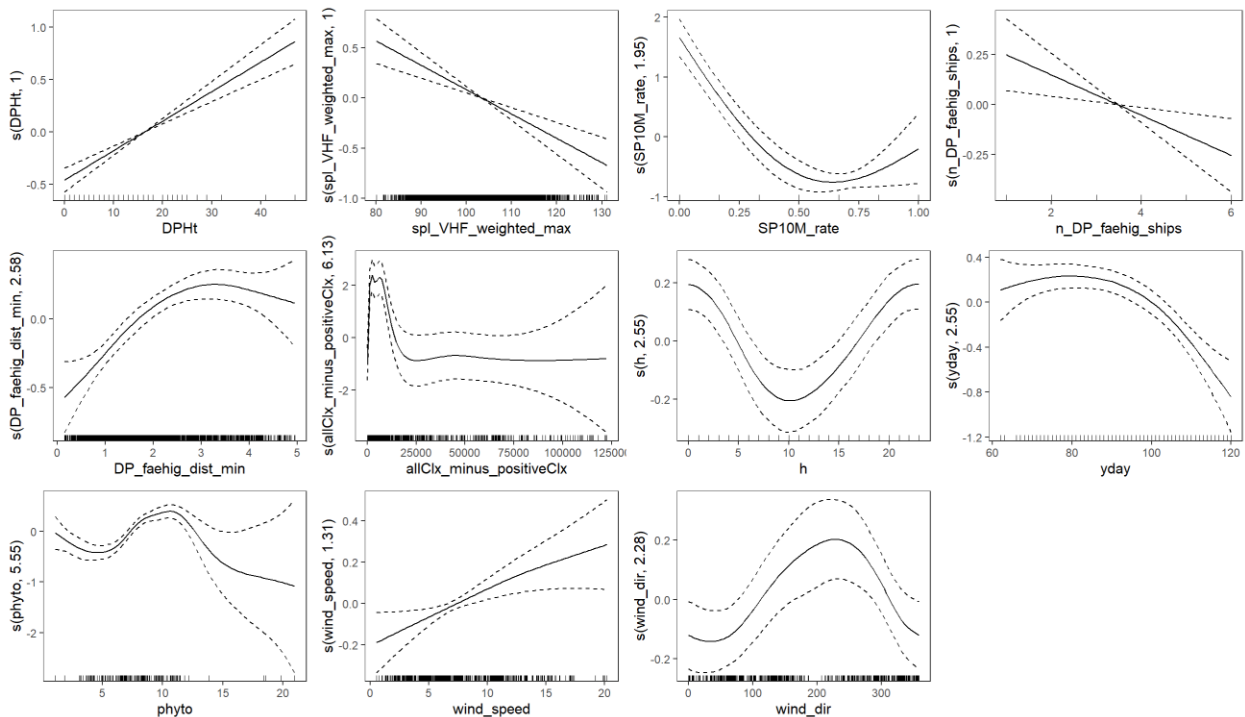


Abbildung 65: GAM-Plot zu Fragestellung 5: Darstellung der modellierten stundenbasierten Schweinswal-Detektionsrate positiveMinutes in Bezug auf alle signifikanten Erklärungsvariablen (vgl. Tabelle 10).

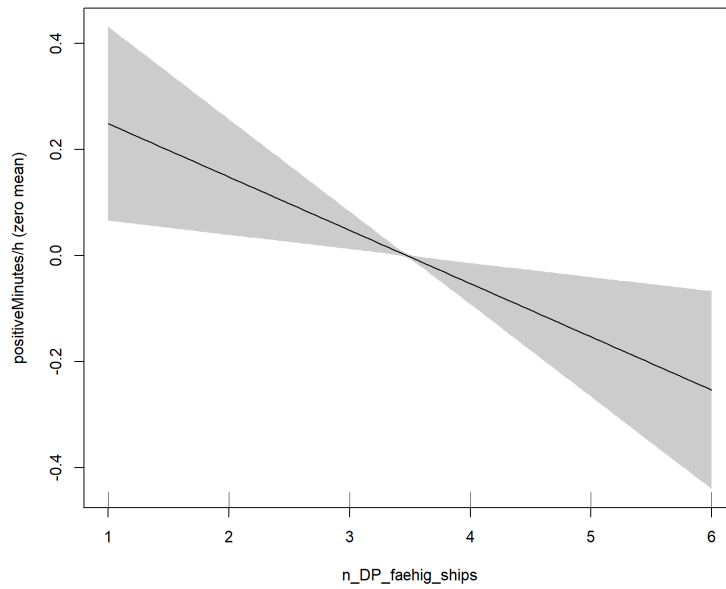


Abbildung 66: GAM-Plot zu Fragestellung 5: Effekt der Anzahl DP-fähiger Schiffe in 5 km Umkreis um den C-POD auf die stundenbasierte Schweinswal-Detektionsrate positiveMinutes.

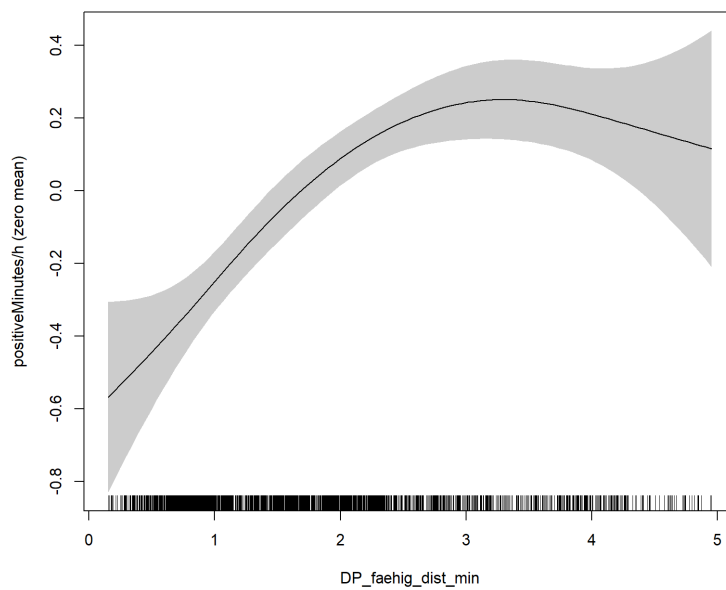


Abbildung 67: GAM-Plot zu Fragestellung 4: Effekt der Distanz des nächstgelegenen DP-fähigen Schiffes in 5 km Umkreis um den C-POD (DP_faehig_dist_min) auf die stundenbasierte Schweinswal-Detektionsrate positiveMinutes.

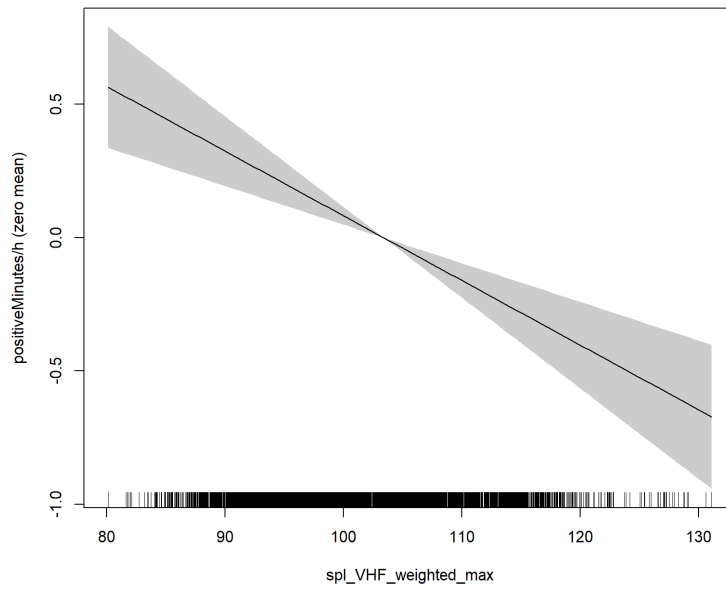


Abbildung 68: GAM-Plot zu Fragestellung 5: Effekt des hochfrequenten Schalls am C-POD (*spl_VHF_weighted_max* in dB) auf die stundenbasierte Schweinswal-Detektionsrate *positiveMinutes*.

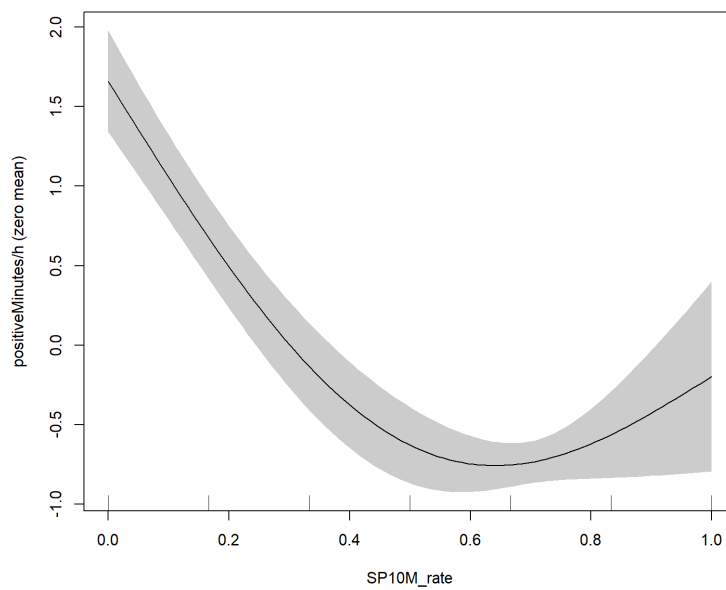


Abbildung 69: GAM-Plot zu Fragestellung 5: Effekt der Sonarrate am C-POD (*SP10M_rate*) auf die stundenbasierte Schweinswal-Detektionsrate *positiveMinutes*.

3.2.3.6 Fragestellung Sonar: Sonarrate als Proxy für bestimmte Schiffs- und Schallvariablen

Oftmals steht in PAM-Untersuchungen als Schiffsparameter nur die direkt am C-POD gemessene Sonarrate $SP10M$ zur Verfügung ($SP10M$ ist die Anzahl der sonarpositiven Minuten/h; $SP10M_rate$ ist $SP10M$ skaliert auf Werte von 0 bis 1; beide sind analog; $SP10M$ ist ein Integer; daher steht im Gegensatz zu $SP10M_rate$ – wie auch bei *positiveMinutes* der anderen Modelle – im GAM die Quasipoisson-Familie als Verteilungsklasse zur Verfügung). Es stellte sich also die Frage, in welchem Verhältnis die Sonarrate zu den AIS-Schiffs- und *itap*-Schallvariablen steht. Daher wurde ein GAM erstellt, in welchem $SP10M$ als abhängige Variable und die AIS-Schiffsvariablen sowie die vom *itap* modellierten Schallpegel als Erklärungsvariablen fungierten (Tabelle 10; letzte Spalte).

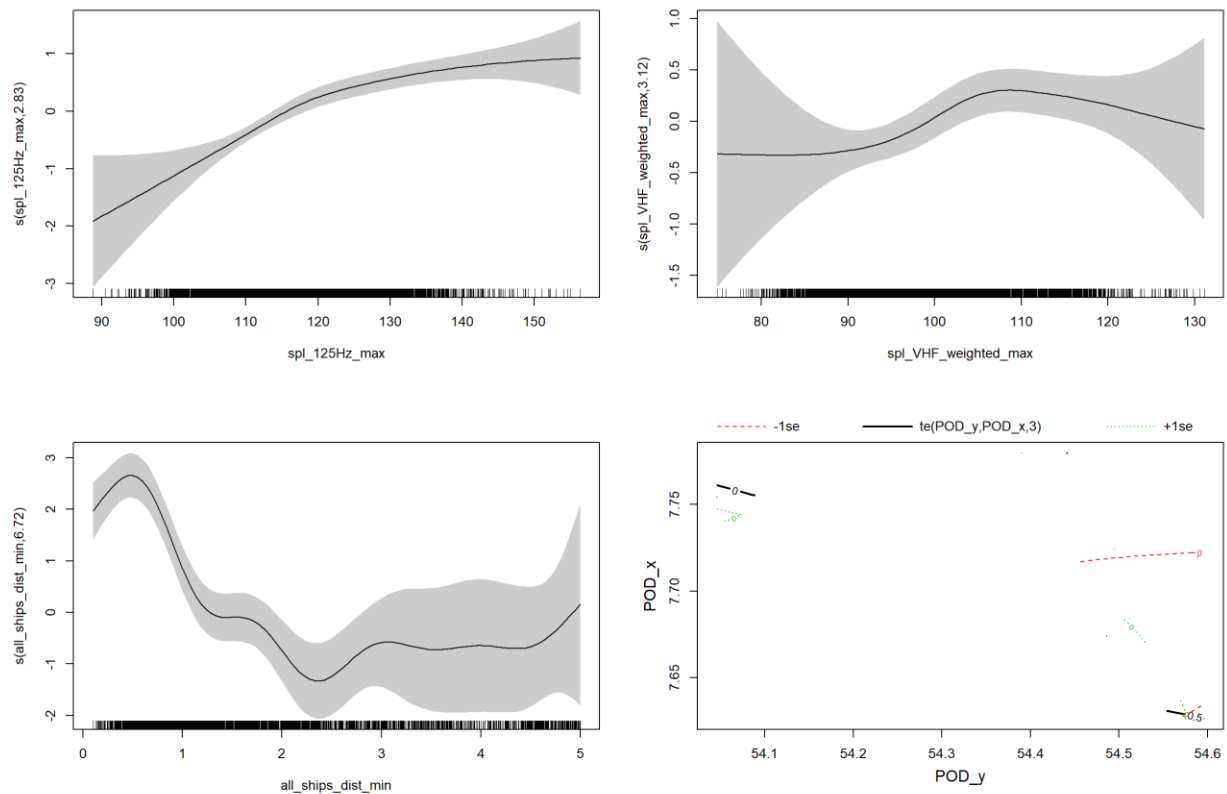


Abbildung 70: GAM-Plot zu Modell „Sonar“: Darstellung der modellierten stundenbasierten Schweinswal-Detektionsrate *positiveMinutes* in Bezug auf alle signifikanten Erklärungsvariablen (vgl. Tabelle 10); die standardmäßige Beschriftung der GAM-Plots nennt auf der y-Achse zwar den Namen der Erklärungsvariablen, jedoch stellt diese Achse bei singulären Variablen (nicht aber bei Tensorprodukten) stets die abhängige Variable um einen Mittelwert von 0 dar (hier die Sonarrate $SP10M$).

Die stundenbasierte Sonarrate $SP10M$ ließ sich am besten durch die Distanz des nächstgelegenen Schiffes in 5 km Umkreis um einen C-POD sowie den tief- und hochfrequenten Schall an der C-POD-Position erklären, während die Anzahl an Schiffen in der Umgebung nicht signifikant war. Von den drei signifikanten Variablen wies die Distanz des nächsten Schiffes den niedrigsten p -Wert, also den besten Erklärungswert auf. Auffällig ist bei deren Smoother-Kurvenverlauf, dass Schiffe in nicht mehr als 1 km Distanz die Sonarrate besonders stark erhöhten, wohingegen es kaum einen Unterschied machte, ob sich das nächstgelegene Schiff in 2 km oder 5 km Entfernung vom C-POD befand (Abbildung 70). Ebenso gingen erhöhte Dauerschallwerte mit größeren Sonarraten einher, dies besonders stark beim tieffrequenten Dauerschall. Die Sonarrate kann somit als brauchbarer Indikator für die Präsenz von Schiffen im Umkreis von etwa 1 km um einen C-POD herum angesehen werden.

3.2.4 Kumulative Effekte der Frühjahrs-Bauphase in verschiedenen Distanzklassen

Die GAM-Analysen zeigten Auffälligkeiten bei den Auswirkungen der Rammvariablen *hrw* und *dist* auf die Detektionsrate *positiveMinutes/h* auf. Effekte dieser Variablen begannen bei einer Distanz von über 20 km bereits weit früher als in der Nähe der Baustellen. Um diesen Sachverhalt genauer zu beleuchten, wurden Referenzdaten aus den Monaten vor der Bauphase hinzugezogen. Hierzu wurden die 17 C-POD-Stationen einer Kreiszone (OWP) und drei Ringzonen unterschiedlicher Distanz zum Zentrum des OWP „Kasikasi II“, basierend auf dem kreuzförmigen Untersuchungsdesign, in dem ein Großteil der Stationen in Transekten in vier Richtungen angelegt war, zugeordnet (Abbildung 71). Die Distanzen konnten sich in Bezug auf einzelne OWEA teilweise überlappen, da diese unterschiedlich weit vom OWP-Zentrum entfernt lagen (vgl. Tabelle 12).

Als Referenzzeitraum wurde die Zeit vom 02.06.2021 bis zum 28.02.2022 ausgewählt, da diese Periode vom Bau weitgehend unbeeinflusst war. Die mittlere Detektionsrate pro Zone aus dieser Periode wurde dem Bauzeitraum vom 03.03.2022 bis 30.04.2022 gegenübergestellt. Zwar lagen die beiden Zeiträume in unterschiedlichen Jahreszeiten, die bedeutsame Relation beider Werte zueinander blieb davon aber – bezogen auf den Vergleich zwischen den Zonen – unbeeinflusst, da der phänologische Unterschied jeden Ring gleichermaßen betraf. Die Phänologiekurven zeigten über das gesamte Jahr betrachtet keine auffälligen Maxima.

Bereits im Referenzzeitraum waren die Detektionsraten der äußeren Stationen der 4. Zone (>17,5-22 km Distanz zum OWP-Zentrum) deutlich niedriger als die der anderen drei Zonen (Abbildung 72, Tabelle 12). Während es in der Bauphase bei den äußeren Stationen nur eine leichte Verringerung der Detektionsraten um ca. 6 % gab, war die Abnahme bei den C-PODs der 2. und 3. Zone (>4,5-10 km und >10-17,5 km Distanz zum Zentrum) mit 34,9 % bzw. 38,5 % wesentlich deutlicher. Am gravierendsten war der Rückgang im Nahbereich des Windparks (OWF, 0-4,5 km). Hier waren die Detektionsraten um circa 60 % verringert (Tabelle 12). Es konnte also gezeigt werden, dass es einen kumulativen negativen Effekt der Frühjahrs-Bauphase auf die Schweinswal-Detektionen gab. Dieser reichte bis in max. 18 km Entfernung, während die äußeren C-POD-Stationen mit durchschnittlich ca. 20 km Distanz zu den Rammbaustellen kaum betroffen waren.

Tabelle 12: Mittlere Schweinswal-Detektionsrate positiveMinutes/h (arithmetisches Mittel mit gleicher Gewichtung der Stationen pro Zone) in kreis- bzw. ringförmigen Zonen zunehmender Distanz zum Windparkzentrum (mit Angaben zur Variationsbreite der Distanz zu den OWEA-Baustellen); angegeben sind Namen und Anzahl an C-POD-Stationen in der jeweiligen Zone, die Rate während der Referenzperiode vom 02.06.2021 bis 28.02.2022, während der Frühjahrs-Bauphase vom 03.03.2022 bis 30.04.2022, die Differenz beider Raten sowie die prozentuale Abnahme der Detektionen (vgl. auch Abbildung 72).

Zone	Distanz zu Baustellen	Distanz zu OWP-Zentrum	C-POD-Stationen	n	positiveMinutes/h			
					Referenz Ø	Bauphase Ø	Differenz	Abnahme %
OWF	0-7 km	0-4,5 km	V08,V09,S10	3	3,142	1,259	-1,882	-59,9
2. Zone	4-12 km	>4,5-10 km	ABW1B,ABW3B,NSO_i2,V07	4	2,804	1,826	-0,978	-34,9
3. Zone	10-18 km	>10-17,5 km	V02,V03,V06,V10,S11,S12	6	2,850	1,753	-1,097	-38,5
4. Zone	16-24 km	>17,5-22 km	V01,V04,V05,V11	4	2,051	1,932	-0,119	-5,8

VISSKA – Abschlussbericht AP7

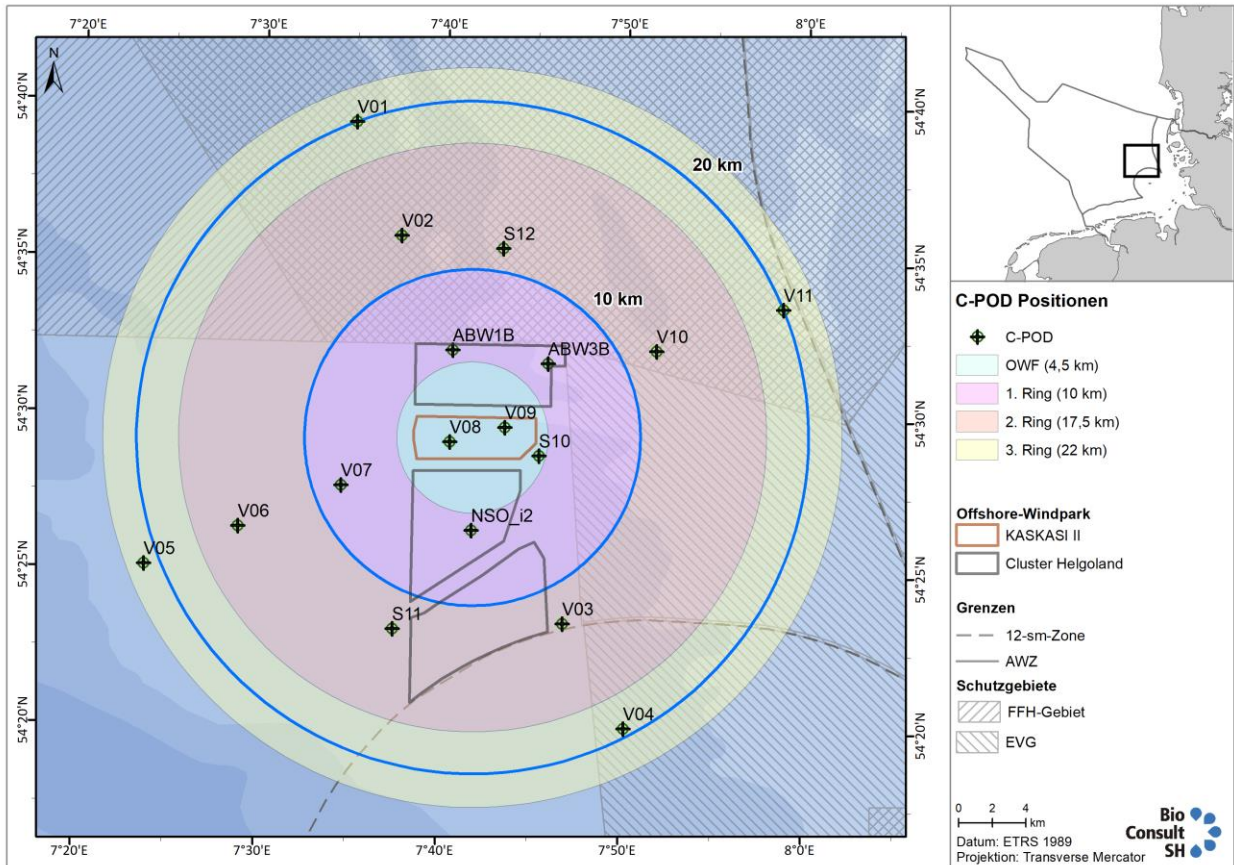


Abbildung 71: Zonen unterschiedlicher Distanzen um das Zentrum des OWP „Kaskasi II“, welche für die Analyse kumulativer Baueffekte verwendet wurden.

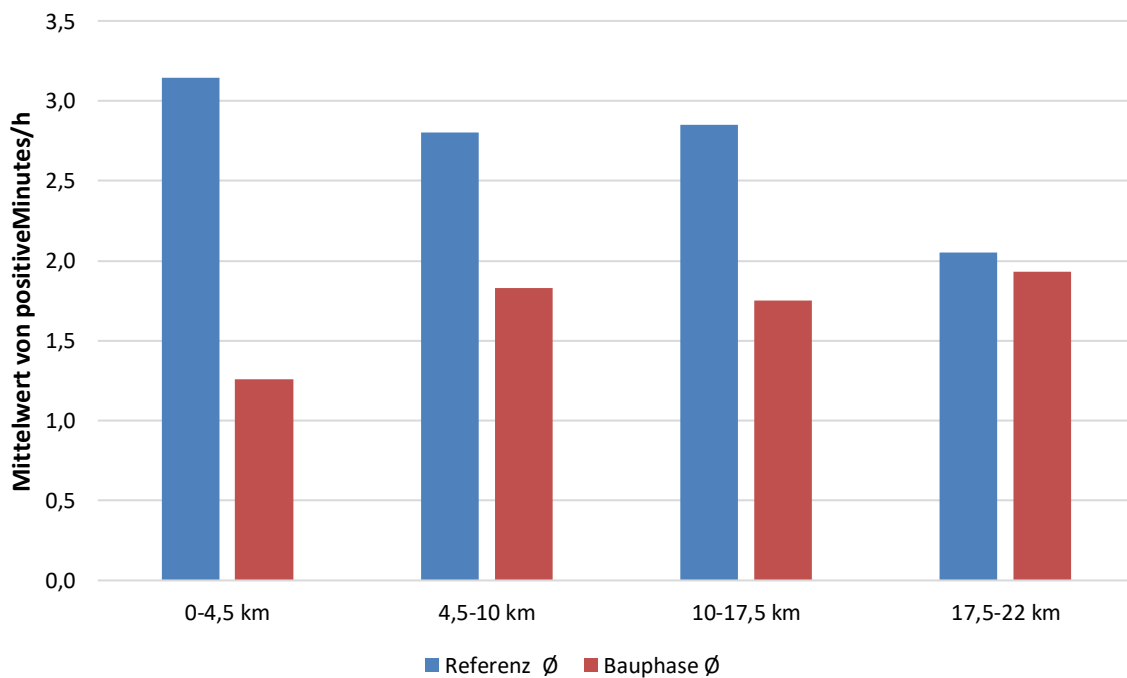


Abbildung 72: Mittlere Schweinswal-Detektionsrate positiveMinutes/h (arithmetisches Mittel mit gleicher Gewichtung der Stationen pro Ring) in Ringzonen von zunehmender Distanz zum Windparkzentrum.

4. Diskussion und ökologische Bewertung

4.1 Der Schweinswal

4.1.1 Vorkommen, Phänologie und Dichte im UG

Als einzige Walart ist der Schweinswal (*Phocoena phocoena*) regelmäßig in der Nordsee anzutreffen. Insbesondere die Deutsche Bucht stellt ein wichtiges Habitat unter anderem während der Fortpflanzungszeit dar (z. B. BENKE ET AL. 1998; HAMMOND ET AL. 2002; SCHEIDAT ET AL. 2004). Basierend auf den Resultaten der drei SCANS-Erfassungen (HAMMOND ET AL. 2002, 2013, 2017) sowie Ergebnissen von verschiedenen durch den Bund geförderten Projekten (MINOS/MINOSplus/Emson/BfN Natura2000 Monitoring; vgl. z.B. GILLES et al. 2009, 2011, 2014) der vergangenen Jahrzehnte, ist das Untersuchungsgebiet im südöstlichen Teil der Deutschen Bucht als eine Region mäßiger bis mittlerer Schweinswal-Dichte einzustufen. Gebiete und Fortpflanzungsareale mit höheren Dichten beginnen demnach erst nördlich des UG, was auch die bei dieser Studie erhaltenen Phänologiekurven widerspiegeln: Insgesamt war das Auftreten der Schweinswale im UG starken mehrtägigen bis zweiwöchigen Fluktuationen unterworfen, wobei jedoch kein länger andauerndes, deutliches jährliches Maximum auftrat (Abbildung 23 bis Abbildung 27) wie in den Regionen nördlich des UG (BIOCONSULT SH ET AL. 2016, 2019). Kurven dieser Art sind typisch für Nebenareale einer opportunistischen Art wie dem Schweinswal, der ein solches Gebiet z. B. als Transitzone zu attraktiveren Regionen (z. B. Fortpflanzungsarealen) nutzt und in solchen Übergangsbereichen lokal stärker auftritt, wo zur jeweiligen Zeit ausreichend Beute verfügbar ist (VAN BEEST ET AL. 2018b; WILLIAMSON ET AL. 2021).

4.1.2 Reaktion auf Rammarbeiten mit Vergrämung

4.1.2.1 Effekte der Impulsrammungen

Anthropogener Lärm ist in den Ozeanen ein wesentlicher Stressfaktor für Meeressäuger (DUARTE ET AL. 2021). So reagieren Schweinswale bekanntermaßen auf die mit dem Bau von Offshore-Windparks verbundenen Aktivitäten, indem sie Gebiete mit hohem Lärmpegel meiden (BRANDT ET AL. 2011, 2018; HAELTERS ET AL. 2012; DÄHNE ET AL. 2013; BIOCONSULT SH & IFAÖ 2014; BIOCONSULT SH ET AL. 2016, 2019; KASTELEIN ET AL. 2018). Allerdings zeigen sich hierbei individuelle Unterschiede: Auch wenn viele Schweinswale aus dem Nahbereich von Rammbaustellen in entferntere Regionen schwimmen (BRANDT ET AL. 2018), bleiben mitunter einige Tiere am Ort (BIOCONSULT SH ET AL. 2016). Der Anteil der davonschwimmenden Schweinswale hängt stark von der Entfernung zur Baustelle und dem jeweiligen Lärmpegel ab (beides ist eng miteinander verbunden; (BIOCONSULT SH ET AL. 2014; DAHL ET AL. 2015). Die Art der Vergrämuungsmaßnahmen, Schiffsverkehr und andere lärmintensive Aktivitäten vor Ort haben ebenfalls einen Einfluss. Was den Lärm von Impulsrammungen betrifft, so beginnen Verhaltensreaktionen während des Rammens (Veränderung der Detektionsraten, der Dichte oder des beobachtbaren Verhaltens) in verschiedenen Studien bei Lärmpegeln von 140-152 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ SEL (DIEDERICHS ET AL. 2010a; BRANDT ET AL. 2011; HAELTERS ET AL. 2012; DÄHNE ET AL. 2013; BIOCONSULT SH ET AL. 2014; BIOCONSULT SH & IFAÖ 2014). Andererseits kann die besondere Attraktivität eines bestimmten Ortes oder die individuelle Fitness (VAN BEEST et al. 2018) beeinflussen, ob ein Tier ein lärmintensives Gebiet verlässt/meidet oder nicht.

Verschiedene Studien zeigten bei Schweinswalen Vertreibungsdistanzen von teilweise 20 km und mehr bei ungedämmten Impulsrammungen (TOUGAARD et al. 2009; BRANDT et al. 2011; HAELTERS et al. 2012, 2015; DÄHNE et al. 2013; BIOCONSULT SH 2014; NEHLS et al. 2016; ROSE et al. 2016). Diese großen Störungsradien führten zur Einbindung von Schallminderungsmaßnahmen (NMS; Übersicht in (VERFUSS ET AL. 2019; TSOUVALAS 2020) in den Installationsprozess, welche auch beim OWP „Kaskasi II“ in den allermeisten Fällen bei Impulsrammungen angewandt wurden. Mit Schallschutzmaßnahmen zum Schutz der Schweinswale vor Verletzungen (TTS/PTS) konnten die Störadien allgemein verringert werden; diese betragen bei den beiden Gescha-Studien in der Deutschen Bucht ca. 14-16 km bzw. 15-19 km (Gescha2: BIOCONSULT SH ET

AL. 2019; darin wurden die Rohdaten von Gescha1 zur besseren Vergleichbarkeit beider Studien mit gleicher Methodik reanalysiert).

In der vorgelegten Studie ergaben die GAMs aus den C-POD-Daten für den OWP „Kaskasi II“ gut 7-14 km weit reichende mindestens 30-40 h andauernde Effekte von schallgeminderten Impulsrammungen und Vergrämung (Abbildung 32, Abbildung 34, Abbildung 44, Abbildung 48). Die Effektdistanzen dieser Rammphasen lagen damit etwas unterhalb der aus den beiden Gescha-Studien bekannten Werte (14-16 km bzw. 15-19 km; BIOCONSULT SH ET AL. 2019; s. o.), was den Erfolg einer ständigen Weiterentwicklung von Schallschutzsystemen andeutet. Geringe Detektionsraten in mehr als 18 km Entfernung zu den Baustellen teils weit vor den Rammungen schienen nicht mit den Rammarbeiten in Zusammenhang zu stehen. Dies legte die Analyse der kumulativen Effekte nahe (Tabelle 12), die bereits in einer Periode weit vor der Bauphase vergleichsweise niedrige Raten in diesem großen Distanzbereich aufzeigte, die sich während der Bauphase jedoch kaum noch verringerten (im Gegensatz zu den Raten in geringeren Entfernungen bis max. 18 km; vgl. Sektion 4.1.2.4). Möglicherweise war dieses Bild durch Gebietsunterschiede bzw. eine etwas abweichende Habitatnutzung in größeren Entfernungen bedingt. Viele Studien deuten darauf hin, dass die Habitatwahl der Schweinswale von der Verfügbarkeit von Beutetieren abhängt, die aber oft nur schwer erfasst werden kann (VAN BEEST ET AL. 2018b; WILLIAMSON ET AL. 2021). Obwohl eine Beziehung zwischen der Verbreitung des Schweinswals und der seiner Beute biologisch naheliegend ist (READ & WESTGATE 1997), wurde diese Hypothese nur in wenigen Studien überprüft (z. B. SVEEGAARD et al. 2012a; b). In der Regel war dies darauf zurückzuführen, dass nur selten räumlich und zeitlich kleinskalige Daten zur Beuteabundanz vorlagen (SANTOS & PIERCE 2003). Die äußeren Stationen waren also möglicherweise in Hinblick auf potenzielle Beutetiere weniger attraktiv für Schweinswale oder wiesen andere ungünstigere Faktorenkombinationen auf.

Die weitreichenden negativen Effekte der ungedämmten Referenzrammung bis in mindestens 15-20 km Entfernung standen in Einklang mit oben genannten Literaturangaben (TOUGAARD et al. 2009: >20 km; BRANDT et al. 2011: 18 km; HAELTERS et al. 2012, 2015: 20-22 km; DÄHNE et al. 2013: 20 km; BIOCONSULT SH 2014: 17 km (Tripods); NEHLS et al. 2016: 15 km; ROSE et al. 2016: 20-25 km).

In denjenigen GAMs, die mindestens Daten von Impulsrammungen einschlossen, gab es nach den schlüssig feststellbaren Effekten bis ca. 30-40 h nach der Rammphase scheinbar wieder zunehmende Effekte, die bis drei Tage nach den Rammphasen reichten. Ursache waren vermutlich die auf der Tages- bis Wochenskala starken natürlichen Fluktuationen der Tiere im UG. Die Rammphasen umfassten nicht selten ein Zeitfenster mit abnehmenden Detektionsraten (Phänologiekurven: Abbildung 23 bis Abbildung 27). In den zeitlich weit vor und nach der Rammphase (*hrw*0) liegenden *hrw*-Stunden gab es zudem oft nur wenige Datensätze, was die Heterogenität verstärkte. Diese Inkonsistenzen konnten deshalb in einigen Modellen den Eindruck erwecken, dass die Rammphasen eine außerordentlich langandauernde Wirkung von 72 h und mehr auf Schweinswale gehabt hätten. Rammeffekte halten aber nach bisherigem Wissensstand selten länger als 40 h an (BIOCONSULT SH ET AL. 2019) bzw. sind nach 24 h bereits deutlich abgeschwächt (GRAHAM ET AL. 2019). Durch Rammungen verursachte mehr als dreitägige Effekte waren zwar nicht gänzlich auszuschließen, dennoch war das erhaltene Muster vermutlich eher auf natürliche kurzfristige räumliche Fluktuationen der Tiere in Verbindung mit heterogener Datendichte zurückzuführen. Denn kurzfristige Schwankungen im Schweinswal-Auftreten wurden sowohl in der Bauphase als auch in Monaten ohne Bauaktivitäten registriert (Abbildung 23 bis Abbildung 27). Es ist bekannt, dass das Schweinswalvorkommen räumlich und zeitlich auch auf kleiner Skala hochvariabel sein kann und es eine große Abhängigkeit zum Vorkommen der verfügbaren Beute gibt (BENJAMINS ET AL. 2016; WILLIAMSON ET AL. 2021).

4.1.2.2 Effekte der Vibrationsrammungen

Zu den Vibrationsrammungen ließen sich keine besonders verlässlichen Aussagen treffen, weder mithilfe der HiDef-Flüge noch durch das passiv-akustische Monitoring. Der PAM-Datensatz an verfügbaren Vibrationsrammungen war klein ($n=6$) und die Anzahl verfügbarer Stunden nach der Rammphase gering (maximal möglich: *hrw*+5). Die wenigen Daten sprachen dafür, dass die Effekte offenbar nicht so weit reichten

wie bei den Impulsrammungen. Ähnliches legt auch eine Studie von BALTZER et al. (2020) nahe, die beim Einvibrieren von Saatmuschel-Kollektoren Effektreichweiten von 375 m für marine Säuger feststellte, allerdings bei wesentlich geringerer Eindringtiefe als dies bei den Fundamenten für den OWP „Kaskasi II“ der Fall war. In der vorliegenden Studie wurden bis 5 h nach der Rammphase Effektreichweiten von 2-6 km festgestellt, wobei sich spätestens zu dieser Zeit immer eine Impulsrammung anschloss. Dass negative Effekte ab ca. 10-20 h vor der Rammphase festzustellen waren (auch bei anderen Installationsmethoden), hing vermutlich mit der zunehmenden Schiffsaktivität ab etwa diesem Zeitraum zusammen. Ähnliches zeigte u.a. eine Studie von BENHEMMA-LE GALL ET AL. (2021), die für zwei schottische OWPs eine Abnahme der Schweinswal-Detektionsraten ab 15 h vor Rammbeginn belegte, wobei Installationsschiffe ca. 11-15 h vor Rammbeginn am Ort eintrafen. Vibrationsrammungen emittieren im Allgemeinen tieffrequenteren Schall als Impulsrammungen (TSOUVALAS & METRIKINE 2014; JIMÉNEZ-ARRANZ ET AL. 2020; TSOUVALAS 2020). Dies könnte, aufgrund des besseren Hörvermögens der Schweinswale im hochfrequenten Bereich, die gegenüber den Impulsrammungen geringeren Effektreichweiten bedingt haben.

Die Ergebnisse des INLA-SPDE-Differenzmodells aus den HiDef-Flügen ergaben im Zeitfenster der Vibrationsrammungen eine mittlere Meidedistanz von ca. 12-14 km um die Grenzen des Clusters „Nördlich Helgoland“ inklusive einer 1 km-Pufferzone. Solche Distanzen können von Schweinswalen bei einer Fluchtgeschwindigkeit von 7 km/h und mehr innerhalb von zwei Stunden erreicht werden (KASTELEIN ET AL. 2018). Da dieser Nahbereich um die OWPs bereits während der Basisphase durch Schiffsverkehr und Wartungsarbeiten an den Turbinen der übrigen drei Cluster-Windparks beeinträchtigt war (Betriebsphase der übrigen OWPs), konnte er nicht als unbeeinflusste Basis gelten. In den vier OWPs des Clusters „Nördlich Helgoland“ sowie in der Region östlich bis südöstlich davon waren die Schweinswaldichten daher bereits während der Basisphase gering. Somit war auch keine weitere deutliche Abnahme in dieser Region mehr möglich. Nördlich und westlich des Clusters gab es hingegen während der Basisphase höhere Schweinswaldichten. Während der beiden untersuchten Vibrationsrammungen waren diese deutlich erniedrigt und es zeigte sich im Eingriffsmodell eine Zone geringer Dichten rund um den OWP „Kaskasi II“ (Abbildung 16 unten). Das GAM der Gradientenanalyse zeigte eine Zunahme an Schweinswalen bei zunehmender Entfernung zum OWP „Kaskasi II“, wohingegen der Wilcoxon-Test bei keinem Vergleich einer Distanzklasse mit der Referenzklasse von 10-12 km Entfernung signifikant war. Dies wäre bei einer Effektreichweite von mehr als 10 km nicht ungewöhnlich, da es sich in einem solchen Fall nicht um eine echte Referenzklasse gehandelt hätte. Allerdings war die Effektreichweite von mehr als 10 km keinesfalls gesichert, weder durch das INLA-SPDE-Modell, noch durch die anderen Analysen. Dagegen sprachen die oben ausgeführten PAM-Ergebnisse, die als aufgrund der besseren Datengrundlage als fundierter gelten können. Lediglich drei Flüge während der Basisphase und zwei Flüge während zweier Vibrationsrammungen dienten als Datengrundlage; im Gegensatz zu allen sechs Vibrationsrammungen in den PAM-Daten. Die Flüge der Basis- und Bauphase fanden überwiegend zu unterschiedlichen Jahreszeiten statt. Somit dürften bei den Ergebnissen des INLA-SPDE-Modells und der Gradientenanalyse neben solchen jahreszeitlichen Effekten auch kurzfristige Fluktuationen der Tiere sowie stochastische Effekte eine große Rolle gespielt haben. Die Unterschiede in den beobachteten Dichten spiegelten also nicht nur die Auswirkungen des Eingriffs wider, sondern auch Veränderungen bei anderen Faktoren wie dem temporären Nahrungsangebot an bestimmten Lokalitäten – oder auch einfach nur das individuelle Tauchverhalten zum Zeitpunkt des Überflugs.

4.1.2.3 Effekte der Vergrämung

In der vorliegenden Studie konnten aufgrund der stundenbasierten PAM-Analysen die Effekte von Rammung und Vergrämung nicht weiter aufgetrennt werden. Vergrämungseffekte sind vom eingesetzten Gerät abhängig (VOß ET AL. 2023a). Diese konnten beispielsweise beim in anderen Untersuchungen eingesetzten Sealscarer mit bis zu 7 km recht weitreichend sein (BRANDT ET AL. 2013a; b). Bei britischen OWPs eingesetzte Vergrämer (ADD) erzeugten Effekte teilweise bis in 21 km Distanz (THOMPSON ET AL. 2020). Und auch die bei anderen OWP-Installationen eingesetzten Pinger konnten starke Reaktionen hervorrufen (KINDT-LARSEN ET AL. 2019; BRENECKE ET AL. 2022). Für in der schottischen Aquakultur eingesetzte Acoustic

Deterrent Devices (ADD; hier Sealscarer verschiedener Bauart) konnte gezeigt werden, dass diese das Potenzial für temporäre Hörschäden bei Schweinswalen haben (FINDLAY ET AL. 2021) und hierbei temporäre Verschiebungen der Hörschwelle der Schweinswale (TTS) bis in 4-31 km Distanz zur Lärmquelle möglich waren (TODD ET AL. 2021). Hingegen wurde beim OWP „Kaskasi II“ der spezifischer an die benötigten Effektreichweiten zur Verhinderung von Hörschäden angepasste FaunaGuard als APD (Acoustic Porpoise Deterrent) eingesetzt. Dieser führte in einer Studie zu wesentlich geringeren Störungsreichweiten von lediglich bis zu 2,5 km Entfernung (VOß ET AL. 2023b). Somit war davon auszugehen, dass die hier beobachteten Effektdistanzen bei den Impulsrammphasen (7-13 km) den Rammarbeiten und nicht der Vergrämung geschuldet waren. Letztere war dennoch wichtig, um die Tiere bereits vor der Rammung aus dem Distanzbereich von Hörschäden (mindestens 750 m) zu vertreiben. Bei den offenbar weniger weitreichenden Effekten der Vibrationsrammphasen von ca. 2-5 km (jedoch mit einiger Unsicherheit behaftet) bestand dagegen die Möglichkeit, dass hier auch die Vergrämung einen gewissen Anteil hatte.

4.1.2.4 Kumulative Effekte des Windparkbaus

Die Analyse aller PAM-Daten zu kumulativen Effekten des Windparks über die gesamte Frühjahrs-Bauphase hinweg (Sektion 3.2.4) ergab – anders als die GAM-Resultate – keine nennenswerte Abnahme der Detektionsraten an den vom Windparkzentrum am weitesten entfernt gelegenen Stationen (17,5-22 km; Abnahme ca. 6 %). Die Verringerung der Raten bei den nähergelegenen Stationen (4,5-10 km und 10-17,5 km) war hingegen deutlicher erkennbar (ca. 35-38 %). Bei den nächstgelegenen Stationen (0-4,5 km) betrug diese sogar um die 60 %. Daraus lassen sich negative kumulative Baueffekte bis in maximal 18 km Entfernung ableiten, die jedoch verschiedene Ursachen gehabt haben konnten, z. B. neben den Rammarbeiten auch den Schiffsverkehr, auf den im nächsten Abschnitt gesondert eingegangen wird (Sektion 4.1.3).

4.1.3 Reaktion auf Schiffsaktivitäten und Dauerschall

Es ist bekannt, dass Schweinswale auf die Anwesenheit von Schiffen reagieren und diese meiden. GRAHAM et al. (2019) konnten zeigen, dass die Anzahl an Schiffen in weniger als 1 km Distanz zum C-POD einen zusätzlichen negativen Einfluss auf die Detektionsraten neben dem Effekt von Rammarbeiten ausübt. Eine Studie von FRANKISH ET AL. (2023) demonstrierte, dass Schiffe auch dann noch das Verhalten von Schweinswalen beeinflussen konnten, wenn sie weiter als 2 km von besenderten Tieren entfernt waren.

Außer Rammeffekten sollten in dieser Studie daher auch jene des Schiffsverkehrs untersucht werden. Neben den Auswirkungen durch alle anwesenden Schiffe waren für die Schweinswale die Auswirkungen der auch im hochfrequenten Bereich sehr lärmintensiven Offshore-Service-Schiffe mit automatischem Positionierungssystem (DP-System) von besonderer Relevanz (HAHNE & KRATZER 2023). In den GAM-Analysen der C-POD-Daten wurden daher nicht nur die Effekte aller Schiffe, sondern auch die speziellen Auswirkungen der DP-fähigen Schiffe im Nahbereich des Windparks auf Schweinswale untersucht.

Besonders interessant waren hierbei die Ergebnisse hinsichtlich der Effekte der Distanz des nächstgelegenen Schiffes auf die Schweinswal-Detektionsraten, wobei nur Schiffe in die Analysen einfließen, deren AIS-Signal höchstens 5 km vom C-POD entfernt aufgezeichnet wurde. Hier zeigte sich, dass über alle Schiffstypen hinweg negative Effekte vor allem dann auftraten, wenn das nächste Schiff sich in höchstens 2 km Distanz zum C-POD befand. Dies hatte auch dann Bestand, wenn man nur die Schiffssignale nahe der C-PODs in Windparknähe betrachtete. Etwas weiter reichten bei den PODs in Windparknähe die Effekte des nächsten DP-fähigen Schiffes. Diese beeinträchtigten die Schweinswale sogar bis in 3 km Entfernung. Der Einsatz von Azimuth-Thrustern der Schiffe mit DP System führt zu einer besonders starken tief-, mittel- und hochfrequenten Schallbelastung in der Umgebung eines solchen Schiffes (FISCHER 2000). Offenbar hatte dieser Dauerschall, besonders der im hochfrequenten Bereich, einen stärkeren Einfluss auf die Anwesenheit und das Verhalten von Schweinswalen im Nahbereich des OWP „Kaskasi II“ als der normale tieferfrequente Schiffsschall.

Die Anzahl aller Schiffe im Umkreis von 5 km um einen C-POD hatte ebenfalls einen negativen Effekt auf die Schweinswal-Detektionsraten, vor allem ab einem Wert von ca. 7-10 Schiffen. Eine höhere Anzahl von Schiffen in dieser Zone erhöhte die Chance, dass sich eines der Schiffe in weniger als 2 km Distanz zum C-POD befand. Insofern stand dieses Resultat in keinem Widerspruch zum Distanzeffekt.

Auch die Analyse der HiDef-Daten zeigte einen negativen Effekt der Anzahl Schiffe auf die Schweinswal-dichten im Umkreis von 5 km. Im Bereich des Baufelds wurden während der Flugerfassungen keine Schweinswale festgestellt, was allerdings auch schon bei den drei Basiserfassungsflügen der Fall war. Möglicherweise hing dies mit dem generell erhöhten Schiffsaufkommen im Cluster „Nördlich Helgoland“ bereits während der Basisphase zusammen.

Die Schifffahrt ist eine der Hauptlärmquellen im Meer und hat daher einen potenziellen Einfluss auf verschiedene Meerestiere (z. B. CODARIN ET AL. 2008; ERBE ET AL. 2019). Direkt beobachtet wurden solche Meidungsreaktionen auf die Annäherung von Schiffen bereits vor über 30 Jahren von BARLOW (1988). Später konnte gezeigt werden, dass die Tiere den Nahbereich von bis zu 600 m um lautstarke Saugbaggerschiffe herum meiden und sich während der Anwesenheit dieser Schiffe signifikant länger außerhalb eines solchen Gebietes aufhalten (DIEDERICHS ET AL. 2010b). Eine Reaktion auf Schiffsverkehr über größere Distanzen bis etwa 1.000 m wurde durch PALKA & HAMMOND (2001) bestätigt, wohingegen die vorliegende Studie weiter reichende Effekte bis in 2-3 km Entfernung fand. In einer Studie wurden sogar mögliche Reaktionen auf Schiffslärm in bis zu 7 km Entfernung gemeldet (WISNIEWSKA ET AL. 2018; COMINELLI ET AL. 2020). WISNIEWSKA et al. (2018) beobachteten hierbei unterschiedliche Reaktionen von Schweinswalen auf Schiffslärm, einschließlich energischem Schlagen der Fluke aufs Wasser, Abtauchen und sogar dem Abbruch von Nahrungssuche oder Echoortung. Damit verbunden waren auch signifikant weniger Versuche des Beutefangs. Nach Verringerung des Lärms wurde die Nahrungssuche kurze Zeit später wieder aufgenommen. Hingegen zeigten andere Studien, dass Schiffsverkehr zwar mitunter lokale Meideeffekte bei Schweinswalen verursachte, dieser aber weder auf Populationsebene noch auf das Verteilungsmuster einen Einfluss hatte. Die Tiere kamen zudem in hohen Dichten auch in Gebieten mit starkem Schiffsverkehr vor (SVEEGAARD ET AL. 2011; NABE-NIELSEN ET AL. 2014).

Auch andere Faktoren, wie die Geschwindigkeit eines Schiffes können die Reaktion der Schweinswale beeinflussen (AKKAYA BAS ET AL. 2017; OAKLEY ET AL. 2017). Dieser Faktor spielte jedoch in den GAMs der vorliegenden Studie, sowohl bei Verschneidung der AIS-Signale mit den PAM-Daten lokaler C-PODs als auch mit den HiDef-Daten des gesamten UG, keine Rolle. Bei Seetauchern in der Deutschen Bucht konnte hingegen ein signifikanter Effekt der Schiffsgeschwindigkeit festgestellt werden, wobei eine geringere Geschwindigkeit zu weniger Störung führte (BURGER ET AL. 2019). Ähnliches zeigte eine Studie zu verschiedenen Seevögeln (GARTHE & HÜPPOP 1999). Seevögel reagieren vermutlich stärker auf den visuellen Störreiz, während Schweinswale hauptsächlich auf Schiffslärm reagieren (z. B. KASTELEIN ET AL. 2017). In einer aktuellen Studie konnte festgestellt werden, dass eine Reduzierung der Schiffsgeschwindigkeit bei Frachtschiffen zu weniger Schiffslärm und damit zu weniger Störungen von Meeressäugern führte (FINDLAY ET AL. 2023). Möglicherweise spielte die Schiffsgeschwindigkeit allerdings in den Modellen der hier vorgelegten Studie auch deshalb keine Rolle, weil sich die Schiffe im Baugebiet in der Regel mit geringer Geschwindigkeit bewegten oder auf Position blieben. Ein weiterer untersuchter Faktor, die Schiffslänge, war in den HiDef-Modellen ebenfalls nicht von Belang.

Hinsichtlich des Dauerschalls schien der hochfrequente maximale SPL einen stärkeren Effekt auf die Schweinswal-Detektionsraten gehabt zu haben als der tieffrequente maximale SPL. Es konnte hierbei jedoch nicht unterschieden werden, ob der jeweilige Wert durch Schiffsverkehr oder Rammungen verursacht wurde. Allerdings war auffällig, dass der hochfrequente Schallpegel beim Stundendatensatz der Vibrationsrammungen kaum über 120 dB hinausging (Abbildung 53), während beim Datensatz der Impulsrammungen mitunter 130 dB erreicht wurden (Abbildung 50). Dies konnte einerseits ein Indiz dafür sein, dass höchste Werte des hochfrequenten Dauerschallpegels von über 120 dB überwiegend vom Ramm-lärm der Impulsrammungen dominiert wurden, während Schiffslärm in diesem Wertebereich nur eine untergeordnete Rolle spielte (itap, mündl. Mitt.). Andererseits schienen die Impulsrammungen in puncto

breitbandigem Dauerschall bei den direkten Messungen im Rahmen des AP6 im Allgemeinen nicht lauter gewesen zu sein als die Vibrationsrammungen (ITAP GMBH 2023).

NEHLS ET AL. (2024) zeigten in einer Studie zum Dauerschall im Fehmarnbelt, dass die Schweinswaldichten tendenziell dort geringer wurden, wo der Median des Hintergrund-Geräuschpegels über 115 dB re 1 μ Pa anstieg, dies auch jenseits der Kernzonen der Schifffahrtsrouten; gleichwohl traten Schweinswale auch in solchen Zonen auf und mieden diese nicht komplett. Eine Studie von DYNDO et al. (2015) konnte nachweisen, dass geringe Anteile hochfrequenten Schalls im Motorenlärm von Schiffen deutliche stereotype Verhaltensweisen bei Schweinswalen auslösten. Die Autoren kamen zu dem Schluss, dass Schiffsflärm durch seine hochfrequenten Komponenten für Schweinswale sogar in Distanzen von mehr als 1.000 m Meidungsreaktionen auslösen können. Verschiedenste Schiffstypen erzeugen einen wesentlichen Anteil an Geräuschen mit hohen Frequenzen, die im Hörbereich der Schweinswale liegen. Dies gilt umso mehr für die sehr lauten DP-fähigen Schiffe, weshalb sich die Ergebnisse der vorliegenden Studie von negativen Effekten bis in 2-3 km Distanz hier recht gut einordnen. Dabei kann Schiffsflärm in 1.190 m Entfernung den Hörbereich von Schweinswalen um >20 dB (bei 1 und 10 kHz) bzw. bei einer Entfernung von 490 m oder weniger um >30 dB (bei 125 kHz) verringern (HERMANNSEN ET AL. 2014). Bezogen auf den tieffrequenten Schiffsschall konnten MORTENSEN et al. (2012) bei POD-Untersuchungen, die zusammen mit Unterwasserschall-Aufzeichnungen im Großen Belt durchgeführt wurden, keinen direkten Effekt solchen Schalls auf die Detektionsraten von Schweinswalen zeigen. Letzteres ergab eine gewisse Übereinstimmung mit den Generalisierten Additiven Modellen dieser Studie, in denen der maximale tieffrequente Schallpegel hinsichtlich der Effekte auf die Schweinswal-Detektionsraten entweder gar nicht signifikant war oder bei Signifikanz einen geringeren p -Wert aufwies als der hochfrequente maximale Dauerschallpegel.

4.2 Methodenkritik

4.2.1 Der C-POD

Das passiv-akustische Monitoring (PAM) mittels C-PODs ist ein wichtiges Instrument für die Bewertung der Reaktionsmuster von Schweinswalen, da es eine kontinuierliche Überwachung ausgewählter Orte mit einer feinen zeitlichen Auflösung ermöglicht. Schweinswale nutzen nahezu kontinuierlich die Echolotung als Orientierungs- und Ortungssystem (AKAMATSU ET AL. 2007; WISNIEWSKA ET AL. 2016). Die Registrierung von Klicklauten zeigt daher die Anwesenheit von Schweinswalen an. Verschiedene Autoren konnten sogar aufzeigen, dass Ergebnisse des PAM mit absoluten Dichten korrelierten (KYHN ET AL. 2012; WILLIAMSON ET AL. 2016; JACOBSON ET AL. 2017). Zudem erwiesen sich mithilfe von C-PODs erhobene PAM-Daten in der Vergangenheit als aussagekräftig in Bezug auf die Habitatnutzung von Schweinswalen (TOUGAARD ET AL. 2009; DIEDERICHS ET AL. 2010a; BRANDT ET AL. 2011; DÄHNE ET AL. 2013; BIOCONSULT SH ET AL. 2016, 2019). Ein Vorteil der Methode liegt in der sehr hohen zeitlichen Auflösung. Die Daten werden millisekundengenau aufgezeichnet und auf Basis von Minuten ausgewertet, sodass neben jahreszeitlichen Verläufen auch zeitlich kleinskalige Muster untersucht werden können. Dass C-PODs hierbei kontinuierlich Daten aufzeichnen, ist ein großer Vorteil gegenüber Flugerfassungen. Dies führt zudem zu Datenmengen, die robuste statistische Analysen erlauben. C-PODs erfassen außerdem im Gegensatz zu Flugerfassungen auch nachts Schweinswale. Ein Nachteil der PAM-Methodik ist jedoch die geringe räumliche Abdeckung. Der Erfassungsradius eines C-PODs beträgt nur wenige hundert Meter. Fluktuationen der Schweinswale in einem Gebiet können durch den geringen Erfassungsradius möglicherweise verzerrt registriert werden, da die lockeren Verbände beim Durchzug einem C-POD mitunter nicht nahe genug kommen. Erst durch die Ausbringung vieler C-PODs an verschiedenen Positionen können Aussagen über die räumliche Verteilung von Schweinswalen in einem Gebiet getroffen werden. Daher könnten die hier als Ursache für die geringen Detektionsraten in großen Distanzen zum OWP „Kaskasi II“ vermuteten Habitatunterschiede in diesen Entfernungen lokal begrenzte Phänomene gewesen sein.

4.2.2 HiDef-Erfassungsflüge

Flugtransekt-Erfassungen von Meeressäugern sind durch die Möglichkeit der Überfliegung großer Flächen derzeit die am besten geeignete Methode, Schweinswal-Dichten in einem großen Seegebiet zu ermitteln. Limitierend handelt es sich hierbei jedoch um eine sogenannte „Schnappschuss“-Methode, da lediglich die Verteilung von Meeressäugern an einzelnen Tagen zu einem bestimmten Zeitpunkt – und hier auch nur während der Lichtphase – erfasst werden kann. Es wird zudem kein statischer Zustand abgebildet, da die Tiere innerhalb der wenige Stunden andauernden Erfassungen weiterziehen können. Dennoch können Flugerfassungen Aufschluss über großräumige Verteilungsmuster von Schweinswalen geben und mit einer räumlich hohen Auflösung große Seegebiete abdecken. Doppelzählungen hierbei sind unwahrscheinlich, weil die Transektlinien einen Abstand von mehreren Kilometern haben und benachbarte Transekte direkt nacheinander abgeflogen werden.

Ein großer Vorteil der Flugmethodik gegenüber dem PAM ist die Möglichkeit, absolute Dichten von Schweinswalen zu bestimmen. Seit der Umstellung auf digitale Erfassungen aus der Luft kann hierbei auf eine entfernungsabhängige Distanzkorrektur verzichtet werden und es können absolute Dichten direkt anhand der Sichtungen berechnet werden. Für Schweinswale kann zudem auf den Anteil an Tieren, die sich tiefer als zwei Meter unter Wasser aufhalten und methodisch nicht mehr wahrgenommen werden können, korrigiert werden, da in einer Studie mithilfe besonderer Schweinswale die Aufenthaltsdauer von Schweinswalen in den oberen zwei Metern der Wassersäule monatsabhängig bestimmt werden konnte (TEILMANN ET AL. 2013).

Als digitale Erfassungsmethode wurde im Rahmen der vorliegenden Studie das sogenannte HiDef-Video-System verwendet, das seit über zehn Jahren erfolgreich bei der Erfassung von Meeressäugern eingesetzt wird (z. B. BIOCONSULT SH ET AL. 2019). Im Vergleich zu konventionellen Flugerfassungen erzielen HiDef-Befliegungen deutlich höhere Sichtungsraten, da diese Methode eine höhere Flächenabdeckung als die konventionelle Methodik aufweist (ŽYDELIS ET AL. 2019). Auch aufgrund der Möglichkeit, die Daten zu überprüfen und zu verifizieren, hat die Methodenumstellung auf die digitale Technik zu einer deutlichen Qualitätssteigerung der flugbasierten Daten geführt.

Im Rahmen der vorliegenden Studie konnten nur fünf Flugerfassungen ausgewertet werden, zwei für die Bauphase und drei für die Basisphase. Die oben genannte Einschränkung der Flüge als Schnappschuss-Erfassungen kam daher verstärkt zum Tragen. So konnten sowohl Unterschiede zwischen den Sichtbedingungen der Flugtage als auch mögliche kurzfristige Durchzugereignisse der Schweinswale einen großen Einfluss auf die Modelle gehabt haben.

4.3 Ökologische Bewertung

Aufgrund von während des Installationsprozesses aufgetretenen technischen Herausforderungen legt die Studie nicht den ursprünglich vorgesehenen Fokus auf die Effekte der Vibrationsrammungen. Mit nur sechs derartigen Rammungen war die Datenlage hinsichtlich dieses Aspektes nicht optimal. Daher rückten andere potenzielle Lärm-Störungsquellen während der Frühjahrs-Bauphase des OWP „Kaskasi II“ in den Fokus. Dazu gehörte der Einfluss des Schiffsverkehrs sowie des hoch- und tieffrequenten Dauerschalls.

Ramm- und Vergrämungseffekte konnten aufgrund der stundengenauen Analysen, einem Kompromiss zwischen zu grober zeitlicher Auflösung einerseits und einer feinen Auflösung mit zu großen Nullwert-Überschuss (zero inflation) pro Zeiteinheit andererseits, nicht weiter aufgetrennt werden. Da allerdings das schonende FaunaGuard-System als APD verwendet wurde, welches Schweinswale nur bis in maximal 2,5 km Distanz vertreibt (VOß ET AL. 2023b), traten Vergrämungseffekte zumindest hinter denen der Impulsrammungen deutlich zurück (s.u.).

Betrachtet man die Störungspotenziale der bei „Kaskasi II“ verwendeten Ramm-Methoden im Vergleich zu den anderen während der Rammarbeiten auftretenden anthropogenen Lärmquellen im Umfeld der OWEA-Baustellen (Schiffsschall, Vergrämung), ergibt sich daraus folgende mögliche Abstufung, die allerdings aufgrund der teilweise suboptimalen Datenbasis mit Unsicherheiten behaftet ist:

1. Während ungedämmter Impulsrammungen traten Schiffseffekte – und vermutlich auch Vergrämungseffekte – gegenüber den mindestens 15-20 km weit, eventuell aber sogar noch weiter reichenden Effekten des lauten Rammschalls deutlich zurück. Allerdings gab es nur eine einzige solche Referenz-Rammphase, was die Aussagekraft einschränkt.

2. Auch während gedämmter Impulsrammungen (alle Impulsrammungen bzw. solche mit der weniger effektiven Schallschutz-Konfiguration DGBS & HSD oder nur Teilen davon) blieben Schiffs- und Dauerschalleffekte in ihrer Bedeutung offenbar hinter den Effekten der Rammungen zurück. Die Effektreichweiten solcher Rammungen von etwa 7-14 km dominierten vermutlich gleichzeitige Schiffseffekte von max. 3 km Reichweite bei DP-Schiffen mit operierender dynamischer Positionierung (beim OWP „Kaskasi II“: DP2-System). Und auch die Vergrämungsdistanzen blieben mutmaßlich deutlich hinter den Effektreichweiten der Rammungen zurück.

3. Während der sehr gut gedämmten Impulsrammungen mit der Schallschutz-Konfiguration VGBS, GBS & HSD konnten Vertreibungseffekte durch Schiffe und Dauerschall prinzipiell bereits eine Rolle gespielt haben, denn das GAM zeigte hinsichtlich der offenbar gut mitigierten Rammeffekte ein sehr heterogenes Bild, das mangels einer klar erkennbaren Effektreichweite jedoch schwer zu interpretieren war. Auch die Vergrämungseffekte lagen bei besonders guter Schalldämmung bei einzelnen Rammungen möglicherweise bereits im Bereich der Stärke der Rammeffekte.

4. Die mittels PAM festgestellten Effektreichweiten der Vibrationsrammungen von ca. 2-6 km lagen mutmaßlich im Bereich der Effektreichweiten von Schiffs- und Dauerschall sowie der hier angewandten Vergrämungsmethode. Jedoch lag bezüglich der Vibrationsrammungen nur ein relativ kleiner PAM-Datensatz vor, was die Allgemeingültigkeit dieser Aussage einschränkt. Weiterhin waren die Schallemissionen der einzelnen Vibrationsrammungen recht unterschiedlich. Zudem zeigte das INLA-SPDE-Modell (bei ungünstigerer Datenlage als beim PAM) Effektreichweiten von 12-14 km, was wiederum Reichweiten vergleichbar mit denen von Impulsrammungen mit der Schallschutz-Konfiguration DGBS & HSD bedeuten würde. Zwischen den beiden hierfür herangezogenen aufeinanderfolgenden Vibrationsrammungen lag tatsächlich eine Impulsrammphase, die für die festgestellte Effektreichweite maßgeblich gewesen sein konnte. Es ergab sich also eine beträchtliche Unsicherheit hinsichtlich der wahrscheinlichsten Effektreichweite von Vibrationsrammungen.

Die obige Abstufung galt für die Zeit während der Rammarbeiten. In der halben Stunde vor den Rammungen war die Vergrämung die wichtigste Lärmquelle. In der Zeit von 10-20 h vor Rammbeginn bis zum Start der Vergrämung war der Schiffsverkehr die bedeutsamste Störungsquelle. Hierbei spielte die Distanz zum nächstgelegenen Schiff die wichtigste Rolle. DP-fähige Schiffe beeinträchtigten Schweinswale in einem

Umkreis von bis zu 3 km (dieses System wurde allerdings überwiegend während der Rammphasen eingesetzt). Von den nicht nach Typ differenzierten Schiffen im Gebiet verursachte das nächstgelegene immerhin noch in bis zu 2 km Distanz negative Effekte (Schiffe waren im UG allerdings oft mit nur geringen bis moderaten Geschwindigkeiten unterwegs; es ist bekannt, dass schnellere Schiffe bei Schweinswalen größere Effektreichweiten verursachen können; WISNIEWSKA ET AL. 2018). Einen Effekt auf die Schweinswale im UG hatte offenbar auch die Anzahl an Schiffen in einem Umkreis von 5 km um einen C-POD (PAM) bzw. um ein Dichteraster-Rechteck von 1 km Länge (HiDef und AIS-Daten). Dies konnte jedoch auch damit zusammenhängen, dass bei einer erhöhten Schiffsdichte auch die Distanz des nächstgelegenen Schiffes im Mittel geringer und letztere die eigentliche Vertreibungsursache war.

Hinsichtlich der Auswirkungen von Vibrationsrammungen auf Schweinswale lieferte diese Studie erste Hinweise; allerdings lag noch keine ausreichende Datenbasis vor, um weitreichende Schlussfolgerungen zu ziehen und konkrete Handlungsempfehlungen auszusprechen. Hierfür wären weitere Untersuchungen in OWPs mit ausschließlich einvibrierten Fundamenten nötig.

Immerhin erbrachte die vorliegende Studie aber neue Erkenntnisse zu Dauerschall- und Schiffseffekten. Außerhalb der Rammphasen ist der Schiffsverkehr im Windpark offenbar der wichtigste Störfaktor. Das legte beispielsweise das INLA-SPDE-Modell der Basisphase nahe, während der im gesamten Cluster „Nördlich Helgoland“ keine OWEA installiert wurde, aber dennoch viele Schiffe zu verschiedenen Zwecken präsent waren. Tatsächlich waren zu den Zeiten der HiDef-Flüge aus dieser Periode im Gebiet des OWP „Kaskasi II“ und den umliegenden Windparks deutlich weniger Schweinswale anwesend als in der Umgebung.

Es ist daher sinnvoll, das erhöhte Schiffsaufkommen in Gebieten mit Schweinswalpräsenz im Blick zu haben, wenn es um die Reduzierung von Störungsquellen für diese Tiere geht. Der Baustellen-Schiffsverkehr sollte in Zukunft bei der Bewertung der Störwirkungen von Gründungsarbeiten folglich stärker berücksichtigt werden. Hier kann als ein Ansatz zur Verringerung von Störungen die Empfehlung ausgesprochen werden, dass Schiffe mit DP-System dieses nur so lange wie unbedingt nötig aktivieren sollten. Da das DP-System anteilmäßig mehr hochfrequenten Schall abstrahlt als Schiffsturbinen im Normalbetrieb und Schweinswale gerade hochfrequenten Schall besser hören, sind die Auswirkungen auf Schweinswale hier gravierender. Dies zeigte sich in den größeren Störungsradien der entsprechenden Schiffe. Ein weiterer bereits teilweise praktizierter Lösungsansatz könnte in einer zeitlichen Konzentration von Windparkarbeiten (Bau und Betrieb) auf Perioden mit geringerem Schweinswalaufkommen liegen. Auf diese Weise ließen sich in Zukunft weitere Verbesserungen beim Schutz der Meeressäuger in der Umgebung von Offshore-Bauarbeiten erzielen.

5. Literatur

- Akamatsu, T., J. Teilmann, L. A. Miller, J. Tougaard, R. Dietz, D. Wang, K. Wang, U. Siebert & Y. Naito (2007) Comparison of echolocation behaviour between coastal and riverine porpoises. *Deep Sea Research Part II* (3, Bd. 54), S. 290–297.
- Akkaya Bas, A., F. Christiansen, A. Amaha Öztürk, B. Öztürk & C. McIntosh (2017) The effects of marine traffic on the behaviour of Black Sea harbour porpoises (*Phocoena phocoena relicta*) within the Istanbul Strait, Turkey. *PLOS ONE* (3, Bd. 12), S. e0172970.
- Amodio, S., M. Aria & A. D’Ambrosio (2015) On concavity in nonlinear and nonparametric regression models. *Statistica* (1), S. 85–98.
- Au, W. W. L., R. A. Kastelein, T. Rippe & N. M. Schooneman (1999) Transmission beam pattern and echolocation signals of a harbor porpoise (*Phocoena phocoena*). *The Journal of the Acoustical Society of America* (6, Bd. 106), S. 3699–3705.
- Bachl, F. E., F. Lindgren, D. L. Borchers & J. B. Illian (2019) inlabru: an R package for Bayesian spatial modelling from ecological survey data. *Methods in Ecology and Evolution* (6, Bd. 10), S. 760–766.
- Baltzer, J., N. Maurer, T. Schaffeld, A. Ruser, J. G. Schnitzler & U. Siebert (2020) Effect ranges of underwater noise from anchor vibration operations in the Wadden Sea. *Journal of Sea Research* (101912, Bd. 162).
- Barlow, J. (1988) Harbor porpoise, *Phocoena phocoena*, abundance estimation for California, Oregon, and Washington: 1. Ship surveys. *Fishery Bulletin* (3, Bd. 86), S. 417–432.
- Van Beest, F. M., J. Teilmann, L. Hermansen, A. Galatius, L. Mikkelsen, S. Sveegaard, J. D. Balle, R. Dietz & J. Nabe-Nielsen (2018a) Fine-scale movement responses of free-ranging harbour porpoises to capture, tagging and short-term noise pulses from a single airgun. *Royal Society Open Science* (1, Bd. 5), S. 170110.
- Benhemma-Le Gall, A., I. M. Graham, N. D. Merchant & P. M. Thompson (2021) Broad-Scale Responses of Harbor Porpoises to Pile-Driving and Vessel Activities During Offshore Windfarm Construction. *Frontiers in Marine Science* (664724, Bd. 8).
- Benjamins, S., N. Van Geel, G. Hastie, J. Elliott & B. Wilson (2016) Harbour porpoise distribution can vary at small spatiotemporal scales in energetic habitats. *Deep Sea Research II*.
- Benke, H., U. Siebert, R. Lick, B. Bandomir & R. Weiss (1998) The current status of harbour porpoises (*Phocoena phocoena*) in German waters. *Arch. Fish. Mar. Res.* (2, Bd. 46), S. 97–123.
- BioConsult SH (Hrsg. der Reihe) (2014) Offshore Test Site *alpha ventus* Expert Report: Marine Mammals. (Aut. Rose, A., A. Diederichs, G. Nehls, M. Brandt, S. Witte, C. Höschle, M. Dorsch, T. Liesenjohnann, A. Schubert, V. Kosarev, M. Laczny, A. Hill & W. Piper). Abschlussbericht, Husum (DEU), S. 156.
- BioConsult SH, Hydrotechnik Lübeck GmbH & Itap GmbH (Hrsg. der Reihe) (2014) Entwicklung und Erprobung des Großen Blasenschleiers zur Minderung der Hydroschallemissionen bei Offshore-Rammarbeiten. OWP Borkum West II: Baumonitoring und Forschungsprojekt HYDROSCHALL-OFF BW II. (Aut. Diederichs, A., H. Pehlke, G. Nehls, M. Bellmann, P. Gerke, J. Oldeland, C. Grunau, S. Witte & A. Rose). Schlussbericht, Husum (DEU), S. 247.
- BioConsult SH, IBL Umweltplanung & Institut für Angewandte Ökosystemforschung (Hrsg. der Reihe) (2016) Effects of offshore pile driving on harbour porpoise abundance in the German Bight 2009–2013. (Aut. Brandt, M. J., A.-C. Dragon, A. Diederichs, A. Schubert, V. Kosarev, G. Nehls, V.

- Wahl, A. Michalik, A. Braasch, C. Hinz, C. Ketzer, D. Todeskino, M. Gauger, M. Laczny & W. Piper). Final Report, Husum (DEU), Prepared for Offshore Forum Windenergie, S. 46.
- BioConsult SH, IBL Umweltplanung & Institut für Angewandte Ökosystemforschung (Hrsg. der Reihe) (2019) Effects of noise-mitigated offshore pile driving on harbour porpoise abundance in the German Bight 2014-2016 (Gescha 2). (Aut. Rose, A., M. J. Brandt, R. Vilela, A. Diederichs, A. Schubert, V. Kosarev, G. Nehls, M. Volkenandt, V. Wahl, A. Michalik, H. Wendeln, A. Freund, C. Ketzer, B. Limmer, M. Laczny & W. Piper). Final Report, Husum (DEU), prepared for Arbeitsgemeinschaft OffshoreWind e.V., S. 193.
- BioConsult SH & IfAÖ (2014) Offshore Test Site Alpha Ventus, Expert Report: Marine Mammals. Final Report: From baseline to wind farm operation, Hamburg, Husum (DEU).
- BMU (2013) Konzept für den Schutz der Schweinswale vor Schallbelastungen bei der Errichtung von Offshore Windparks in der deutschen Nordsee (Schallschutzkonzept).
- Borchers, D. L. (2003) Estimation with incomplete detection at distance zero 'g (0) < 1'. - Aus International workshops. Advanced techniques and recent developments in distance sampling. Centre for Research into Ecological and Environmental Modelling, St. Andrews, Scotland, S. 102–129.
- Brandt, M. J., A. Diederichs, K. Betke & G. Nehls (2011) Responses of harbour porpoises to pile driving at the Horns Rev II offshore wind farm in the Danish North Sea. Marine Ecology Progress Series (Bd. 421), S. 205–216.
- Brandt, M. J., A.-C. Dragon, A. Diederichs, M. Bellmann, V. Wahl, W. Piper, J. Nabe-Nielsen & G. Nehls (2018) Disturbance of harbour porpoises during construction of the first seven offshore wind farms in Germany. Marine Ecology Progress Series (Bd. 596), S. 213–232.
- Brandt, M. J., C. Höschle, A. Diederichs, K. Betke, R. Matuschek & G. Nehls (2013a) Seal scarers as a tool to deter harbour porpoises from offshore construction sites. Marine Ecology Progress Series (Bd. 475), S. 291–302.
- Brandt, M. J., C. Höschle, A. Diederichs, K. Betke, R. Matuschek, S. Witte & G. Nehls (2013b) Far-reaching effects of a seal scarer on harbour porpoises, *Phocoena phocoena*. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems (2, Bd. 23), S. 222–232.
- Brennecke, D., U. Siebert, L. Kindt-Larsen, H. Skov Midtiby, H. D. Egemose, S. T. Ortiz, K. Knickmeier & M. Wahlberg (2022) The fine-scale behavior of harbor porpoises towards pingers. Fisheries Research (106437, Bd. 255).
- BSH (2023) Flächenentwicklungsplan 2023 für die deutsche Nord- und Ostsee. Hamburg (DEU), S. 133.
- Burger, C., A. Schubert, S. Heinänen, M. Dorsch, B. Kleinschmidt, R. Žydelis, J. Morkūnas, P. Quillfeldt & G. Nehls (2019) A novel approach for assessing effects on distributions and movements of seabirds in relation to shipping traffic. Journal of Environmental Management (Bd. 251), S. 109511.
- Clausen, K. T., J. Tougaard, J. Carstensen, M. Delefosse & J. Teilmann (2018) Noise affects porpoise click detections – the magnitude of the effect depends on logger type and detection filter settings. Bioacoustics (Bd. 28), S. 443–458.
- Clausen, K. T., M. Wahlberg, K. Beedholm, S. Deruiter & P. T. Madsen (2011) Click communication in harbour porpoises *Phocoena phocoena*. Bioacoustics (1, Bd. 20), S. 1–28.
- Codarin, A., L. E. Wysocki, F. Ladich & M. Picciulin (2008) Hearing under ambient and ship noise conditions: a case study on fishes from a protected area in the Adriatic Sea. Bioacoustics (1–3, Bd. 17), S. 196–199.
- Cominelli, S., W. D. Halliday, M. K. Pine, R. C. Hilliard, J. W. Lawson, N. I. Duman & R. Devillers (2020) Vessel noise in spatially constricted areas: Modeling acoustic footprints of large vessels in the Cabot Strait, Eastern Canada. Ocean & Coastal Management (105255, Bd. 194).

- Dahl, P. H., C. A. F. De Jong & A. N. Popper (2015) The Underwater sound field from Impact Pile Driving and Its Potential effects on Marine life. *Acoustics Today* (2, Bd. 11), S. 18–25.
- Dähne, M., A. Gilles, K. Lucke, V. Peschko, S. Adler, K. Krügel, J. Sundermeyer & U. Siebert (2013) Effects of pile-driving on harbour porpoises (*Phocoena phocoena*) at the first offshore wind farm in Germany. *Environmental Research Letters* (2, Bd. 8), S. 025002.
- Diederichs, A., M. J. Brandt, G. Nehls, M. Laczny, A. Hill & W. Piper (2010a) Auswirkungen des Baus des Offshore Testfelds „alpha ventus“ auf marine Säugetiere. Husum (DEU), Im Auftrag der Stiftung Offshore-Windenergie, S. 120.
- Diederichs, A., M. Brandt & G. Nehls (2010b) Does sand extraction near Sylt affect harbour porpoises? *Wadden Sea Ecosystem No. 26* (Bd. Impacts of human activities), S. 199–203.
- Donaldson, J. (2016) tsne: T-Distributed Stochastic Neighbor Embedding for R (t-SNE). R package version 0.1-3. <https://CRAN.R-project.org/package=tsne> (2016).
- Duarte, C. M., L. Chapuis, S. P. Collin, D. P. Costa, R. P. Devassy, V. M. Eguiluz, C. Erbe, T. A. . C. Gordon, B. S. Halpern, H. R. Harding, M. N. Havlik, M. Meekan, N. D. Merchant, J. L. Miksis-Olds, M. Parsons, M. Predragovic, A. N. Radford, C. A. Radford, S. D. Simpson, H. Slabbekoorn, E. Staaterman, I. C. Van Opzeeland, J. Winderen, X. Zhang & F. Juanes (2021) The soundscape of the Anthropocene ocean. *Science* (Bd. 371), S. eaba4658.
- Dyndo, M., D. M. Wiśniewska, L. Rojano-Doñate & P. T. Madsen (2015) Harbour porpoises react to low levels of high frequency vessel noise. *Scientific Reports* (1, Bd. 5), S. 1–9.
- Erbe, C., S. A. Marley, R. P. Schoeman, J. N. Smith, L. E. Trigg & C. B. Emling (2019) The Effects of Ship Noise on Marine Mammals—A Review. *Frontiers in Marine Science* (Bd. 6), S. 21.
- European Commission (2014) The EU system for fisheries controls. https://ec.europa.eu/fisheries/cfp/control/technologies_en (2014).
- Findlay, C. R., D. Aleynik, A. Farcas, N. D. Merchant, D. Risch & B. Wilson (2021) Auditory impairment from acoustic seal deterrents predicted for harbour porpoises in a marine protected area. *Journal of Applied Ecology* (8, Bd. 58), S. 1631–1642.
- Findlay, C. R., L. Rojano-Doñate, J. Tougaard, M. P. Johnson & P. T. Madsen (2023) Small reductions in cargo vessel speed substantially reduce noise impacts to marine mammals. *Science Advances* (25, Bd. 9), S. eadf2987.
- Fischer, R. (2000) Bow Thruster Induced Noise And Vibration. *Dynamic Positioning Conference*
- Frankish, C. K., A. M. Von Benda-Beckmann, J. Teilmann, J. Tougaard, R. Dietz, S. Sveegaard, B. Binnerts, C. A. F. De Jong & J. Nabe-Nielsen (2023) Ship noise causes tagged harbour porpoises to change direction or dive deeper. *Marine Pollution Bulletin* (115755, Bd. 197).
- Garthe, S. & O. Hüppop (1999) Effect of Ship Speed on Seabird Counts in Areas Supporting Commercial Fisheries. *J. Field Ornithol.* (1, Bd. 70), S. 28–32.
- Gilles, A., V. Peschko & U. Siebert (2011) Marine Säugetiere und Seevögel in der deutschen AWZ von Nord- und Ostsee. Teilbericht marine Säugetiere. Teil A: Visuelle Erfassung von Schweinswalen und akustische Erfassung im Seegebiet Doggerbank. Monitoringbericht 2010-2011, Büsum (DEU), Im Auftrag des Bundesamtes für Naturschutz (BfN), S. 12–74.
- Gilles, A., M. Scheidat & U. Siebert (2009) Seasonal distribution of harbour porpoises and possible interference of offshore wind farms in the German North Sea. *Marine Ecology Progress Series* (Bd. 383), S. 295–307.
- Gilles, A., S. Viquerat & U. Siebert (2014) Monitoring von marinen Säugetieren 2013 in der deutschen Nord- und Ostsee. Teil A: Visuelle Erfassung von Schweinswalen. Büsum (DEU), Im Auftrag des Bundesamtes für Naturschutz (BfN), S. 14–53.

- Graham, I. M., N. D. Merchant, A. Farcas, T. R. Barton, B. Cheney, S. Bono & P. M. Thompson (2019) Harbour porpoise responses to pile-driving diminish over time. *Royal Society Open Science* (6, Bd. 6), S. 190335.
- Haelters, J., V. Dulière, L. Vigin & S. Degraer (2015) Towards a numerical model to simulate the observed displacement of harbour porpoises *Phocoena phocoena* due to pile driving in Belgian waters. *Hydrobiologia* (1, Bd. 756), S. 105–116.
- Haelters, J., W. Van Roy, L. Vigin & S. Degraer (2012) The effect of pile driving on harbour porpoises in Belgian waters. *Aus Offshore windfarms in the Belgian part of the North Sea: heading for an understanding of environmental impacts*, Bd. Chapter 9 von 10, Royal Belgian Institute of Natural Resources, Department MUMM, S. Chapter 9: 127-143.
- Hahne, W. & I. Kratzer (2023) Einfluss der schallintensiven Bauarbeiten von OWPs auf die Präsenz von Schweinswalen. *Meeresumweltsymposium 2023*.
- Hammond, P. S., P. Berggren, H. Benke, D. L. Borchers, A. Collet, M. P. Heide-Jørgensen, S. Heimlich, A. R. Hiby, M. F. Leopold & N. Øien (2002) Abundance of harbour porpoise and other cetaceans in the North Sea and adjacent waters. *Journal of Applied Ecology* (2, Bd. 39), S. 361–376.
- Hammond, P. S., C. Lacey, A. Gilles, S. Viquerat, P. Börjesson, H. Herr, K. MacLeod, V. Ridoux, M. B. Santos, M. Scheidat, J. Teilmann, J. Vingada & N. Øien (2017) Estimates of cetacean abundance in European Atlantic waters in summer 2016 from the SCANS-III aerial and shipboard surveys. S. 40.
- Hammond, P. S., K. Macleod, P. Berggren, D. L. Borchers, L. Burt, A. Cañadas, G. Desportes, G. P. Donovan, A. Gilles, D. Gillespie, J. Gordon, L. Hiby, I. Kuklik, R. Leaper, K. Lehnert, L. Mardik, P. Lovell, N. Øien, C. G. M. Paxton, V. Ridoux, E. Rogan, Samarra Filipa, M. Scheidat, M. Sequeira, U. Siebert, H. Skov, R. Swift, M. L. Tasker, J. Teilmann, O. Van Canneyt & J. A. Vázquez (2013) Cetacean abundance and distribution in European Atlantic shelf waters to inform conservation and management. *Biological Conservation* (Bd. 164), S. 107–122.
- Hermannsen, L., K. Beedholm, J. Tougaard & P. T. Madsen (2014) High frequency components of ship noise in shallow water with a discussion of implications for harbor porpoises (*Phocoena phocoena*). *The Journal of the Acoustical Society of America* (4, Bd. 136), S. 1640–1653.
- International Maritime Organization (2002) SOLAS (Safety of Life at Sea). Chapter V, Safety of navigation. (Aut. IMO). S. 29.
- Itap GmbH (Hrsg. der Reihe) (2023) Messung und Modellierung von Vibrationsrammschall und dessen Auswirkungen auf Schweinswale. (Aut. Bellmann, M., P. Remmers & J. Poppitz). *Technischer Zwischenbericht*, Oldenburg (DEU), S. 50.
- Jacobson, E. K., K. A. Forney & J. Barlow (2017) Using paired visual and passive acoustic surveys to estimate passive acoustic detection parameters for harbor porpoise abundance estimates. *The Journal of the Acoustical Society of America* (1, Bd. 141), S. 219–230.
- Jiménez-Arranz, G., N. Banda, S. Cook & R. Wyatt (2020) Review on existing data on underwater sounds from pile driving activities. *Holsworthy* (GBR), S. 62.
- Kastelein, R. A., P. Bunskoek, M. Hagedoorn, W. W. L. Au & D. De Haan (2002) Audiogram of a harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) measured with narrow-band frequency-modulated signals. *The Journal of the Acoustical Society of America* (1, Bd. 112), S. 334.
- Kastelein, R. A., L. Helder-Hoek & S. Van de Voorde (2017) Effects of exposure to sonar playback sounds (3.5 – 4.1 kHz) on harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) hearing. *The Journal of the Acoustical Society of America* (4, Bd. 142), S. 1965–1975.

- Kastelein, R. A., J. Schop, L. Hoek & J. Covi (2015) Hearing thresholds of a harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) for narrow-band sweeps. *The Journal of the Acoustical Society of America* (4, Bd. 138), S. 2508–2512.
- Kastelein, R. A., S. Van de Voorde & N. Jennings (2018) Swimming speed of a harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) during playbacks of offshore pile driving sounds. *Aquatic Mammals* (1, Bd. 44), S. 92–99.
- Keele, L. J. (2008) *Semiparametric Regression for the Social Sciences*. Verl. Wiley. John Wiley & Sons Ltd., Chichester (UK), S. 230.
- Kindt-Larsen, L., C. W. Berg, S. Northridge & F. Larsen (2019) Harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) reactions to pingers. *Marine Mammal Science* (2, Bd. 35), S. 552–573.
- Koblitz, J. C., M. Wahlberg, P. Stilz, P. T. Madsen, K. Beedholm & H.-U. Schnitzler (2012) Asymmetry and dynamics of a narrow sonar beam in an echolocating harbor porpoise. *The Journal of the Acoustical Society of America* (3, Bd. 131), S. 2315–2324.
- Koschinski, S., A. Diederichs & M. Amundin (2008) Click train patterns of free-ranging harbour porpoises acquired using T-PODs may be useful as indicators of their behaviour. *Journal of Cetacean Research and Management* (2, Bd. 10), S. 147–155.
- Kyhn, L. A., J. Tougaard, L. Thomas, L. R. Duve, J. Stenback, M. Amundin, G. Desportes & J. Teilmann (2012) From echolocation clicks to animal density - Acoustic sampling of harbor porpoises with static dataloggers. *The Journal of the Acoustical Society of America* (1, Bd. 131), S. 550–560.
- Lindgren, F., H. Rue & J. Lindström (2011) An explicit link between Gaussian fields and Gaussian Markov random fields: the stochastic partial differential equation approach: Link between Gaussian Fields and Gaussian Markov Random Fields. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)* (4, Bd. 73), S. 423–498.
- Marra, G. & S. N. Wood (2011) Practical variable selection for generalized additive models. *Computational Statistics & Data Analysis* (7, Bd. 55), S. 2372–2387.
- Mortensen, L. O., J. Tougaard & J. Teilmann (2012) Effects of underwater noise on harbour porpoises around major shipping lanes.
- Nabe-Nielsen, J., R. M. Sibly, J. Tougaard, J. Teilmann & S. Sveegaard (2014) Effects of noise and by-catch on a Danish harbour porpoise population. *Ecological Modelling* (Bd. 272), S. 242–251.
- Nehls, G., A. Rose, A. Diederichs, M. Bellmann & H. Pehlke (2016) Noise mitigation during pile driving efficiently reduces disturbance of marine mammals. *Aus The Effects of Noise on Aquatic Life II* (Aut. Popper, A. N. & A. Hawkins), Bd. 875, Verl. Springer New York, New York, NY, S. 755–762.
- Nehls, G., R. Zydalis, R. Matuschek, M. Brandt, A. Diederichs, C. Hoeschle & F. Thomsen (2024) Impact of High Marine Traffic on Harbor Porpoise: Effect on Abundance and Distribution. *Aus The Effects of Noise on Aquatic Life*, Verl. Springer International Publishing, Cham (SUI), S. 1–27.
- Oakley, J. A., A. T. Williams & T. Thomas (2017) Reactions of harbour porpoise (*Phocoena phocoena*) to vessel traffic in the coastal waters of South West Wales, UK. *Ocean & Coastal Management* (Bd. 138), S. 158–169.
- O'Brien, R. M. (2007) A caution regarding rules of thumb for variance inflation factors. *Quality & Quantity* (5, Bd. 41), S. 673–690.
- Palka, D. L. & P. S. Hammond (2001) Accounting for responsive movement in line transect estimates of abundance. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* (4, Bd. 58), S. 777–787.
- Pinheiro, J. C. & D. M. Bates (2000) *Mixed-effects models in S and S-PLUS*. In *Statistics and computing*, Aufl. reprinted paperback ed. of the 2000 ed, Verl. Springer, New York, S. 528.

- R Core Team (2018) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing.
- R Core Team (2019) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing.
- R Core Team (2021) R: A language and environment for statistical computing.
- Read, A. & A. Westgate (1997) Monitoring the movements of harbour porpoises (*Phocoena phocoena*) with satellite telemetry. *Marine Biology* (2, Bd. 130), S. 315–322.
- Rose, A., M. Bellmann, A. Diederichs, J. Oldeland & G. Nehls (2016) Bubble curtains efficiently reduce temporary habitat loss for harbour porpoises during pile driving. 4th International Conference on the Effects of Noise on Aquatic Life 2016 Dublin.
- Rue, H. & L. Held (2005) Gaussian Markov random fields: theory and applications. In *Monographs on statistics and applied probability / Nr. 104*, Verl. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, S. 263.
- Rue, H., S. Martino & N. Chopin (2009) Approximate Bayesian inference for latent Gaussian models by using integrated nested Laplace approximations. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)* (2, Bd. 71), S. 319–392.
- Santos, M. B. & G. J. Pierce (2003) The diet of harbour porpoise (*Phocoena phocoena*) in the northeast Atlantic. *Oceanography and Marine Biology: an Annual Review* (Bd. 41), S. 355–390.
- Scheidat, M., K.-H. Kock & U. Siebert (2004) Summer distribution of harbour porpoise (*Phocoena phocoena*) in the German North Sea and Baltic Seas. *Journal of Cetacean Research and Management* (3, Bd. 6), S. 251–257.
- Sørensen, P. M., D. M. Wisniewska, F. H. Jensen, M. Johnson, J. Teilmann & P. T. Madsen (2018) Click communication in wild harbour porpoises (*Phocoena phocoena*). *Scientific Reports* (9702, Bd. 8).
- Sveegaard, S., H. Andreassen, Kim N. Mouritsen, J. Jeppesen, J. Teilmann & Carl C. Kinze (2012a) Correlation between the seasonal distribution of harbour porpoises and their prey in the Sound, Baltic Sea. *Marine Biology* (5, Bd. 159), S. 1029–1037.
- Sveegaard, S., J. Nabe-Nielsen, K.-J. Stæhr, T. F. Jensen, K. N. Mouritsen & J. Teilmann (2012b) Spatial interactions between marine predators and their prey: herring abundance as a driver for the distributions of mackerel and harbour porpoise. *Marine Ecology Progress Series* (Bd. 468), S. 245–253.
- Sveegaard, S., J. Teilmann, J. Tougaard, R. Dietz, K. N. Mouritsen, G. Desportes & U. Siebert (2011) High-density areas for harbor porpoises (*Phocoena phocoena*) identified by satellite tracking. *Marine Mammal Science* (1, Bd. 27), S. 230–246.
- Teilmann, J., C. T. Christiansen, S. Kjellerup, R. Dietz & G. Nachman (2013) Geographic, seasonal, and diurnal surface behavior of harbor porpoises. *Marine Mammal Science*, S. 1–17.
- Teilmann, J., O. D. Henriksen, J. Carstensen & H. Skov (2002) Monitoring effects of offshore windfarms on harbour porpoises using PODs (porpoise detectors). Technical report, Denmark (DNK), Technical report SEAS Wind Energy Center and Tech-wise A/S, S. 41.
- Thompson, P. M., I. M. Graham, B. Cheney, T. R. Barton, A. Farcas & N. D. Merchant (2020) Balancing risks of injury and disturbance to marine mammals when pile driving at offshore windfarms. *Ecological Solutions and Evidence* (2, Bd. 1).
- Todd, V. L. G., L. D. Williamson, J. Jiang, S. E. Cox, I. B. Todd & M. Ruffert (2021) Prediction of marine mammal auditory-impact risk from Acoustic Deterrent Devices used in Scottish aquaculture. *Marine Pollution Bulletin* (Bd. 165), S. 112171.

- Tougaard, J., J. Carstensen, J. Teilmann, H. Skov & P. Rasmussen (2009) Pile driving zone of responsiveness extends beyond 20 km for harbor porpoises (*Phocoena phocoena* (L.)). *The Journal of the Acoustical Society of America* (1, Bd. 126), S. 11–14.
- Tsouvalas, A. (2020) Underwater noise emission due to offshore pile installation: A review. *Energies* (12, Bd. 13), S. 3037.
- Tsouvalas, A. & A. V. Metrikine (2014) A three-dimensional vibroacoustic model for the prediction of underwater noise from offshore pile driving. *Journal of Sound and Vibration* (8, Bd. 333), S. 2283–2311.
- Ullah, M. I., M. Aslam, S. Altaf & M. Ahmed (2019) Some New Diagnostics of Multicollinearity in Linear Regression Model. *Sains Malaysiana* (9, Bd. 48), S. 2051–2060.
- Van Beest, F. M., J. Teilmann, R. Dietz, A. Galatius, L. Mikkelsen, D. Stalder, S. Sveegaard & J. Nabe-Nielsen (2018b) Environmental drivers of harbour porpoise fine-scale movements. *Marine Biology* (5, Bd. 165).
- Van Der Maaten, L. & G. Hinton (2008) Visualizing Data using t-SNE. *Journal of Machine Learning Research* (Bd. 9), S. 2579–2605.
- Verfuss, U. K., L. A. Miller, P. K. Pilz & H.-U. Schnitzler (2009) Echolocation by two foraging harbour porpoises (*Phocoena phocoena*). *Journal of Experimental Biology* (6, Bd. 212), S. 823–834.
- Verfuss, U. K., R. R. Sinclair & C. E. Sparling (2019) A review of noise abatement systems for offshore wind farm construction noise, and the potential for their application in Scottish waters. *Nr. Research Report No. 1070*, Inverness (GBR).
- Vilela, R., C. Burger, A. Diederichs, F. E. Bachl, L. Szostek, A. Freund, A. Braasch, J. Bellebaum, B. Beckers, W. Piper & G. Nehls (2021) Use of an INLA latent gaussian modeling approach to assess bird population changes due to the development of offshore wind farms. *Frontiers in Marine Science* (701332, Bd. 8).
- Villadsgaard, A., M. Wahlberg & J. Tougaard (2007) Echolocation signals of wild harbour porpoises, *Phocoena phocoena*. *Journal of Experimental Biology* (1, Bd. 210), S. 56–64.
- Voß, J., A. Rose, V. Korarev, R. Vilela & A. Diederichs (2023a) Response of Harbour Porpoises to Pingers and Acoustic Harassment Devices. *Aus The Effects of Noise on Aquatic Life*.
- Voß, J., A. Rose, V. Kosarev, R. Vilela, I. C. Van Opzeeland & A. Diederichs (2023b) Response of harbor porpoises (*Phocoena phocoena*) to different types of acoustic harassment devices and subsequent piling during the construction of offshore wind farms. *Frontiers in Marine Science* (Bd. 10), S. 1128322.
- Williamson, L. D., K. L. Brookes, B. E. Scott, I. M. Graham, G. Bradbury, P. S. Hammond & P. M. Thompson (2016) Echolocation detections and digital video surveys provide reliable estimates of the relative density of harbour porpoises. *Methods in Ecology and Evolution* (Bd. 7), S. 762–769.
- Williamson, L. D., B. E. Scott, M. R. Laxton, F. E. Bachl, J. B. Illian, K. L. Brookes & P. M. Thompson (2021) Spatiotemporal variation in harbor porpoise distribution and foraging across a landscape of fear. *Marine Mammal Science*.
- Wisniewska, D. M., M. Johnson, K. Beedholm, M. Wahlberg & P. T. Madsen (2012) Acoustic gaze adjustments during active target selection in echolocating porpoises. *The Journal of Experimental Biology* (Pt 24, Bd. 215), S. 4358–4373.
- Wisniewska, D. M., M. Johnson, J. Teilmann, L. Rojano-Doñate, J. Shearer, S. Sveegaard, L. A. Miller, U. Siebert & P. T. Madsen (2016) Ultra-high foraging rates of harbor porpoises make them vulnerable to anthropogenic disturbance. *Current Biology* (11, Bd. 26), S. 1441–1446.

- Wisniewska, D. M., M. Johnson, J. Teilmann, U. Siebert, A. Galatius, R. Dietz & P. T. Madsen (2018) High rates of vessel noise disrupt foraging in wild harbour porpoises (*Phocoena phocoena*). Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences (1872, Bd. 285), S. 20172314.
- Wood, S. (2015) Package 'mgcv'. R package version, S. 1.7-29.
- Wood, S. N. (2006) Generalized additive models: an introduction with R. Chapman and Hall. London (UK).
- Wood, S. R. (Hrsg.) (2017) Generalized additive models. An introduction with R. Verl. CRC Press, Boca Raton (USA).
- Zuur, A. F. (2009) Mixed effects models and extensions in ecology with R. In Statistics for biology and health, Verl. Springer, New York, NY, S. 574.
- Zuur, A. F., E. N. Ieno & C. S. Elphick (2010) A protocol for data exploration to avoid common statistical problems. Methods in Ecology and Evolution (1, Bd. 1), S. 3–14.
- Zuur, A. F., E. N. Ieno, N. J. Walker, A. A. Saveliev & G. M. Smith (2009) Mixed effects models and extensions in ecology with R. In Statistics for Biology and Health, Verl. Springer, New York, NY (USA), S. 574.
- Žydelis, R., M. Dorsch, S. Heinänen, G. Nehls & F. Weiss (2019) Comparison of digital video surveys with visual aerial surveys for bird monitoring at sea. Journal of Ornithology (2, Bd. 160), S. 567–580.

6. Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsprojektes VISSKA (Untersuchungen zur Vibrationsrammung in Bezug auf die Installation, die Schallemissionen und die Auswirkungen auf Schweinswale im Offshore-Windpark Kaskasi II) sollte die Einbringmethode der Vibrationsrammung umfassend vor, während und nach der Bauphase eines Offshore-Windparks (OWP) messtechnisch durch passiv-akustisches Monitoring (PAM mittels C-PODs als akustischen Detektoren), Flugtransekt-Erfassungen (HiDef-Flüge) und Schallmonitoring (Hydrofone) begleitet werden. Hierbei lag das Augenmerk auf den Auswirkungen der Schallentwicklung auf die Meeresumwelt am Beispiel des Schweinswals als Indikatorart für die Bewertung der anthropogenen Schalleinträge. Ursprünglich sollte hierbei geprüft werden, ob das Vibrationsrammverfahren hinsichtlich der Installationsdauer und der Schalleinträge ins Wasser eine schallarme und naturverträgliche Alternative zur derzeit marktüblichen Methode des Impulsrammverfahrens darstellt. Aufgrund von während des Installationsprozesses aufgetretenen Schwierigkeiten konnte die Studie jedoch nicht – wie ursprünglich geplant – den vollen Fokus auf die Effekte der Vibrationsrammungen legen. Mit nur sechs solcher Fundamentrammungen für Offshore-Windenergieanlagen (OWEA) des OWP „Kaskasi II“ war die Datenlage dafür nicht ausreichend. Weitere Aspekte der Eingriffsphase gewannen dagegen in der Studie an Wichtigkeit. So wurden schließlich die Effekte von Vibrationsrammungen, Impulsrammungen, des Schiffsverkehrs sowie des hoch- und tieffrequenten Dauerschalls während der Frühjahrs-Bauphase des OWP „Kaskasi II“ evaluiert. Folgende Fragestellungen wurden hierbei im Einzelnen angegangen:

- Welchen Einfluss hatte die Fundament-Installationsmethode (Impuls- bzw. Vibrationsrammung) auf die Detektionsraten?
- Welchen Einfluss hatten Impuls- und Vibrationsrammung unter Berücksichtigung der Schiffsaktivität auf die Verteilung der Schweinswale?
- Wie wirkte sich die Lautstärke im Umfeld der C-PODs (tief- und hochfrequenter Lärm) auf die Detektionsrate der Schweinswale aus?
- Wie verhielt sich die Schweinswal-Detektionsrate in Abhängigkeit von der Distanz des nächsten Schiffes (alle Schiffe bzw. speziell solche mit DP-System)?
- Wie wirkte sich die Anzahl der Bauschiffe (alle Schiffe bzw. speziell solche mit DP-System) im Umkreis von 5 km auf die Detektionsraten der Schweinswale aus?

Die Generalisierten Additiven Modelle (GAM) aus den C-POD-Daten ergaben für den OWP „Kaskasi II“ bis in etwa 7-14 km Distanz zu den OWEA-Baustellen reichende (die Obergrenze ließ in den Modellen viel Interpretationsspielraum) und bis etwa 30-40 h nach Rammende andauernde Effekte der schallgedämmten Impulsrammungen mit vorheriger Vergrämung. Die Effektdistanzen dieser Rammphasen lagen damit offenbar etwas unterhalb der aus den beiden Gescha-Studien bekannten Werte (14-16 km bzw. 15-19 km). Allgemein geringere Detektionsraten in mehr als 18 km Entfernung zu den Baustellen, und dies bereits weit vor Rammbeginn, schienen nicht mit den Rammarbeiten in Zusammenhang zu stehen. Dies legte die Analyse der kumulativen Effekte nahe, welche bereits in einer Periode Monate vor der Bauphase vergleichsweise niedrige Raten in diesem großen Distanzbereich aufzeigte, die sich während der Bauphase jedoch kaum änderten (im Gegensatz zu denen in näheren Distanzklassen). Möglichweise waren natürliche räumliche Habitatnutzungs-Unterschiede für dieses Bild verantwortlich. Der weitreichende negative Effekt der einzigen ungedämmten Referenzrammung bis in mindestens 15-20 km Entfernung stand in Einklang mit Erkenntnissen aus anderen Studien. Ramm- und Vergrämungseffekte konnten bei den stundengenauen Analysen nicht weiter aufgetrennt werden. Da jedoch das FaunaGuard-System als APD verwendet wurde, welches Schweinswale nur bis in ca. 2,5 km Distanz vertreibt, war es wahrscheinlich, dass Vergrämungseffekte hinter den Effekten der Impulsrammungen zurücktraten. Weiterhin gab es in

den Modellen oft nur wenige verfügbare Stunden-Datensätze für die zeitlich weit (1-3 Tage) vor und nach den Impuls-Rammphasen liegenden Zeiträume. Da außerdem auf der Tages- bis Wochenskala starke natürliche Fluktuationen der Schweinswale im UG auftraten, trafen die wenigen Impuls-Rammphasen mit ausreichend langen Daten-Zeitfenstern nicht selten eine Periode mit ohnehin abnehmenden Detektionsraten. Diese Inkonsistenzen führten in einigen Modellen zu scheinbar außerordentlich lange andauernden Effekten der Rammphasen auf Schweinswale von mindestens 72 h. Vermutlich war dieses Resultat jedoch ein Artefakt des bezüglich konsistent langer Ramm-Zeitfenster stark eingeschränkten PAM-Datensatzes. Allerdings konnte dieser Sachverhalt ohne weitere Daten nicht abschließend geklärt werden.

Hinsichtlich der sechs Vibrationsrammungen wurden bei den Modellen aus stundengenauen C-POD-Daten Effektreichweiten von 2-6 km festgestellt, wobei sich spätestens 5 h nach den Vibrations-Rammphasen immer eine Impulsrammung anschloss, es also keine Ergebnisse über diesen Zeitpunkt hinaus gab. Die negativen Effekte begannen hierbei ca. 10-20 h vor der Rammaktivität. Vibrationsrammungen emittieren im Allgemeinen tieffrequenteren Schall als Impulsrammungen. Dies könnte, aufgrund des besseren Hörvermögens der Schweinswale im hochfrequenten Bereich, die gegenüber den Impulsrammungen geringeren Effektreichweiten bedingt haben. Im Gegensatz zu den PAM-Modellen ergaben die Ergebnisse des INLA-SPDE-Differenzmodells aus den Daten der HiDef-Flüge im Zeitfenster zweier Vibrationsrammungen allerdings eine mittlere Meidedistanz von ca. 12-14 km um die Grenzen des Clusters „Nördlich Helgoland“ inklusive einer 1 km-Pufferzone. Da dieser Nahbereich um die vier Cluster-OWPs aber bereits während der Basisphase durch Schiffsverkehr und Wartungsarbeiten an den Turbinen der zeitlich vor „Kaskasi II“ gebauten drei Windparks des Clusters anthropogen beeinträchtigt war (Betriebsphase dieser OWPs), konnte er nicht als unbeeinflusste Basis gelten. Im ganzen Cluster „Nördlich Helgoland“ sowie in der Region östlich bis südöstlich davon waren die Schweinswaldichten – vermutlich durch die vielfältigen Aktivitäten – bereits während der Basisphase gering. Somit war auch keine weitere deutliche Abnahme in dieser Region mehr möglich, also auch kein negativer Effekt feststellbar. Nördlich und westlich des Clusters gab es hingegen während der Basisphase höhere Schweinswaldichten. Während der beiden untersuchten Vibrationsrammungen waren diese deutlich erniedrigt und es zeigte sich im Eingriffsmodell eine Zone geringer Dichten rund um den OWP „Kaskasi II“ als Zentrum, was für anthropogene Effekte im Rahmen der beiden Vibrationsrammungen – aber u. U. auch für Effekte einer Impulsrammung, die zwischen den beiden an zwei aufeinander folgenden Tagen erfolgten HiDef-Flüge stattfand – sprach. Ein weiteres Modell zu den HiDef-Daten, das GAM der Gradientenanalyse, zeigte eine Zunahme an Schweinswalen bei zunehmender Entfernung zum OWP „Kaskasi II“, wohingegen ein Wilcoxon-Test bei keinem Vergleich einer Distanzklasse mit der Referenzklasse von 10-12 km Entfernung signifikant war. Grund hierfür konnte aber auch die vom INLA-SPDE-Modell errechnete große Effektreichweite von mehr als 10 km sein, wodurch die 10-12 km-Klasse keine unbeeinflusste Referenz gewesen wäre. Allerdings war solch eine große Effektreichweite keinesfalls gesichert. Denn zum einen war der abnehmende Gradient während der Basisphase sogar noch stärker als in der Bauphase, zum anderen sprachen die oben ausgeführten PAM-Ergebnisse dagegen, die als besser untermauert gelten dürften, da die Datenlage bei den HiDef-Flügen ungünstiger als beim PAM war. Es gab lediglich drei Flüge während der Basisphase und zwei Flüge während zweier Vibrationsrammungen; hingegen gab es PAM-Daten zu allen sechs Vibrationsrammungen. Die Flüge der Basis- und Bauphase fanden zudem überwiegend zu unterschiedlichen Jahreszeiten statt. Somit dürften bei den Ergebnissen des INLA-SPDE-Modells und der Gradientenanalyse neben solchen jahreszeitlichen Effekten auch kurzfristige Fluktuationen der Tiere sowie stochastische Effekte eine große Rolle gespielt haben. Die Unterschiede in den beobachteten Flug-Dichten spiegelten also nicht nur die Auswirkungen des Eingriffs wider, sondern auch Veränderungen bei anderen Faktoren wie dem temporären Nahrungsangebot an bestimmten Lokalitäten – oder auch einfach das individuelle Tauchverhalten zum Zeitpunkt des Überflugs.

Die Analyse tagesgenauer PAM-Daten zu kumulativen Effekten des Windparks über die gesamte Frühjahrs-Bauphase hinweg ergab keine nennenswerte Abnahme der Detektionsraten an den vom Windparkzentrum am weitesten entfernt gelegenen C-POD-Stationen (17,5-22 km; Abnahme nur ca. 6 %). Demgegenüber war die Verringerung der Detektionsraten bei den nähergelegenen Stationen (4,5-10 km, 10-17,5

km) wesentlich stärker (ca. 35-38 %) und bei den Windpark-Stationen (0-4,5 km) am deutlichsten (ca. 60 %). Dies implizierte negative kumulative Baueffekte bis in maximal 18 km Entfernung, die jedoch neben Rammarbeiten auch weitere Ursachen gehabt haben konnten, so auch den Schiffsverkehr. Tatsächlich konnten Schiffseffekte auf Schweinswale mittels stundendatenbasierten GAMs nachgewiesen werden. Über alle Schiffstypen hinweg traten negative Effekte vor allem dann auf, wenn das nächste Schiff sich in höchstens 2 km Distanz zum C-POD befand. Dieses Ergebnis hatte auch dann Bestand, wenn man nur die Schiffssignale im Umfeld der C-PODs in Windparknähe betrachtete. Sogar etwas weiter reichend waren bei den PODs in Windparknähe die Effekte des nächsten DP-fähigen Schiffes (DP-fähig: Schiffe mit automatischen Positionierungssystem durch dauerhaft aktive Thruster). Diese beeinträchtigten die Schweinswale bis in 3 km Entfernung. Offenbar hatte der über einen weiten Frequenzbereich laute Dauerschall DP-fähiger Schiffe einen stärkeren negativen Effekt auf die Anwesenheit und das Verhalten von Schweinswalen im Nahbereich des OWP „Kaskasi II“ als der normale, eher tieferfrequente Schiffsschall. Dies bestätigten auch solche Modelle mit Schall unterschiedlicher Frequenzen als direkten Erklärungsvariablen: Der hochfrequente maximale SPL hatte einen stärkeren Effekt auf die Schweinswal-Detektionsraten als der tieffrequente maximale SPL. Es konnte bei diesen direkten Schallvariablen jedoch nicht unterschieden werden, ob der jeweilige maximale SPL-Wert eher durch Schiffsverkehr oder Rammungen verursacht worden war.

Ebenfalls einen negativen Effekt auf die Schweinswal-Detektionsraten übte die Anzahl aller Schiffe im Umkreis von 5 km um einen C-POD aus, dies vor allem oberhalb eines Wertes von ca. 7-10 Schiffen. Eine höhere Anzahl von Schiffen in dieser Zone erhöhte die mathematische Chance, dass sich eines der Schiffe in weniger als 2 km Distanz zum C-POD befand. Insofern stand dieses Resultat in keinem Widerspruch zum Distanzeffekt. Auch die Analyse der HiDef-Daten in Kombination mit AIS-Daten zeigte einen negativen Effekt der Anzahl an Schiffen auf die Schweinswaldichte im Umkreis von 5 km. Schiffsgeschwindigkeit und -länge spielten dagegen in keinem Modell eine Rolle.

Eine Abstufung der Störungspotenziale verschiedener Rammtypen nach ihrem Effekt auf Schweinswale relativ zu dem anderer Lärmquellen während der Rammphasen für den OWP „Kaskasi II“ im Umfeld der OWEA-Baustellen könnte folgendermaßen aussehen, wobei einige Unsicherheiten bestehen bleiben:

1. Während ungedämmter Impulsrammungen traten Schiffseffekte – und vermutlich auch Vergrämungseffekte – gegenüber den mindestens 15-20 km weit, eventuell aber sogar noch weiter reichenden Effekten des lauten Rammschalls deutlich zurück. Allerdings gab es nur eine einzige solche Referenz-Rammphase, was die Aussagekraft einschränkt.
2. Auch während gedämmter Impulsrammungen (alle Impulsrammungen bzw. solche mit der weniger effektiven Schallschutz-Konfiguration DGBS & HSD oder nur Teilen davon) blieben Schiffs- und Dauerschalleffekte in ihrer Bedeutung offenbar hinter den Effekten der Rammungen zurück. Die Effektreichweiten solcher Rammungen von etwa 7-14 km dominierten vermutlich gleichzeitige Schiffseffekte von max. 3 km Reichweite bei DP-Schiffen mit operierender dynamischer Positionierung (beim OWP „Kaskasi II“: DP2-System). Und auch die Vergrämungsdistanzen blieben mutmaßlich deutlich hinter den Effektreichweiten der Rammungen zurück.
3. Während der sehr gut gedämmten Impulsrammungen mit der Schallschutz-Konfiguration VGBS, GBS & HSD konnten Vertreibungseffekte durch Schiffe und Dauerschall prinzipiell bereits eine Rolle gespielt haben, denn das GAM zeigte hinsichtlich der offenbar gut mitigierten Rammefekte ein sehr heterogenes Bild, das mangels einer klar erkennbaren Effektreichweite jedoch schwer zu interpretieren war. Auch die Vergrämungseffekte lagen bei besonders guter Schalldämmung bei einzelnen Rammungen möglicherweise bereits im Bereich der Stärke der Rammefekte.
4. Die mittels PAM festgestellten Effektreichweiten der Vibrationsrammungen von ca. 2-6 km lagen mutmaßlich im Bereich der Effektreichweiten von Schiffs- und Dauerschall sowie der hier angewandten Vergrämungsmethode. Jedoch lag bezüglich der Vibrationsrammungen nur ein relativ kleiner PAM-Datensatz vor, was die Allgemeingültigkeit dieser Aussage einschränkt. Weiterhin waren die Schallemissionen der einzelnen Vibrationsrammungen recht unterschiedlich. Zudem zeigte das INLA-SPDE-Modell (bei

ungünstigerer Datenlage als beim PAM) Effektreichweiten von 12-14 km, was wiederum Reichweiten vergleichbar mit denen von Impulsrammungen mit der Schallschutz-Konfiguration DGBS & HSD bedeuten würde. Zwischen den beiden hierfür herangezogenen aufeinanderfolgenden Vibrationsrammungen lag tatsächlich eine Impulsrammphase, die für die festgestellte Effektreichweite maßgeblich gewesen sein konnte. Es ergab sich also eine beträchtliche Unsicherheit hinsichtlich der wahrscheinlichsten Effektreichweite von Vibrationsrammungen.

Die obige Abstufung galt für die Zeit während der Rammarbeiten. In der halben Stunde vor den Rammungen war die Vergrämung die wichtigste Lärmquelle. In der Zeit von 10-20 h vor Rammbeginn bis zum Start der Vergrämung war der Schiffsverkehr die bedeutsamste Störungsquelle. Hierbei spielte die Distanz zum nächsten Schiff die wichtigste Rolle. DP-fähige Schiffe beeinträchtigten Schweinswale in einem Umfeld von bis zu 3 km, während nicht weiter nach Typ differenzierte Schiffe im Gebiet negative Effekte immerhin noch in bis zu 2 km Distanz verursachten. Einen Effekt auf die Schweinswale im UG hatte offenbar auch die Anzahl an Schiffen in einem Umkreis von 5 km um einen C-POD (PAM) bzw. um ein Dichteraster-Rechteck von 1 km Länge (HiDef und AIS-Daten). Dies konnte jedoch auch damit zusammenhängen, dass bei einer erhöhten Schiffsdichte auch die Distanz des nächstgelegenen Schiffes im Mittel geringer und letztere die eigentliche Vertreibungsursache war. Schiffsgeschwindigkeit und -länge spielten dagegen in den Modellen keine Rolle.

Hinsichtlich der Auswirkungen von Vibrationsrammungen auf Schweinswale lieferte diese Studie erste Hinweise; allerdings lag noch keine ausreichende Datenbasis vor, um weitreichende Schlussfolgerungen zu ziehen und konkrete Handlungsempfehlungen auszusprechen. Hierfür wären weitere Untersuchungen in OWPs mit ausschließlich einvibrierten Fundamenten nötig.

Besser war hingegen die Datenlage zu Dauerschall- und Schiffseffekten. In rammungsfreien Zeiten ist innerhalb von OWPs der Schiffsverkehr offenbar der wichtigste Störfaktor. Das legt u.a. das INLA-SPDE-Modell der Basisphase nahe, in deren Verlauf im gesamten Cluster „Nördlich Helgoland“ keine OWEA installiert wurde, aber dennoch viele Schiffe zu verschiedenen Zwecken präsent waren. Zu den Zeiten der HiDef-Flüge aus dieser Periode waren im Areal des OWP „Kaskasi II“ und in den umliegenden Windparks deutlich weniger Schweinswale unterwegs als in deren Umgebung. Es ist daher sinnvoll, das erhöhte Schiffsaufkommen in Gebieten mit Schweinswalpräsenz im Blick zu haben, wenn es um die Reduzierung von Störungsquellen für diese Tiere geht. Der Baustellen-Schiffsverkehr sollte in Zukunft bei der Bewertung der Störwirkungen von Gründungsarbeiten folglich stärker berücksichtigt werden. Hier kann als ein Ansatz zur Verringerung von Störungen die Empfehlung ausgesprochen werden, dass Schiffe mit DP-System dieses nur so lange wie unbedingt nötig aktivieren. Da das DP-System anteilmäßig mehr hochfrequenten Schall abstrahlt als Schiffsturbinen im Normalbetrieb und Schweinswale gerade hochfrequenten Schall besser hören, sind die Auswirkungen auf Schweinswale hier gravierender. Dies zeigte sich in den größeren Störungsradien der entsprechend ausgestatteten Schiffe. Ein weiterer, bereits teilweise praktizierter Ansatz könnte in einer zeitlichen Konzentration von Windparkarbeiten (Bau und Betrieb) auf Perioden mit geringerem Schweinswalaufkommen liegen. Durch solche oder ähnliche Maßnahmen ließen sich in Zukunft weitere Verbesserungen beim Schutz der Meeressäuger in der Umgebung von Offshore-Bauarbeiten erzielen.

7. Anhang

7.1 Monatlicher AIS-Schiffsverkehr im UG

7.1.1 Linienvverlauf aller Schiffe mit AIS-Signal

Der Schiffsverkehr im UG wird mittels AIS-Karten der einzelnen Erfassungsmonate dargestellt (Quelle: ha-base.no), welche die Veränderungen im Verlauf des Untersuchungszeitraums visualisieren (Abbildung 73 bis Abbildung 84). Eingetragen sind zusätzlich die 17 C-POD-Stationen.

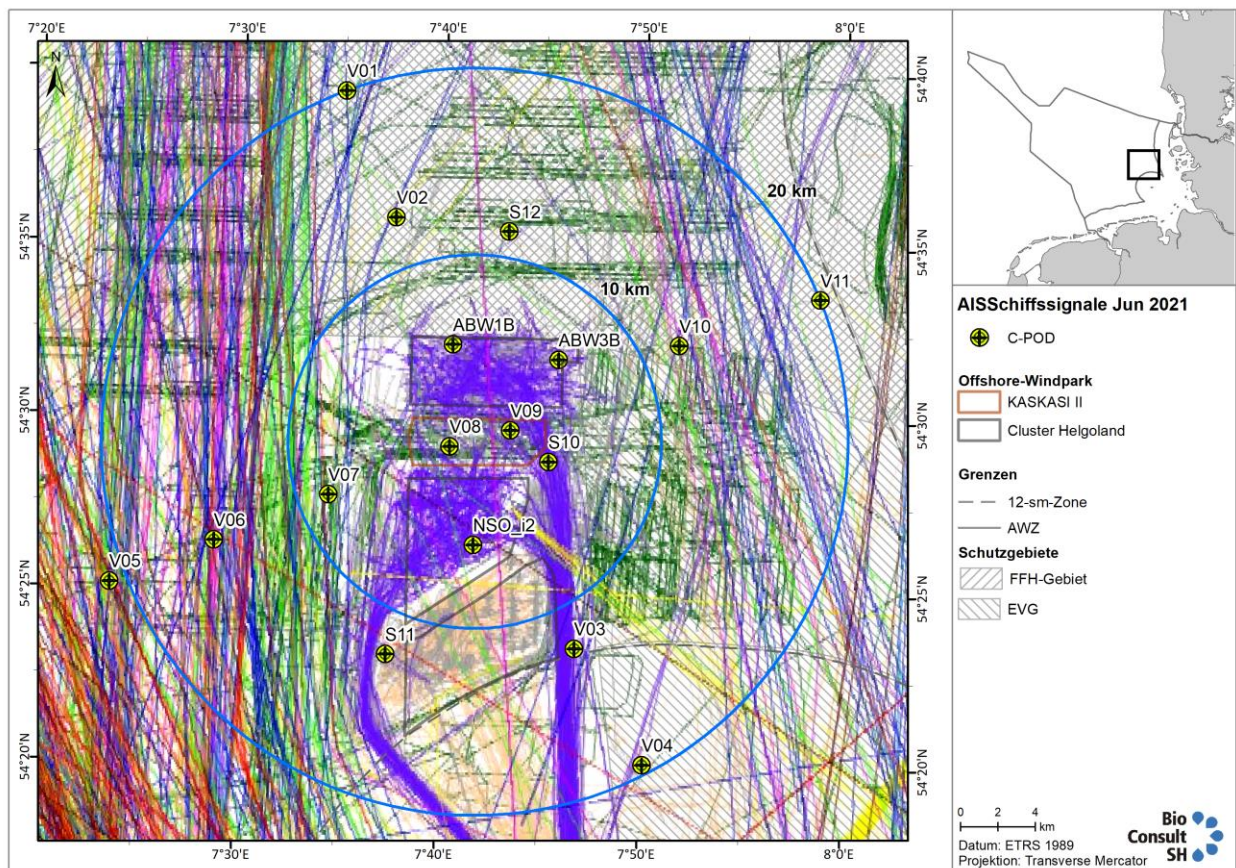


Abbildung 73: Karten des Schiffsverkehrs im Juni 2021 im UG (gemäß AIS-Daten) mit Position der 17 C-POD-Stationen im UG.

VISSKA – Abschlussbericht AP7

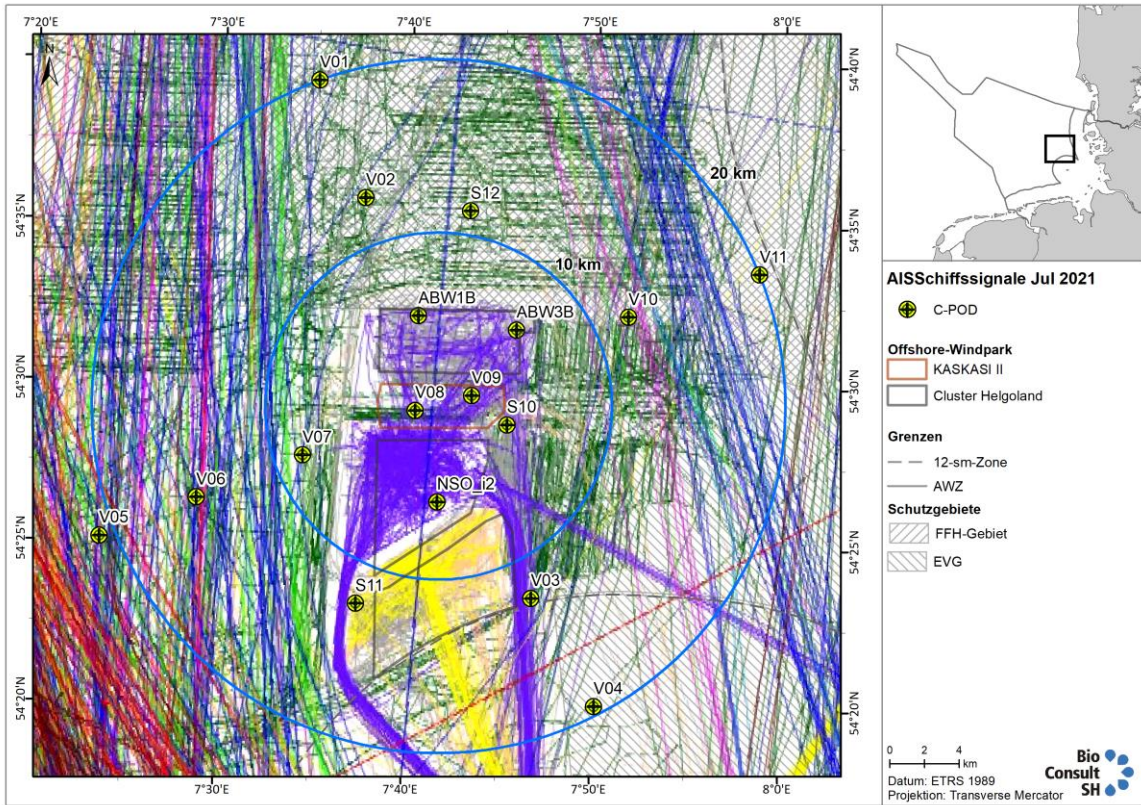


Abbildung 74: Karten des Schiffsverkehrs im Juli 2021 im UG (gemäß AIS-Daten).

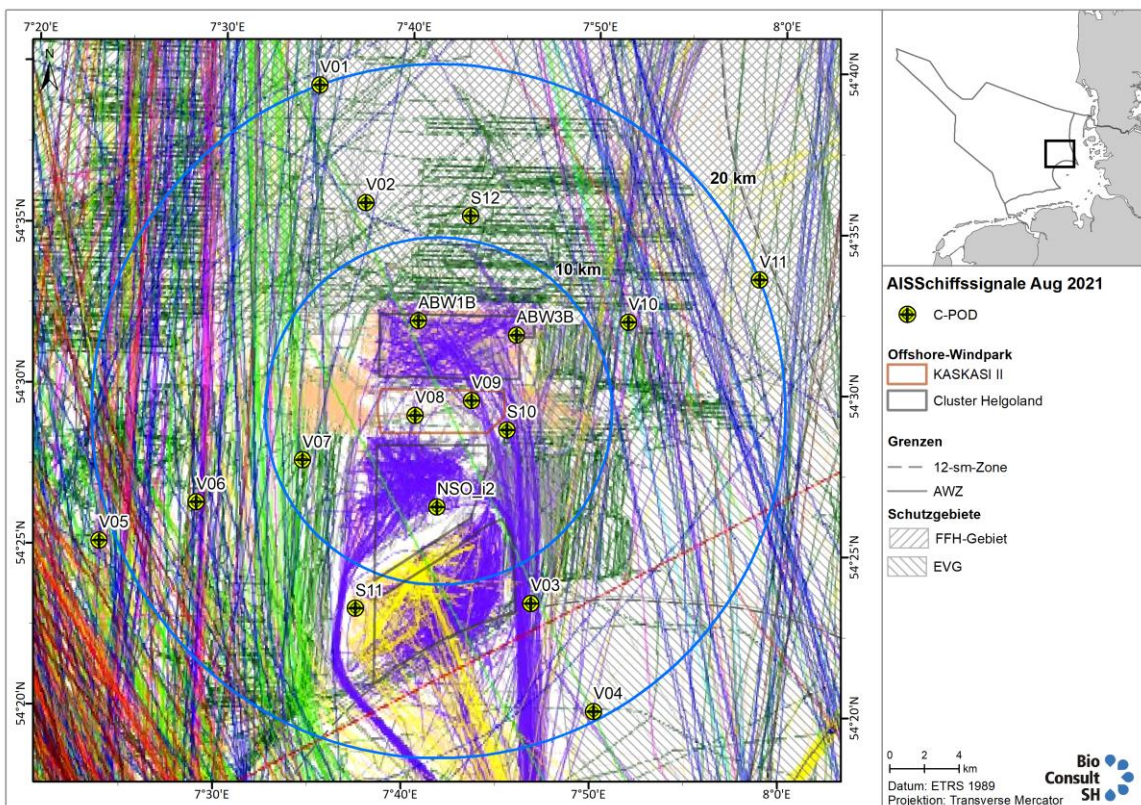


Abbildung 75: Karten des Schiffsverkehrs im August 2021 im UG (gemäß AIS-Daten).

VISSKA – Abschlussbericht AP7

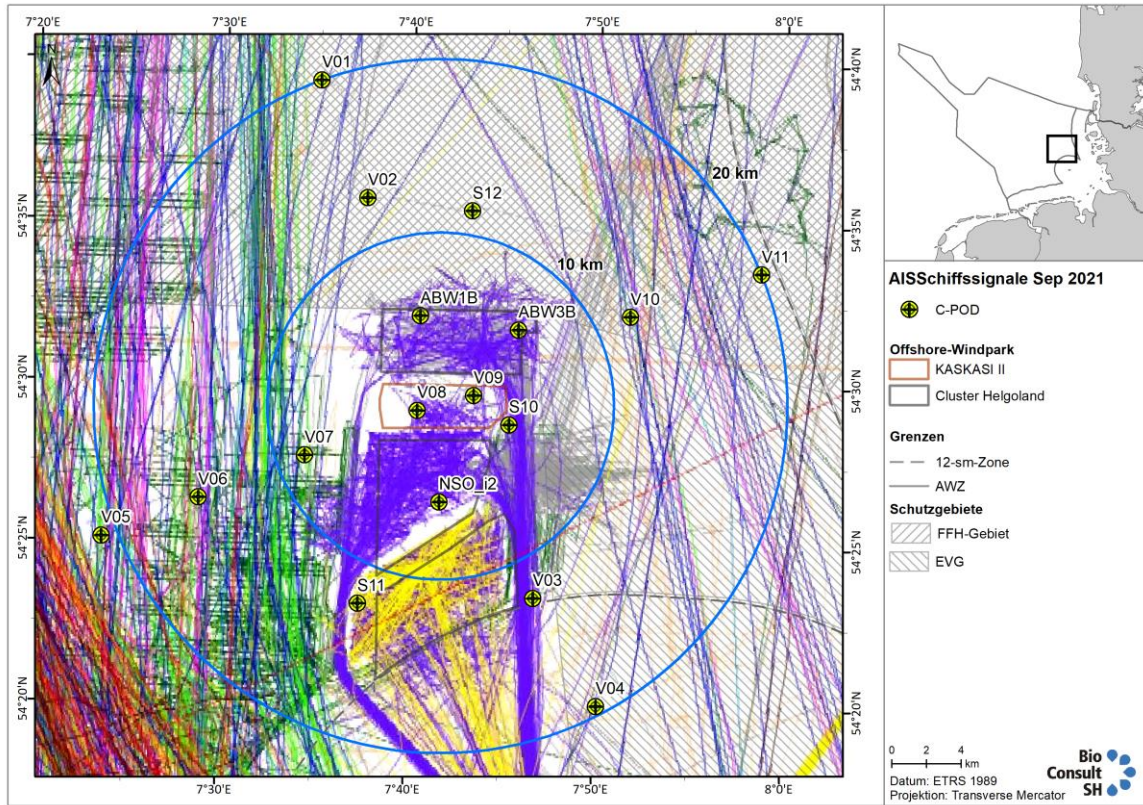


Abbildung 76: Karten des Schiffsverkehrs im September 2021 im UG (gemäß AIS-Daten).

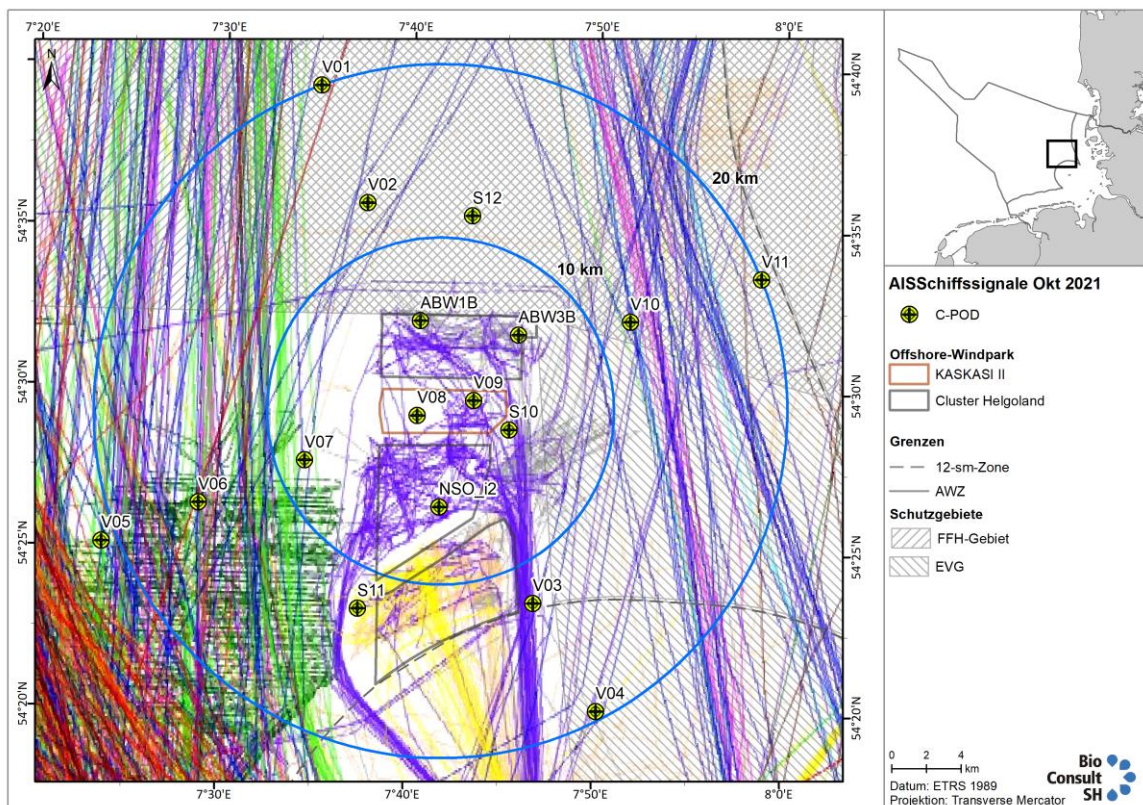


Abbildung 77: Karten des Schiffsverkehrs im Oktober 2021 im UG (gemäß AIS-Daten).

VISSKA – Abschlussbericht AP7

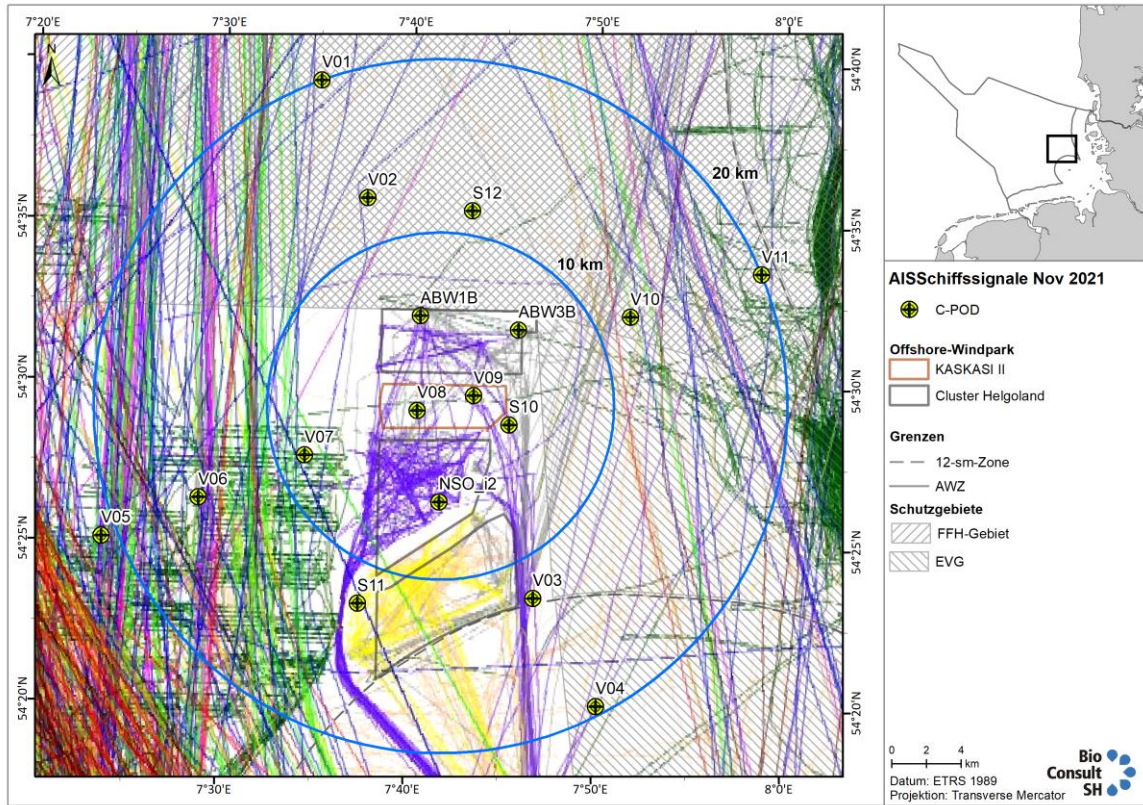


Abbildung 78: Karten des Schiffsverkehrs im November 2021 im UG (gemäß AIS-Daten).

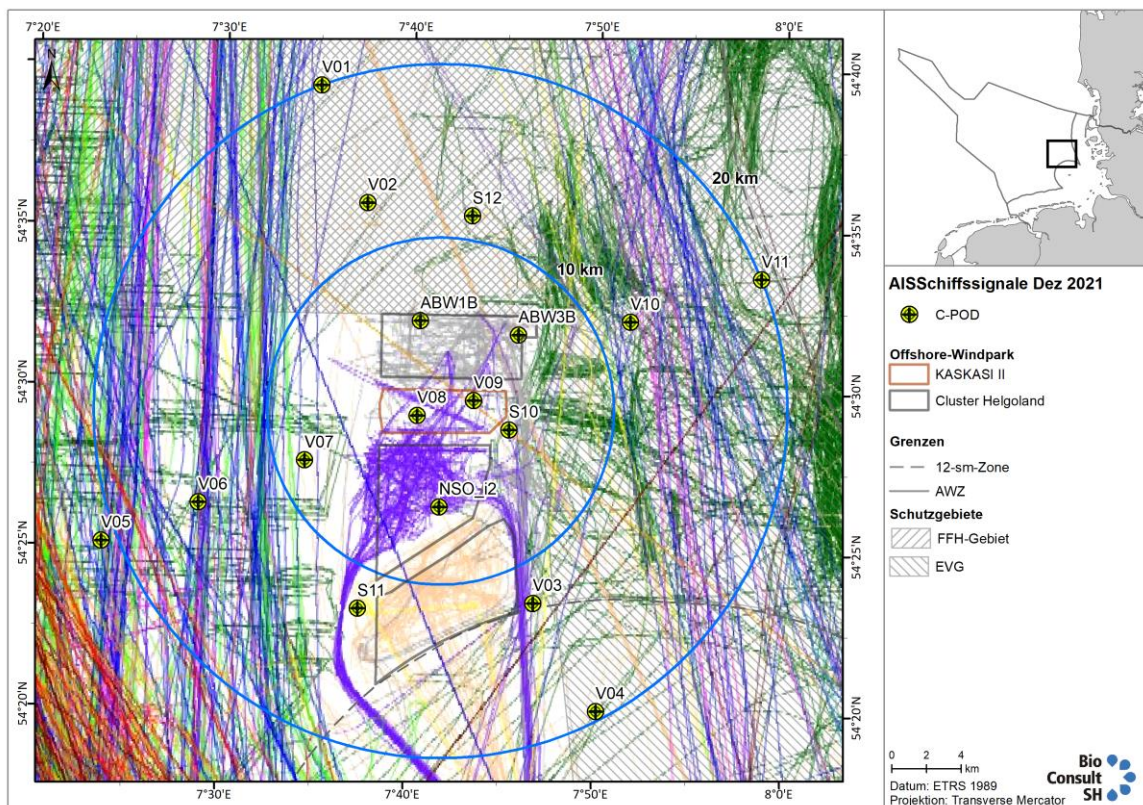


Abbildung 79: Karten des Schiffsverkehrs im Dezember 2021 im UG (gemäß AIS-Daten).

VISSKA – Abschlussbericht AP7

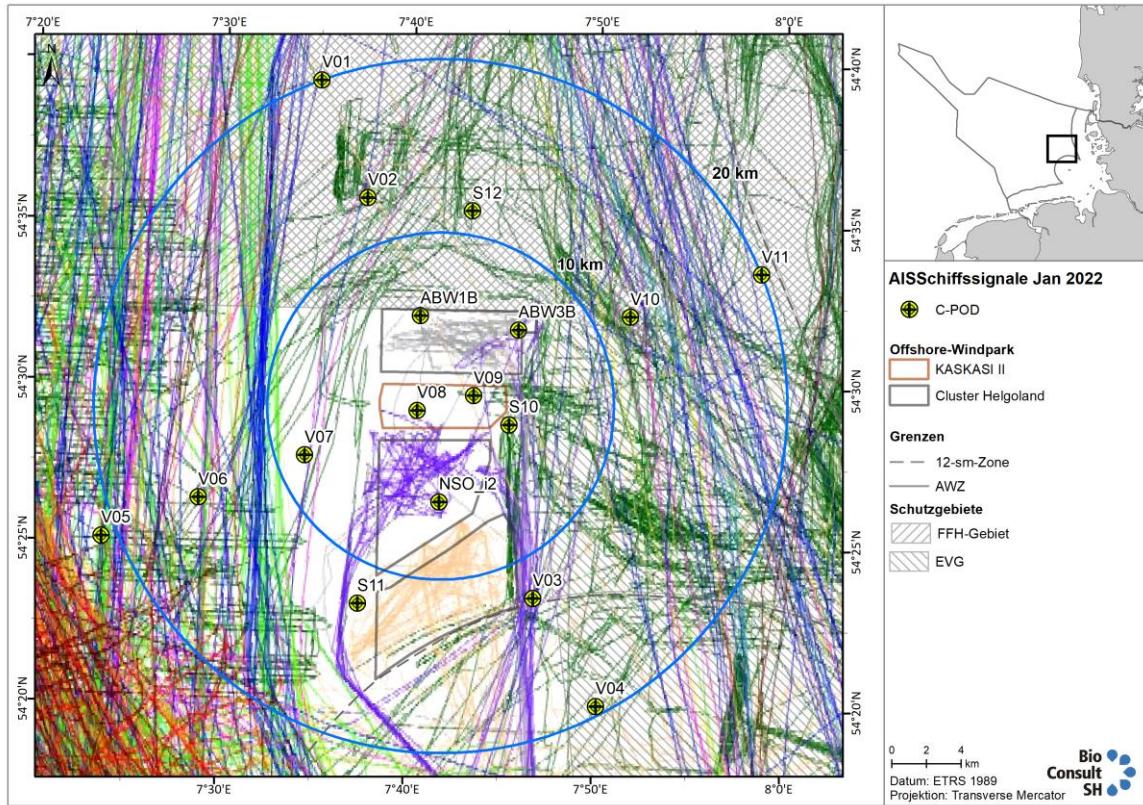


Abbildung 80: Karten des Schiffsverkehrs im Januar 2022 im UG (gemäß AIS-Daten).

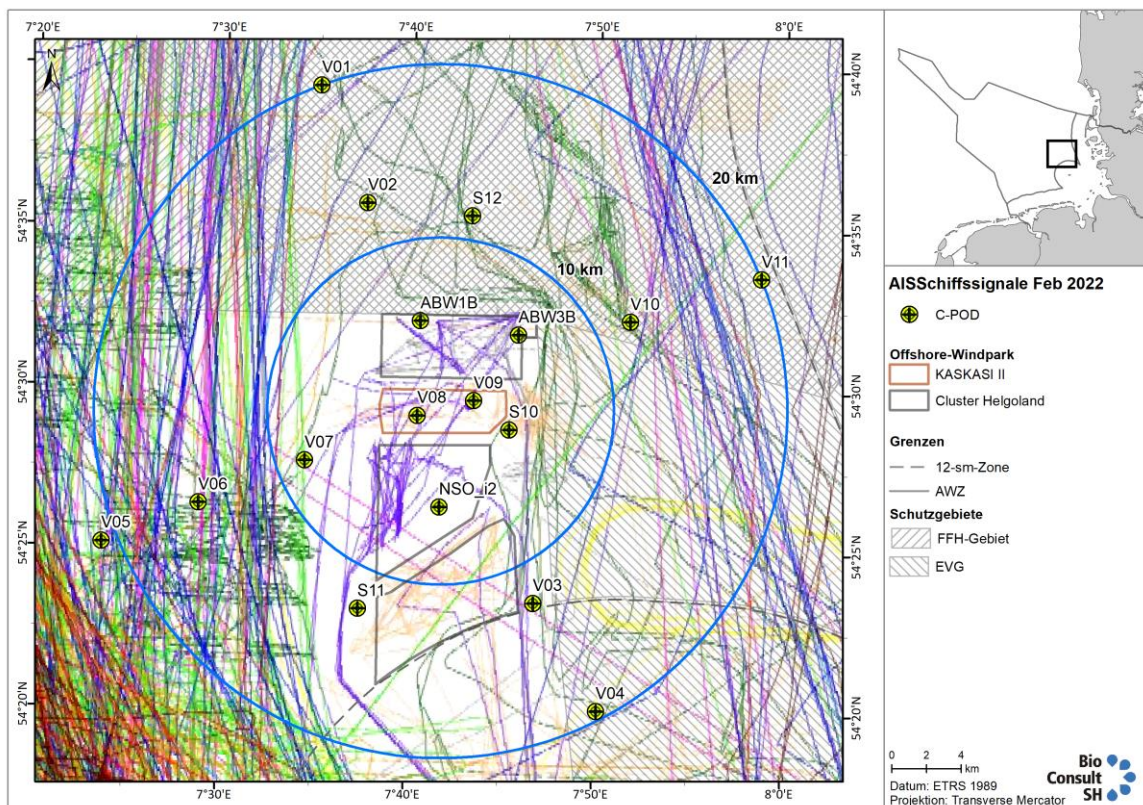


Abbildung 81: Karten des Schiffsverkehrs im Februar 2022 im UG (gemäß AIS-Daten).

VISSKA – Abschlussbericht AP7

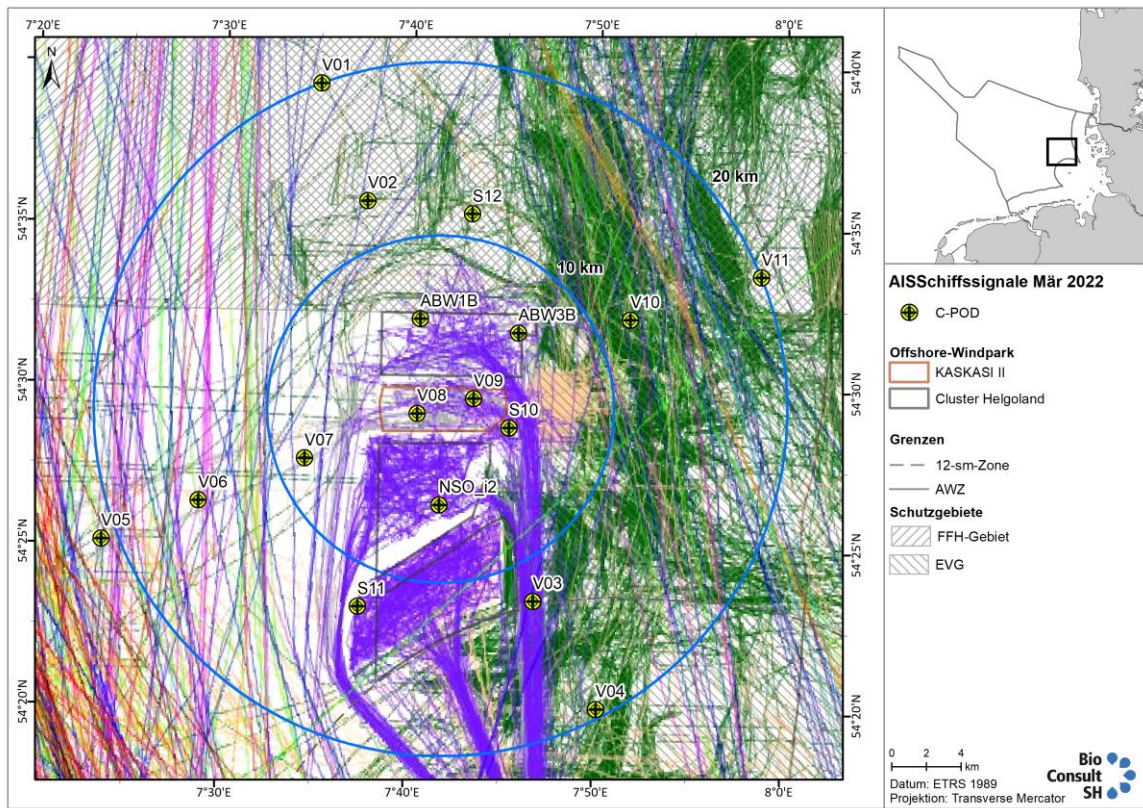


Abbildung 82: Karten des Schiffsverkehrs im März 2022 im UG (gemäß AIS-Daten).

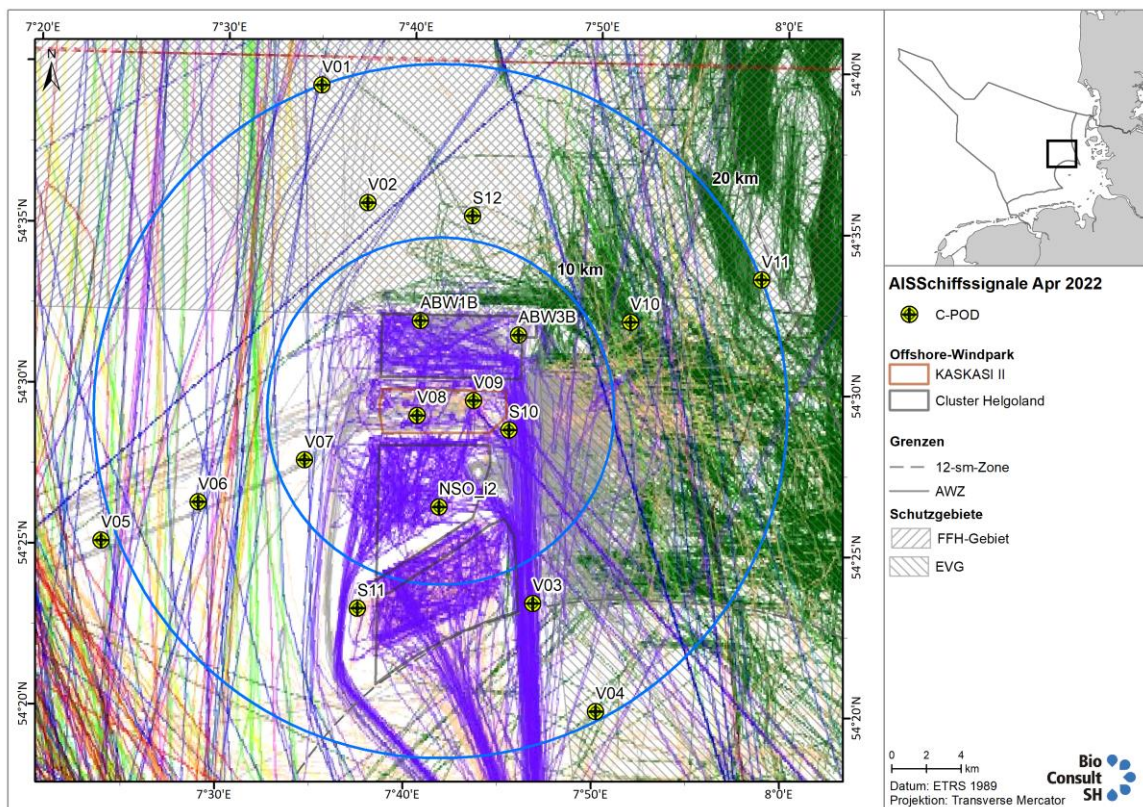


Abbildung 83: Karten des Schiffsverkehrs im April 2022 im UG (gemäß AIS-Daten).

VISSKA – Abschlussbericht AP7

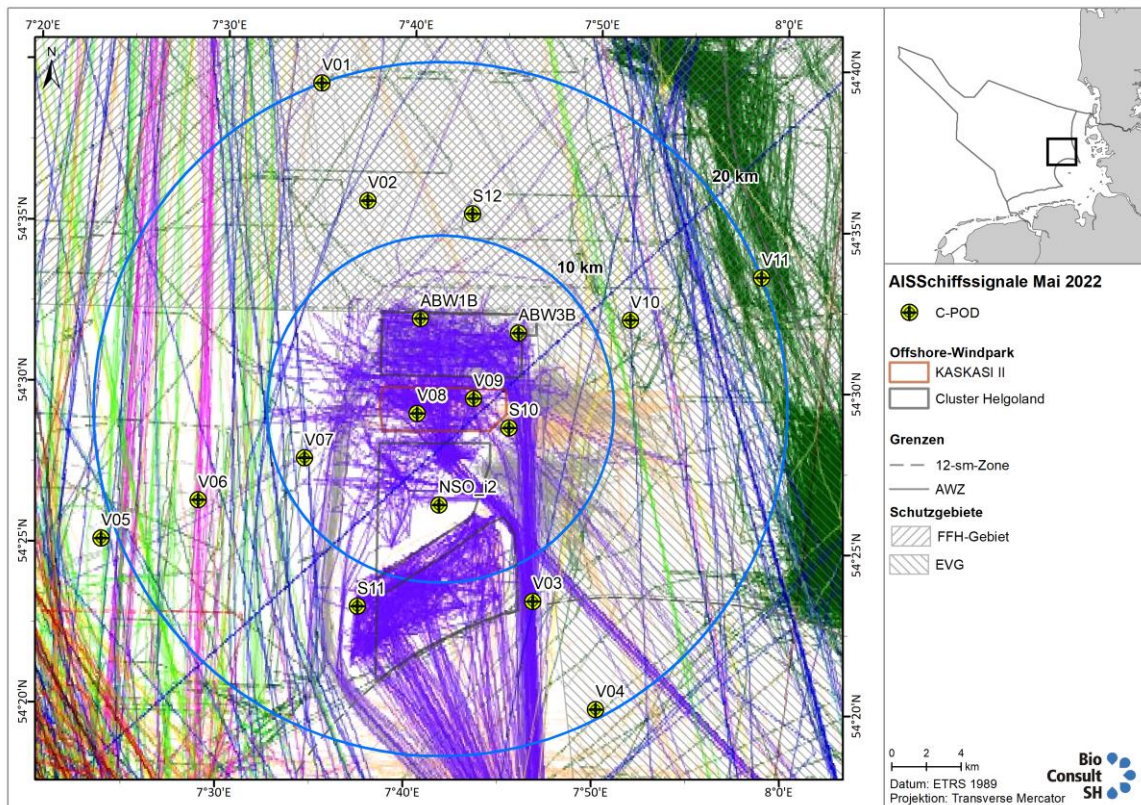


Abbildung 84: Karten des Schiffsverkehrs im Mai 2022 im UG (gemäß AIS-Daten).

Oljetankere	Passasjer
Oljetankere	Passasjer
Kjemikalie-/produkttankere	Offshore supply skip
Gasstankere	Offshore supply skip
Bulkskip	Andre offshore service skip
Bulkskip	Andre offshore service skip
Stykkgodsskip	Andre aktiviteter
Konteinerskip	Andre aktiviteter
Konteinerskip	Fiskefartøy
Ro Ro last	Fiskefartøy
Ro Ro last	Alle skipstyper
Kjøle-/fryseskip	Alle skipstyper

Abbildung 85: Legende für die AIS-Karten (Quelle: havbase.no).

7.1.2 AIS-Schiffsdichte: Mittelwert der Monatssummen pro Gitterzelle

Um den Verlauf der Schiffsdichte während des Untersuchungszeitraums zu dokumentieren, wurden die AIS-Darstellungen aus der vorigen Sektion in Schiffsdichten pro Gitterzelle (250 m mal 250 m) umgewandelt. Die Darstellungen zeigen Zweimonats-Zeiträume (hier bereits ab Mai 2021), wobei der Gitterzellenwert dem Mittelwert der beiden Monatssummen an Schiffen in der entsprechenden Gitterzelle entspricht. Die ersten fünf Karten zeigen die Zweimonats-Zeiträume der Basisphase, die letzte Karte den Zeitraum der Frühjahrs-Bauphase. Ein Zeitraum von zwei Monaten wurde gewählt, weil die Frühjahrs-Bauphase diese Länge aufwies und so Vergleiche mit dieser intuitiv besser verständlich waren.

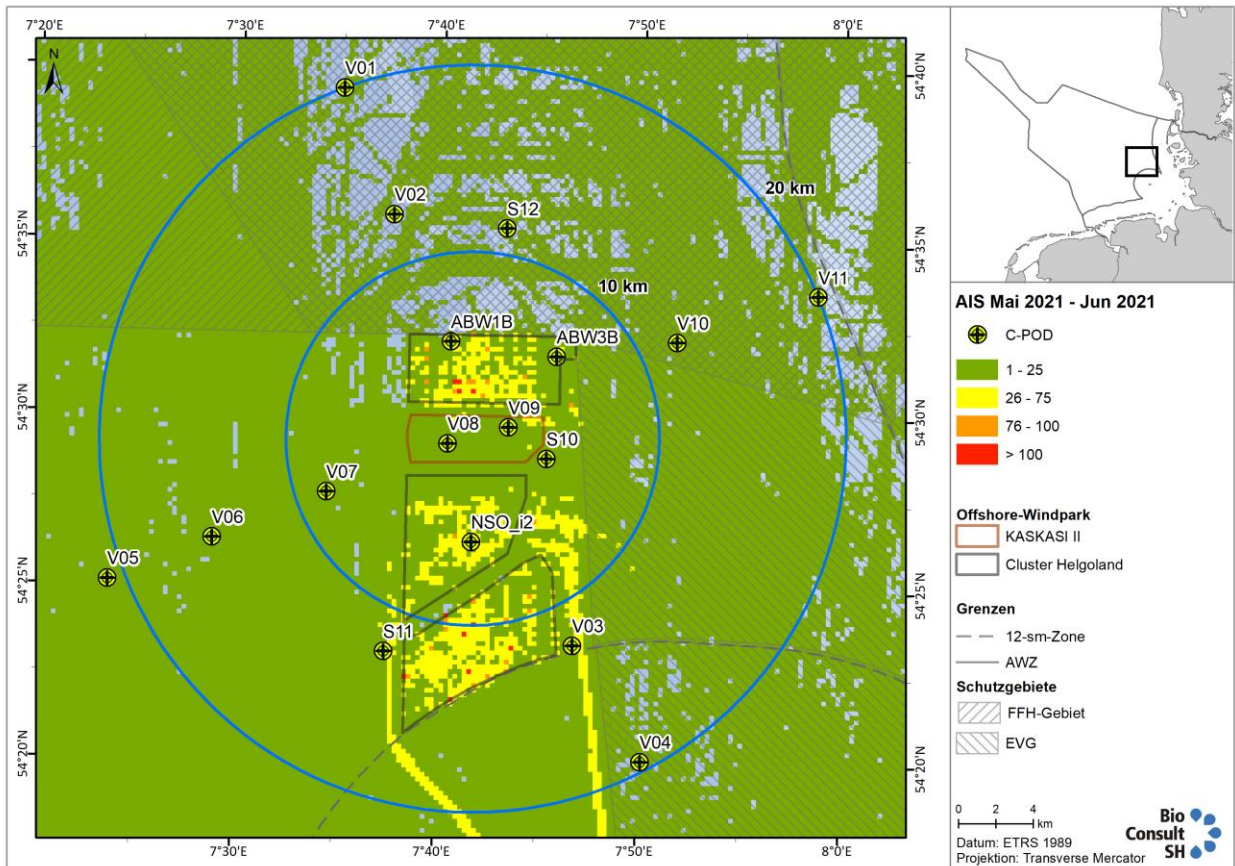


Abbildung 86: Mittelwert der Monatssummen an Schiffen pro Gitterzelle im UG während der Basisphase (Mai bis Juni 2021).

VISSKA – Abschlussbericht AP7

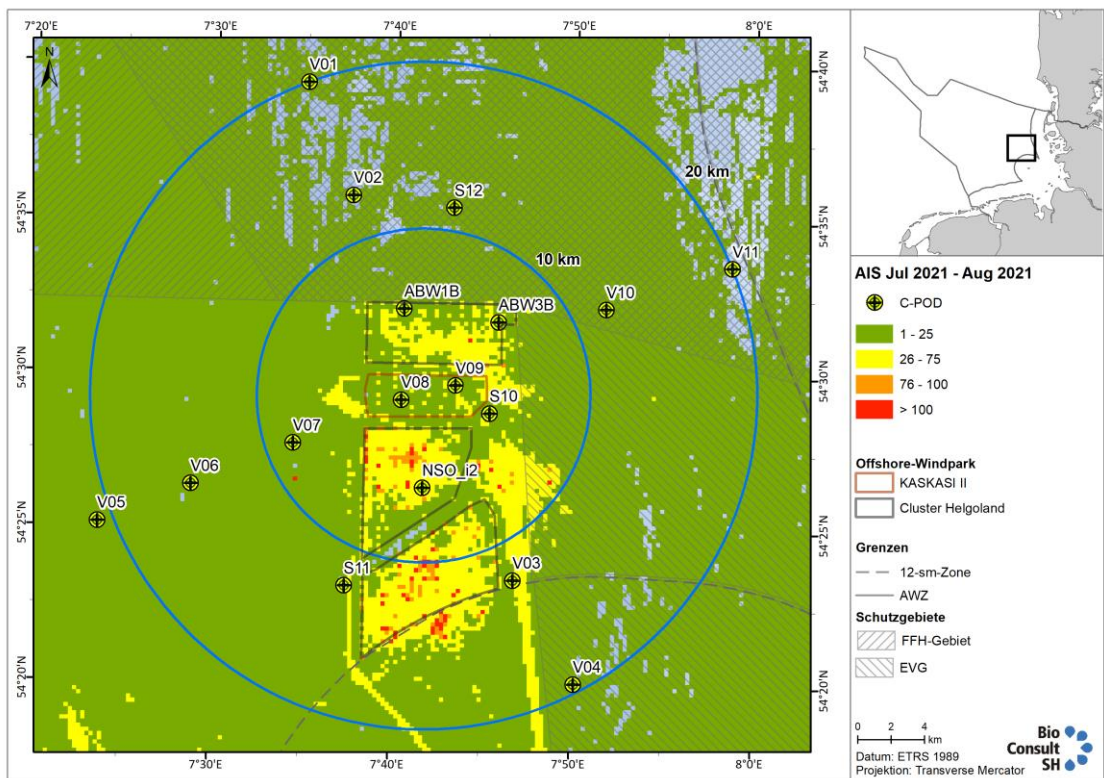


Abbildung 87: Mittelwert der Monatssummen an Schiffen pro Gitterzelle im UG während der Basisphase (Juli bis August 2021).

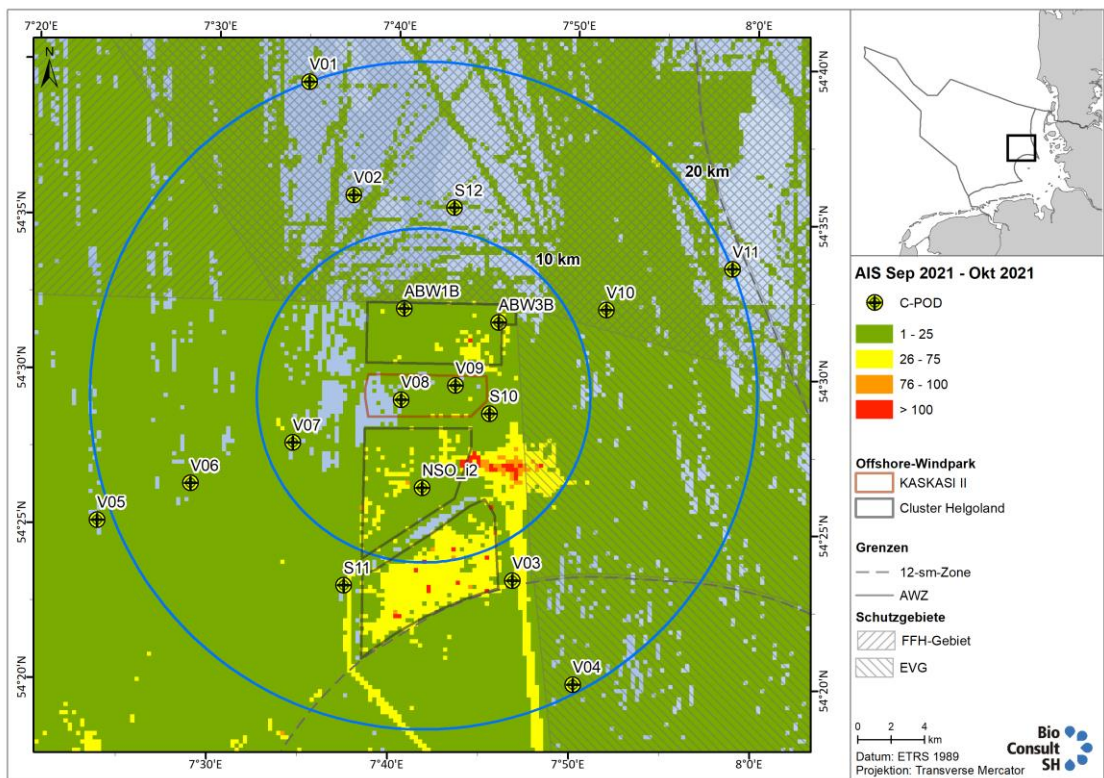


Abbildung 88: Mittelwert der Monatssummen an Schiffen pro Gitterzelle im UG während der Basisphase (September bis Oktober 2021).

VISSKA – Abschlussbericht AP7

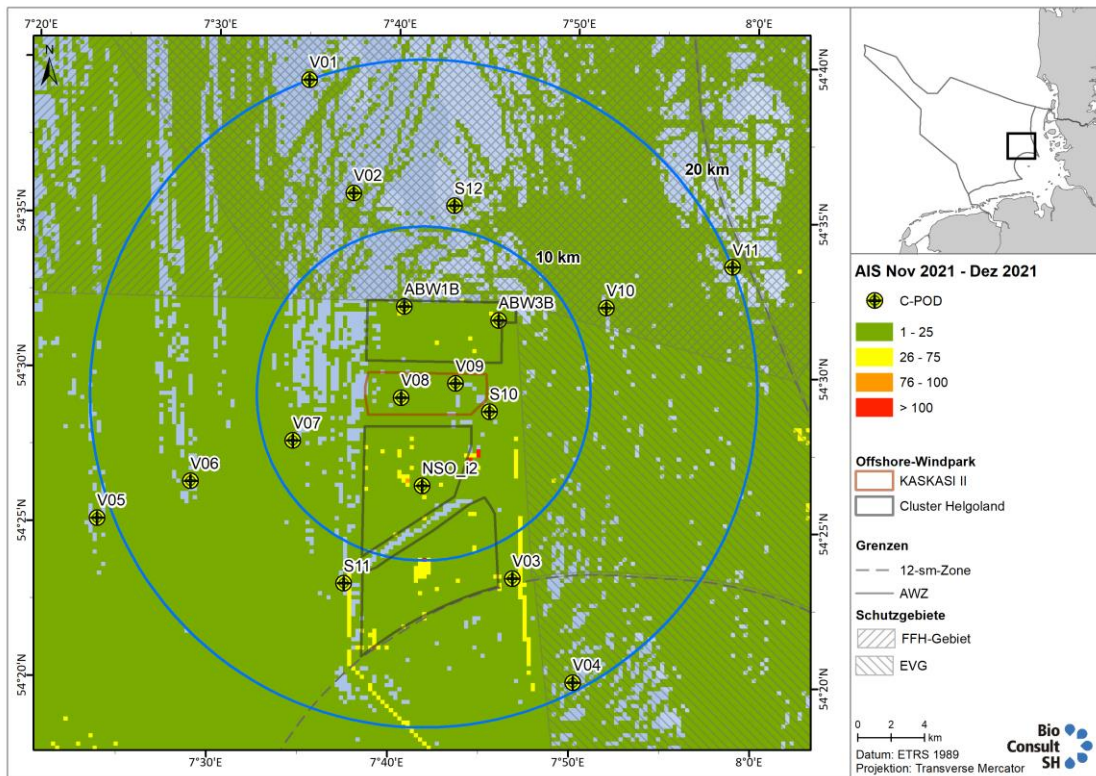


Abbildung 89: Mittelwert der Monatssummen an Schiffen pro Gitterzelle im UG während der Basisphase (November bis Dezember 2021).

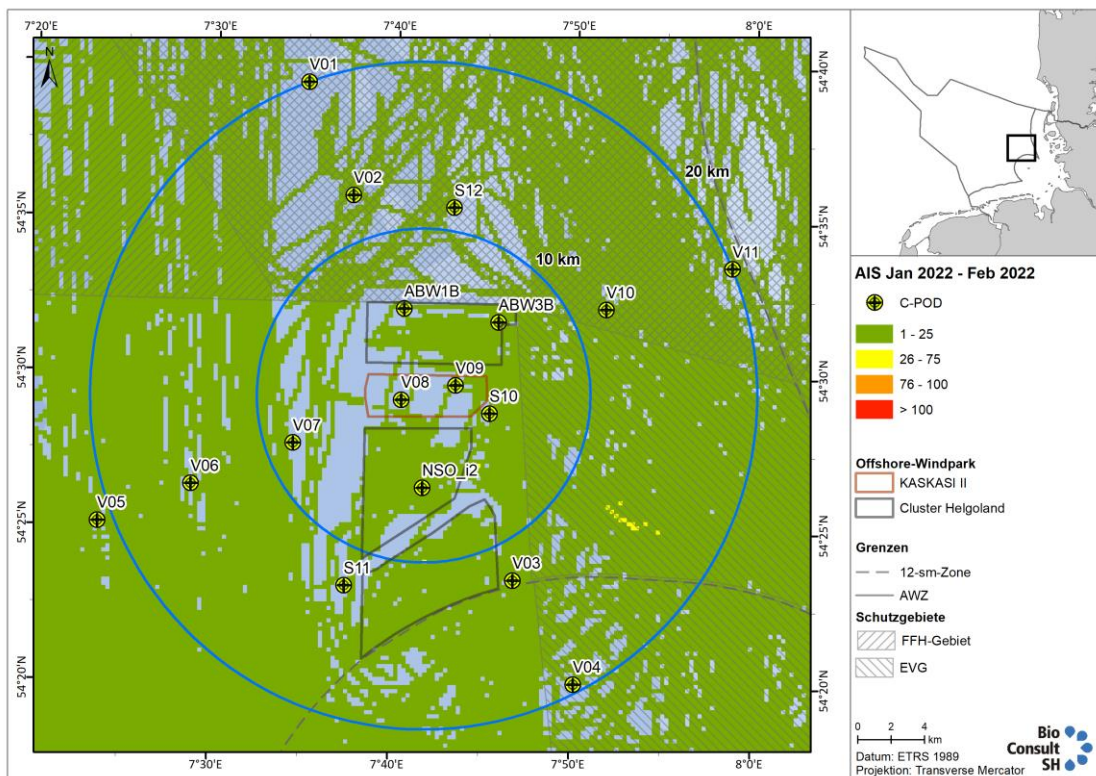


Abbildung 90: Mittelwert der Monatssummen an Schiffen pro Gitterzelle im UG während der Basisphase (Januar bis Februar 2022).

VISSKA – Abschlussbericht AP7

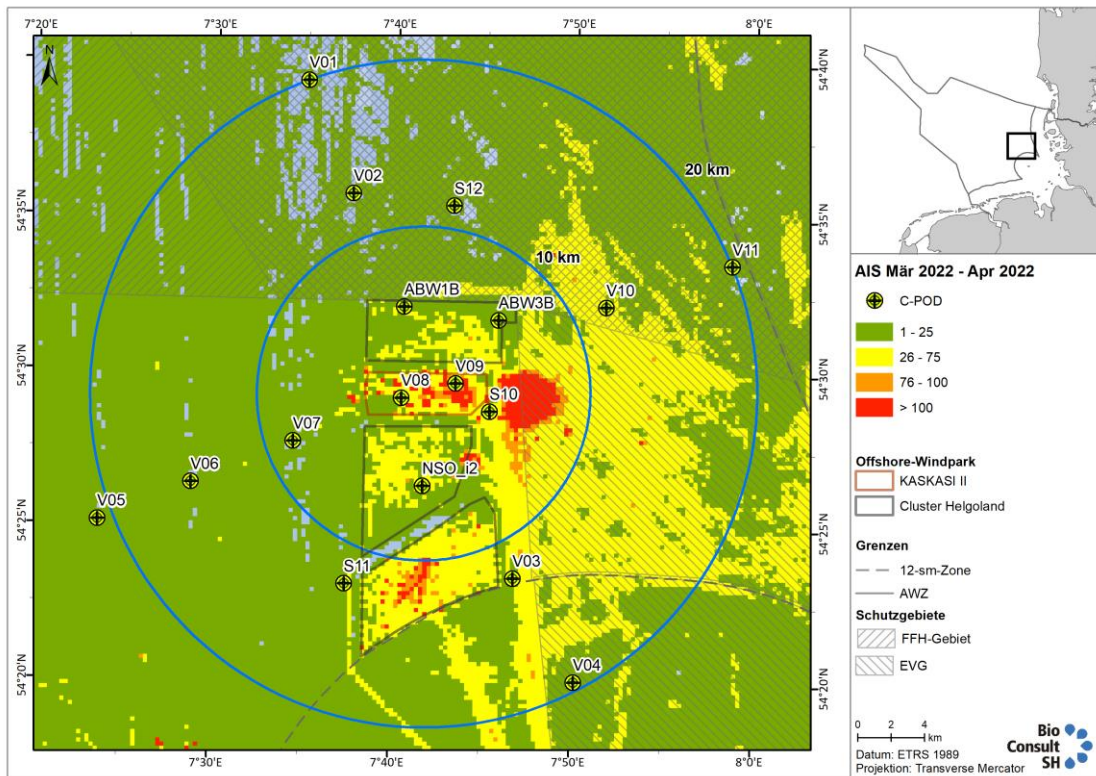


Abbildung 91: Mittelwert der Monatssummen an Schiffen pro Gitterzelle im UG während der Bauphase (März bis April 2022).

7.2 HiDef-Flüge

7.2.1 Dichtekarten der Schweinswale im UG

7.2.1.1 Einzelflüge

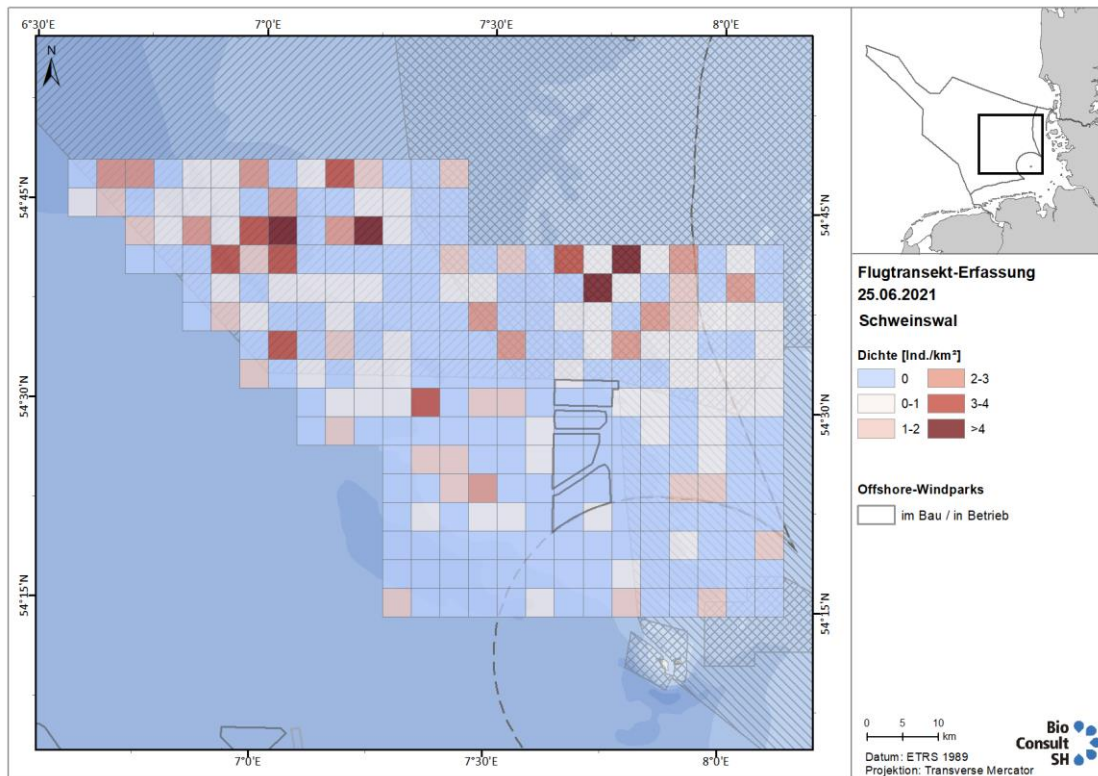


Abbildung 92: Schweinswal-Dichten während des HiDef-Fluges vom 25.06.2021.

VISSKA – Abschlussbericht AP7

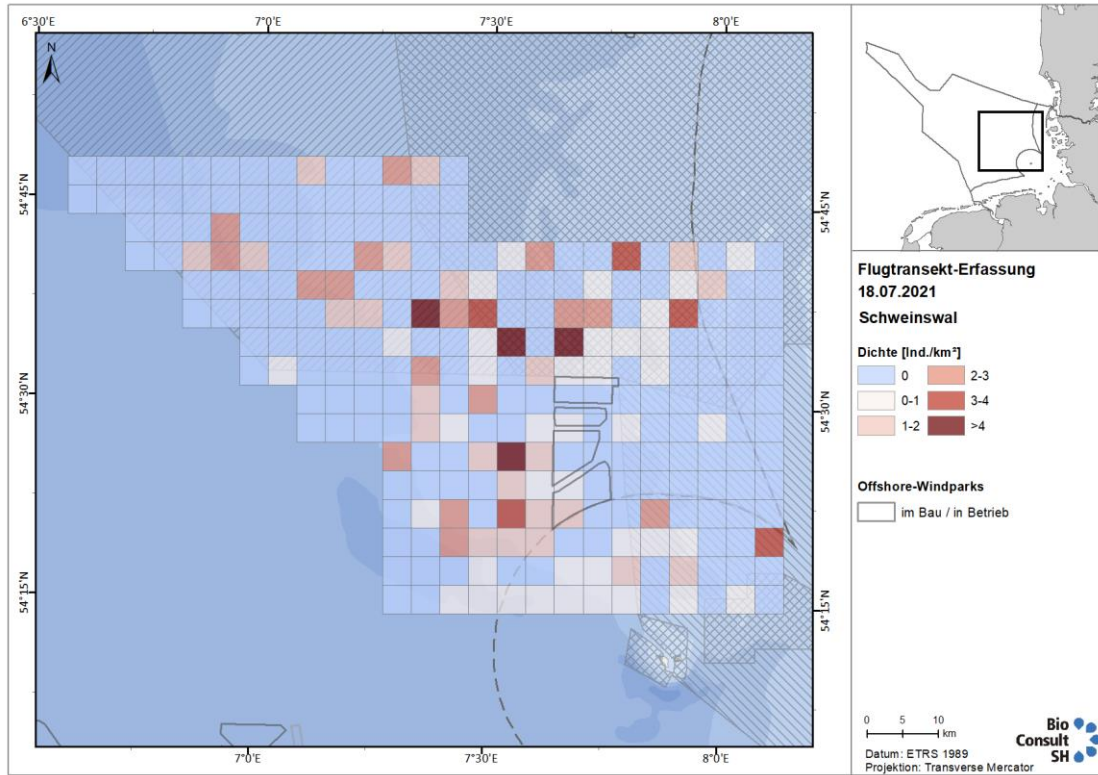


Abbildung 93: Schweinswal-Dichten während des HiDef-Fluges vom 18.07.2021.

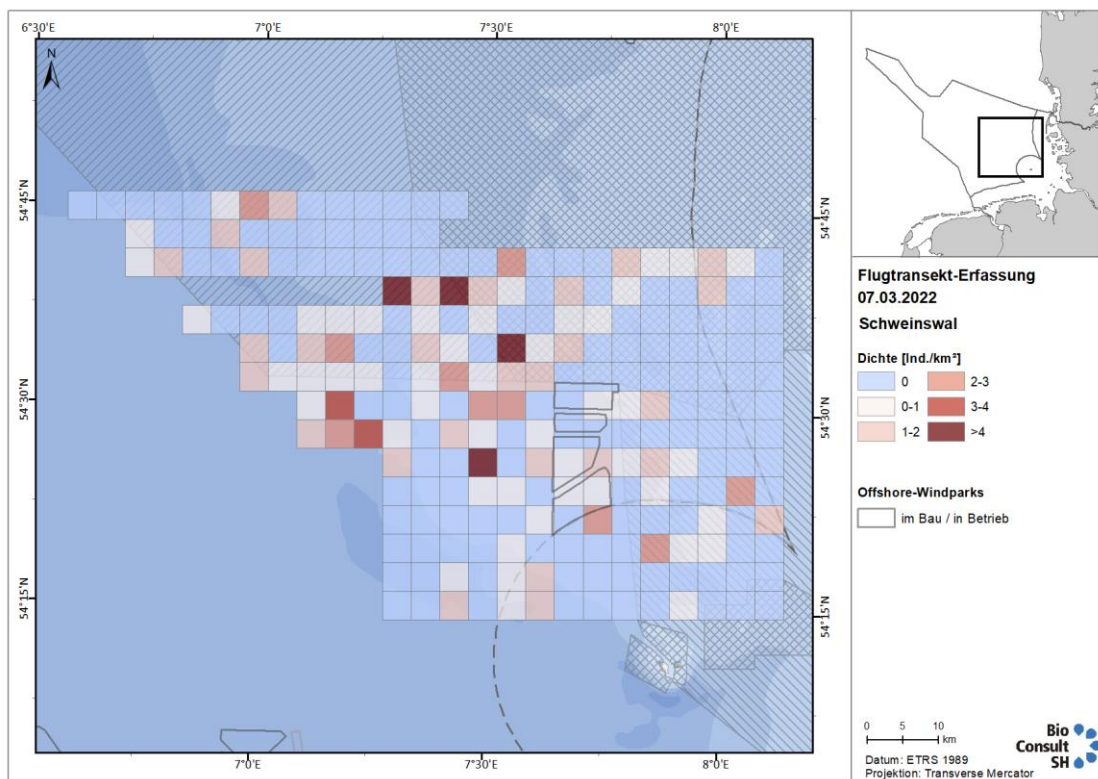


Abbildung 94: Schweinswal-Dichten während des HiDef-Fluges vom 07.03.2022.

VISSKA – Abschlussbericht AP7

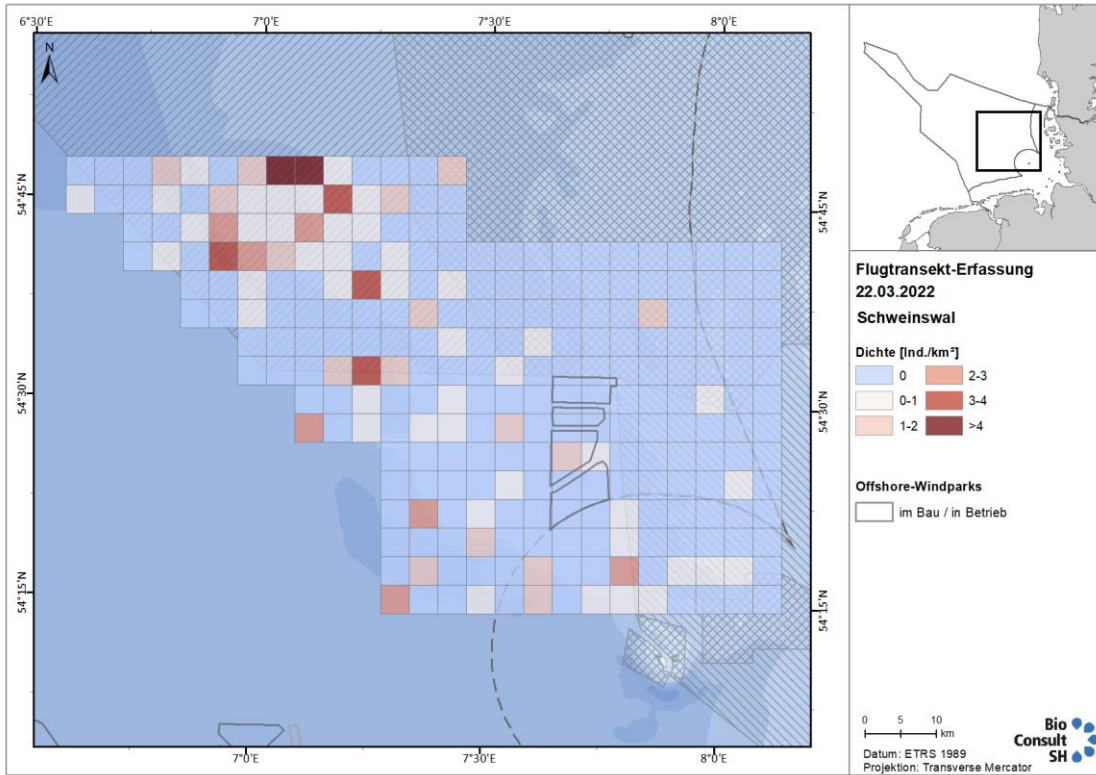


Abbildung 95: Schweinswal-Dichten während des HiDef-Fluges vom 22.03.2022.

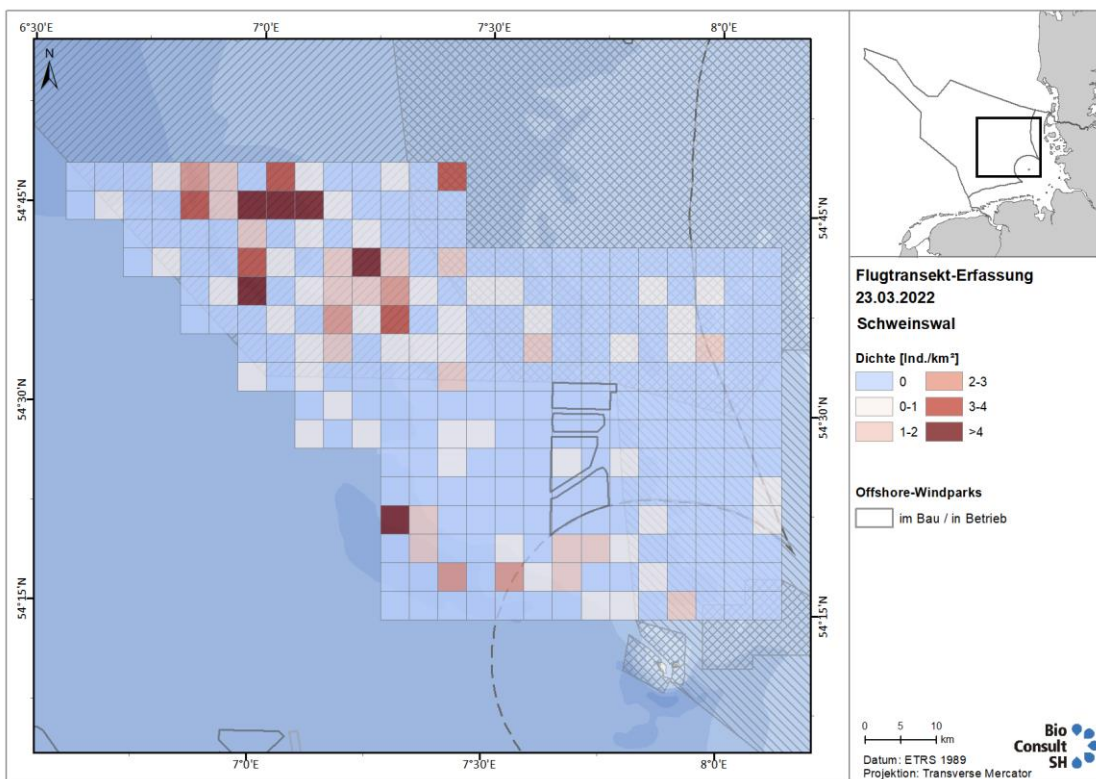


Abbildung 96: Schweinswal-Dichten während des HiDef-Fluges vom 23.03.2022.

7.2.1.2 Basisphase und Bauphase

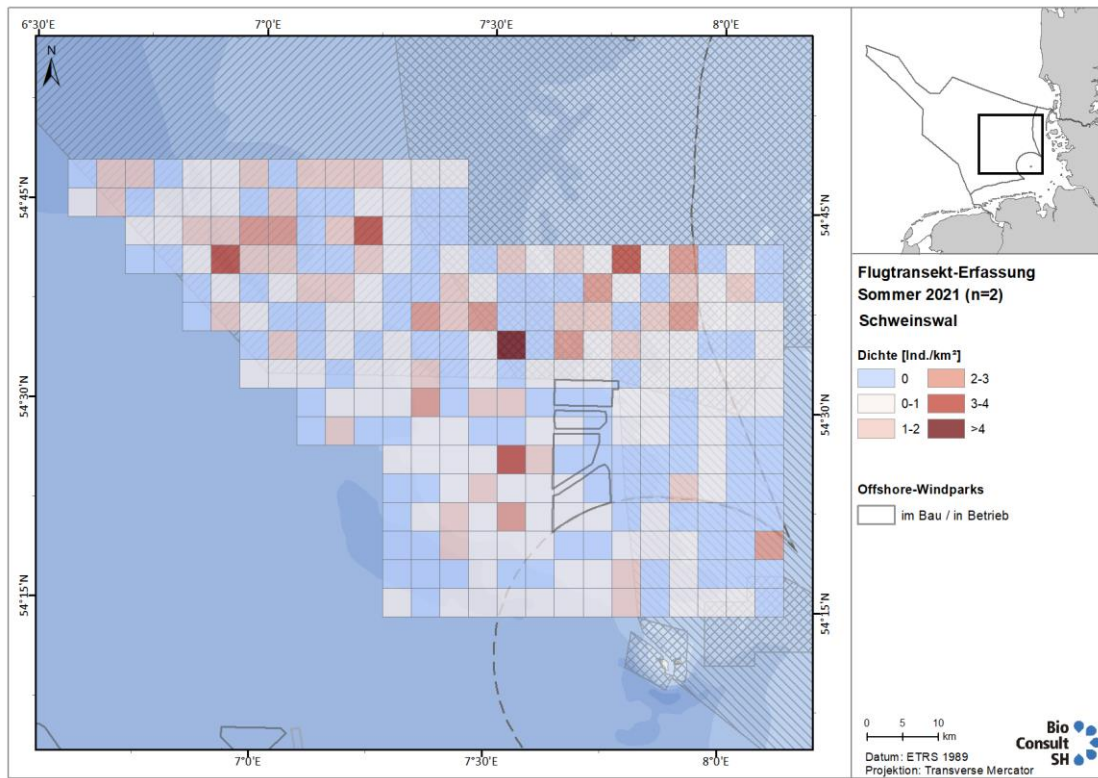


Abbildung 97: Schweinswal-Dichten während der Basisphase im Sommer 2021.

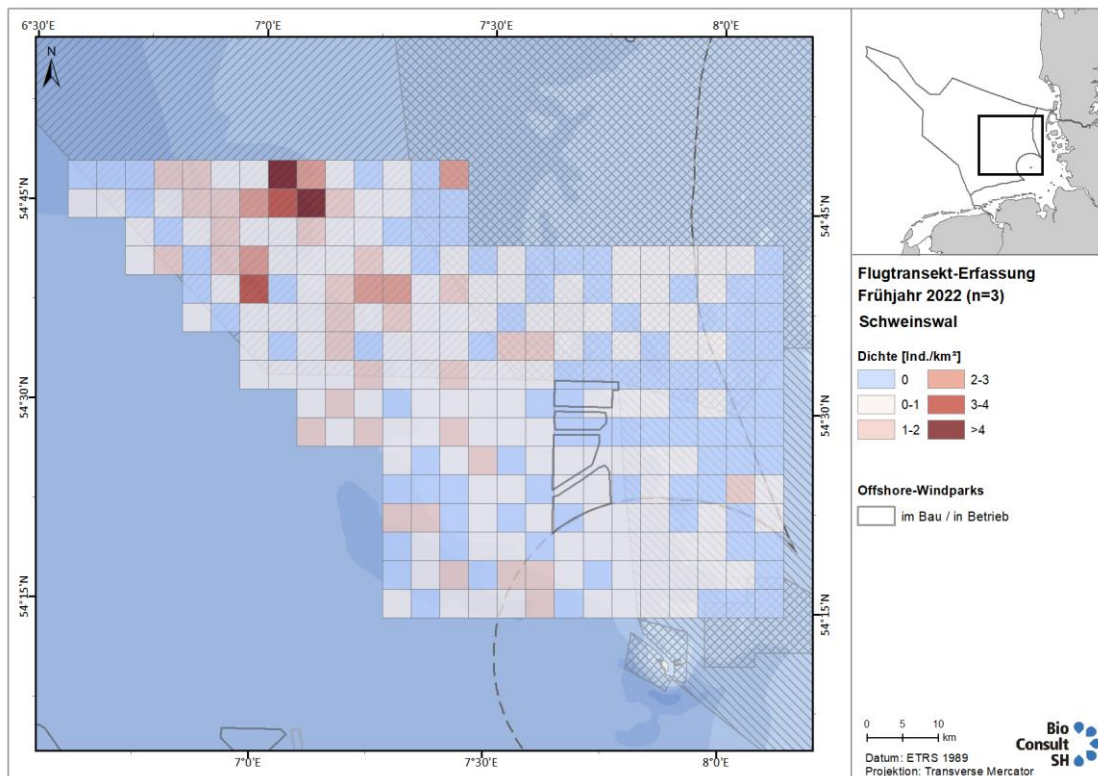


Abbildung 98: Schweinswal-Dichten während der Bauphase im Frühjahr 2022.

7.2.2 Punktsichtungskarten der Schweinswale im UG

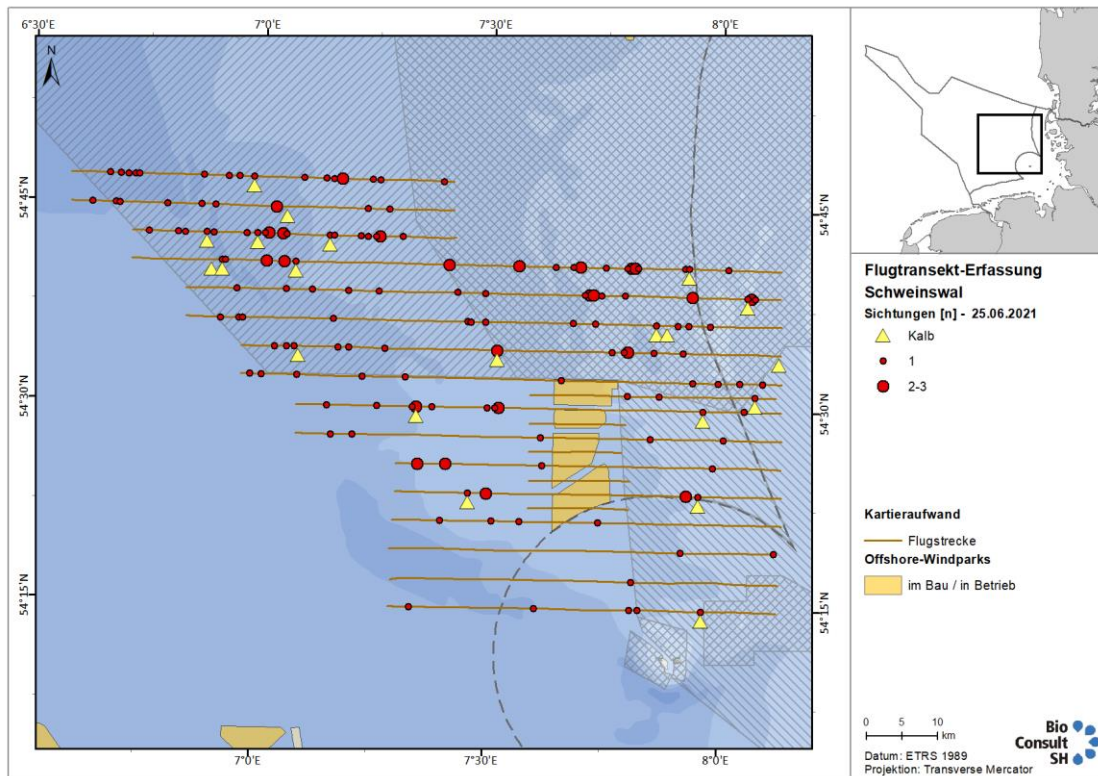


Abbildung 99: Schweinswal-Sichtungen während des HiDef-Fluges vom 25.06.2021.

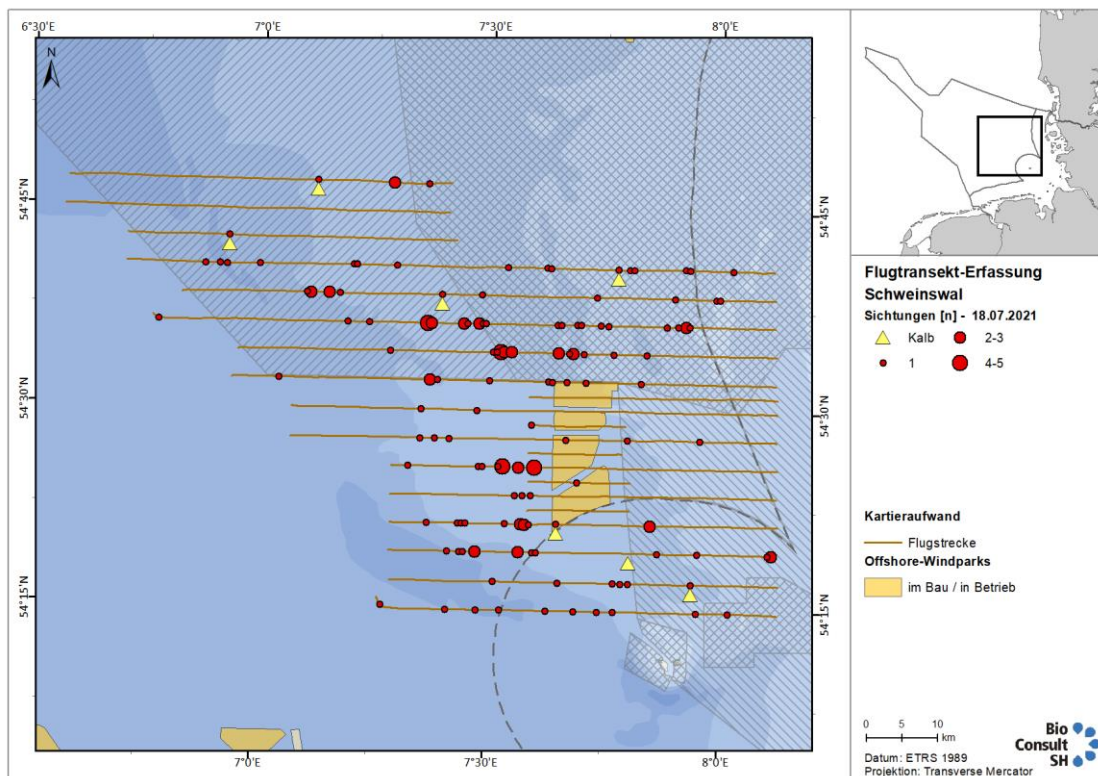


Abbildung 100: Schweinswal-Sichtungen während des HiDef-Fluges vom 18.07.2021.

VISSKA – Abschlussbericht AP7

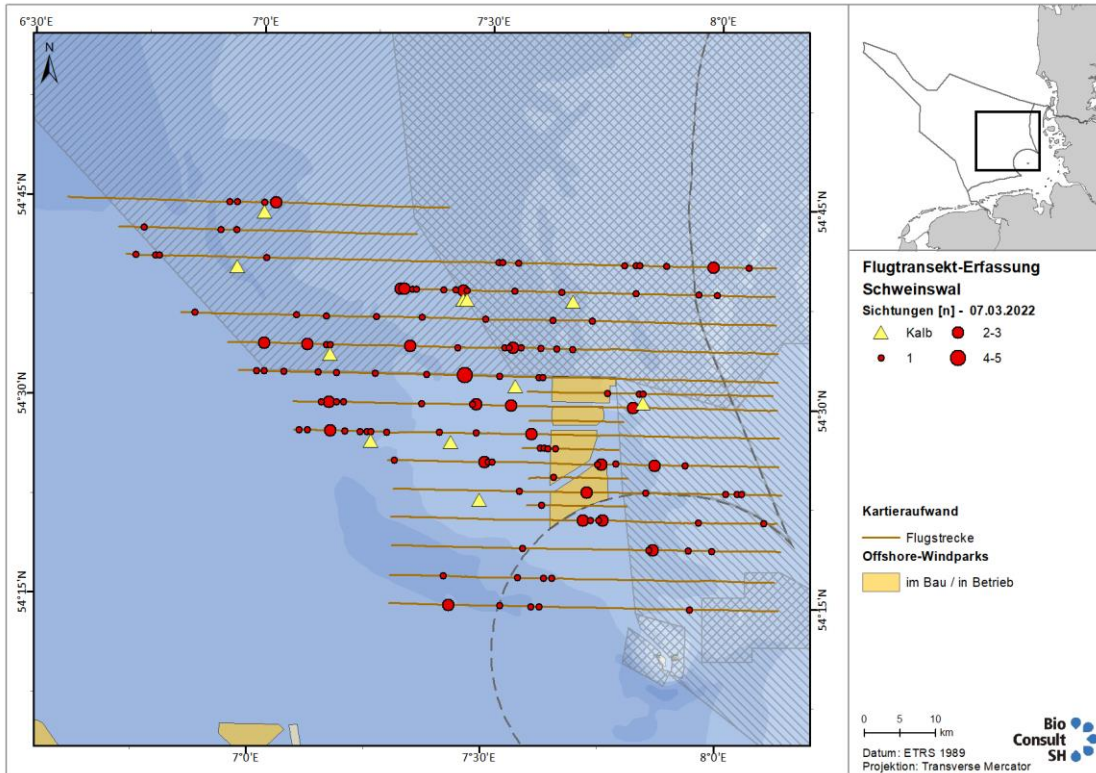


Abbildung 101: Schweinswal-Sichtungen während des HiDef-Fluges vom 07.03.2022.

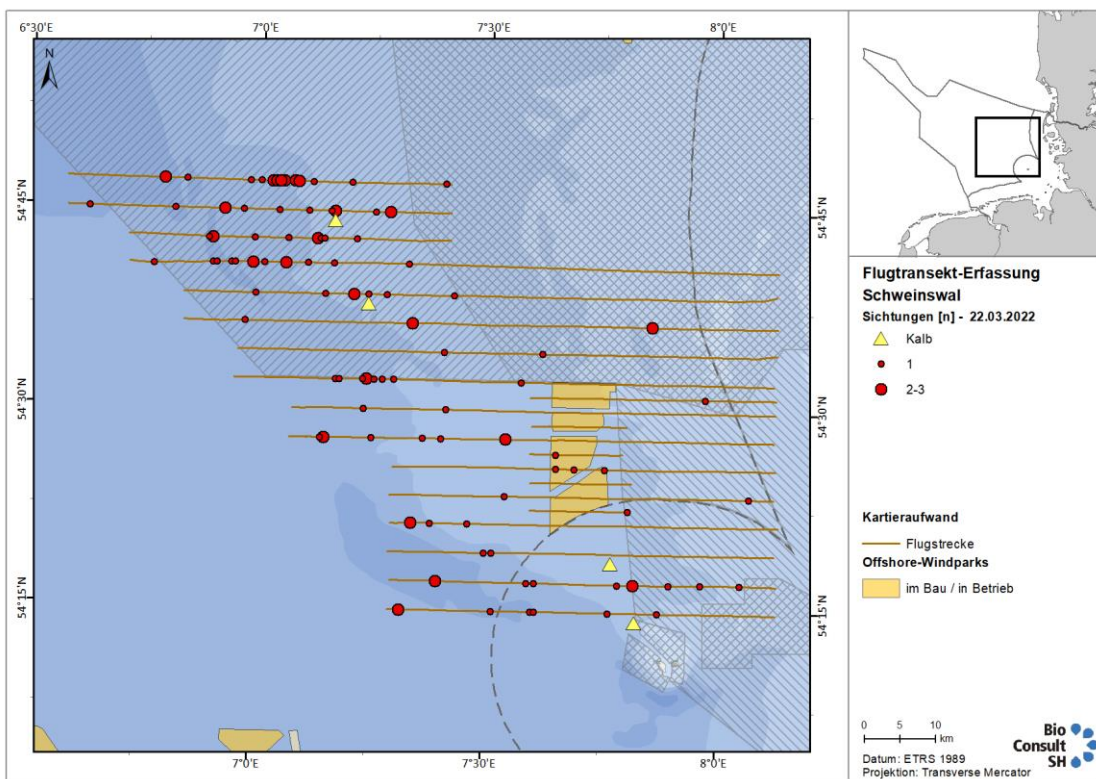


Abbildung 102: Schweinswal-Sichtungen während des HiDef-Fluges vom 22.03.2022.

VISSKA – Abschlussbericht AP7

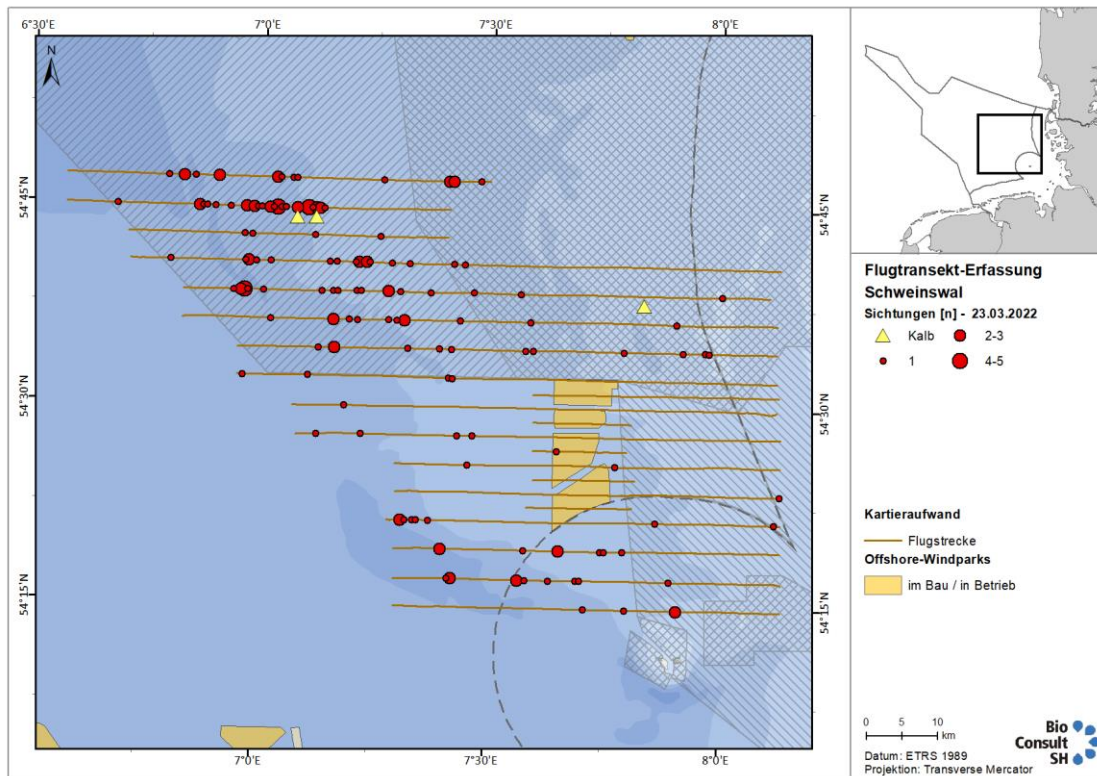


Abbildung 103: Schweinswal-Sichtungen während des HiDef-Fluges vom 23.03.2022.

7.2.3 Punktsichtungskarten der Schweinswale im UG mit AIS-Daten des Flugtages

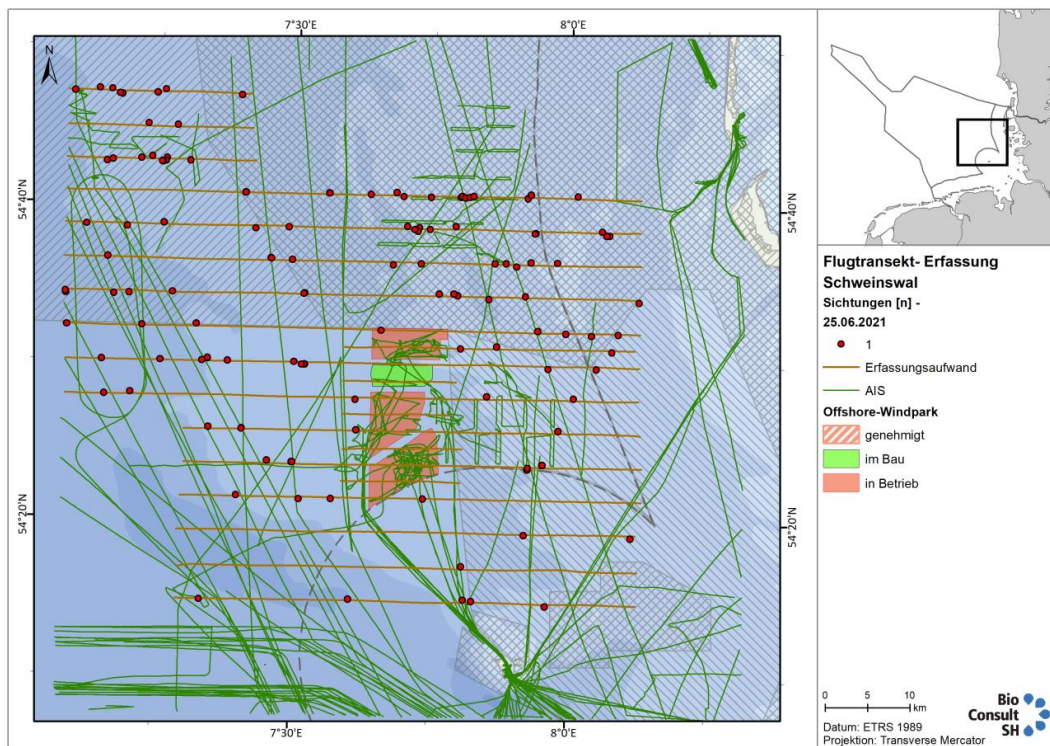


Abbildung 104: Darstellung der AIS-Daten für die HiDef-Flugerfassung am 25.06.2021, mit Schweinswalsichtungen.

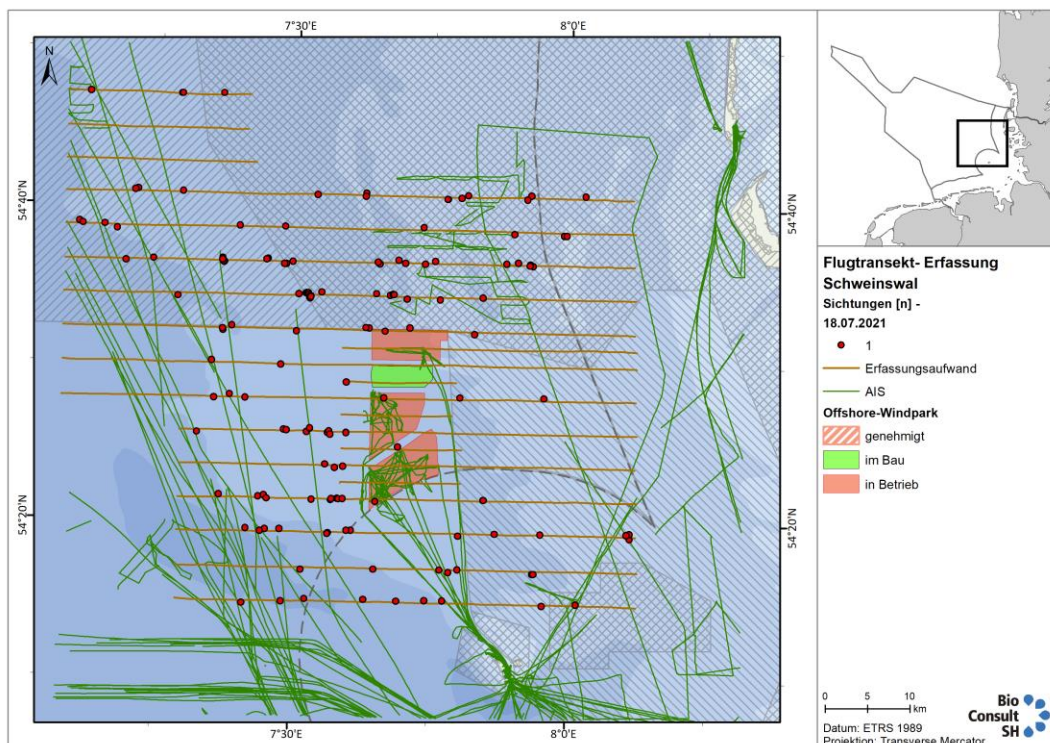


Abbildung 105: Darstellung der AIS-Daten für die HiDef-Flugerfassung am 18.07.2021, mit Schweinswalsichtungen.

VISSKA – Abschlussbericht AP7

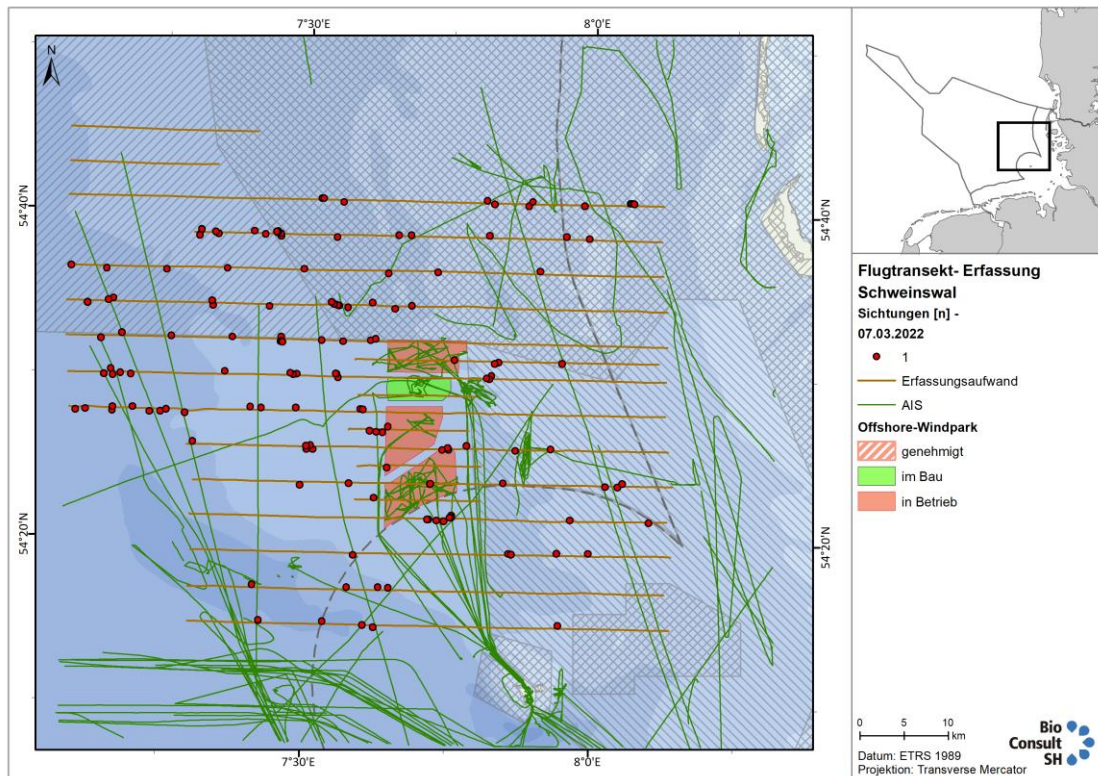


Abbildung 106: Darstellung der AIS-Daten für die HiDef-Flugerfassung am 07.03.2022, mit Schweinswalsichtungen.

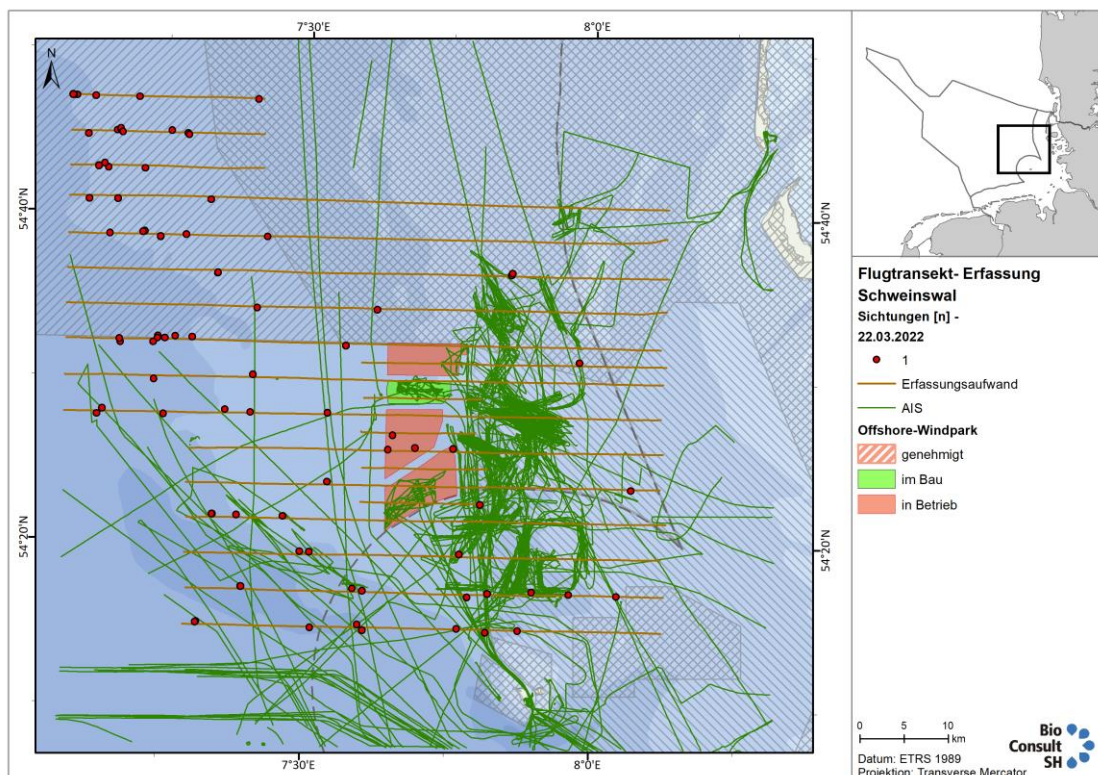


Abbildung 107: Darstellung der AIS-Daten für die HiDef-Flugerfassung am 22.03.2022, mit Schweinswalsichtungen.

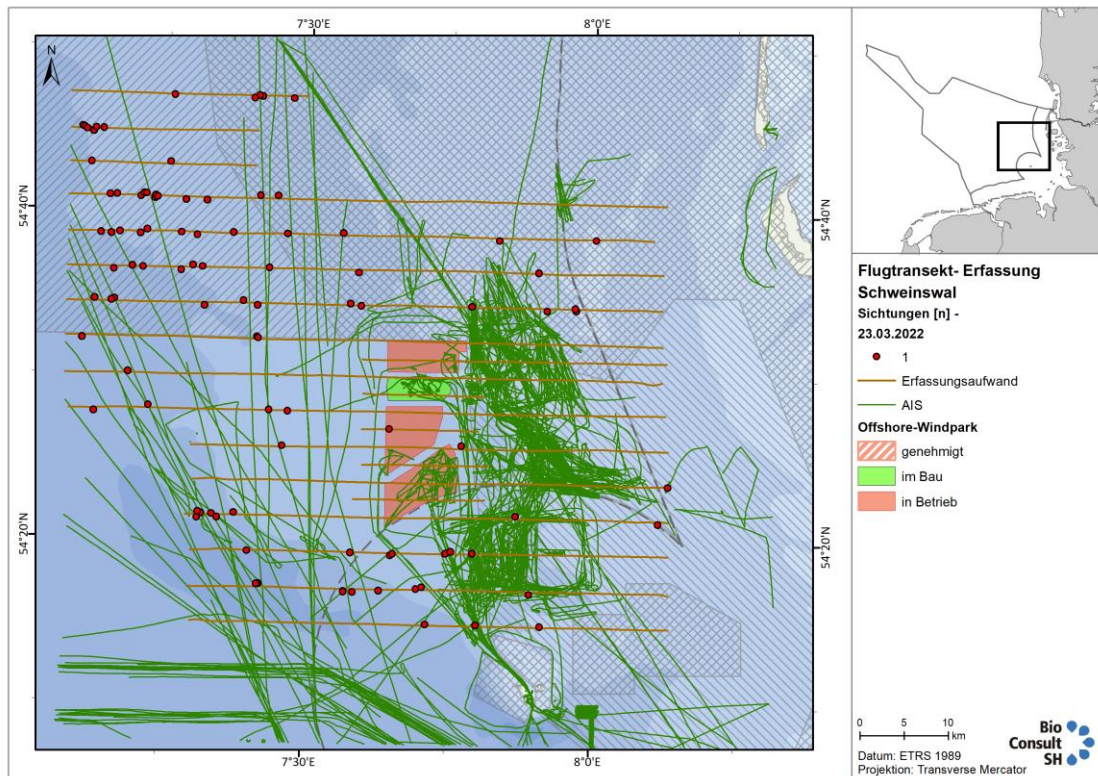


Abbildung 108: Darstellung der AIS-Daten für die HiDef-Flugerfassung am 23.03.2022, mit Schweinswalsichtungen.