

# VII.1 - Risikoanalyse

Prepared by Windbostel Ost GmbH

Document date: 09.10.2025

Document number: 005905946

Revision number: 02

Classification:





Company	Windbostel Ost GmbH
Project	Windbostel Ost (WBO)
Package	Consenting
Asset	Offshore Wind
Document title	VII.1 - Risikoanalyse
Document number	005905946
Revision number	02
Derived from	N/A

The reproduction, distribution and utilisation of this document, and the disclosure of this document (or any information contained herein) to any third party, without the prior written consent of the company (as defined above) is strictly prohibited. The company (as defined above) retains all right, title and interest, including all copyright and intellectual property rights, in and to this document and all information contained herein. The author shall complete this cover sheet and may give guidance below on any actions required by the recipient(s).

- ☒ The checker and approver must not be the same person.
- ☒ The author and approver must not be the same person.
- ☒ The approver must not be less senior than the author.

Revision number	Revision date	Status or reason for Issue	Author	Checker	Approver
01	28.07.2025	Plangenehmigungsantrag WBO	<div></div>	<div></div>	<div></div>
02	09.10.2025	Plangenehmigungsantrag WBO – Einarbeitung BSH Nachforderungen	<div></div>	<div></div>	<div></div>

\*Initials



Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung ..... 4

2 Ergebnisse der Risikoanalyse vor Erweiterung (Risikoanalyse 1) ..... 4

3 Ergebnisse der Risikoanalyse nach Erweiterung (Risikoanalyse 2) ..... 4

4 Schlussfolgerung ..... 5

5 Anlagen ..... 5

## 1 Einleitung

Zusätzlich zu der eigentlichen Risikoanalyse, die für den Plangenehmigungsantrag hiermit eingereicht wird, vergleicht dieser kurze Bericht vorab die Ergebnisse zweier Risikoanalysen für die Offshore-Windparkfläche Windbostel Ost, dargestellt in den Berichten „DNV RA OWP Windbostel Ost M-DR-E 2025.177 V1.1“ („Risikoanalyse 1“) und „DNV RA OWP Windbostel Ost M-DR-E 2025.177 V2.2“ („Risikoanalyse 2“). Die Risikoanalysen beleuchten unterschiedliche Szenarien und Zeiträume, wobei die *Risikoanalyse 1* den Zustand direkt nach der Errichtung des Windparks 2030 beschreibt, während die *Risikoanalyse 2* eine spätere Phase mit zusätzlichen, benachbarten Offshore-Windparks berücksichtigt, entsprechend dem planungsrechtlich verfestigten Stand der Beplanung bzw. Bebauung aller umgebenden im FEP 2025 festgelegten Flächen. Zudem wurde hier noch der niederländische Windpark Doordewind in die Analyse einbezogen, der 2032 in Betrieb gehen soll und unmittelbar an der Südwest-Flanke des OWP Windbostel Ost angrenzt.

### Anmerkung:

In der Revision V1.1 und V2.2 der oben genannten Dokumente wurde im Vergleich zu den vorherigen Versionen lediglich im Kapitel mit Darstellung der Aufstellmuster 2.2/3.2 eine zusätzliche Anmerkung hinzugefügt aus der hervorgeht, dass die Konverterplattformen bei der Analyse berücksichtigt wurden. Dies ist in den Revisionslisten auf der Übersichtsseite des jeweiligen Reports auch vermerkt. Das Ergebnis daselbst hat sich nicht geändert, da die Konverterplattformen auch vorher schon berücksichtigt, jedoch nicht erwähnt wurden.

## 2 Risikoanalyse 1

In der *Risikoanalyse 1*, die den Zeitraum direkt nach der Errichtung des Windparks betrachtet, liegt die durchschnittliche Zeitspanne zwischen zwei potenziellen Kollisionen bei über 100 Jahren. Konkret wird eine Kollisionswiederholperiode von 136 Jahren errechnet, wenn risikomindernde Maßnahmen wie AIS (Automatic Identification System), Verkehrsüberwachung sowie des Notschleppers *Nordic* berücksichtigt werden.

Es wird betont, dass der Windpark Windbostel Ost zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme keine unmittelbare Notwendigkeit für den Einsatz eines betreiberseitigen Notschleppers hervorruft, da die Kollisionswahrscheinlichkeit aufgrund der getroffenen Maßnahmen auf ein akzeptables Niveau gesenkt werden konnte.

## 3 Risikoanalyse 2

Die *Risikoanalyse 2* stellt eine spätere Phase dar, mit zusätzlichen, benachbarten Offshore-Windparks, entsprechend dem planungsrechtlich verfestigten Stand der Beplanung bzw. Bebauung aller umgebenden im FEP 2025 festgelegten Flächen sowie dem niederländischen OWP Doordewind. Dies führt zu einer Erhöhung der kumulativen Kollisionswahrscheinlichkeit in der Region. Die durchschnittliche Kollisionswiederholperiode sinkt auf 75 Jahre, selbst unter Berücksichtigung von Maßnahmen wie AIS, Verkehrsüberwachung und der Nutzung mehrerer Notschlepper, inkl. betreiberseitigem Notschlepper.

## 4 Schlussfolgerung

Aus den beiden Berichten wird deutlich, dass der Windpark Windbostel Ost zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme (*Risikoanalyse 1*) eine durchschnittliche Kollisionswiederholperiode von über 100 Jahren aufweist und daher keine zusätzliche Bereitstellung eines betreiberseitigen Notschleppers erforderlich macht. Durch den späteren Bau benachbarter Windparks (*Risikoanalyse 2*) sinkt diese Wiederholperiode jedoch auf unter 100 Jahre, trotz Berücksichtigung mehrerer Notschlepper. Dies verdeutlicht, dass nicht der Windpark Windbostel Ost allein, sondern die kumulative Entwicklung der Offshore-Infrastruktur in der Region das erhöhte Risiko und die zusätzliche Sicherheitsanforderung auslöst.

## 5 Anlagen

- 1) Risikoanalyse 1: DNV RA OWP Windbostel Ost M-DR-E 2025.177 V1.1 (PDF-Seite 7)
- 2) Risikoanalyse 2: DNV RA OWP Windbostel Ost M-DR-E 2025.177 V2.2 (PDF Seite 74)

## Anlage 1

# Risikoanalyse 1

OFFSHORE-WINDPARKFLÄCHE WINDBOSTEL OST

# Technische Risikoanalyse

WINDBOSTEL OST GmbH,

**Berichtsnr.:** M-DR-E 2025.177, Rev. 1.1

**Datum:** 23.09.2025



Projektname: Offshore-Windparkfläche Windbostel Ost  
 Berichtstitel: Technische Risikoanalyse  
 Kunde: WINDBOSTEL OST GmbH,  
 RWE Platz 4,, 45141 Essen  
 Kontaktperson: [REDACTED]  
 Datum: 23.09.2025  
 Projektnr.: 10573854  
 Org-Einheit: Safety & Systems Engineering, M-DR-E  
 Berichtsnr.: M-DR-E 2025.177, Rev. 1.1

DNV SE – Maritime  
 Postfach 11 16 06  
 20416 Hamburg  
 Brooktorkai 18  
 20457 Hamburg  
 Tel.: +49 40 36149-[REDACTED]  
 Fax: +49 40 36149-[REDACTED]  
 HRB 115442

#### Inhalt:

In dieser technischen Risikoanalyse wird das kumulative Kollisionsrisiko für die geplante Offshore-Windparkfläche Windbostel Ost (FEP-Fläche: N-9.1) untersucht. Dabei werden unter Berücksichtigung der im Herbst 2004 für derartige Risikoanalysen harmonisierten Annahmen, sowie der im Sommer 2008 im Rahmen einer BMVBS-Arbeitsgruppe festgelegten Wirkung von risikomindernden Maßnahmen die Kollisionshäufigkeiten und das Kollisionsrisiko berechnet.

Die kumulative Betrachtung hat unter Berücksichtigung von AIS, einer Verkehrsüberwachung/Seeraumbeobachtung der Variante 3 und einem Notschlepper eine durchschnittliche statistische Wiederholperiode zwischen zwei Kollisionen von 136 Jahren ergeben. Es wurden 1.04 t/Jahr an austretenden Schadstoffen ermittelt.

Eine Einstufung des berechneten Risikos in die Risikoprioritätszahl (RPZ) nach dem BSH-Standard „Konstruktive Ausführung von Offshore-Windenergieanlagen“ ergab ein Risiko mit einer RPZ von 2 bis 3.

Copyright © DNV 2024. Alle Rechte vorbehalten. Sofern nicht anders schriftlich vereinbart: (i) Diese Publikation oder Teile davon dürfen nicht in irgendeiner Form oder mit irgendwelchen Mitteln, weder digital noch anderweitig, kopiert, reproduziert oder übertragen werden; (ii) Der Inhalt dieser Publikation ist vom Kunden vertraulich zu behandeln; (iii) kein Dritter darf sich auf ihren Inhalt verlassen; und (iv) DNV übernimmt keine Sorgfaltspflicht gegenüber Dritten. Ein Verweis auf einen Teil dieser Publikation, der zu Fehlinterpretationen führen kann, ist untersagt.

#### DNV Verteiler:

- ☐ OFFEN. Unbeschränkte Verteilung, intern und extern  
☐ ausschließlich INTERNE Verwendung. Internes DNV Dokument  
☒ VERTRAULICH. Beschränkte /unbeschränkte Verteilung innerhalb von DNV und Vertragsparteien, wie erforderlich Distribution within DNV according to applicable contract.  
☐ STRENG VERTRAULICH. Nur autorisierter Zugriff.

#### Schlüsselworte:

Referenznr	Datum	Grund der Ausstellung	Erstellt von	Geprüft durch	freigegeben durch
Rev. 1.0	27.06.2025	Erste finalisierte Version	<span style="background-color: black; color: black;">[REDACTED]</span>		
Rev. 1.1	23.09.2025	Zus. Erklärung zur Berücksichtigung der Konverplattformen in Kap. 3.2.			

Hinweis: DNV Maritime Advisory Germany liefert seine Dienstleistungen unabhängig und autonom von einer eventuellen Klassifikation / Zertifizierung durch andere organisatorische Einheiten innerhalb DNV. Zur Sicherstellung der Unabhängigkeit befindet sich DNV Maritime Advisory Germany in einer separaten Berichtslinie. Im Falle einer Klassifikation / Zertifizierung durch DNV kann die hierfür zuständige Einheit daher zu einem anderen Ergebnis kommen als Maritime Advisory. Dieses Grundprinzip ist in unsrem nach ISO 9001 zertifizierten Management System definiert.



## Inhaltsverzeichnis

1	ZUSAMMENFASSUNG .....	1
2	EINLEITUNG.....	2
3	BERECHNUNGSGRUNDLAGEN .....	2
3.1	Harmonisierte Annahmen	3
3.2	Aufstellmuster der kumulativ betrachteten Windparks	4
3.3	Schiffsrouten	5
3.4	Beschreibung von Klima, Wetter und Hydrologie	6
4	RISIKOMINDERNDE MAßNAHMEN .....	11
4.1	Automatic Identification System (AIS)	11
4.2	Verkehrsüberwachung und Seeraumbeobachtung	12
4.3	Berücksichtigte Notfallschleppkapazitäten	19
5	KUMULATIVE KOLLISIONSHÄUFIGKEIT .....	21
5.1	Kollisionshäufigkeiten	21
5.2	Zwischenergebnisse ohne AIS, Notfallschlepper und Seeraumbeobachtung	24
5.3	Kumulatives Gesamtergebnis	25
6	SCHLEPPERWIRKSAMKEIT .....	26
7	KOLLISIONSRISIKO FÜR DIE OFFSHORE-WINDPARKFLÄCHE WINDBOSTEL OST .....	27
7.1	Risiko für die kumulative Betrachtung	28
8	RISIKOBEURTEILUNG.....	31
8.1	Umweltauswirkungen	31
8.2	Kollisionskonsequenzen Schiff-OWEA	33
8.3	Personensicherheit	33
9	LITERATUR .....	34
	ANHANG A METHODEN DER RISIKOBERECHNUNG .....	1
A.1	Risikoberechnungen für den Windpark	2
A.2	Verfahren zur Berechnung des Risikos für Kollisionen manövrierfähiger Schiffe mit Installationen des Windparks	4
A.3	Verfahren zur Berechnung von Risiken für die Kollisionen manövrierunfähiger Schiffe mit Installationen des Windparks	11
A.4	Literatur zum Anhang A	29

# 1 ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Bericht sind die Ergebnisse der quantitativen Risikoanalyse für die geplante Offshore-Windparkfläche Windbostel Ost (FEP Fläche: N-9.1) zusammengefasst. Zu Grunde liegt der Planungsstand Juni 2025. Hierzu wurde das kumulative Kollisionsrisiko für die Offshore-Windparkfläche Windbostel Ost zusammen mit den bis zum Zeitpunkt der Realisierung der Offshore-Windparkfläche Windbostel Ost bebauten benachbarten Offshore-Windparkplanungen im Radius von 20 Seemeilen ermittelt. Die Berechnungen werden unter Berücksichtigung der im Herbst 2004 für derartige Risikoanalysen harmonisierten Annahmen /1/ sowie der in 2008 in einer BMVBS-Arbeitsgruppe abgestimmten Wirkung risikomindernder Maßnahmen /3/ durchgeführt.

Die kumulative Betrachtung, unter Berücksichtigung von AIS-Geräten am Windpark, einer Verkehrsüberwachung/Seeraumbeobachtung der Variante 3 und einem Notschlepper hat eine durchschnittliche statistische Wiederholperiode zwischen zwei Kollisionen von 136 Jahren ergeben. Es wurden durchschnittlich statistisch 1.04 t/Jahr an austretenden Schadstoffmengen ermittelt.

Weitere Ergebnisse unter Berücksichtigung unterschiedlicher Kombinationen der risikomindernden Maßnahmen sind in Tabelle 1 angegeben.

Eine Einstufung des berechneten Risikos in die Risikoprioritätszahl (RPZ) nach dem BSH-Standard „Konstruktive Ausführung von Offshore-Windenergieanlagen“ ergab ein Risiko einer RPZ von 2 bis 3.

## Hinweis:

Es wird auf den starken Einfluss der Aufstellmuster, Entfernungen der OWEAs und Sicherheitsabstände der noch ungewissen Windpark-Planungen der Kumulativbetrachtung, insbesondere zu den stark frequentierten Verkehrsrouten (SN 10), auf die in dieser Analyse ermittelten Ergebnisse hingewiesen. Die Ergebnisse dieser Analyse können daher in Zukunft, von den genannten Parametern abhängig, als relativ unsicher und veränderlich betrachtet werden.

**Tabelle 1: Ermittelte kumulative Kollisionswiederholperioden Offshore-Windparkfläche Windbostel Ost**

<b>Kumulative Betrachtung</b> Offshore-Windparkfläche Windbostel Ost inklusive benachbarter Offshore-Bebauungen und -Planungen (entsprechend Abbildung 1)	durchschnittliche statistische Kollisionswiederholperiode für manövrierfähige und manövrierunfähige Schiffe
unter Berücksichtigung der Wirkung von AIS-Geräten am Windpark	57 Jahre
unter Berücksichtigung der Wirkung von AIS-Geräten am Windpark und einer Verkehrsüberwachung/Seeraumbeobachtung der Variante 3	66 Jahre
unter Berücksichtigung der Wirkung von AIS-Geräten am Windpark, und einer Verkehrsüberwachung/Seeraumbeobachtung der Variante 3 + Notschlepper Nordic	136 Jahre

## 2 EINLEITUNG

In dieser Risikoanalyse wurde das Kollisionsrisiko für die Offshore-Windparkfläche Windbostel Ost bestimmt. Die Grundlagen zu den durchgeführten Berechnungen sind in Abschnitt 3 und 4 sowie im Anhang A zu finden.

Dieser Bericht gliedert sich in acht Abschnitte. Ausgehend von der Zusammenfassung im Abschnitt 1 und dieser Einleitung folgt eine Darstellung der verwendeten Berechnungsgrundlagen in Abschnitt 3, sowie eine Vorstellung der risikomindernden Maßnahmen und eine Erläuterung deren angesetzter Wirkung in Abschnitt 4. In Abschnitt 5 wird die kumulative Wirkung der Offshore-Windparkfläche Windbostel Ost und benachbarter Windparks untersucht. In Abschnitt 6 wird die Schlepperwirksamkeit aus den vorangegangenen Berechnungsergebnissen ermittelt. Eine Konsequenzanalyse bezüglich der austretenden Schadstoffmengen für die kumulative Betrachtung findet in Abschnitt 7 statt. In Abschnitt 8 wird eine Einstufung der ermittelten Risiken anhand des Anhang 1 des BSH Standards „Konstruktive Ausführung von Offshore-Windenergieanlagen“ vorgenommen.

## 3 BERECHNUNGSGRUNDLAGEN

Für die Risikoberechnungen wurden die im Anhang A genannten Grundlagen und Methoden verwendet. Neben den im Jahr 2004 zwischen unterschiedlichen Gutachtern harmonisierten Annahmen (Abschnitt 3.1) werden weitergehende Annahmen für die Wirkung risikomindernder Maßnahmen entsprechend der im Jahr 2008 in einer BMVBS-Arbeitsgruppe abgestimmten Wirkung berücksichtigt /3/. Diese werden im Abschnitt 4 näher beschrieben.

Für die Berechnung der Kollisionen von manövrierunfähigen Schiffen mit Installationen von Windparks wurde in der Berechnungssoftware ein realitätsnahes Driftmodell verwendet, das die Strömung in der Nordsee in Abhängigkeit des Windes berücksichtigt. Zusätzlich wird die Bergung durch Notschleppkapazitäten innerhalb der Windparkfläche lediglich bis zu einer Windstärke von 4 Bft berücksichtigt, da eine erfolgreiche Bergung innerhalb der Windparkfläche bei höheren Windgeschwindigkeiten für unwahrscheinlich angesehen wird.

Im Abschnitt 3.2 sind die Aufstellmuster der unterschiedlichen Windparks dargestellt. Die an die Aufstellmuster angepassten Schiffsrouten werden im Abschnitt 3.3 erläutert. Abschnitt 3.4 beinhaltet Angaben zu den in der Simulationssoftware implementierten und verwendeten Klima- und Wetterbedingungen.

### 3.1 Harmonisierte Annahmen

Im Auftrag vom BMVBW wurde vom BSH eine Harmonisierung der Annahmen zwischen den unterschiedlichen Gutachtern für die Erstellung von Risikoanalysen zum Kollisionsrisiko mit Installationen von Offshore-Windparks veranlasst.

Zwischen den Gutachtern des Germanischen Lloyd, DNV und MARIN wurde Ende 2004 eine Harmonisierung von Annahmen vorgenommen. Im Einzelnen wurden gemeinsame Grundannahmen für die Szenarien mit manövrierfähigen und manövrierunfähigen Schiffen vereinbart, die eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse der unterschiedlichen Gutachter gewährleisten sollen. Detaillierte Angaben hierzu sind im Bericht zur Harmonisierung /1/ zu finden.

Durch die harmonisierten Annahmen wurden hauptsächlich folgende Parameter vereinheitlicht:

Allgemeine Daten:

- Zur bisherigen Lateralverteilung der Schiffe auf den einzelnen Schiffsrouten durch eine Gauß-Verteilung wurde eine zusätzliche gleichförmige Verteilung mit einem Anteil von 2% der Schiffe angenommen, um die Sensibilität zu reduzieren. Dabei reduziert sich der Anteil der Schiffe, die durch die Gauß-Verteilung betrachtet werden, auf 98%.

Szenario mit manövrierfähigen Schiffen

- Ein Causation Factor (Wahrscheinlichkeit  $P_{fm,k}$  von nicht erfolgten Maßnahmen zur Kursänderung) von  $3.0 \cdot 10^{-4}$  wurde gemeinsam vereinbart (vgl. Anhang A Abs. A.2.1).
- Die effektive Kollisionsbreite wurde mit dem 1.2-fachen der Schiffsbreite zzgl. des Durchmessers des Hindernisses festgelegt.

Szenario mit manövrierunfähigen Schiffen

- Die Ausfallrate der Antriebs- und Ruderanlage wurde mit  $2.5 \cdot 10^{-4}$  pro Stunde festgelegt.
- Des Weiteren wurden Anpassungen an den Versagenswahrscheinlichkeiten von einer Notankerung und von Reparaturmaßnahmen vorgenommen.

### 3.2 Aufstellmuster der kumulativ betrachteten Windparks

Entsprechend der harmonisierten Annahmen werden die bis zum Zeitpunkt der Realisierung der Offshore-Windparkfläche Windbostel Ost gebauten benachbarten Offshore-Windparkplanungen in einem Radius von 20 Seemeilen für die kumulative Betrachtung berücksichtigt. Die Inbetriebnahme der Offshore-Windparkfläche Windbostel Ost ist für das Jahr 2030 (3. Quartal) geplant. Entsprechend des Flächenentwicklungsplanes /14/ werden die zu diesem Zeitpunkt fertiggestellten benachbarten Planungen berücksichtigt. Die Fertigstellung der angrenzenden niederländischen Windparkplanung Doordewind ist für das Jahr 2032 vorgesehen /15/.

In Abbildung 1 sind die in dieser Analyse berücksichtigten Aufstellmuster der umliegenden Offshore-Windparks dargestellt.

Für das Aufstellmuster der Offshore-Windparkfläche Windbostel Ost werden 136 OWEAs einem Fundamentdurchmesser von 9,6 m auf Höhe des Meeresspiegels berücksichtigt. Die Aufstellmuster der OWEAs von umliegenden Windparkplanungen sind generisch vom DNV entwickelt worden, falls diese noch nicht geplant und verfügbar sind. Für sämtliche Anlagen wird aufgrund der Forderungen der Genehmigungsbehörde eine kollisionsfreundliche Konstruktion der Fundamente angenommen. Es wurden die vorhandenen oder geplanten Konverterplattformen des untersuchten und der benachbarten Windparks entsprechend der Angaben des Flächenentwicklungsplanes /14/ in den Ergebnissen berücksichtigt.

Auf den starken Einfluss der Aufstellmuster, Entfernungen der OWEAs und Sicherheitsabstände der noch ungewissen Windpark-Planungen der Kumulativbetrachtung, insbesondere zu der stark frequentierten Verkehrsrouten (SN 10), auf die in dieser Analyse ermittelten Kollisionshäufigkeiten wird hingewiesen. Die Ergebnisse dieser Analyse können daher in Zukunft, von den genannten Parametern abhängig, als relativ unsicher und veränderlich betrachtet werden.

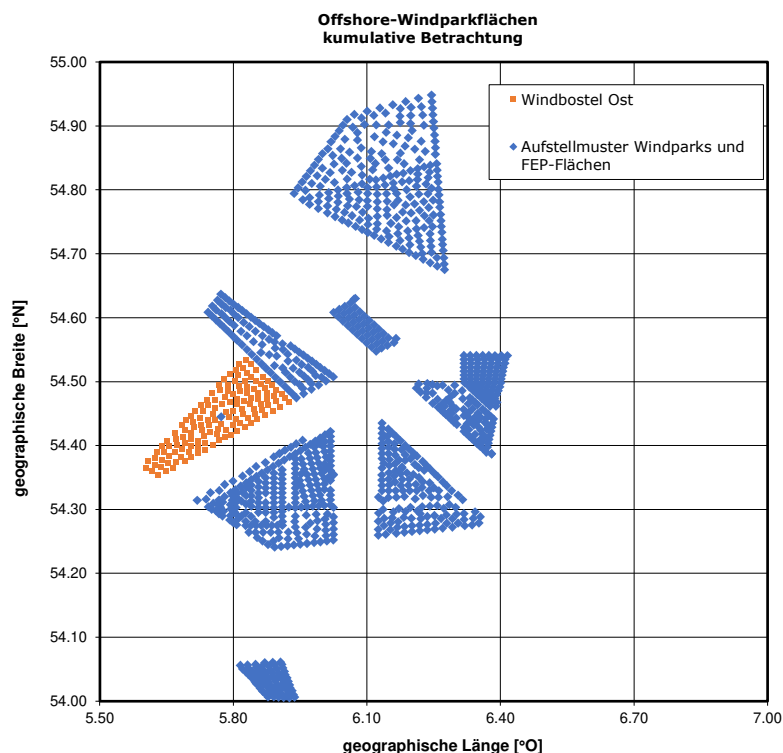


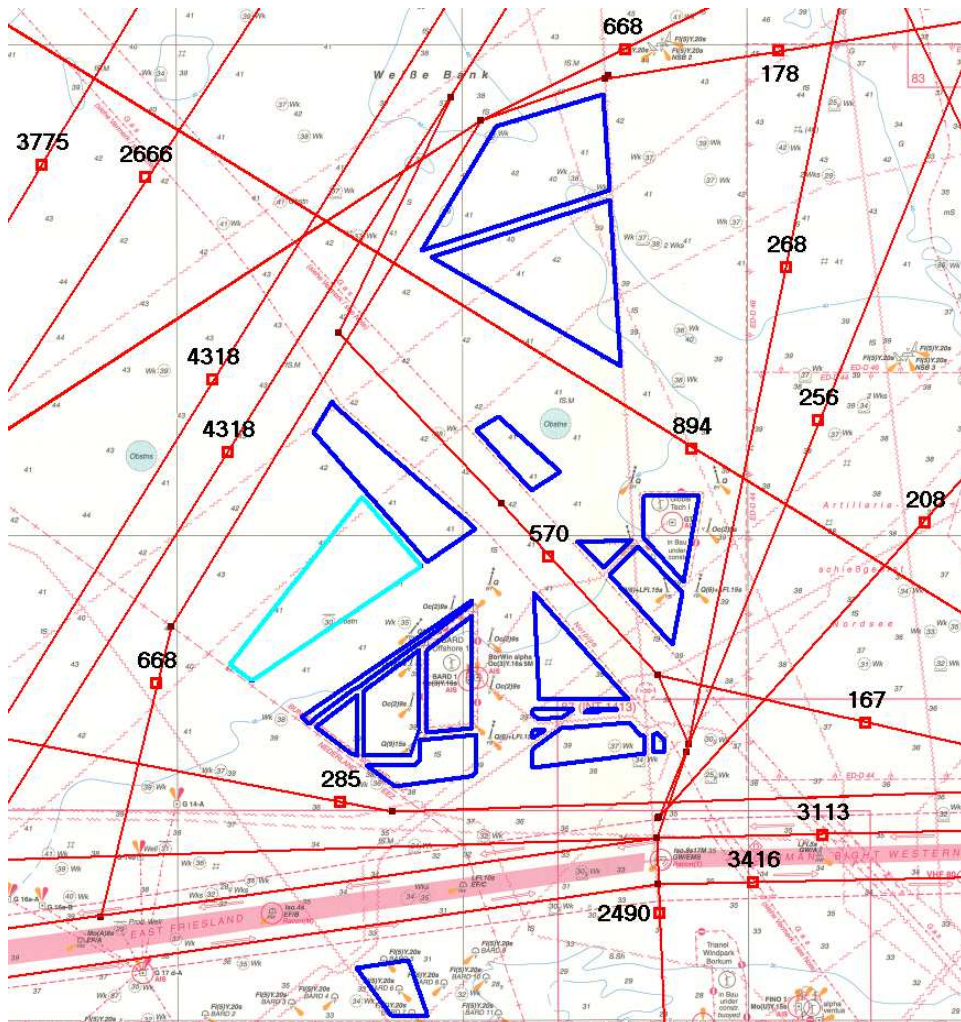
Abbildung 1: Aufstellmuster der kumulativen Betrachtung

### 3.3 Schiffsrouten

Als Datenbasis wurde der Schiffsverkehr im betrachteten Seegebiet durch Auswertungen von pseudonymisierten AIS-Daten analysiert. Die hierbei verwendeten AIS-Daten wurden von der WSV zur Verfügung gestellt. Dabei wurde der Schiffsverkehr über die Monate April, Juli und Oktober des Jahres 2022 sowie Januar 2023 ausgewertet.

Die auf Basis von AIS-Auswertung identifizierten Schiffsrouten im Bereich der Windparkplanungen sind unter Berücksichtigung der Offshore-Windparks in Abbildung 2 dargestellt. Dabei sind die Routenführungen mit den jährlichen Schiffsbewegungen sowie die Offshore-Windparks eingezeichnet.

Die Schifffahrtsrouten SN6 und SN12 nach Raumordnung werden hierbei bereits als gesperrt angenommen. Die entsprechenden Schiffsbewegungen sind modellhaft auf andere vorhandene Routen umverlegt worden.



**Abbildung 2: Schiffsrouten mit Angabe jährlicher Schiffsbewegungen unter Berücksichtigung der kumulativ berücksichtigten Windparks**



### 3.4 Beschreibung von Klima, Wetter und Hydrologie

In den Risikoanalysen werden Umwelteinflüsse wie Wind und Strömung berücksichtigt. In diesem Abschnitt sind die für die Analyse verwendeten Eingangsdaten erläutert.

Das Klima und Wetter im Bereich des Windparks ist im Handbuch „Naturverhältnisse – Nordsee und Englischer Kanal“ /11/ beschrieben. In diesem Handbuch wurden die Wetterdaten für den Bereich Deutsche Bucht entnommen:

- Wind
- Seegang

Die Strömungsverhältnisse wurden aus dem Strömungsatlas /11/ abgeleitet. Die Gezeitenverhältnisse werden in der Analyse mitberücksichtigt.

In den folgenden Abschnitten werden diese Einflüsse für das Seegebiet um den Windpark näher beschrieben.

### 3.4.1 Wind

Der Wind kommt im Sommer überwiegend aus westlicher Richtung (270°). Im Winter treten auch sehr häufig östlich Winde (90°) auf. Die Auftretenswahrscheinlichkeit und die Hauptwindrichtung sind in Tabelle 2 dargestellt.

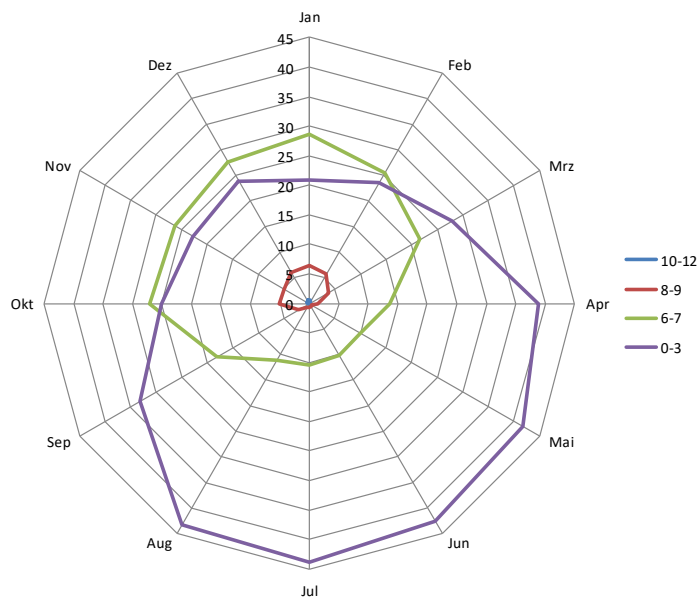
Die in Tabelle 2 gezeigten Werte aus /6/ wurden für den Bereich der Deutschen Bucht gemessen. Die gleiche Anzahl von Messungen wurde auch für auftretende Windgeschwindigkeiten gemacht. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Abbildung 3 dargestellt.

Die Verteilung zeigt eine maximale Auftretenswahrscheinlichkeit von Windgeschwindigkeiten im Bereich von 4 – 5 Bft.

**Tabelle 2: Deutsche Bucht, Relative monatliche Häufigkeit von Windstärkegruppen in [%] und Hauptwindrichtungen**

Bft	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
10-12	0.6	0.5	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.4	0.5	0.2
8-9	6.5	5.7	3.7	1.4	0.5	0.6	0.6	0.7	2.2	5.2	4.9	6.0	3.2
6-7	28.6	25.5	21.7	13.7	10.0	10.2	10.5	11.1	18.2	27.0	26.4	27.6	19.2
4-5	43.5	44.7	46.4	46.0	47.8	46.7	45.1	44.9	46.3	42.6	45.6	42.0	45.1
0-3	20.8	23.6	28.0	38.9	41.7	42.5	43.8	43.3	33.2	25.0	22.7	23.9	32.2
Richtung	S-W	SW-W	SW-W	keine	keine	SW-NW	SW-NW	SW-NW	SW-NW	S-W	S-SW	S-SW	SW-W

Die folgende Abbildung zeigt eine grafische Darstellung der Daten aus Tabelle 2:



**Abbildung 3: Windverteilung Deutsche Bucht**



### 3.4.2 Seegang

Für die Analyse werden ebenfalls Daten aus /7/ verwendet. Die Daten für den Bereich der Deutschen Bucht sind in Tabelle 3 dargestellt.

**Tabelle 3: Deutsche Bucht, Relative Häufigkeiten von Seegangsstufen [in % der Beobachtungen] und die mittlere Höhe des Seegangs [MSH; in m]**

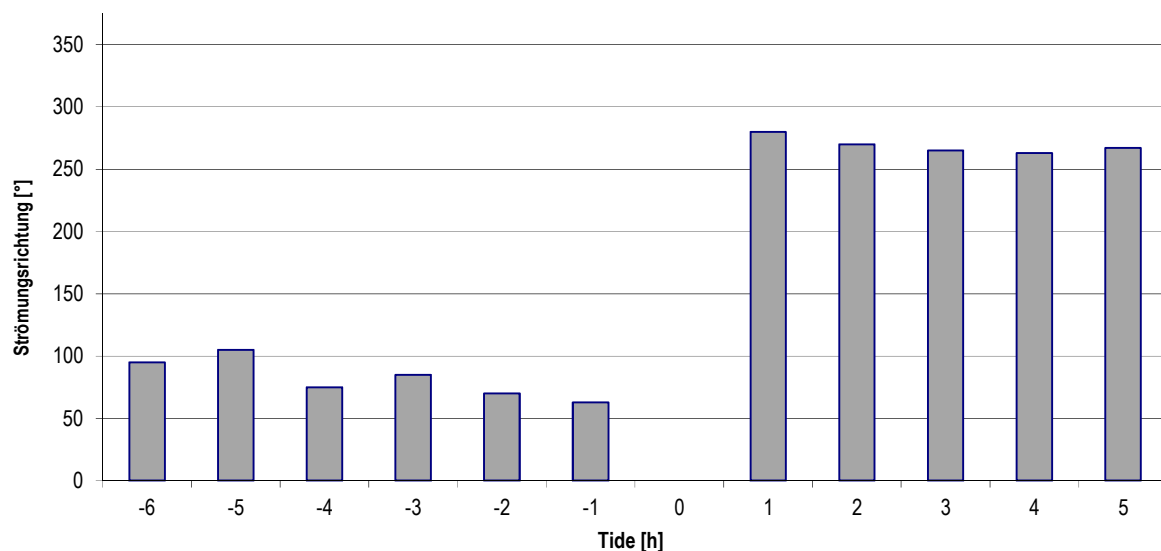
	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
> 4,70 m	<b>2.3</b>	1.9	1.2	0.6	0.2	0.1	0.3	0.3	1	1.6	<b>2.3</b>	2	1.1
2,8 - 4,7 m	<b>12.8</b>	11.2	9.5	4.5	2.8	3.7	3.6	4.1	8.6	9.9	11.3	12.3	7.9
1,3 - 2,7 m	<b>39.5</b>	34.4	29.6	23.2	23.5	24.5	24.6	26.4	33.5	36.1	36.2	35.6	30.6
0,0 - 1,2 m	45.4	52.4	59.7	71.8	<b>73.5</b>	71.7	71.5	69.2	57	52.4	50.2	50.1	60.4
MSH [m]	<b>1.6</b>	1.5	1.3	1	0.9	1	0.9	1	1.3	1.4	1.5	1.5	1.3

### 3.4.3 Strömung

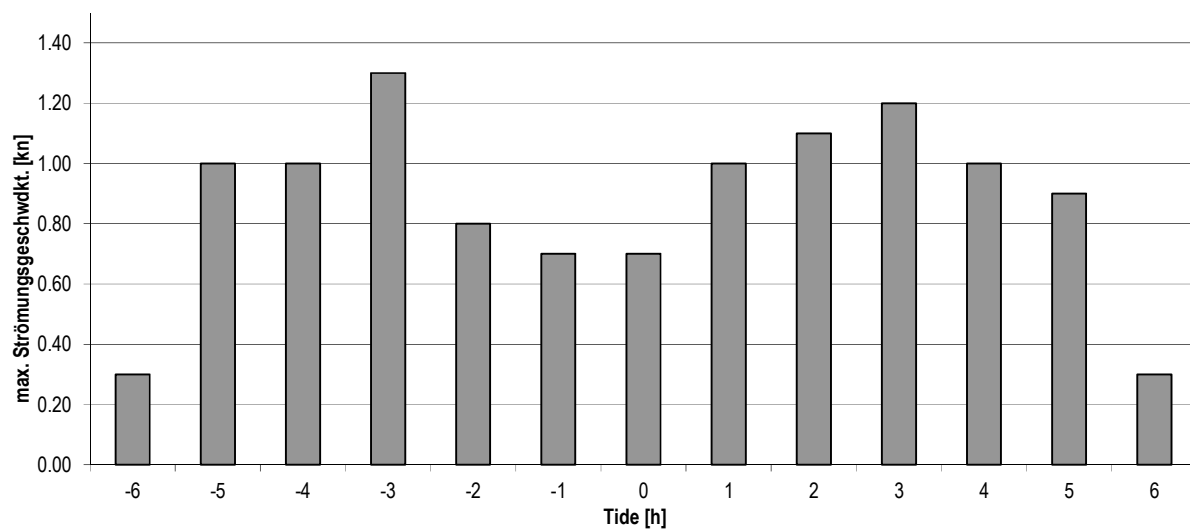
Die Strömungsverhältnisse im betrachteten Seegebiet lassen sich durch Geschwindigkeit und Richtung beschreiben. Für die statistische Beschreibung der Strömungsverhältnisse liegen die Daten des „ADMIRALTY TIDAL STREAM ATLAS“ /11/ zugrunde. Die sich ändernden Strömungsverhältnisse für das Seegebiet sind entsprechend dem Tidenprogress für jede Stunde definiert.

Nach vorliegenden Messwerten des BSH sind Strömungsgeschwindigkeiten um ca. 0.5 kn am häufigsten in der Deutschen Bucht anzutreffen. Starke Strömungen erreichen Geschwindigkeiten bis ca. 1.6 kn. In Abbildung 4 sind die Hauptströmungsrichtungen für einen Tidenprogress im Bereich der betrachteten Windparks aufgezeigt.

Abbildung 5 zeigt die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten für den Verlauf des Tidenprogresses in der Region der Windparks. Für die Seegebiete im Umkreis des Windparks werden entsprechend der Position die Strömungsdaten angesetzt.



**Abbildung 4: Strömungsrichtungen im Bereich der Windparks für jede Stunde des Tidenprogresses**



**Abbildung 5: Verteilung der Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich der Windparks**

## 4 RISIKOMINDERNDE MAßNAHMEN

Als risikomindernde Maßnahmen werden die Installation von AIS-Geräten an den Installationen der Windparks, verschiedene Varianten einer Verkehrsüberwachung/Seeraumbeobachtung und die Wirksamkeit von Schleppern betrachtet. Die Ausrüstung des Windparks mit AIS-Geräten und das Notschleppkonzept Deutsche Küste sind als vorhandene Maßnahmen anzusehen /2/. Als zusätzliche Maßnahme kann eine Verkehrsüberwachung/Seeraumbeobachtung vorgesehen werden, durch die auf Kollisionskurs fahrende Schiffe erkannt, identifiziert und gewarnt werden können und gegebenenfalls Unterstützung gegeben oder veranlasst werden kann.

### 4.1 Automatic Identification System (AIS)

AIS ermöglicht der Schiffsführung das rechtzeitige Erkennen eines Kollisionskurses mit anderen Schiffen oder Offshore-Einrichtungen, die mit AIS ausgerüstet sind. Die Warnung erfolgt durch das jeweilige an Bord befindliche AIS-Gerät. Das Kollisionsrisiko manövrierfähiger Schiffe kann somit durch den Einsatz von AIS reduziert werden. Seit Anfang 2005 gilt für alle Schiffe auf internationaler Fahrt größer 300 BRZ die AIS-Ausrüstungspflicht.

Solange keine Erkenntnisse durch empirische Daten oder detaillierte analytische Modelle vorliegen, wird ein konservativer Wert als Faktor der Wirksamkeit von 1.25 angenommen /1/.

**Tabelle 4: Risikoreduzierungen aufgrund der Wirkung von AIS Geräten am Windpark**

Szenario	angesetzte Wirkung
Kollision manövrierfähiger Schiffe mit Installationen der Windparks	Faktor
<b>ohne AIS</b>	1.00
<b>mit AIS</b>	1.25

## 4.2 Verkehrsüberwachung und Seeraumbeobachtung

Eine weitere Verminderung der Risiken kann durch die Einbeziehung einer Seeraumbeobachtung seitens des Betreibers oder einer Verkehrsüberwachung durch staatliche Stellen erzielt werden. Ziel der Seeraumbeobachtung und Verkehrsüberwachung ist es, Schiffe zu erkennen und zu identifizieren, die einen Kurs auf die Sicherheitszone haben oder sich auf Kollisionskurs mit dem Windpark befinden, und diese zu warnen sowie gegebenenfalls Navigationshinweise oder Navigationsanweisungen zu geben.

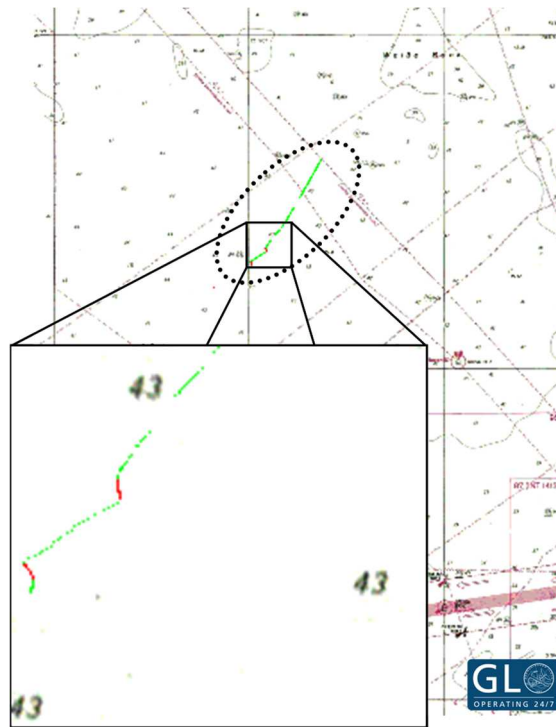
### 4.2.1 Wirkung auf manövrierunfähige Schiffe

Durch eine Verkehrsüberwachung können in Richtung Windpark driftende manövrierunfähige Schiffe erkannt, identifiziert und gezielt angesprochen, sowie gegebenenfalls Rettungsmaßnahmen eingeleitet werden. Ein solcher Vorgang wird durch die technischen Mittel AIS und Radar unterstützt. Dabei hat der Aufwand bei der Realisierung solcher Maßnahmen einen entscheidenden Einfluss auf die Wirksamkeit. Weiterhin sind der Schulungsgrad und die Anzahl der involvierten Personen von zentraler Wichtigkeit.

Durch eine AIS-Überwachung können mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit Schiffe erkannt werden, die durch einen Ausfall der Maschinenanlage oder andere Ereignisse manövrierunfähig werden. Dabei werden Schiffe erfasst, die mit einem AIS-Gerät ausgerüstet sind und AIS-Daten senden. Aufgrund der Ausrüstungspflicht seit Anfang 2005 ist die Mehrzahl der im Seegebiet des OWP fahrenden Schiffe mit AIS-Geräten ausgerüstet. In dem Forschungs- und Entwicklungsvorhaben SAFESHIP /10/ wurde pessimistisch eine Ausrüstung und die Sendung der AIS-Daten bei 90% aller Schiffe angenommen. Inzwischen ist mit einem deutlich über diesem Wert liegenden Anteil zu rechnen.

Sofern das manövrierunfähige Schiff sein Driften nicht selbst meldet, kann über verschiedene AIS- und Radar- auswertemethoden eine Identifikation erfolgen. Dabei bietet AIS gegenüber Radar den Vorteil, dass neben GPS gestützten Positions-, Lage- und Geschwindigkeitsdaten auch schiffsspezifische Daten und Statusmeldungen übertragen werden. Der Informationsgehalt von Radar ist zwar geringer, jedoch besteht hier der Vorteil, dass das Signal vom Schiff selbst unabhängig ist. Die höchste Wahrscheinlichkeit der Erkennung ist über eine Kombination von AIS und Radar zu erreichen.

Softwarealgorithmen, mit denen sich driftende Schiffe erkennen lassen, sind derzeit in der Entwicklung. Untersuchungen des GL deuten auf eine nahezu sichere Erkennung von driftenden Schiffen über AIS hin. Zum einen kann das AIS Gerät an Bord durch eine Statusmeldung (z.B. „not under command“ oder „restricted ability to manoeuvre“) auf ein Driften aufmerksam machen, zum anderen ist ein Erkennen durch Auswertung der Positionsmeldungen möglich. Letzteres ist durch ein Feststellen einer Differenz zwischen Kurs und Ausrichtung des Schiffes („course over ground“ und „heading“) und über komplexere Auswertung der zeitlichen Änderung verschiedener AIS-Parameter („speed over ground“, „course over ground“, „heading“) zu erreichen. Beispielfhaft ist in Abbildung 6 die Spur eines über AIS-Auswertung identifizierten Drifters dargestellt.



**Abbildung 6: Driftweg eines über AIS-Auswertung identifizierten driftenden Schiffes**

Durch einen Ereignisbaum, der die jeweiligen Teilwahrscheinlichkeiten für verschiedene Arten der Identifikation enthält, lässt sich eine Gesamtwahrscheinlichkeit für das Erkennen eines driftenden Schiffes durch eine Verkehrsüberwachung ermitteln, siehe Abbildung 7. Bei Annahme konservativer Werte, kann davon ausgegangen werden, dass ca. 88% aller manövrierunfähigen Schiffe identifiziert werden können.

Wird die Verkehrsüberwachung über AIS durch Radar ergänzt, ergibt sich eine höhere Wahrscheinlichkeit der Identifikation eines driftenden Schiffes. Einerseits ist man vom AIS-Signal unabhängig, andererseits können auftretende Differenzen zwischen beiden Signalen zusätzliche Informationen liefern. Über den in Abbildung 8 dargestellten Ereignisbaum wird bei Berücksichtigung einer AIS- und Radarüberwachung eine Erkennung des manövrierunfähigen Schiffes in 98% aller Fälle errechnet.

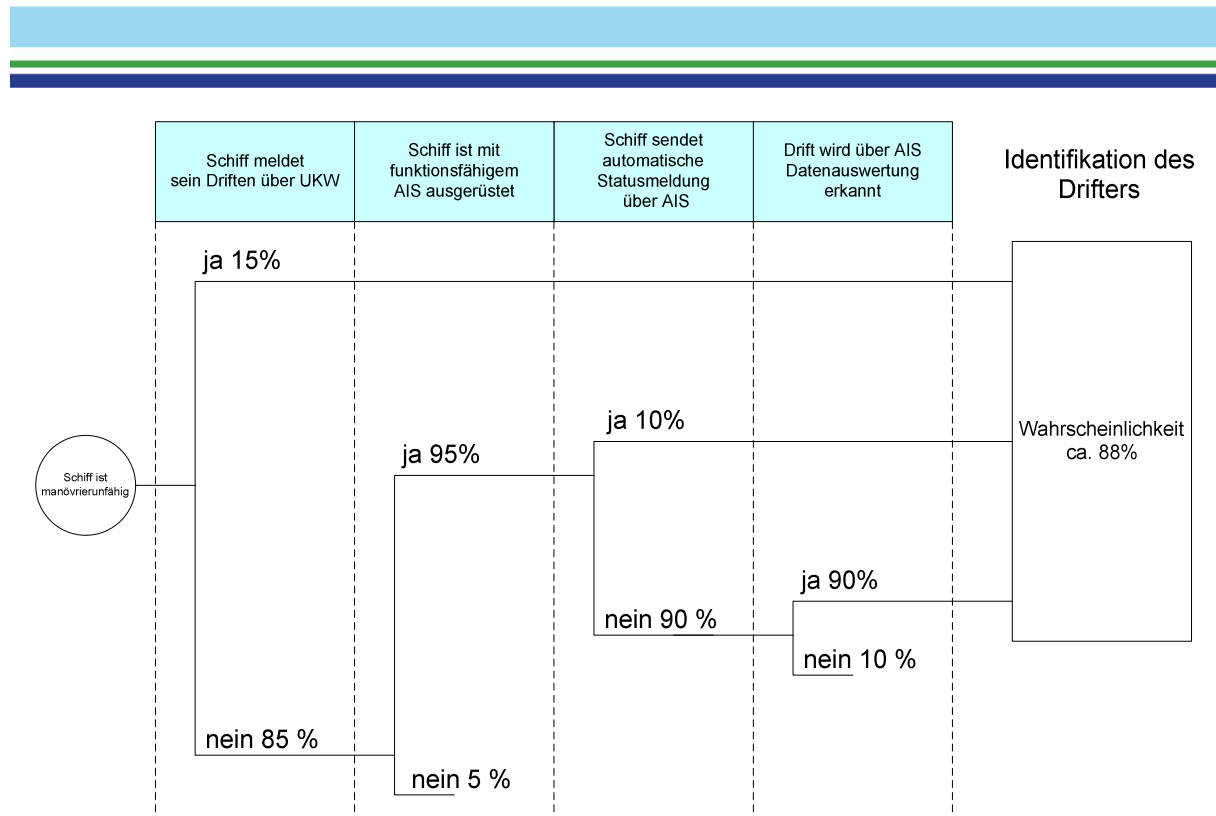


Abbildung 7: Ereignisbaum zur Identifikation driftender Schiffe durch Verkehrsüberwachung über AIS

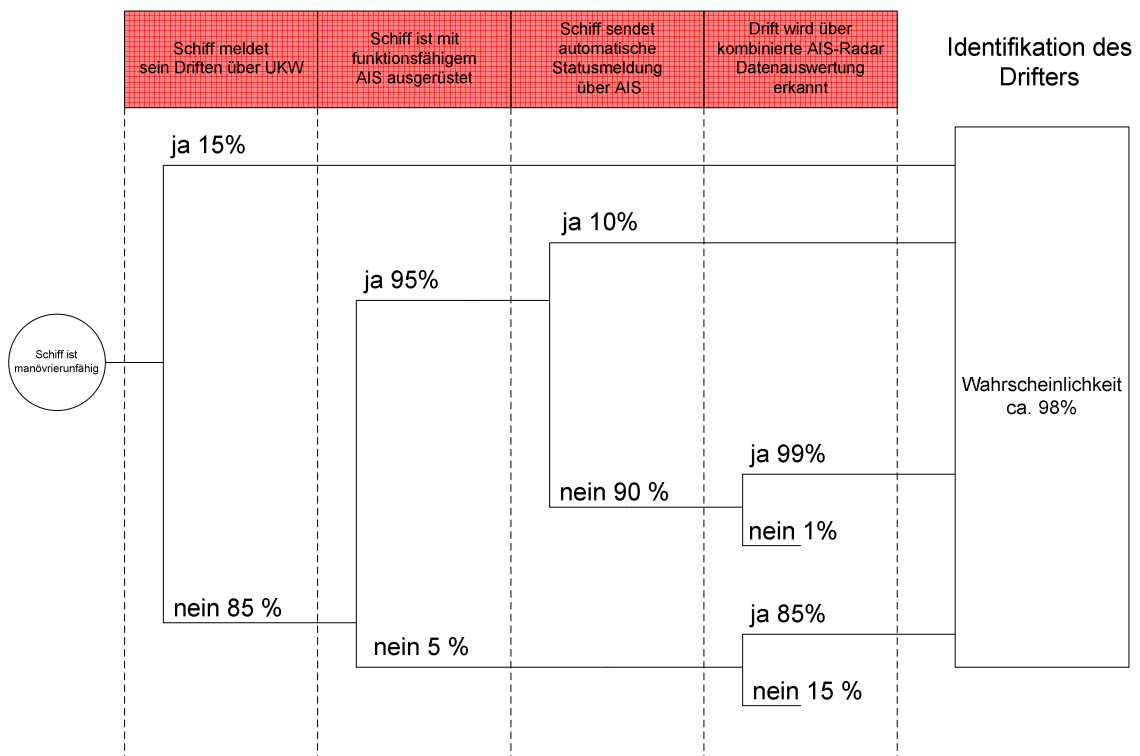



Abbildung 8: Ereignisbaum zur Identifikation driftender Schiffe durch Verkehrsüberwachung über AIS und Radar

Bei Verfolgung der Driftbewegung der erkannten manövrierunfähigen Schiffe sowie einer Kommunikation mit dem driftenden Schiff kann ein Gefährdungspotential durch das jeweilig driftende Schiff abgeschätzt werden. Für die



Beurteilung der risikomindernden Wirkung einer Verkehrsüberwachung auf Kollisionen manövrierunfähiger Schiffe mit Installationen der Windparks sind im Weiteren die Wirksamkeit der kommunikativen Unterstützung durch Verkehrsüberwachung und Bergungsmaßnahmen zu betrachten.

Kommunikative Unterstützung durch nautisch geschultes Personal kann zu einer Verminderung des Kollisionsrisikos führen. Dabei ist die Bereitstellung von Hinweisen zum gezielten Einsetzen von eventuell noch vorhandenen Bordmitteln, wie beispielsweise Bugstrahlruder, Ruderstellung oder Anker zur Beeinflussung der Drift zu nennen; hinzu kommt der psychologische Effekt der Beratung, der zu einer positiven Veränderung der Lage des Havaristen beitragen kann. Da dieser Effekt schwer zu quantifizieren ist, wird hier zunächst pessimistisch von einem Faktor 1.1 ausgegangen. Das heißt, in etwa 10% aller identifizierten Fälle kann eine Kollision zwischen manövrierunfähigen Schiffen und Windenergieanlagen durch kommunikative Mittel verhindert werden.

#### 4.2.2 Wirkung auf manövrierfähige Schiffe

Für die Betrachtung und Quantifizierung der Maßnahmen der Verkehrsüberwachung/ Seeraumbeobachtung auf manövrierfähige Schiffe werden im Folgenden drei verschiedene Varianten unterschieden, die sich bezüglich ihrer Ausrüstung, Konzeption und Wirksamkeit unterscheiden.

#### 4.2.3 Variante 1: Vollständige Verkehrsüberwachung/Seeraumbeobachtung

Eine vollständige Überwachung und Beobachtung schließt alle Maßnahmen der maritimen Verkehrssicherung ein. Dies beinhaltet eine permanente (manuelle) Beobachtung des Schiffsverkehrs durch ausgebildete Nautiker sowohl mit Hilfe von AIS, als auch mit Hilfe von Radar. Eine Quantifizierung der Wirksamkeit ist auf Grund der unterschiedlichen Ausrüstung der Schiffe und der jeweiligen nautischen Gegebenheiten des betrachteten Seeraums schwierig. Die Studien /7/ und /8/ geben für die Vergangenheit eine Spanne der Reduzierung der Kollisionshäufigkeiten von Faktor 2 bis 10 an. Es wird erwartet, dass sich die Wirksamkeit auf Grund der ständig fortschreitenden technischen Ausrüstung der Schiffe eher reduziert hat. Andererseits wird jedoch erwartet, dass sich die Möglichkeit einer gezielten Identifikation einzelner Schiffe durch AIS in Verbindung mit einer Seeraumbeobachtung positiv auswirkt /9/. Basierend auf Ergebnissen eines vom Germanischen Lloyd, MARIN und der Technical University of Denmark durchgeführten Forschungsprojektes /10/ wurde ein risikomindernder Faktor von 4.33 für eine umfassende Verkehrsüberwachung/Seeraumbeobachtung quantifiziert. Im Rahmen der Harmonisierung der Annahmen unterschiedlicher Gutachter wurde ein Faktor von 4 vereinbart /3/.

#### 4.2.4 Variante 2: Automatische Überwachung/Beobachtung mit manueller Option

Grundlage der Variante 2 ist die ständige automatische Auswertung aller mit AIS ausgerüsteten Fahrzeuge. Parallel dazu erfolgt in regelmäßigen Abständen eine manuelle Auswertung. Werden Grenzparameter überschritten, das heißt, befindet sich beispielsweise ein Schiff in einem definierten Abstand auf Kollisionskurs mit dem Windpark, erfolgt in jedem Fall eine automatische Alarmierung/Warnung und eine weitere manuelle Überwachung/Beobachtung der entsprechenden Fahrzeuge durch Nautiker. Bei Identifikation eines Schiffes kann versucht werden, den potentiellen Kollisionsgegner rechtzeitig über Funk oder Satellitentelefon zu warnen. Für die hier vorgeschlagene automatische Beobachtung mit Hilfe von AIS-Signalen und einer zusätzlichen manuellen Beobachtung der in der Umgebung des Windparks fahrenden Schiffe ist ein geringerer Faktor als 4 anzusetzen, da einerseits nur AIS-Daten verwendet werden und andererseits teilweise eine automatische Beobachtung stattfindet. Mit diesen Einschränkungen gegenüber einer umfassenden Verkehrsüberwachung/Seeraumbeobachtung mit einer zusätzlichen Radarüberwachung und einer ständigen manuellen Auswertung sind Annahmen bezüglich einer reduzierten Wirksamkeit verbunden. Im Forschungsvorhaben SAFESHIP /10/ wurde eine Seeraumbeobachtung nur mit AIS-Geräten untersucht. Aufgrund der nicht 100%igen Verfügbarkeit der



Schiffsinformationen (nicht vorhandenes, defektes oder abgeschaltetes AIS-Gerät an Bord) ist eine geringere Wirksamkeit anzusetzen. Jedoch sind aufgrund der besseren Identifikation der Schiffe durchaus Vorteile gegenüber einer Radarüberwachung vorhanden. Insgesamt konnte für eine nur über AIS betriebene Seeraumbeobachtung in /10/ ein Faktor von 3.66 festgestellt werden. Zusätzlich ist für diese Variante zu berücksichtigen, dass die Auswertung der AIS-Signale zunächst teilweise automatisch erfolgt. Hierbei ist mit einer Reduzierung der Wirksamkeit zu rechnen, so dass ein risikomindernder Faktor von 3 als realistisch angenommen wird /3/.

#### 4.2.5 Variante 3: Automatische Auswertung

Diese Variante unterscheidet sich gegenüber der oben beschriebenen Variante 2 in der Weise, dass die Auswertung des Schiffsverkehrs permanent automatisch über AIS vor dem Hintergrund der Einleitung von Sofortmaßnahmen bei besonderen Ereignissen vorgenommen wird und nur bei Überschreiten vorgegebener Grenzparameter ein Aufmerksamkeitssignal als Hinweis erfolgt. Nach Überprüfung können mögliche Maßnahmen ergriffen werden. Es ist auch denkbar, dass zusätzlich eine automatische Textmeldung über AIS an das entsprechende Schiff gesendet wird oder automatisch über den DSC-Kanal des UKW-Funkgerätes (Kanal 70) an das entsprechende Schiff eine Dringlichkeits- oder Sicherheitsmeldung abgesetzt wird. Aufgrund der zunächst nur automatisch vorgenommenen Auswertung ist von einer weiteren Verminderung der Wirksamkeit im Vergleich zu Variante 2 auszugehen. Deshalb wird für diese Variante von einem reduzierten risikomindernden Faktor von 2.5 ausgegangen /3/.

Tabelle 5 und Tabelle 6 zeigen die Faktoren zur Reduzierung der Kollisionshäufigkeiten, bedingt durch die Wirkung der Verkehrsüberwachung/Seeraumbeobachtung gemäß den verschiedenen Varianten.

In Tabelle 7 sind die erforderlichen Ausrüstungen und das erforderliche Personal für eine Verkehrsüberwachung/Seeraumbeobachtung gemäß Variante 3 näher beschrieben /3/.

**Tabelle 5: Risikoreduzierungen aufgrund der Wirkung einer Verkehrsüberwachung/Seeraumbeobachtung auf manövrierfähige Schiffe**

Szenario	angesetzte Wirkung
Kollision manövrierfähiger Schiffe mit Installationen des Windparks	Faktor
<b>ohne</b> Überwachung/Beobachtung und Warnmeldungen	1
<b>mit</b> Überwachung/Beobachtung nach Variante 1	4
<b>mit</b> Überwachung/Beobachtung nach Variante 2	3
<b>mit</b> Überwachung/Beobachtung nach Variante 3	2.5

**Tabelle 6: Risikoreduzierungen aufgrund der Wirkung einer Verkehrsüberwachung/ Seeraumbeobachtung und anschließender kommunikativer nautischen Unterstützung auf manövrierunfähige Schiffe**

Szenario	angesetzte Wirkung
Kollision manövrierunfähiger Schiffe mit Installationen des Windparks	Faktor
<b>ohne</b> kommunikative Unterstützung durch nautisch geschultes Personal	1
<b>mit</b> kommunikativer Unterstützung durch nautisch geschultes Personal	1.1

**Tabelle 7: Ausrüstung und Personal für eine Seeraumbeobachtung durch die Leitwarte**

<b>Ausrüstung:</b>	<b>Beschreibung</b>
AIS	Redundante AIS-Empfangsgeräte und redundante Datenweiterleitung
AIS-Auswertung	Die am Windpark empfangenen AIS-Daten werden in geeigneter Art und Weise ausgewertet. Wenn sich in einem bestimmten Radius um den Windpark ein Schiff auf Kurs in Richtung des Windparks befindet, wird ein Alarm ausgegeben.  Eventuell ist in Verbindung mit den AIS-Geräten und den UKW-Funkgeräten eine zusätzliche automatische Alarmierung der entsprechenden Schiffsführung realisierbar.
UKW-Funk mit DSC	Mindestens zwei redundant arbeitende Geräte  Es können potenzielle Kollisionsgegner informiert und gewarnt werden (z.B. über UKW Kanal 16 oder über den DSC Kanal 70).
Telefon	Zur Kommunikation mit dem Kollisionsgegner (Satellitentelefon) und mit Behörden/Verkehrszentrale zur Information und gegebenenfalls zur Einleitung von Hilfsmaßnahmen
Datenübertragung	Redundante Datenübertragung vom Windpark zur Leitwarte des Windparks zur Sicherstellung des Informationsaustausches (Funk und AIS)
Sicherheitshandbuch	Sicherheitshandbuch mit Verfahrensanweisungen und Notfallplänen für das Personal
Weitere Informationssysteme	Informationssysteme zur Anzeige von hydrologischen und meteorologischen Daten (Windstärke und -richtung, Wasserstand, Sichtweite)  Eventuell weitere Systeme, die den Status der einzelnen WEA anzeigen
<b>Personal:</b>	
Betriebspersonal	Ausgebildetes Personal ist 24 Stunden am Tag notwendig.

### 4.3 Berücksichtigte Notfallschleppkapazitäten

Notschlepper werden zum Bergen von manövrierunfähigen Havaristen eingesetzt. Ihr risikomindernder Einfluss kommt daher nur beim Szenario der Kollision von manövrierunfähigen Schiffen mit Installationen des Windparks zur Wirkung. Die Möglichkeit der Bergung eines Havaristen durch einen oder mehrere Schlepper setzt neben der Erkennung und Identifikation des Schiffes die Einsatzbereitschaft der Schlepper voraus. Dafür können ebenfalls Annahmen getroffen werden.

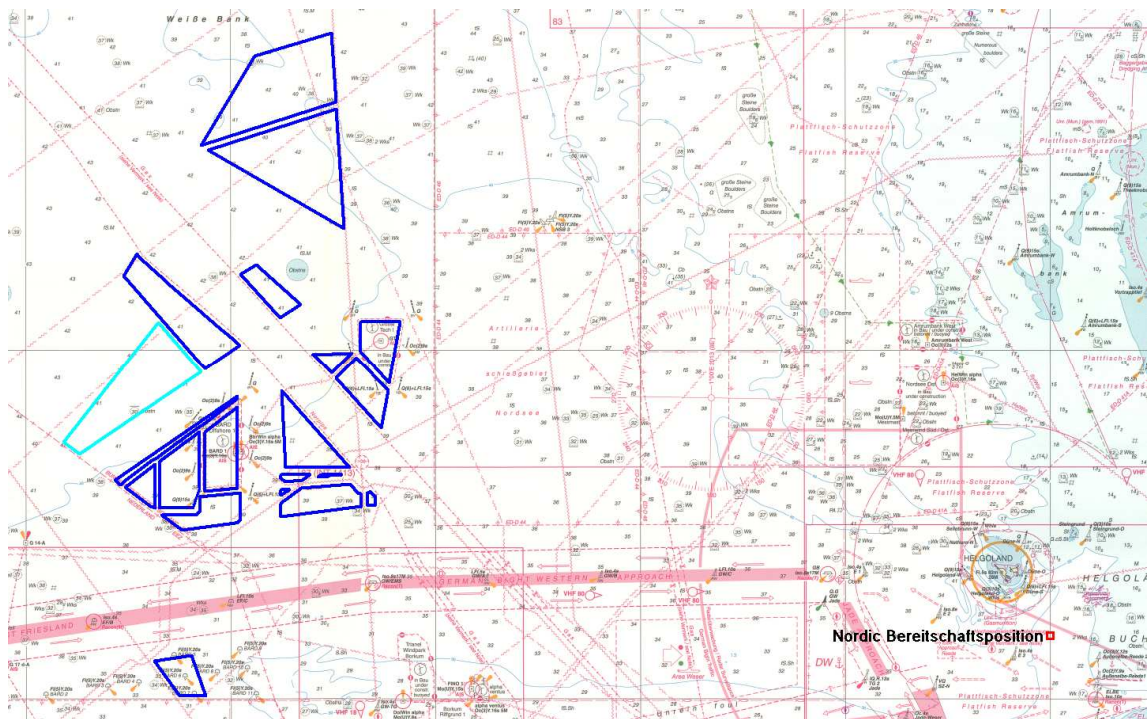
Der große Nordseeschlepper „Nordic“, seit Anfang 2019 auf der Bereitschaftsposition südlich Helgoland, kann ganzjährig für Notschleppeinsätze vom Havariekommando oder dem WSA Cuxhaven eingesetzt werden („hoheitlicher Notschlepper“). Er ist in der Regel innerhalb von 0,5 h einsatzklar. Bei diesem Schlepper kann von einer hohen Wahrscheinlichkeit der Bereitschaft von etwa 96% (d.h. an 16 Tagen im Jahr steht hier kein Schlepper zur Verfügung) ausgegangen werden, da er ausschließlich für Schleppmanöver, allerdings vorwiegend zum Küstenschutz, vorgehalten wird. Für den Fall des technischen Ausfalls, des Besatzungswechsels und Bunkerns von Treibstoff wird er adäquat durch andere Schiffe ersetzt.

Aus dem Anforderungsprofil für die Schlepper ergeben sich folgende Leistungsdaten:

**Tabelle 8: Leistungsdaten der Schlepper**

Notschlepper:	Hoheitlicher Notschlepper „Nordic“
Geschwindigkeit:	19,5 kn
Pfahlzug:	200 t
Position	Bereitschaftsposition: -5 sm SE'lich Helgoland, zwischen Insel Helgoland und Außenelbe-Reede

In den Berechnungen wird konservativ die mögliche risikomindernde Wirkung der niederländischen Guardian, sowie der Mehrzweckschiffe „Mellum“ und „Neuwerk“ vernachlässigt.



**Abbildung 9: Bereitschaftspositionen des berücksichtigten Schleppers**

Die Bergung durch einen Notschlepper innerhalb der Windparkfläche wird lediglich bis zu einer Windstärke von 4 Bft berücksichtigt, da eine erfolgreiche Bergung innerhalb der Windparkfläche bei höheren Windgeschwindigkeiten als unwahrscheinlich angesehen wird.

Bei Annahme einer Wahrscheinlichkeit für die Identifikation eines manövrierunfähigen Schiffes von 98% und einer Schlepperbereitschaft von 96% ergibt sich somit eine Gesamtwahrscheinlichkeit für die Initiierung eines Bergungsversuches von:

$$98\% \quad \times \quad 96\% \quad = \quad 94\%$$

Um den risikomindernden Einfluss der Notschlepper auf die Kollisionshäufigkeit von Schiffen mit dem Windpark zu untersuchen, wurde das von manövrierunfähigen Havaristen ausgehende Kollisionsrisiko unter Berücksichtigung der Wirkung eines Notschleppers entsprechend der Angaben in Anhang A berechnet.



## 5 KUMULATIVE KOLLISIONSHÄUFIGKEIT

Grundlage für die kumulativen Berechnungen dieses Abschnitts sind die an die Windparks angepassten Routen entsprechend Abbildung 2. In diesem Abschnitt wird das kumulative Kollisionsrisiko mit Installationen der Offshore-Windparkfläche Windbostel Ost und der kumulativ berücksichtigten Windparks angegeben.

In den folgenden Abschnitten 5.1 und 5.2 werden die Kollisionshäufigkeiten ohne risikomindernde Maßnahmen angegeben. Die Gesamtergebnisse der kumulativen Betrachtung mit und ohne risikomindernde Maßnahmen sind im Abschnitt 5.3 zusammengestellt.

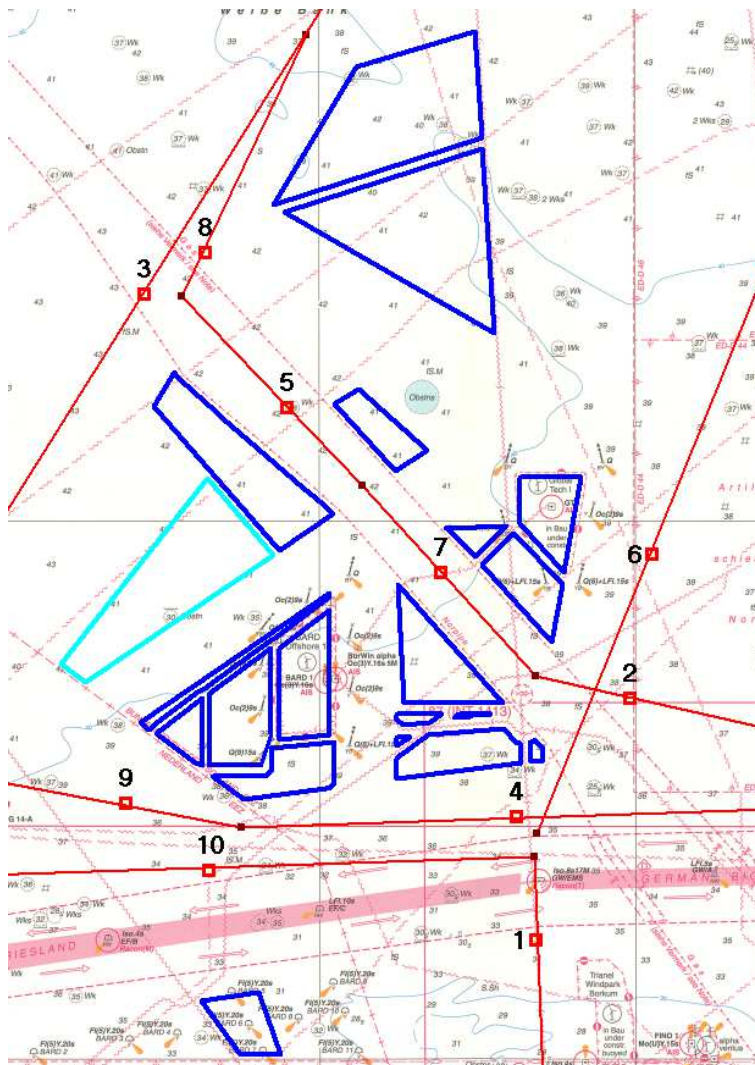
### 5.1 Kollisionshäufigkeiten

Die berechnete Kollisionshäufigkeit von manövrierfähigen Schiffen mit Installationen der Windparks ergibt eine Gesamtkollisionshäufigkeit aller Routenabschnitte von 0.0015 Kollisionen/Jahr, welches einer statistisch zu erwartenden Zeit zwischen zwei Kollisionen von 645 Jahren entspricht.

Die aufsummierte Kollisionshäufigkeit für manövrierunfähige Schiffe aller Routenabschnitte ergibt eine Häufigkeit von 0.0162 Kollisionen/Jahr. Dies entspricht einer statistisch zu erwartenden Zeit zwischen zwei Kollisionen von manövrierunfähigen Schiffen mit Installationen der Windparks von 62 Jahren.

**Tabelle 9: Kollisionshäufigkeiten von manövrierfähigen Schiffen mit Installationen der Windparks (ohne risikomindernde Maßnahmen), sortiert nach normierter Häufigkeit**

Nr.	Koordinaten des Abschnittsbeginns		Koordinaten des Abschnittsendes		Routenabschnittslänge [sm]	normierte Kollisionshäufigkeit [Kollisionen/Jahr/sm]	normierte mittlere Zeit zwischen den Kollisionen [Jahre/sm]	Kollisionshäufigkeit [Kollisionen/Jahr]	mittlere Zeit zwischen den Kollisionen [Jahren]
	geografische Breite	geografische Länge	geografische Breite	geografische Länge					
1	53° 51.540' N	06° 21.831' O	54° 11.400' N	06° 20.484' O	20	0.000040	25060	0.000794	1259
2	54° 21.423' N	06° 20.650' O	54° 12.678' N	07° 26.518' O	40	0.000007	135700	0.000291	3431
3	54° 06.642' N	05° 05.058' O	55° 35.941' N	06° 41.420' O	105	0.000003	341300	0.000309	3236
4	54° 13.020' N	05° 52.740' O	54° 14.927' N	07° 26.730' O	55	0.000001	672500	0.000082	12250
5	54° 32.001' N	06° 04.193' O	54° 42.462' N	05° 47.127' O	14	0.000001	1048000	0.000014	72890
6	54° 12.660' N	06° 20.799' O	55° 25.054' N	07° 11.164' O	78	0.000000	2198000	0.000035	28250
7	54° 21.423' N	06° 20.650' O	54° 32.001' N	06° 04.193' O	14	0.000000	2591000	0.000006	181200
8	54° 56.820' N	05° 58.860' O	54° 42.462' N	05° 47.127' O	16	0.000000	2809000	0.000006	177000
9	54° 35.592' N	02° 28.793' O	54° 13.020' N	05° 52.740' O	120	0.000000	8183000	0.000015	67980
10	54° 09.618' N	04° 49.679' O	54° 11.400' N	06° 20.483' O	53	0.000000	30490000	0.000002	574700

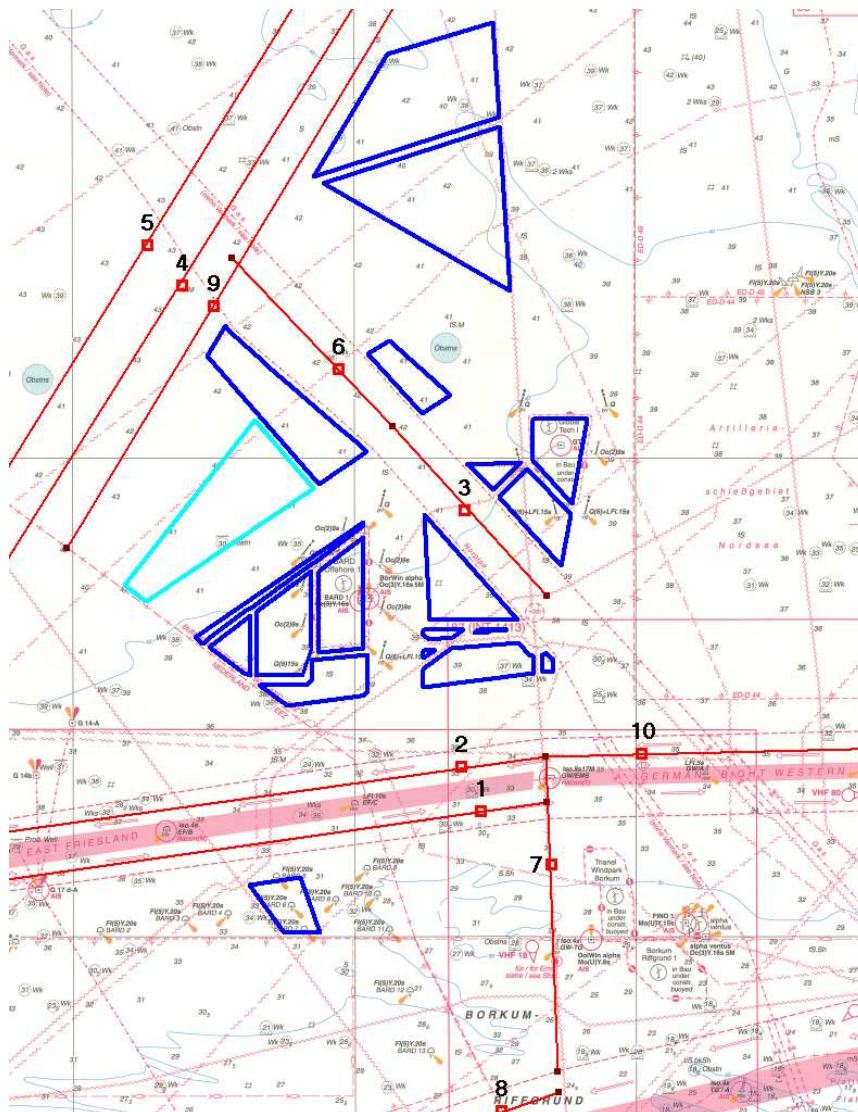


**Abbildung 10: Darstellung der Routen mit den größten normierten Kollisionshäufigkeiten von manövrierfähigen Schiffen mit Installationen der Windparks**



**Tabelle 10: Kollisionshäufigkeiten von manövrierunfähigen Schiffen mit Installationen der Windparks (ohne risikomindernde Maßnahmen), sortiert nach normierter Häufigkeit**

Nr.	Koordinaten des Abschnittsbeginns		Koordinaten des Abschnittsendes		Routenabschnittslänge [sm]	normierte Kollisionshäufigkeit [Kollisionen/Jahr/sm]	normierte mittlere Zeit zwischen den Kollisionen [Jahren/sm]	Kollisionshäufigkeit [Kollisionen/Jahr]	mittlere Zeit zwischen den Kollisionen [Jahre]
	geografische Breite	geografische Länge	geografische Breite	geografische Länge					
1	54° 01.230' N	04° 54.103' O	54° 08.520' N	06° 20.678' O	51	0.000040	25320	0.002020	495
2	54° 11.400' N	06° 20.483' O	54° 04.200' N	04° 53.362' O	51	0.000037	27030	0.001900	526
3	54° 21.423' N	06° 20.650' O	54° 32.001' N	06° 04.193' O	14	0.000035	28330	0.000505	1980
4	54° 06.642' N	05° 05.058' O	55° 35.941' N	06° 41.420' O	105	0.000032	31750	0.003310	302
5	55° 36.302' N	06° 34.997' O	54° 06.984' N	04° 59.616' O	105	0.000021	48540	0.002170	461
6	54° 32.001' N	06° 04.193' O	54° 42.462' N	05° 47.127' O	14	0.000020	49800	0.000290	3448
7	53° 51.540' N	06° 21.831' O	54° 11.400' N	06° 20.484' O	20	0.000020	49880	0.000399	2506
8	53° 50.239' N	06° 21.950' O	53° 28.200' N	04° 36.000' O	66	0.000018	54350	0.001210	826
9	55° 06.054' N	06° 12.756' O	54° 24.457' N	05° 29.528' O	49	0.000014	71890	0.000675	1481
10	54° 12.401' N	07° 30.172' O	54° 11.400' N	06° 20.483' O	41	0.000013	78130	0.000522	1916



**Abbildung 11: Darstellung der Routen mit den größten normierten Kollisionshäufigkeiten von manövrierunfähigen Schiffen mit Installationen der Windparks**



## 5.2 Zwischenergebnisse ohne AIS, Notfallschlepper und Seeraumbeobachtung

**Tabelle 11: Kumulative Zwischenergebnisse der Risikoanalyse ohne risikomindernde Maßnahmen**

Szenario	Kollisionshäufigkeit [1/Jahr]	stat. zu erwartende Zeit zwischen zwei Kollisionen [Jahre]
Kollision eines manövrierfähigen Schiffes mit Installationen des Windparks	0.0015	645
Kollision eines manövrierunfähigen Schiffes mit Installationen des Windparks	0.0162	62
Gesamt	0.0178	56

### 5.3 Kumulatives Gesamtergebnis

Die Ergebnisse der kumulativen Betrachtung der Offshore-Windparkfläche Windbostel Ost und der kumulativ berücksichtigten Windparks mit und ohne Berücksichtigung der Wirkung risikomindernder Maßnahmen sind in Tabelle 12 zusammengestellt. Die Kollisionshäufigkeit für die kumulative Aufstellung von manövrierfähigen und manövrierunfähigen Schiffen ergibt, unter Berücksichtigung von AIS, einer Verkehrsüberwachung/-Seeraumbeobachtung der Variante 3 (s. Kapitel 4.2) und berücksichtigter Notschlepperkapazität, eine Wiederhol frequenz von 136 Jahren.

**Tabelle 12: Kumulative Analyseergebnisse ohne und unter Berücksichtigung der risikomindernden Maßnahmen**

Szenario  Kumulative Betrachtung	Kollisionshäufigkeit			
	für manövrierfähige Schiffe  [1/Jahr]	für manövrierunfähige Schiffe  [1/Jahr]	für manövrierfähige und manövrierunfähige Schiffe  [1/Jahr]	stat. zu erwartende Zeit zwischen zwei Kollisionen [Jahre]
ohne risikomindernde Maßnahmen (Verkehrsüberwachung/Seeraumbeobachtung, AIS, Notfallschlepper)	0.0016	0.0162	0.0178	56
mit AIS, ohne Verkehrsüberwachung/Seeraumbeobachtung und ohne Notfallschlepper	0.0012	0.0162	0.0174	57
mit AIS, mit Verkehrsüberwachung/Seeraumbeobachtung der Variante 3 und ohne Notfallschlepper	0.0005	0.0147	0.0152	66
mit AIS, Verkehrsüberwachung/Seeraumbeobachtung der Variante 3 und Notschlepper Nordic	0.0005	0.0069	0.0069	136

## 6 SCHLEPPERWIRKSAMKEIT

Wie die Ergebnisse aus Kapitel 5.3 zeigen, hat die Möglichkeit des Einsatzes von Notschleppern einen erheblichen Einfluss auf die Kollisionshäufigkeit von manövrierunfähigen Schiffen mit Installationen der Windparks. Eine Kollision mit einem driftenden Schiff kann in Abhängigkeit verschiedener Faktoren durch rechtzeitige Bergung von einem Schlepper verhindert werden (vgl.: A.3.1 Bergung mit Schleppunterstützung).

Die Schlepperwirksamkeit kann explizit aus den errechneten Ergebnissen für die Kollisionshäufigkeiten für manövrierunfähige Schiffe bestimmt werden. Die Wirksamkeit des Schleppers ergibt sich folgendermaßen:

$$\text{Schlepperwirksamkeit} = \frac{\text{Häufigkeit der Kollision zwischen Schiff und Windenergieanlage (ohne Schleppereinsatz)}}{\text{Häufigkeit der Kollision zwischen Schiff und Windenergieanlage (mit Schleppereinsatz)}}$$

Die errechneten Faktoren der Schlepperwirksamkeit der berücksichtigten Notschlepper sind bei Ansatz einer Verkehrsüberwachung/Seeraumbeobachtung der Variante 3 für die kumulative Betrachtung in der folgenden Tabelle aufgeführt.

**Tabelle 13: Schlepperwirksamkeit der berücksichtigten Schlepper für die Kumulativbetrachtung**

	Kumulative Betrachtung Offshore-Windparkfläche Windbostel Ost
Ermittelte Schlepperwirksamkeit für manövrierunfähige Schiffe	2,1

## 7 KOLLISIONSRISIKO FÜR DIE OFFSHORE-WINDPARKFLÄCHE WINDBOSTEL OST

In diesem Abschnitt werden die im vorangegangenen Kapitel ermittelten Kollisionswiederholperioden mit den bei Kollisionen auftretenden Konsequenzen verknüpft. Als Konsequenzen werden die Folgen einer Kollision zwischen Schiffen und Windenergieanlagen bezeichnet. Diese werden in Form von Mengen an austretenden Schadstoffen ermittelt. Bei der Betrachtung der Konsequenzen wird wiederum zwischen verschiedenen Kollisionsszenarien unterschieden. Dies ist in der Tatsache begründet, dass Kollisionen zwischen manövrierfähigen Schiffen und Windenergieanlagen grundsätzlich von solchen zwischen manövrierunfähigen Schiffen und Windenergieanlagen zu unterscheiden sind.

Aufgrund der angenommenen kollisionsfreundlichen Konstruktion der Fundamente wird als kritische Driftgeschwindigkeit eine Geschwindigkeit von 2,0 m/s angesetzt, auch wenn diese für das jeweilige verwendete OWEA-Fundament noch im Detail nachgewiesen werden muss. Bei einem Überschreiten dieser Geschwindigkeit wird angenommen, dass die Schiffshülle beschädigt wird und es zu einem Schadstoffaustritt kommt. Eine Zerstörung der Windkraftanlage und ein Austritt der in der Anlage vorhandenen Schadstoffe wird bei jeder Kollision angenommen.

Bei einer kleineren Kollisionsgeschwindigkeit als 2,0 m/s wird angenommen, dass der Schiffskörper intakt bleibt und keine Schadstoffe aus dem Schiff austreten. Die kritische Geschwindigkeit von 2,0 m/s wird von driftenden Schiffen nur bei starken Winden und/oder Strömungen erreicht und ist außerdem vom Schiffstyp und Schiffgröße abhängig.

## 7.1 Risiko für die kumulative Betrachtung

In Tabelle 14 sind die mittleren freigesetzten Schadstoffmengen für unterschiedliche Schiffstypen aufgelistet

**Tabelle 14: Mittlere freigesetzte Treibstoff- und Ladeölmengen für manövrierfähige und manövrierunfähige Schiffe**

Konsequenzanalyse manövrierfähige und manövrierunfähige Schiffe		
Schiffstyp	Mittlere freigesetzte Treibstoffmenge [t/Kollision]	Mittlere freigesetzte Ladeölmenge [t/Kollision]
Tankschiffe	0.4	163.0
Cargoschiffe	1.4	0.0
Fähren & Passagierschiffe	0.0	0.0

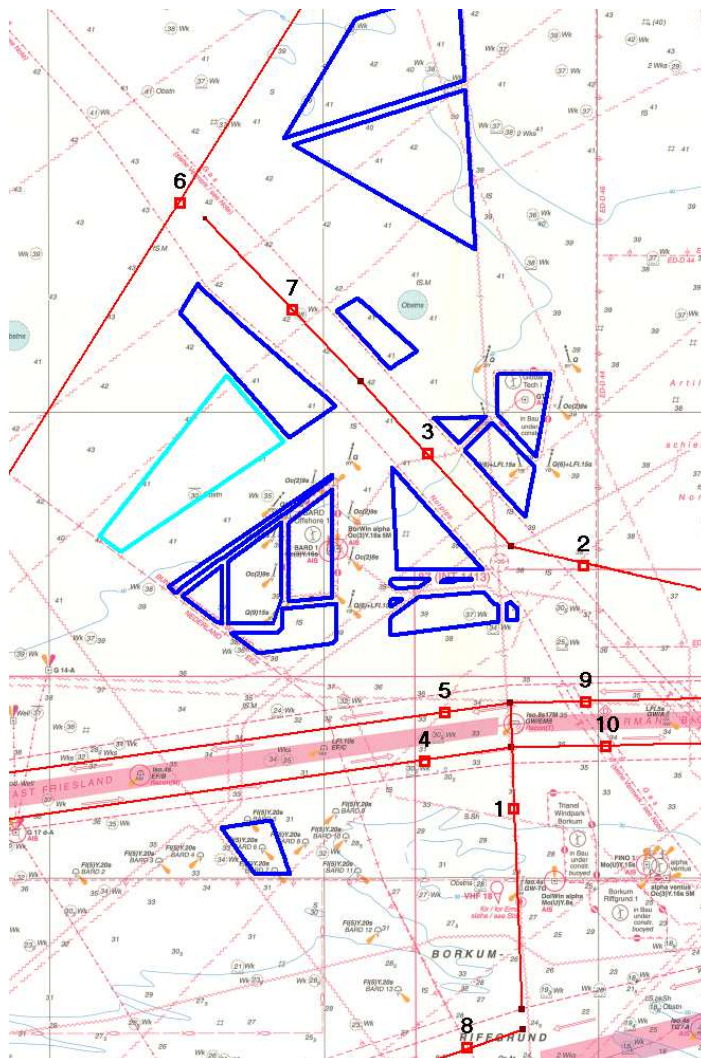
Das Gesamtrisiko an austretenden Schadstoffen für die kumulative Betrachtung beträgt 2.64 t/Jahr. Das schiffsspezifische Risiko für manövrierfähige und manövrierunfähige Schiffe ist in Tabelle 15 und das routenspezifische Risiko für die Routen mit den größten auf die Routenlänge normierten Risikoanteilen in Tabelle 16 dargestellt. Diese Routenabschnitte der Tabelle 16 sind in Abbildung 12 dargestellt und entsprechend nummeriert.

**Tabelle 15: Schiffsspezifisches Risiko**

Schiffstypspezifisches Risiko			
Schiffstyp	Risiko $R_{öl,k}$ [t/Jahr] für manövrierfähige Schiffe	Risiko $R_{öl,k}$ [t/Jahr] für manövrierunfähige Schiffe	Risiko $R_{öl,k}$ [t/Jahr] für manövrierfähige und manövrierunfähige Schiffe
Tankschiffe	0.72	0.48	1.19
Cargoschiffe	0.07	1.32	1.39
Fähren & Passagierschiffe	0.00	0.05	0.05
		Gesamtrisiko	2.64

**Tabelle 16: Routenspezifisches Risiko**

normiertes Routenabschnittsspezifisches Risiko							normiertes Risiko $R_{0,k}$ [t/Jahr/sm] für manövrierfähige Schiffe	normiertes Risiko $R_{0,k}$ [t/Jahr/sm] für manövrierunfähige Schiffe	normiertes Risiko $R_{0,k}$ [t/Jahr/sm] für manövrierfähige und manövrierunfähige Schiffe	Risiko $R_{0,k}$ [t/Jahr] für manövrierfähige und manövrierunfähige Schiffe
Nr.	Koordinaten des Abschnittsbeginns		Koordinaten des Abschnittsendes		Routen- abschnitts- länge[sm]					
	geografische Breite	geografische Länge	geografische Breite	geografische Länge						
1	53° 51.540' N	06° 21.831' O	54° 11.400' N	06° 20.484' O	20	0.010600	0.003910	0.014510	0.289200	
2	54° 21.423' N	06° 20.650' O	54° 12.678' N	07° 26.518' O	40	0.007111	0.000250	0.007361	0.290900	
3	54° 21.423' N	06° 20.650' O	54° 32.001' N	06° 04.193' O	14	0.000833	0.004690	0.005523	0.079000	
4	54° 01.230' N	04° 54.103' O	54° 08.520' N	06° 20.678' O	51	0.000000	0.005090	0.005090	0.260000	
5	54° 11.400' N	06° 20.483' O	54° 04.200' N	04° 53.362' O	51	0.000000	0.004850	0.004850	0.249000	
6	54° 06.642' N	05° 05.058' O	55° 35.941' N	06° 41.420' O	105	0.001660	0.002670	0.004330	0.455000	
7	54° 32.001' N	06° 04.193' O	54° 42.462' N	05° 47.127' O	14	0.001199	0.002040	0.003239	0.046800	
8	53° 50.239' N	06° 21.950' O	53° 28.200' N	04° 36.000' O	66	0.000000	0.002540	0.002540	0.168000	
9	54° 12.401' N	07° 30.172' O	54° 11.400' N	06° 20.483' O	41	0.000000	0.002250	0.002250	0.091600	
10	54° 08.520' N	06° 20.678' O	54° 09.477' N	07° 33.125' O	42	0.000000	0.002090	0.002090	0.088600	
Gesamtrisiko [t/Jahr] aller Routenabschnitte									2.64	



**Abbildung 12: Darstellung der Routen mit dem größten normierten Risikoanteil für die kumulative Betrachtung**

In Tabelle 17 sind die austretenden Schadstoffmengen ohne und mit Berücksichtigung risikomindernder Maßnahmen für die kumulative Anordnung angegeben.

**Tabelle 17: Analyseergebnisse ohne und mit Berücksichtigung der risikomindernden Maßnahmen für die kumulative Betrachtung**

Szenario	Austretende Schadstoffmengen [t/Jahr]
ohne risikomindernde Maßnahmen	2.64
mit AIS, ohne Verkehrsüberwachung/ Seeraumbeobachtung und ohne Notfallschlepper	2.48
mit AIS, mit Verkehrsüberwachung/See- raumbeobachtung der Variante 3 und ohne Notfallschlepper	1.93
mit AIS, Verkehrsüberwachung/Seeraum- beobachtung der Variante 3 und Notschlepper Nordic	1.04

Die Ergebnisse der Konsequenzbetrachtung für die kumulative Aufstellung sind als gering einzustufen. Aufgrund der kritischen Driftgeschwindigkeit von 2.0 m/s werden bei Kollisionen mit manövrierunfähigen Schiffen annähernd keine Schadstoffaustritte am Schiff ermittelt. Bei geringeren kritischen Driftgeschwindigkeiten würde dieser Anteil der Schadstoffmengen einen größeren Beitrag zum Risiko liefern. Der Hauptanteil der ermittelten austretenden Schadstoffe resultiert aus den möglichen Kollisionen manövrierfähiger Schiffe mit Anlagen der Windparks.

## 8 RISIKOBEURTEILUNG

In diesem Abschnitt wird die Einstufung des berechneten Risikos in die Risikomatrix des Anhang 1 des BSH-Standards „Konstruktive Ausführung von Offshore-Windenergieanlagen“ /12/ vorgenommen. Neben der Einstufung des Umweltrisikos werden Einstufungen des Risikos in Bezug auf die Kollisionskonsequenzen Schiff-OWEA und Personensicherheit angegeben.

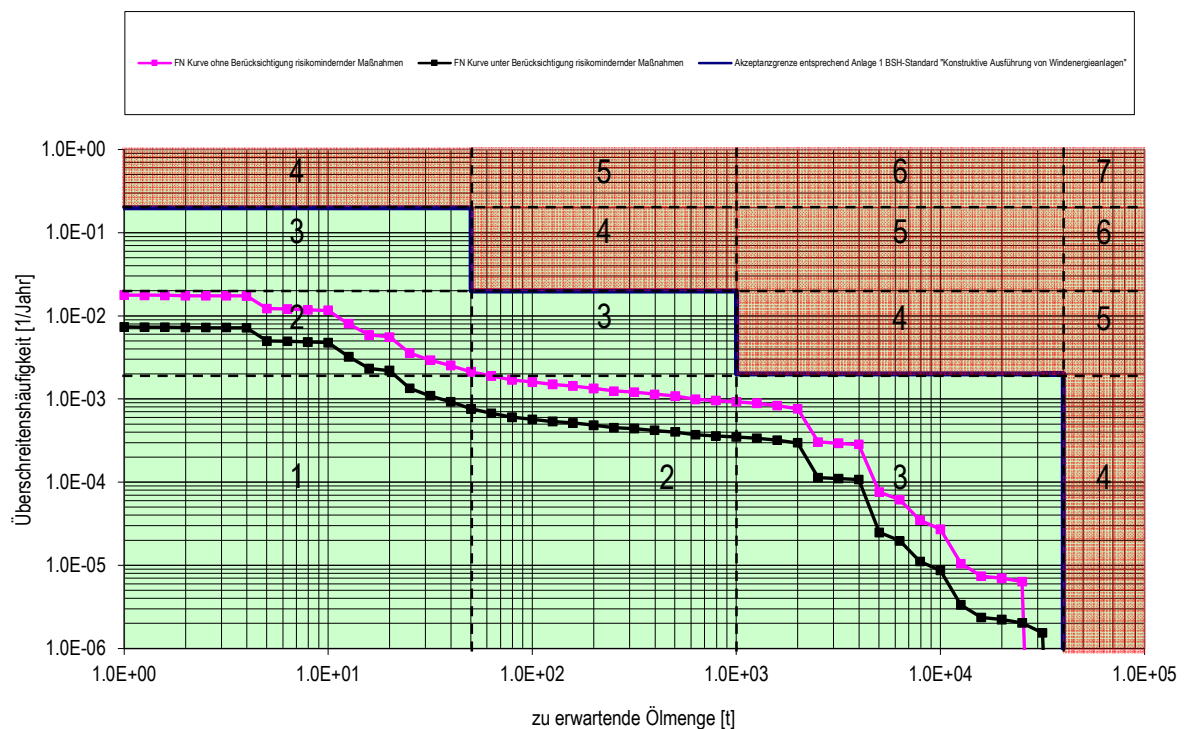
### 8.1 Umweltauswirkungen

Bei Kollisionen mit driftenden Schiffen ist entsprechend der Annahme eines kollisionsfreundlichen Fundamentes bei einer Driftgeschwindigkeit bis 2 m/s kein Aufreißen der Außenhaut des Schiffes zu erwarten /12/. Höhere Driftgeschwindigkeiten treten äußerst selten auf, da in der Regel Driftgeschwindigkeiten unter 2m/s (4 kn) festgestellt werden. Nur bei äußerst ungünstigen Verhältnissen muss eventuell mit leicht höheren Driftgeschwindigkeiten und somit mit der Möglichkeit des Aufreißens der Schiffshülle gerechnet werden. Hinzu kommen Kollisionen manövrierfähiger Schiffe, bei denen ebenfalls in ungünstigen Konstellationen mit einem Aufreißen der Schiffshülle im Tankbereich gerechnet werden muss. Insgesamt kann die Einstufung der Häufigkeit eines Ölaustritts aus einem Schiff bei Berücksichtigung der in der Risikoanalyse angegebenen risikomindernden Maßnahmen in die Häufigkeitsklasse „äußerst selten“ vorgenommen werden. Die beschriebenen Szenarien mit einem Ölaustritt aus dem Schiff können in die Konsequenzklassen „beträchtlich“ bis „schwerwiegend“ und somit in der Risikomatrix mit einer Risikoprioritätszahl (RPZ) von 2 bis 3 eingestuft werden.

Ein ähnliches Bild (RPZ = 2 bis 3) liefert die Auswertung der FN-Diagramme. Die FN-Diagramme stellen den Zusammenhang zwischen Schadstoffaustrittsmengen und Häufigkeiten her und liefern somit die notwendigen Informationen für eine Einstufung des Risikos in die Risikoprioritätszahlen (RPZ). In Abbildung 13 ist das FN-Diagramm mit der zugehörigen RPZ dargestellt. Als risikomindernde Maßnahmen sind in dem Diagramm die Installation von AIS-Geräten an den Windparkinstallationen, eine Verkehrsüberwachung/Seeraumbeobachtung der Variante 3 sowie Notschlepper Nordic berücksichtigt. Für die Abgrenzung der einzelnen Konsequenzklassen der Anlage 1 des BSH-Standards wurden folgende Einstufungen anhand der austretenden Schadstoffe vorgenommen.



Konsequenzklasse	Freigesetzte Schadstoffmenge in t <sub>öl</sub>
Unbedeutend	1 bis 50 t <sub>öl</sub>
Beträchtlich	50 bis 1.000 t <sub>öl</sub>
Schwerwiegend	1.000 bis 40.000 t <sub>öl</sub>
Katastrophal	Mehr als 40.000 t <sub>öl</sub>



**Abbildung 13: Einstufung des Risikos anhand des FN-Diagramms für die kumulative Betrachtung**

Eine Auswertung der im FN-Diagramm dargestellten Kurven liefert für die kumulative Betrachtung folgende Kollisionshäufigkeitswerte, bei denen gewisse Ölmenge überschritten werden (Tabelle 18).

**Tabelle 18: Einstufungen der Konsequenzen anhand der austretenden Schadstoffe für die kumulative Betrachtung**

Konsequenz- klasse Umwelt	Ölmenge [t]	Überschreitenshäufigkeit [1/Jahr] (Wiederholperiode in Jahren)	
		ohne Berücksichtigung risikomindernde Maßnahmen	mit Berücksichtigung risikomindernder Maßnahmen
<b>unbedeutend</b>	≥ 1 t	0.018 (56 Jahre)	0.007 (136 Jahre)
<b>beträchtlich</b>	≥ 50 t	0.0021 (472Jahre)	0.0007 (1319 Jahre)
<b>schwerwiegend</b>	≥ 1000 t	0.00093 (1081Jahre)	0.00035 (2861 Jahre)

## 8.2 Kollisionskonsequenzen Schiff-OWEA

Die berechneten Kollisionshäufigkeiten von Schiffen mit Installationen der betrachteten Offshore-Windparks in der Nähe der Offshore-Windparkfläche Windbostel Ost beziehen sich auf alle möglichen Kollisionsfälle. Die Ergebnisse unter Berücksichtigung der risikomindernden Maßnahmen sind in die Kategorie „äußerst selten“ (10-3≥H) einzustufen. Bei einer Kollision eines Seeschiffes mit einer OWEA wird diese in der Regel beschädigt oder zerstört, so dass diese nicht weiter betrieben werden kann. Eine derartige Beschädigung kann bereits bei Kollisionen mit Driftgeschwindigkeiten unter 2,0 m/s auftreten. Es kann davon ausgegangen werden, dass eine Zerstörung der OWEA nicht in allen berechneten Kollisionsfällen eintritt. Die zu erwartenden Konsequenzen sind in die Konsequenzklassen „beträchtlich“ bis „schwerwiegend“ einzustufen. Somit kann eine RPZ für die Risiken im Bereich der OWEA mit 2 bis 3 berechnet werden.

Eine Einstufung der Risiken in Bezug auf Kollisionskonsequenzen im Bereich der Anlagen der kumulativ betrachteten Windparks wurde an dieser Stelle nicht vorgenommen, da diese nach Auffassung des DNV einzeln für jeden Windpark vorgenommen werden sollten.

## 8.3 Personensicherheit

Die Sicherheit von beteiligten Personen wurde in dieser Risikoanalyse nicht explizit betrachtet. Jedoch können die Gefährdungen aus früheren Arbeiten des DNV abgeleitet werden, in denen eine Gefahrenanalyse für Offshore-Windparks vorgenommen wurde. In dieser Gefahrenanalyse wurden mögliche Personenschäden der Kategorie „schwerwiegend“ in die Kategorien „äußerst selten“ und somit in die RPZ 3 eingestuft.

## 9 LITERATUR

- /1/ MARIN, DNV und Germanischer Lloyd: Harmonisierung der Grundannahmen für Kollisionsrisikoanalysen zwischen MARIN, DNV und GL; Hamburg, Dezember 2004.
- /2/ BMVBW: Genehmigungrelevante Richtwerte für Offshore-Windparks - Bericht einer Arbeitsgruppe; Referat LS 23, Bonn, März 2005.
- /3/ Germanischer Lloyd: Offshore Windparks – Wirksamkeit kollisionsverhindernder Maßnahmen – Abschlußbericht, Bericht Nr. NB-ER 2008.178, Version 1.8, Risk Assessment and Mechanical Engineering/NB-ER, 2008-11-24
- /4/ Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie: Häufigkeitsverteilungen der signifikanten Wellenhöhe gegen die Windgeschwindigkeit, Hamburg, 2000.
- /5/ <http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Vorhersagen/Gezeiten/810.jsp>
- /6/ Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie. Nr. 20062 "Naturverhältnisse - Nordsee und Englischer Kanal" Hamburg und Rostock; 2009.
- /7/ Olsen, D., H.-H. Gotfredsen, Y. Fujii: Risk Reducing Effect of the Great Belt VTS System; Publ. no. 810, VTS 92 – 7th International VTS Symposium, Vancouver, Canada, 1992.
- /8/ Fujii, Y., N. Mizuki: Design of VTS systems for water with bridges; Proc. of the International Symposium on Advances in Ship Collision Analysis. Gluwer & Olsen eds.; Copenhagen, Denmark; 1998.
- /9/ Foxwell, D.: AIS: The next big thing in navigation; Fairplay, Nov. 2003.
- /10/ SAFESHIP – Reduction of Ship Collision Risks for Offshore Wind Farms, Report, Germanischer Lloyd AG, MARIN, Technical University of Denmark, January 2005.
- /11/ Hydrographic Office; „Admiralty Tidal Stream Atlas – north sea eastern part“; Taunton; Edition 2 2004
- /12/ Standard „Standard Konstruktion“, BSH- Nr: 7005, BSH 2015
- /13/ „Voruntersuchung zur verkehrlich-schifffahrtspolizeilichen Eignung von Flächen in der AWZ der Nord- und Ostsee“, DNV GL SE Maritime Advisory, M-W-ADER 2019.137, Rev. 1.00, 2019-12-06
- /14/ Flächenentwicklungsplan 2025 für die deutsche Nordsee und Ostsee“, BSH, Hamburg, 30. Januar 2025
- /15/ Development Framework for Offshore Wind Energy“, Adopted by the Council of Ministers on 20 December 2024, VERSION 4 February 2025



# ANHANG A

## METHODEN DER RISIKOBERECHNUNG

- A.1 Risikoberechnungen für den Windpark
- A.2 Verfahren zur Berechnung des Risikos für Kollisionen **manövrierfähiger Schiffe** mit Installationen des Windparks
  - A.2.1 Berechnung der Kollisionshäufigkeiten
  - A.2.2 Berechnung der Kollisionskonsequenzen
  - A.2.3 Berechnung des Kollisionsrisikos
- A.3 Verfahren zur Berechnung von Risiken für die Kollisionen **manövrierunfähiger Schiffe** mit Installationen des Windparks
  - A.3.1 Berechnung der Kollisionshäufigkeit
  - A.3.2 Berechnung der Kollisionskonsequenzen
  - A.3.3 Berechnung des Kollisionsrisikos
- A.4 Literatur zum Anhang A

## A.1 Risikoberechnungen für den Windpark

Verfahren zur Berechnung von Risiken können in statistische<sup>1</sup> und analytische<sup>2</sup> Verfahren eingeteilt werden.

Statistischen Verfahren basieren auf der Erfassung ("Zählung") von Sachverhalten. Bezogen auf Kollisionseignisse sind das z.B. die Zahl von Schiff-Schiff Kollisionen in einem bestimmten Seegebiet. Sofern sich die Randbedingungen der Statistik nicht ändern, können aus den statistisch ermittelten Werten Prognosen abgeleitet werden. Bei analytischen Verfahren wird versucht, die Einflussgrößen des Sachverhaltes (z.B. Windeinfluss, Zusammensetzung des Schiffsverkehrs) und das Zusammenspiel der Einflussfaktoren zu ermitteln. Bei der Beschreibung der Einflussgrößen werden dann wiederum statistische Methoden verwendet.

Sowohl statistische als auch analytische Verfahren zur Risikoberechnung werden in der Technik angewendet. Welche Vorgehensweise besser geeignet ist, um bestimmte Sachverhalte zu klären, ergibt sich aus einer Abwägung der Vor- und Nachteile der jeweiligen Verfahren.

### Vorteile statistischer Verfahren

- Statistische Verfahren beinhalten alle Einflussgrößen  
Da statistische Verfahren auf Messungen und Zählungen basieren, erfassen sie naturgemäß alle wirkenden Einflussfaktoren und deren Zusammenwirken.
- Grundlage sind historische Daten  
Da Statistiken auf tatsächlich geschehenen Ereignissen basieren, liefern sie ein exaktes Abbild des Sachverhaltes.
- Einfache Ermittlung von Statistiken  
Sofern der Sachverhalt direkt messbar ist, können statistische Werte sehr schnell und einfach ermittelt werden.

### Nachteile statistischer Verfahren

- Vertrauen statistischer Ergebnisse  
Das Gesetz der großen Zahlen besagt, dass sich die relative Häufigkeit (Wahrscheinlichkeit) eines Zufallsergebnisses immer weiter an die theoretische Wahrscheinlichkeit für dieses Ergebnis (Erwartungswert) annähert, je häufiger das Zufallsexperiment durchgeführt wird. Das bedeutet, um eine "sichere" statistische Aussage über zufällige Ereignisse zu machen, müssen diese in ausreichender Menge vorhanden sein bzw. gemessen werden. Bei sehr selten auftretenden Ereignissen ist dies häufig nicht gegeben. Kollisionseignisse von Schiffen mit Installationen von Windparks sind bisher nicht bekannt geworden. Eine Auswertung von Kollisionseignissen aus statistischen Unfallzahlen für genau dieses Szenario ist daher nicht möglich.
- Übertragung statistischer Ergebnisse  
Die Übertragung statistischer Werte von einem System auf ein anderes System ist nur begrenzt möglich. Mit Bezug auf Kollisionen von Schiffen mit Installationen eines Windparks bedeutet das, dass bei statistisch ermittelten Kollisionshäufigkeiten eine Übertragung von einem Windpark zu einem anderen Windpark nur zulässig ist, sofern die Randbedingungen (nautische Gegebenheiten, Umwelteinflüsse, etc.) bei beiden Windparks die gleichen sind. In der Regel unterscheiden sich diese.
- Entwicklung des Systems  
Aus den ersten beiden Nachteilen ergibt sich ein dritter Nachteil. Sind die zu beobachtenden Ereignisse sehr selten, so vergeht ein großer Zeitraum bevor statistisch sichere Aussagen formuliert werden können. Innerhalb dieses Zeitraums verändert sich das System jedoch selbst. Beispiele hierfür sind die Veränderungen der Schiffsbewegungen auf Grund wirtschaftlicher Veränderungen oder die Entwicklung neuer Hilfsmittel für die Navigation bzw. neuer Schiffsmaschinenanlagen. Das bedeutet, dass sich das System an sich geändert hat und statistische Aussagen auf der Basis früherer Ereignisse nicht mehr dem aktuellen Systemzustand entsprechen.

<sup>1</sup> Statistik, allg.: (meist in Tabellenform zusammengestellte) Ergebnisse von zahlenmäßigen Erfassungen bestimmter Sachverhalte (z.B. Bevölkerungs-, Ind., Landwirtschafts-, Verkehrs- und Preisstatistik).

<sup>2</sup> Analyse allg.: Verfahren, bei dem Erkenntnisse durch die Untersuchung der einzelnen, elementaren Bestandteile eines Ganzen gewonnen werden (Ggs.: Synthese).

### Vorteile analytischer Verfahren

- Unabhängigkeit von historischen Kollisionsereignissen  
Ein Vorteil analytischer Verfahren ist, dass sie auch zur Prognose seltener Ereignisse geeignet sind, weil für sie keine historischen Daten des Ereignisses selbst notwendig sind. Bei analytischen Verfahren werden die elementaren Bestandteile und deren Zusammenspiel betrachtet. Mit Bezug auf Kollisionsszenarien bedeutet das, dass einzelne Einflussgrößen (z.B. auftretende Windrichtungen) separat untersucht werden können und nicht nur im Zusammenhang mit Kollisionen von Schiffen zu betrachten sind. Das Erfassen der elementaren Bestandteile wiederum kann auf statistischem Wege erfolgen.
- Berücksichtigung der Entwicklung des Systems  
Durch die Kenntnis des Zusammenwirkens der einzelnen Einflussfaktoren können auch neue Einflussgrößen in das System eingearbeitet werden. Das bedeutet, dass neue Entwicklungen (z.B. die Wirkung von AIS) in der Schiffstechnik bei der Prognose von Kollisionsereignissen berücksichtigt werden können.

### Nachteile analytischer Verfahren

- Komplexes mathematisches Modell  
Je mehr Einflussfaktoren vorhanden sind und je komplexer deren Zusammenspiel ist, umso schwieriger ist es, ein mathematisches Modell für deren Beschreibung zu finden. Um die Komplexität des mathematischen Modells in Grenzen zu halten, werden wesentliche und unwesentliche Einflüsse voneinander getrennt. Die Vernachlässigung von unbedeutenden Einflüssen führt zu Ungenauigkeiten in den Ergebnissen.
- Prüfung des analytischen Verfahrens  
Um die Qualität des analytischen Verfahrens zu überprüfen, ist eine Überprüfung des Verfahrens notwendig. Sofern vorhanden, werden dafür statistische Daten historischer Ereignisse herangezogen. Exemplarisch wird dann ein Vergleich der Ergebnisse des analytischen Verfahrens mit den statistisch ermittelten Werten vorgenommen.

## A.2 Verfahren zur Berechnung des Risikos für Kollisionen manövrierfähiger Schiffe mit Installationen des Windparks

### A.2.1 Berechnung der Kollisionshäufigkeiten

Basierend auf Arbeiten von Fujii /A-1/ und MacDuff /A-2/ wurde von Pedersen /A-3/ ein Verfahren präsentiert, dass die Berechnung der Häufigkeit von Kollisionen von Schiffen mit im Wasser befindlichen Objekten ermöglicht.

Das Verfahren basiert auf zwei Bedingungen, die gleichzeitig erfüllt sein müssen, damit es zur Kollision eines Schiffes mit einem Objekt kommt.

1. Das Schiff muss sich auf Kollisionskurs mit einer Windenergieanlage oder Umspannstation des Windparks befinden (die Wahrscheinlichkeit dafür wird mit  $P_{fK,k}$  bezeichnet).
2. Die Schiffsführung unternimmt keine Kurskorrektur, um die drohende Kollision zu vermeiden oder die Kurskorrektur erfolgt zu spät, um die Kollision zu vermeiden (die Wahrscheinlichkeit dafür wird mit  $P_{fM,k}$  bezeichnet).

Für beide Bedingungen muss die Eintrittswahrscheinlichkeit bestimmt werden.

Für die Berechnung der Kollisionshäufigkeit werden diese Wahrscheinlichkeiten ( $P_{fM,k}$ ,  $P_{fK,k}$ ) mit der Zahl der Schiffsbewegungen  $n_{S,k}$  (Zahl der Schiffspassagen einer Routenabschnitts) multipliziert, siehe Gleichung (A-1).

Die Berechnung der Wahrscheinlichkeiten  $P_{fM,k}$  und  $P_{fK,k}$  wird im Folgenden erläutert.

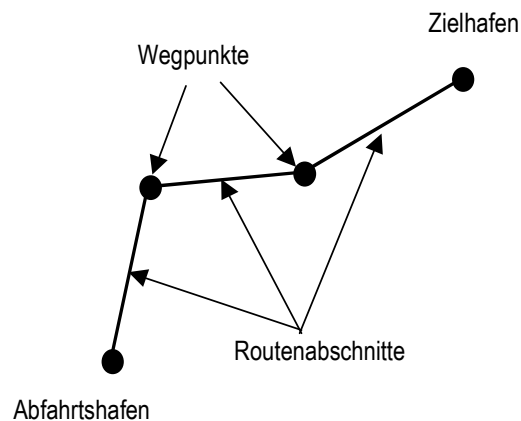
$$n_{\text{coll,pow}} = \sum_K n_{\text{coll,pow},k} = \sum_K P_{fM,k} \cdot P_{fK,k} \cdot n_{S,k} \quad (\text{A-1})$$

Befinden sich in einem Seegebiet mehrere Schifffahrtsrouten, so kann die Gesamtkollisionshäufigkeit  $n_{\text{coll,pow}}$  aller Routen durch Addition der Kollisionshäufigkeiten  $n_{\text{coll,pow},k}$  der einzelnen Routenabschnitte der Schifffahrtsrouten bestimmt werden.

#### - Wahrscheinlichkeit $P_{fK,k}$ von Schiffen auf Kollisionskurs

Für die Berechnung der Kollisionshäufigkeit muss die Wahrscheinlichkeit  $P_{fK,k}$  bestimmt werden. Diese Wahrscheinlichkeit beschreibt den Anteil von Schiffen des Seegebietes, der sich auf Kollisionskurs mit dem Windpark befinden.

Für die Berechnung dieser Wahrscheinlichkeit wird modellhaft davon ausgegangen, dass Schiffe auf idealisierten Routen fahren, die typischerweise aus dem kürzesten Weg zwischen Abfahrts- und Zielhafen bestehen. Aufgrund nautischer Restriktionen wie Tiefgang, markierten Wasserwegen, Zwangswegen etc. muss der Kurs im Allgemeinen an so genannten Wegpunkten geändert werden. Eine Route besteht somit aus mindestens einem Routenabschnitt. Ein Routenabschnitt wird durch Abfahrts-, Zielhafen oder durch Wegpunkte begrenzt (siehe Abbildung A-1).



#### Abbildung A-1: Zusammenhang von Schiffsroute, Routenabschnitt und Wegpunkten

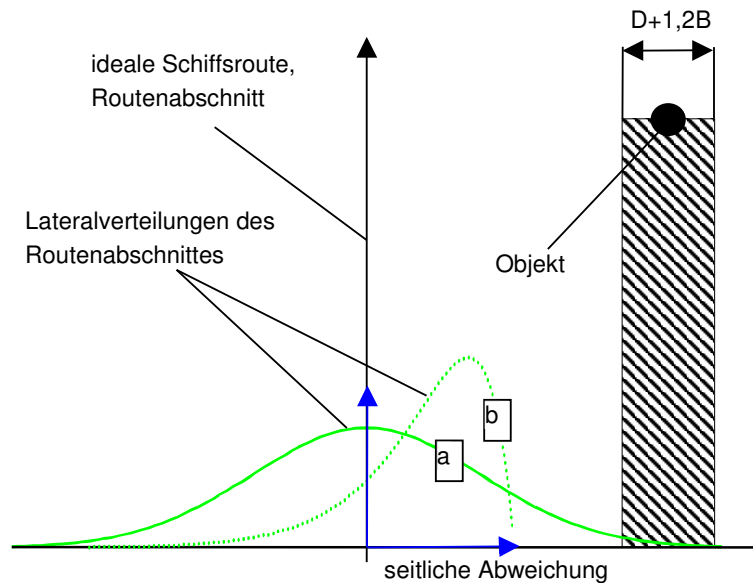
Aufgrund von Ungenauigkeiten beim Abstecken des Kurses beziehungsweise Versatz durch Wind, Strömung und Wellen weichen die tatsächlich gefahrenen Routen der Schiffe jedoch mehr oder weniger stark von der im Programm verwendeten, idealisierten Route ab.

Es wird davon ausgegangen, dass die Schiffsführung bestrebt ist, die ideale, kürzeste Route aus Zeit- und Kostengründen zu fahren. Folglich kann man auch davon ausgehen, dass die Wahrscheinlichkeit von kleinen Abweichungen größer ist, als die Wahrscheinlichkeit von großen Abweichungen.

Die Abweichung der Schiffe orthogonal zur idealen Route wird über sog. Lateralverteilungen (statistischen Verteilungsfunktionen) in die Berechnung einbezogen.

Bei Schifffahrtsrouten, die keinen nautischen Restriktionen unterliegen, geht man von Gauß'schen Normalverteilungen aus. Eine typische Lateralverteilung dieses Typs ist in Abbildung A-2 als "a" dargestellt. Bei dieser Verteilung geht man davon aus, dass die Abweichungen der Schifffahrtsrouten von der idealen Route nach beiden Seiten in gleichem Maße auftreten, also symmetrische Verteilungen vorhanden sind. Auf Zwangswegen wie Verkehrstrennungsgebieten oder betonnten Fahrwassern (Verteilungsfunktion "b" in Abbildung A-2) verschiebt sich das Maximum der Verteilungsfunktion (Modalwert) zum Rand des Fahrwassers, weil die Betonnung häufig als Orientierungspunkt genutzt wird und nach den Kollisionsverhütungsregeln ein Rechtsfahrgebot vorliegt.





**Abbildung A-2: Lateralverteilungen für den Schiffsverkehr**

Die Wahrscheinlichkeit  $P_{fk,k}$ , dass sich ein Schiff auf Kollisionskurs mit einer Windenergieanlage oder der Umspannstation befindet, ergibt sich aus der Fläche unter der jeweiligen Lateralverteilung  $h_i = f(x)$  des Routenabschnittes  $k$ , die von der Schattenfläche der OWEA/Umspannwerk (UW) plus 1.2 mal der Schiffsbreite  $B$  überdeckt wird. Für die  $i$ -te Installation mit dem Durchmesser  $D_i$  wird diese Wahrscheinlichkeit mit Gleichung (A-2) berechnet.

$$P_{fk,k} = \sum_i P_{fk,k,i} = \sum_i \int_{D_i+1,2B} f_k(x) dx \quad (A-2)$$

Durch Annahme der 1.2-fachen Schiffsbreite wird die Möglichkeit einer seitlichen Kollision berücksichtigt. Dies kann auftreten, wenn ein Schiff sich mit einem kleinen Schiebewinkel relativ zur Kurslinie fortbewegt (z. B. durch Windeinfluss).

Neben den Kollisionen der Kategorie I durch eine laterale Verteilung der Schiffe werden auch Kollisionen der Kategorie II durch einen Verpassen des Wegpunkt entsprechend den Angaben in /A-4/ berücksichtigt.

- *Wahrscheinlichkeit  $P_{fm,k}$  von Maßnahmen zur Kursänderung*

Die Wahrscheinlichkeit  $P_{fm,k}$ , dass ein Kollisionskurs auf einem Routenabschnitt nicht geändert wird, kann aus statistischen Daten oder mit Hilfe analytischer Methoden (Fehlerbaummethode, Bayes'sche Netzwerke) ermittelt werden.

Statistische Daten von Schiffsunfällen mit Offshore-Windparks liegen z. Z. nicht vor. Somit kann derzeit die Wahrscheinlichkeit  $P_{fm,k}$  nicht aus statistischen Daten abgeleitet werden. Eine Orientierung der Größenordnung dieser

Wahrscheinlichkeit liefern jedoch Unfallszenarien mit Brücken, Schiffsstrandungen oder Schiff-Schiff-Kollisionen aus unterschiedlichen Seegebieten. In Tabelle A-1 sind Minimal- und Maximalwerte für die Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{IM},k}$  aus unterschiedlichen Unfallszenarien der Schifffahrt gemäß /A-4/ dargestellt.

**Tabelle A-1: Bereiche der Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{IM},k}$  aus anderen Unfallszenarien der Schifffahrt /A-4/**

Szenario	Minimaler Wert	Maximaler Wert
Schiff - Schiff Kollisionen (frontale Kollisionen)	4.9E-05	5.18E-04
Schiff - Schiff Kollisionen (seitliche Kollision)	9.5E-05	1.11E-04
Schiffsstrandungen	8.0E-05	6.3E-04
Schiff - Brücke Kollisionen	4.0E-05	5.4E-04

Fujii und Mizuki geben in /A-5/ wird für die Kollision von Schiffen mit fixen Objekten ein Bereich für die Wahrscheinlichkeit von  $8.12\text{E-}05 < P_{\text{IM},k} < 5.26\text{E-}04$  an. Das angegebene Intervall für die Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{IM},k}$  wurde auf der Grundlage von Radarbeobachtungen erhoben und enthält alle möglichen Ursachen für Kollisionsunfälle einschließlich aller Aspekte menschlichen Versagens. Der entsprechend der Harmonisierung /A-6/ in den vorliegenden Berechnungen verwendete Wert für die Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{IM},k} = 3.0\text{E-}04$  entspricht dem Mittelwert des angegebenen Wahrscheinlichkeitsintervalls.

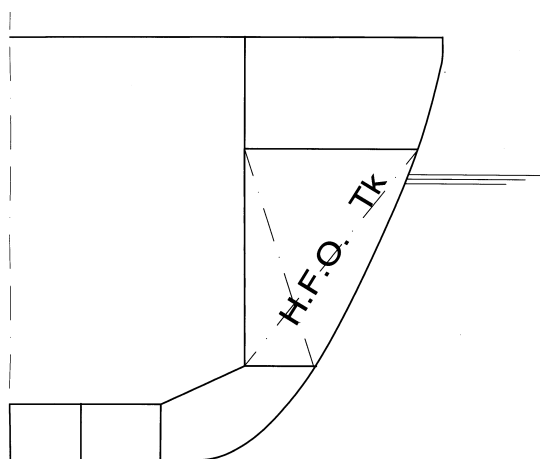
## A.2.2 Berechnung der Kollisionskonsequenzen

Je nach Ablauf einer Kollision eines Schiffes mit einer Installation eines Windparks sind unterschiedliche Konsequenzen zu erwarten.

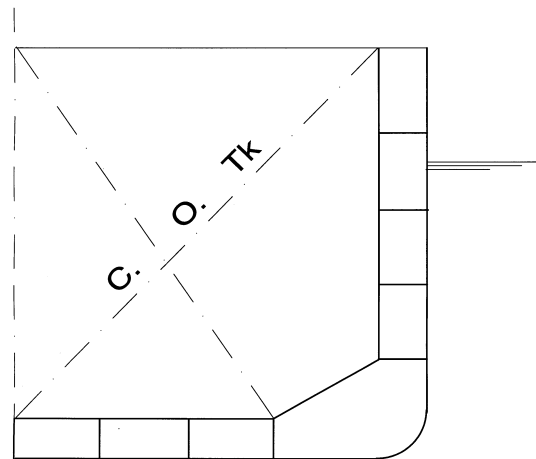
Ein mögliches Szenario des Auftreffens von Schiffen bei Kollisionen ist die frontale Kollision, bei der der Bug des Schiffes den Turm der OWEA zentral trifft. Bei einer derartigen Kollision ist damit zu rechnen, dass es zum Versagen des Turmes kommt. Dabei kann der Turm am Fundament oder in der Nähe des Kollisionspunktes abknicken. Bei einem zentralen Stoß ist mit einem Aufreißen der Außenhaut im Bereich von Tanks nicht zu rechnen.

Trifft das Schiff nicht zentrisch, sondern streift seitlich am Bug des Schiffes entlang, so ist ebenfalls mit dem Versagen des Turmes zu rechnen. Das relative steife konische Vorschiff kann einen großen Teil der Kollisionsenergie umwandeln, in dem das Schiff beim seitlichen Entlangschleifen vom Turm weggedrückt wird. Schäden am Vorschiff sind zu erwarten. Inwieweit ein seitliches Streifen des Schiffes am Turm zu einem Aufreißen der Schiffsaußenhaut im Bereich möglicher Ladetanks oder Brennstofftanks führen kann, ist derzeit nicht abschließend geklärt. Bei Einhüllenschiffen ist ein lokal begrenztes Aufreißen der Außenhaut denkbar. Bei Doppelhüllenschiffen ist ein Aufreißen der inneren Wand nur schwer vorstellbar, kann jedoch bisher nicht vollständig ausgeschlossen werden. Eine detaillierte Quantifizierung dieser Szenarien für manövrierfähige Schiffe erfolgte bisher nicht in einem vergleichbaren Rahmen wie die Quantifizierung der möglichen Szenarien für manövrierunfähige driftende Schiffe. Die Kollisionskonsequenzen durch Kollisionen manövrierunfähiger Schiffe mit Windenergieanlagen wurden intensiv in Forschungsvorhaben der TU Harburg (F. Biehl) und im europäischen SAFESHIP-Vorhaben /A-7/ betrachtet.

Zur Veranschaulichung der Lage von Brennstofftanks und Ladeölkzellen sind in Abbildung A-3 typische Schiffsquerschnitte dargestellt.



Typischer Achterschiffsquerschnitt eines Trockenfrachters/Containerschiffs mit einem Brennstoffseitentank (H.F.O. Tk)



Typischer Mittschiffsquerschnitt eines Doppelhüllentankers mit Ladeölzelle (C.O.Tk)

### Abbildung A-3: Typische Schiffsquerschnitte

Die Frage, ob die Gondel auf das kollidierende Schiff fällt und dadurch weitere Schäden bewirkt oder nicht auf das Schiff fällt, ist ebenfalls nicht abschließend wissenschaftlich untersucht.

Die Berechnung der Kollisionskonsequenzen konzentrieren sich auf die Freisetzung von Öl und Brennstoff sowie in den Installationen des Windparks enthaltene wassergefährdende Schadstoffe. Bei der Berechnung der Konsequenzen werden sowohl die Treibstofftanks als auch die Ladetanks von Schiffen betrachtet. Es werden zusätzlich Ölmengen berechnet, die im Falle einer Kollision durch umstürzende Windenergieanlagen freigesetzt werden. Bei Passagierschiffen wird angenommen, dass Brennstoff nur im Doppelboden und in Zwischentanks im Mitschiffsbereich gelagert wird. An diesen Positionen sind Schäden durch Kollisionen mit einer Windenergieanlage nicht zu erwarten und werden daher ausgeschlossen.

Grundlage der Berechnungen zur Konsequenzanalyse (austretende Schadstoffmengen) ist ein Kollisionsgutachten, dass eine Aussage über die kritische Schiffsgeschwindigkeit gibt, ab der mit einem Versagen der Schiffsstruktur und der Windkraftanlage zu rechnen ist.

Die bei einer Kollision freigesetzte mittlere Ölmenge  $\bar{M}_{\text{Öl}}$  wird für manövrierfähige Schiffe mit Gleichung (A-3) berechnet. Vereinfachend wird auf die Darstellung des Zählers k für jeden betrachteten Routenabschnitt an dieser Stelle verzichtet.

$$\bar{M}_{\text{Öl,pow}} = \sum_s \sum_t (P_{\text{SE,Br}} \cdot M_{\text{Br,s,t}} + P_{\text{SE,La}} \cdot M_{\text{La,pow,s,Tanker}}) \cdot P_s \cdot P_t + \sum_I P_{\text{WEA,Typ,I}} \cdot M_{\text{Öl,I}} \quad (\text{A-3})$$

In Gleichung (A-3) ist  $P_{\text{SE,Br}}$  - die Wahrscheinlichkeit, dass bei der Kollision ein Brennstofftank getroffen wird,  $M_{\text{Br,s,t}}$  - die freigesetzte Brennstoffmenge für ein Schiff der Größenklasse s und des Typs t,  $P_{\text{SE,La}}$  - die Wahrscheinlichkeit, dass bei einer Kollision ein Ladetank getroffen wird,  $M_{\text{La,s,Tanker}}$  - die freigesetzte Ladeölmenge für einen Tanker der Größenklasse s,  $P_s$  - die Auftretenswahrscheinlichkeit der Schiffsgrößenklasse s und  $P_t$  die Auftretenswahrscheinlichkeit des Schiffstyps t,  $P_{\text{WEA,Typ,I}}$  die Wahrscheinlichkeit des Typs I (OWEA oder Umspannwerk (UW)) und  $M_{\text{Öl,I}}$  die freiwerdende Ölmenge Typs I (OWEA oder UW). Die betrachteten Schiffsgrößenklasse s und die unterschiedlichen

Schiffstypen  $t$  werden der Schiffsverkehrsdatenbank entnommen und sind aus den Schiffsverkehrsdaten abgeleitet. Die unterschiedlichen Anlagentypen  $l$  des Windparks definieren sich durch die Angaben der Planer. Es wird zwischen unterschiedlichen Anlagen der Windenergieanlagen (OWEAn) und der Umspannwerke (UW) unterschieden.

Eine Bedingung, dass bei der Kollision ein Brennstofftank getroffen wird, ist dass die Kollisionsstelle im Bereich eines an der Außenhaut des Schiffes liegenden Brennstofftanks liegt. Die Wahrscheinlichkeit dafür ist 0.15, da die Länge der Tanks im Verhältnis zur Schiffslänge nur 15 % ausmacht.

Die zweite Bedingung, dass ein Brennstofftank geschädigt wird ist, dass das Schiff überhaupt einen an der Außenhaut liegenden Brennstofftank besitzt. Dies ist bei etwa 25 % der Schiffe der Fall.

Berücksichtigt man beide Bedingungen so ergibt sich ein Faktor  $P_{SE,Br} = 0.0375$ .

$$P_{SE,Br} = P_{tt} \cdot P_{ta} = 0.25 \cdot 0.15 = 0.0375 \quad (A-4)$$

Die freigesetzte Brennstoffmenge für ein Schiff der Größenklasse  $s$  und des Schiffstyps  $t$  ergibt sich aus Gleichung (A-5).

$$M_{Br,s,t} = \frac{(a_k + b_k \cdot T + c_k \cdot T^2)}{6} \quad (A-5)$$

In Gleichung (A-5) sind  $a_k$ ,  $b_k$ ,  $c_k$  - die angewendeten schiffstypspezifischen Koeffizienten aus Tabelle A-2 und  $T$  die Tonnage des betrachteten Schiffes. Die Koeffizienten der Tabelle A-2 wurden statistisch ermittelt, in dem stichprobenartig beim Germanischen Lloyd klassifizierte Schiffe ausgewählt wurden. Aus den Klasseunterlagen konnte deren Brennstoffmenge ermittelt werden und durch eine Regressionsfunktion approximiert werden.

**Tabelle A-2: Schiffstypspezifische Koeffizienten für Gleichung A-5, Brennstoff**

Schiffstyp $k$	Obere Tonnagebegrenzungen [tdw]	Koeffizienten		
		$a_k$	$b_k$	$c_k$
Stückgut & Containerschiffe	100 000	1.886E+01	8.560E-02	4.000E-07
Massengut	300 000	5.480E+01	4.940E-02	0.000E+00
RoRo-Schiffe	50 000	1.89E+01	8.560E-02	4.000E-07
Gastanker	70 000	1.750E+02	7.09E-02	-1.69E-07
Chemikaliertanker	200 000	4.761E+01	2.760E-02	0.000E+00
Öltanker	200 000	7.12E+02	2.98E-02	0.000E+00
Fähren- und Passagierschiffe	50 000	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00

Für Öltanker wird ebenfalls der Austritt von Ladeöl im Berechnungsverfahren berücksichtigt. Bedingung für den Austritt von Ladeöl ist, dass die Kollision im Bereich eines Ladeöltanks erfolgt. Dieser Faktor wird  $P_{SE,La} = 0.75$  angenommen, was dem Verhältnis der Länge der Ladöltanks zur Schiffslänge 75 % entspricht.

Bei der Berechnung der Menge austretenden Ladeöls wird konservativ davon ausgegangen, dass der komplette Inhalt zweier Ladetanks freigesetzt wird und dass 50% der Tanker voll beladen sind.

Die freigesetzte Ladeölmenge  $M_{La,k}$  für einen Tanker der Größenklasse  $k$  wird mit Gleichung (A-6) berechnet.

$$M_{La,pow,s,Tanker} = 2 \cdot (a_k + b_k \cdot T + c_k \cdot T^2) \quad (A-6)$$

In Gleichung (A-6) sind  $a_k$ ,  $b_k$ ,  $c_k$  Koeffizienten, die statistisch aus den Klasseunterlagen von beim Germanischen Lloyd klassifizierten Tankern ermittelt wurden, und  $T$  die Tonnage des betrachteten Schiffes.

**Tabelle A-3: Schiffstypspezifische Koeffizienten für Gleichung (A-6) und (A-21), Ladeöl**

Schiffstyp $k$	Obere Tonnage- begrenzung [tdw]	Koeffizienten		
		$a_k$	$b_k$	$c_k$
Öltanker	200 000	0.000E+00	8.02E-02	4.000E-08

### A.2.3 Berechnung des Kollisionsrisikos

Das Kollisionsrisiko für das Szenario "Kollision von manövrierfähigen Schiffen mit Installationen des Windparks" ergibt sich für jeden betrachteten Routenabschnitt  $k$  aus der Kombination von Kollisionshäufigkeiten und Kollisionskonsequenzen.

$$R_{öl,k} = n_{coll,pow,k} \cdot \bar{M}_{öl,pow,k} \quad \text{für jeden Routenabschnitt } k \quad (A-7)$$

## A.3 Verfahren zur Berechnung von Risiken für die Kollisionen manövrierunfähiger Schiffe mit Installationen des Windparks

In den internationalen Kollisionsverhütungsregeln /A-8/ (KVR 1972, Teil A, Regel 3) wird ein manövrierunfähiges Schiff wie folgt definiert:

"Der Ausdruck "manövrierunfähiges Fahrzeug" bezeichnet ein Fahrzeug, das wegen außergewöhnlicher Umstände nicht so manövrieren kann, wie es die Regeln vorschreiben, und daher einem anderen Fahrzeug nicht ausweichen kann."

Manövrierunfähige Schiffe müssen ihre Manövrierunfähigkeit durch Setzen entsprechender Signalkörper bzw Lichter (KVR 1972, Teil C, Regel 27) deutlich machen.

" Ein manövrierunfähiges Schiff muss führen:

- (i) zwei rote Rundumlichter senkrecht übereinander dort, wo sie am besten gesehen werden können;
- (ii) zwei Bälle oder ähnliche Signalkörper senkrecht übereinander dort, wo sie am besten gesehen werden können;
- (iii) bei Fahrt durch Wasser zusätzlich zu den unter diesem Buchstaben vorgeschriebenen Lichtern Seitenlichter und ein Hecklicht."


Zusätzlich müssen manövrierunfähige Schiffe im Falle verminderter Sicht alle 2 min die Signaltöne - lang, kurz, kurz - (KVR 1972, Teil D, Regel 35) geben.

Eine häufige Ursache für Manövrierunfähigkeit sind Ausfälle der Antriebs- oder Ruderanlage. Solche Ausfälle bewirken, dass Schiffe aufgrund von Seegangs-, Wind- und Strömungskräften anfangen zu driften. Die Driftrichtung und Driftgeschwindigkeit hängt jeweils von der Größe der am Schiff angreifenden Kräfte ab. In Abhängigkeit vom Ort, an dem ein Schiff manövrierunfähig wird, müssen bestimmte Kombinationen von Wind-, Strömungs- und Seegangskräften vorhanden sein, so dass das Schiff in Richtung Windpark treibt. Zusätzliche Einflussgrößen für die Driftbewegung sind Schiffstyp und Schiffsgröße.

Bevor es zu einer Kollision mit Installationen des Windparks kommt, besteht die Möglichkeit einer Notankerung, einer erfolgreichen Reparatur und somit die Wiedererlangung der Manövrierfähigkeit, oder die Bergung durch andere Fahrzeuge. Die zur Verfügung stehende Zeit ist vom Havarieort, den Wetter-/Stömungsbedingungen und dem Abstand zum Windpark abhängig.

### A.3.1 Berechnung der Kollisionshäufigkeit

Die Kollisionshäufigkeit von manövrierunfähigen Schiffen wird je Routenabschnitt aus der Kombination der Wahrscheinlichkeit der Manövrierunfähigkeit, der Kollisionswahrscheinlichkeit durch entsprechende Driftbewegungen, der Versagenswahrscheinlichkeit der kollisionsverhindernden Maßnahmen und der Anzahl der Schiffe auf dem Routenabschnitt bestimmt. Eine Erläuterung der Berechnung der einzelnen Wahrscheinlichkeiten wird in diesem Abschnitt vorgenommen.



Als Grundannahme für die Manövrierunfähigkeit wird die Ausfallrate des Propulsionssystems (Antriebs- und Rudersystem) verwendet. Entsprechend der Harmonisierung der Grundannahmen für Kollisionsrisikoanalysen /A-6/ wird für diese Ausfallrate ein Wert von  $2,5 \cdot 10^{-4}$  pro Stunde angesetzt. Dies entspricht einem durchschnittlichen statistischen Ausfallintervall von 4.000 Stunden.

Die Kollisionswahrscheinlichkeit aufgrund der Driftbewegung wird berechnet, indem alle Kombinationen aus den genannten Einflussgrößen herausgefiltert, die zu einer Kollision führen. Dies wird mit Hilfe einer Monte-Carlo Simulation durchgeführt. Eine ausführliche Beschreibung des Verfahrens ist in /A-9/ gegeben.

Bei der angewendeten Monte-Carlo Simulation /A-9/ wird die Wahrscheinlichkeit der Kollision von Schiffen mit Installationen des Windparks ermittelt, in dem mögliche Driftvorgänge von manövrierunfähigen Schiffen rechnerisch simuliert werden. Hierzu werden eine Vielzahl von Simulationsläufen durchgeführt, bei denen für jeden Simulationslauf die den Driftvorgang bestimmenden Einflussfaktoren als Startbedingungen vorgegeben werden. Als Ergebnis eines Simulationslaufes ergibt sich, ob ein Schiff unter den angenommenen Startbedingungen in Richtung einer Anlage driftet oder nicht und eine Kollisionsgefahr besteht. Es wird eine Vielzahl von Simulationsläufen durchgeführt, wobei die Startbedingungen für jeden Simulationslauf neu generiert werden.

Die Kollisionswahrscheinlichkeit ergibt sich aus dem Quotienten der Anzahl von Simulationsläufen mit Kollision und der Gesamtzahl an durchgeführten Simulationsläufen. Bei der Ermittlung der Kollisionswahrscheinlichkeit werden zunächst risikomindernde Maßnahmen nicht miteinbezogen. Diese werden in einem späteren Schritt bei der Berechnung der Kollisionshäufigkeit berücksichtigt. In Abbildung A-4 ist der Ablauf der Monte-Carlo Simulation grafisch dargestellt. Die einzelnen Schritte der Simulation werden im Folgenden erläutert.

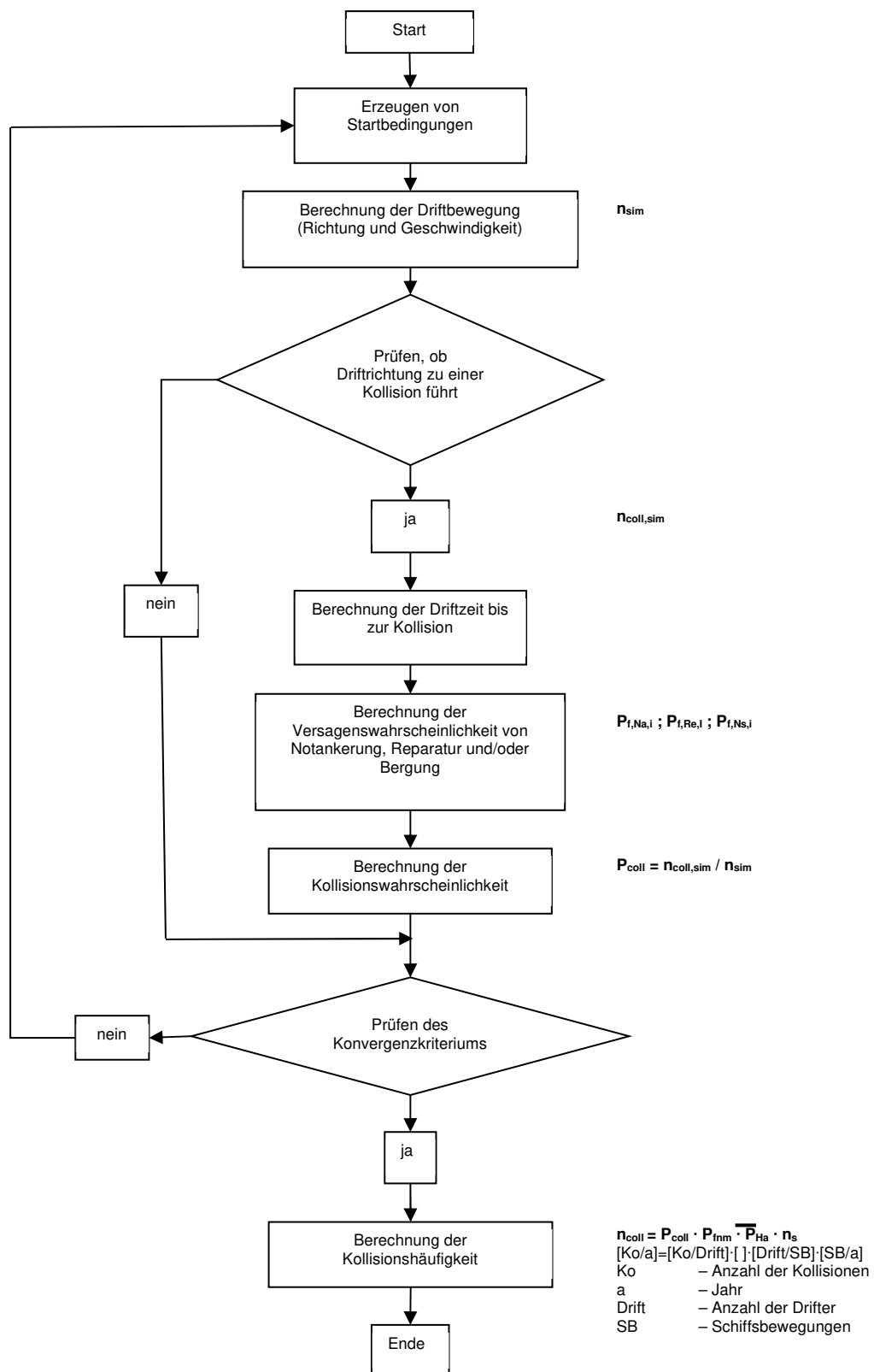


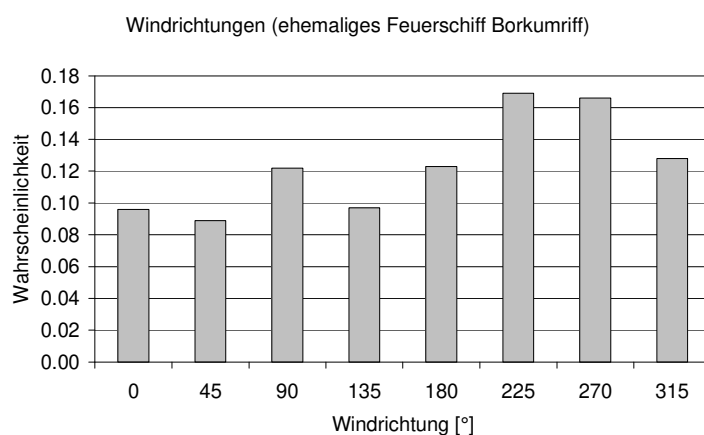
Abbildung A-4: Schematische Darstellung des Ablaufs der Monte-Carlo Simulation



- *Generierung von zufälligen Startbedingungen*

In einer Monte-Carlo Simulation werden Zufallsvariablen betrachtet, die durch Verteilungsfunktionen beschrieben werden. Im Gegensatz zu deterministischen Variablen, denen jeweils ein bestimmter Wert zugewiesen wird, können Zufallsvariablen ein ganzes Spektrum von Werten annehmen, denen jeweils eine Auftretenswahrscheinlichkeit oder Auftretenshäufigkeit zugeordnet wird.

Eine typische Zufallsvariable ist z.B. die Windrichtung. Einer deterministischen Variablen kann nur ein Wert zugewiesen werden, z.B. Windrichtung Ost (90°). Bei einer Zufallsvariable werden alle Windrichtungen mit ihrer entsprechenden Auftretenswahrscheinlichkeit beschrieben. Sie umfasst somit das gesamte Spektrum möglicher Werte, z.B. die Windrichtungen 0-360°.



**Abbildung A-5: Beispiel einer Zufallsvariable (Windrichtung)**

Im Falle der Kollisionsberechnungen von manövrierunfähigen Schiffen mit Installationen des Windparks werden die folgenden Zufallsvariablen betrachtet werden.

- schiffsbezogen
  - Schiffstyp
  - Schiffgröße
- routenbezogen
  - Ort, an dem das Schiff manövrierunfähig wird
- umweltbezogen
  - Wind (Geschwindigkeit und Richtung)
  - Strömung (Geschwindigkeit und Richtung sind zeitenabhängig)
  - Seegang (Wellenrichtung, Wellenhöhe)
  - Wassertiefe, (Gezeiten)

In einer Monte-Carlo Simulation werden eine Reihe von Simulationsläufen durchgeführt. In jedem Simulationslauf wird der Prozess deterministisch untersucht. Das bedeutet, dass jeder Simulationslauf mit deterministischen Variablen durchgeführt werden muss. Im Falle der Kollision von manövrierunfähigen Schiffen mit Installationen des Windparks bedeutet dies, dass ein Simulationslauf mit genau einem Schiff einer bestimmten Größe, eines bestimmten Typs, bei einer definierten Windrichtung und Windstärke, etc. durchgeführt wird. Die Problematik besteht nun darin, aus den Zufallsvariablen (den Verteilungen) Werte (z.B. eine Windrichtung) zu finden, mit denen die einzelnen Simulationsläufe durchzuführen sind. Hinzu kommt, dass die deterministischen Variablen so ausgewählt werden sollen, dass sie in ihrer Gesamtheit (alle Simulationsläufe zusammen betrachtet) den Häufigkeiten ihres Auftretens entsprechen. Das bedeutet,

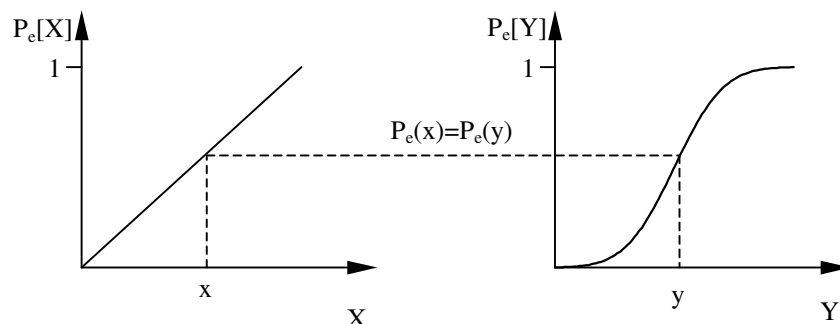
dass Windrichtungen, die in der Realität häufiger vorkommen auch häufiger in den Simulationsläufen verwendet werden sollen. Für den einzelnen Simulationslauf ist die Auswahl der Startbedingungen zufällig. In der Gesamtheit aller Simulationsläufe entsprechen sie den real existierenden Verteilungen.

Diese Forderung an das Berechnungsverfahren wird umgesetzt, in dem Zufallszahlen gebildet werden, die an die Verteilungsfunktionen der Zufallsvariablen angepasst werden. Zufallsgeneratoren können im Allgemeinen nur gleichverteilte Zufallszahlen zwischen 0 und 1 erzeugen. Das bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit aller Zahlen in besagtem Intervall gleich groß ist. Die Anpassung die Verteilungsfunktionen der Zufallsvariablen erfolgt über eine mathematische Transformation.

Die Transformationsvorschrift lautet:

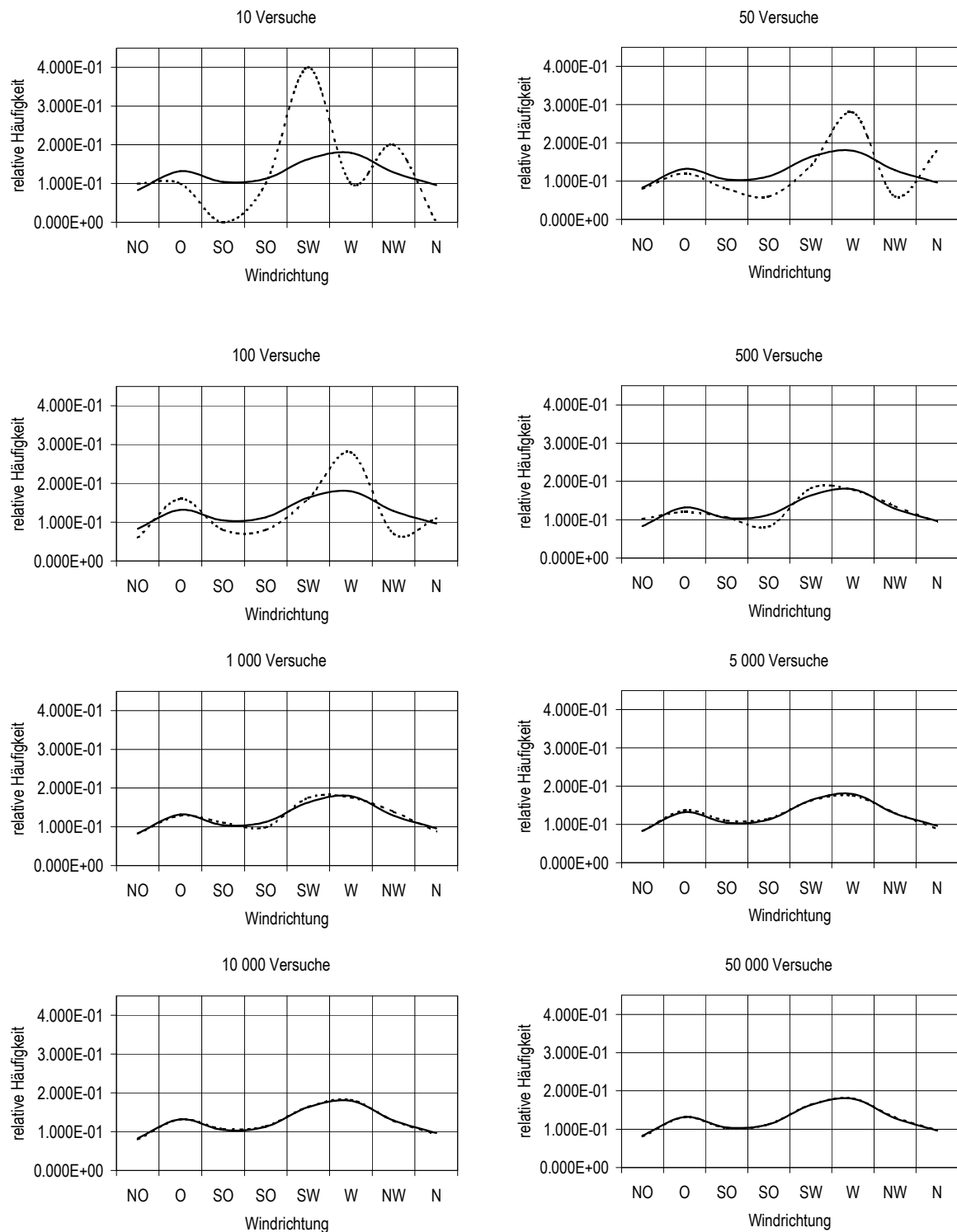
$$P_e[X] = P_e[Y] \quad (\text{A-8})$$

In Gleichung (A-8) ist  $P_e[X]$  die Überschreitenswahrscheinlichkeit der gleichverteilten Zufallszahlen des Zufallsgenerators und  $P_e[Y]$  die Überschreitenswahrscheinlichkeit der anzupassenden Zufallsvariablen (z.B. Windrichtung). In Abbildung A-6 ist der Algorithmus der Berechnung zufälliger Startbedingungen graphisch dargestellt. Es wird per Zufallsgenerator eine Zahl  $x$  erzeugt und der entsprechende Funktionswert  $P_e(x)$  berechnet. Dann wird die Zahl  $y$  gesucht, bei der  $P_e(y)$  gleich  $P_e(x)$  ist.



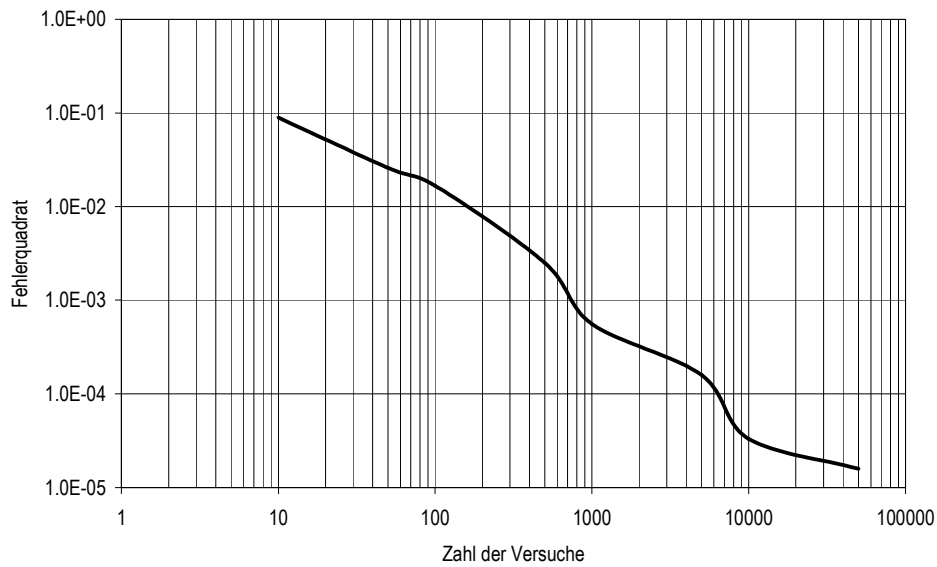
**Abbildung A-6: Transformation gleichverteilter Zufallszahlen**

Die Genauigkeit, mit der die einzelnen Einflussfaktoren von der Monte-Carlo Simulation abgebildet werden, steigt mit der Zahl der Simulationsläufe. In Abbildung A-7 wird dieses konvergierende Verhalten für eine jeweils unterschiedliche Anzahl von Simulationsläufen beispielhaft an der Verteilung der Windrichtungen gezeigt. In den einzelnen Bildern stellt die durchgezogene Kurve jeweils die Verteilung der original gemessenen Daten dar. Die gestrichelte Kurve zeigt die relative Häufigkeit der simulierten Windrichtungen an. Es ist deutlich zu erkennen, wie die gestrichelte Kurve der simulierten Windrichtungen sich mit wachsender Zahl von Simulationsversuchen der originalen Kurve anpasst.



**Abbildung A-7: Konvergenz der simulierten Windrichtungen mit steigender Zahl von Versuchen**

Bildet man das Quadrat des Fehlerintegrals, also das Quadrat der Fläche zwischen den beiden Kurven, so kann man die Konvergenz erkennen. In Abbildung A-8 ist das Quadrat des Fehlerintegrals über die Zahl von Versuchen der Simulation dargestellt. Deutlich ist die Abnahme des Fehlerintegrals zu erkennen.



**Abbildung A-8: Quantitative Beschreibung des Konvergenzverhaltens der berechneten Startbedingungen**

Die Kombination der einzelnen deterministischen Variablen wird in den Berechnungen unabhängig vorgenommen. Das bedeutet, dass der für einen Simulationslauf ausgewählte Schiffstyp unabhängig davon ist, welche Windrichtung für den Simulationslauf ausgewählt wird. Am Ende der Auswahl der Startbedingungen liegen für einen Simulationslauf ein Satz Startbedingungen (ein Schiffstyp, eine Schiffsgröße, eine Windrichtung, eine Windgeschwindigkeit, Ort der Havarie, etc.) vor, mit dem die Driftbewegung des Schiffes berechnet werden kann.

- *Berechnung der Driftbewegung*

Für jeden Simulationslauf muss für die gewählten Startbedingungen die Berechnung der Driftbewegung erfolgen, um festzustellen, ob das Schiff in Richtung des Windparks driftet oder nicht. Diese Driftbewegung wird 24 Stunden lang für jede Stunde neu berechnet. So können die Einflüsse der Tidenströmungen, die abhängig von der Position des Havaristen und dem Tidenprogress sind, mit in die Driftbewegung einfließen.

Die Driftbewegung eines Schiffes ergibt sich allgemein aus dem Gleichgewicht der auf das Schiff wirkenden Wind-, Wellen- und Strömungskräfte. Um die Driftbewegung des Havaristen berechnen zu können, müssen die jeweils wirkenden Kraftkomponenten berechnet werden. Für die einzelnen Kraftkomponenten wurden die folgenden Berechnungsformeln /A-11/ angewendet:

- Windkräfte

Die auf das manövrierunfähige Schiff wirkenden Windkräfte werden mit Gleichung (A-9) berechnet.

$$\vec{F}_{Wi,90} = c_{d,Win,90} \frac{\rho_{Air}}{2} \cdot (\vec{v}_{Wi} + \vec{v}_S)^2 \cdot A_{l,Win} \quad (A-9)$$

In Gleichung (A-9) ist  $c_{d,Win,90} = 0.855$  - der Widerstandsbeiwert des Überwasserschiffes,  $\rho_{Air} = 1.3 \text{ kg/m}^3$  - die Dichte von Luft,  $v_{Wi}$  - die Windgeschwindigkeit,  $A_{l,Win}$  - die Lateralfäche des Überwasserschiffes und  $v_S$  - die Geschwindigkeit des Schiffes über Grund. Die Lateralfäche  $A_{l,Win}$  des Überwasserschiffes ergibt sich aus der Länge multipliziert mit dem Freibord des Schiffes. Dazu wird die Fläche addiert, die sich aus dem Produkt der Länge und Höhe der Decksaufbauten ergibt. Die laterale Fläche der Decksaufbauten schließt bei Frachtschiffen die Flächen der möglichen Ladung ein, dies gilt insbesondere für Containerschiffe.

- Wellendriftkräfte

Die resultierende Wellendriftkraft wird mit Gleichung (A-10) berechnet.

$$\vec{F}_{We,90} = c_{d,We,90} \frac{\rho_W}{2} \cdot g \cdot \nabla^{1/3} \cdot \xi_a^2 \quad (A-10)$$

In Gleichung (A-10) ist  $c_{d,We,90} = 0.5$  - der Beiwert der Wellendriftkraft,  $\rho_W = 1024 \text{ kg/m}^3$  - die Dichte von Seewasser,  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$  - die Erdbeschleunigung,  $\nabla$  - die Verdrängung des Havaristen und  $\xi_a$  - die signifikante Wellenamplitude ( $H_s/2$ ).

- Strömungskräfte

Die resultierende Strömungskraft wird mit Gleichung (A-11) berechnet.

$$\vec{F}_{St,90} = c_{d,St,90} \cdot \frac{\rho_W}{2} \cdot (\vec{v}_S + \vec{v}_{T,Wd})^2 \cdot A_{l,St} \quad (A-11)$$

In Gleichung (A-11) ist  $c_{d,St,90} = 0.6$  - der Beiwert der Strömungskraft,  $\vec{V}_S$  - die Geschwindigkeit des Schiffes über Grund,  $\vec{V}_{T,Wd}$  - die Geschwindigkeit der Strömung von Gezeiten und Winddrift und  $A_{l,St}$  - die Lateralfäche des Unterwasserschiffes. Die Lateralfäche des Unterwasserschiffes ergibt sich aus dem Produkt der Schiffslänge zwischen den Loten und dem Schiffstiefgang.

Unter der Annahme, dass bei konstanter Driftbewegung alle am Schiff angreifenden Kräfte im Gleichgewicht stehen, ergibt sich die Driftgeschwindigkeit (Fahrt des Schiffes über Grund) als Lösung von Gleichung (A-12).

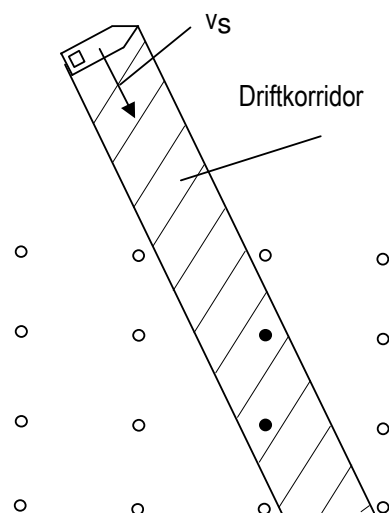
$$\vec{0} = \vec{F}_{Wi,90} + \vec{F}_{We,90} + \vec{F}_{St,90} \quad (A-12)$$

Die Driftrichtung ergibt sich aus der komponentenweisen Betrachtung der Vektorgleichung (A-12).

Vergleichsberechnungen mit realen Driftbewegungen von manövrierfähigen Schiffen haben gezeigt, dass unter Einbeziehung der Windkräfte und der Kräfte aus Wind- und Tidenströmung eine realistische Driftbewegung berechnet werden kann. Somit bleibt die Wellenkraft für die Berechnung der Driftbewegung unberücksichtigt. Unabhängig davon wird diese Kraftkomponente bei der Ermittlung der erforderlichen Schleppleistung eines Notschleppers berücksichtigt.

- *Prüfen ob Driftrichtung zu einer Kollision führt*

Im nächsten Schritt des Berechnungsverfahrens wird geprüft, ob die Driftbewegung des Havaristen zu einer Kollision zwischen Schiff und OWEA bzw. UW führen kann. Hierfür wird die Fläche (Driftkorridor) berechnet, über die das Schiff manövrierunfähig driftet, siehe Abbildung A-9. Liegen OWEA oder UW des Windparks innerhalb dieses Korridors, so ist das Schiff kollisionsgefährdet.



**Abbildung A-9: Driftkorridor eines manövrierunfähigen Schiffes (nicht maßstäblich)**

- *Berechnung der Driftzeit bis zur Kollision*

Liegen im Driftkorridor Installationen des Windparks, so kann aus der Driftgeschwindigkeit  $v_s$  und der Distanz  $d$  (Strecke zwischen der Position an der die Drift des Schiffes begann und der dichtesten OWEA im Driftkorridor) die Driftzeit  $t_d$  bis zur Kollision berechnet werden.

$$t_d = \frac{d}{v_s} \quad (\text{A-13})$$

- *Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit von Notankerung, Reparatur und/oder Bergung*

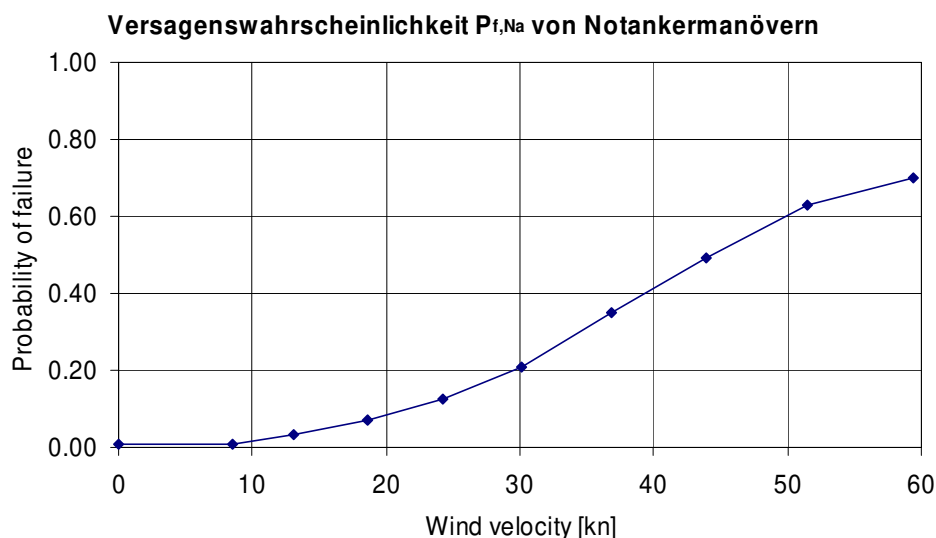
In der Simulation werden drei Arten von kollisionsverhindernden Maßnahmen berücksichtigt, die von jeder Schiffsführung eingeleitet werden können, deren Schiff manövrierunfähig geworden ist. Diese Maßnahmen sind Notankerung, Reparatur und Bergung.

Hierfür wird bei jedem Simulationslauf die Wahrscheinlichkeit ermittelt, die den Erfolg oder Misserfolg dieser risikomindernden Maßnahmen ausdrücken.

## - Notankerung

Eine Möglichkeit, die Drift des manövrierunfähigen Schiffes aufzuhalten oder zu verlangsamen, ist die Notankerung. Dabei werden einer oder beide Anker geworfen und es wird versucht, das Schiff aufzustoppen. Gelingt die Notankerung, so besteht für das Schiff keine weitere Kollisionsgefahr.

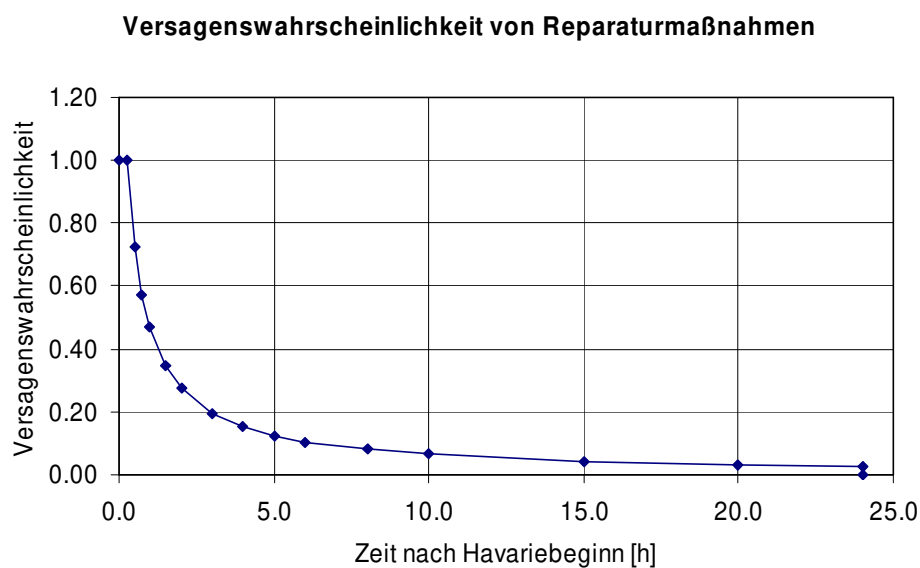
Um die mögliche risikoreduzierende Wirkung einer Notankerung in die Berechnung einfließen zu lassen, wird eine Funktion (Abbildung A-10) eingeführt, welche die Versagenswahrscheinlichkeit von Notankermanövern in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit beschreibt. Diese Funktion entspricht den harmonisierten Grundannahmen /A-6/.



**Abbildung A-10: Risikomindernde Wirkung von Notankerung**

## - Reparaturmaßnahmen

Manövrierunfähigkeit ist immer mit dem Ausfall der Antriebs- und/oder der Ruderanlage verbunden. Somit besteht in den meisten Fällen auch die Möglichkeit einer Reparatur der ausgefallenen Anlage und somit der Wiedererlangung der Manövrierfähigkeit. Kritisch für die Wiederherstellung der Manövrierfähigkeit ist daher die dafür zur Verfügung stehende Zeit. Die Versagenswahrscheinlichkeit von Reparaturmaßnahmen wird deshalb als zeitabhängige Funktion in der Simulation berücksichtigt (Abbildung A-11). Diese Funktion entspricht den harmonisierten Grundannahmen /A-6/ und wurde von MARIN aus der Datenbank über manövrierunfähige Schiffe der niederländischen Coastguard aus den Jahren 2002 und 2003 abgeleitet (siehe /A-10/). Die Datenbank ermöglicht aufgrund der enthaltenen Informationen die Ableitung des Zusammenhangs zwischen Ausfall des Antriebs- und Rudersystems und der Dauer der Manövrierunfähigkeit.

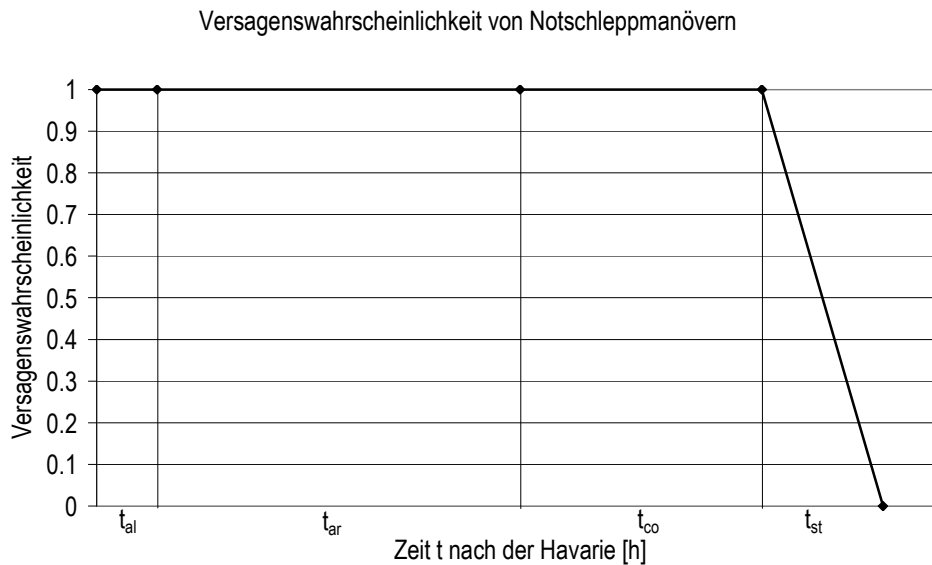


**Abbildung A-11: Berücksichtigung von Reparaturmaßnahmen in der Monte-Carlo Simulation**



## - Bergung mit Schlepperunterstützung

Der Einsatz von Bergungsschleppern ist eine weitere Möglichkeit, die drohende Kollision eines manövrierunfähigen Schiffes mit OWEA oder der UW abzuwenden. Es wird eine zeitabhängige Funktion der Versagenswahrscheinlichkeit (Abbildung A-12) eingeführt. Die einzelnen Zeitabschnitte müssen entsprechend der Position des Windparks sowie des Havaristen und der Kapazitäten von verfügbaren Bergungsschleppern angepasst werden. In Abbildung A-12 ist daher der Verlauf der Funktion nur schematisch dargestellt.



**Abbildung A-12: Berücksichtigung von Bergungseinsätzen in der Monte-Carlo Simulation**

Die Zeit, die für eine erfolgreiche Bergung benötigt wird, lässt sich durch die in der Abbildung A-12 schematisch dargestellten Faktoren  $t_{al}$ ,  $t_{ar}$ ,  $t_{co}$  und  $t_{st}$  beschreiben. Wird diese Zeit überschritten, kommt es auf jeden Fall zu einem Versagen des Bergungsmanövers. Ansonsten sinkt die Versagenswahrscheinlichkeit erst im Laufe der Zeitperiode für die Stabilisierung und Anschleppens des manövrierunfähigen Schiffes langsam auf Null ab. D.h., sollte keine ausreichende Zeit für die Stabilisierung und das Anschleppen verbleiben, kann nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden, dass es trotz Leinenverbindung zwischen Schlepper und driftendem Schiff zu einer Kollision mit einer Windenergieanlage kommen kann. Das Notschleppmanöver gilt als gescheitert, wenn es innerhalb der Summe der hier aufgezeigten Teilzeiten (Alarmierung, Anfahrt, Leinenverbindung und Stabilisieren) zu einer Kollision zwischen Drifter und OWEA kommt bzw. wenn das manövrierunfähige Schiff bei Windstärken größer 4 Bft in einen Windpark driftet. Die Bergung gilt als erfolgreich, wenn der Schlepper den Havaristen mit Ablauf der Zeit für die Stabilisierung angeschleppt hat und es bis dahin zu keiner Kollision gekommen ist bzw. das Schiff bei Windstärken größer 4 Bft nicht in einen Windpark gedriftet ist.

Entsprechend den harmonisierten Annahmen von 2005 /A-14/ berücksichtigt das Rechenmodell des GL eine detaillierte Modellierung der Bergung durch Notschlepper mit Berücksichtigung der zeitlichen Abläufe sowie der Schleppkapazitäten. Eine Begrenzung der Notschleppereinsätze auf Windbedingungen kleiner 8 Bft wird nicht vorgenommen.

#### *t<sub>al</sub> - Zeit für die Alarmierung und Aktivierung*

Die Zeit  $t_{al}$  umfasst den Zeitraum von der Havarie bis zum Auslaufen des Bergungsschleppers von seinem Stationierungsort. Diese Zeitspanne enthält die Zeit zur Feststellung der Havarie bei, die Zeit bis zur Entscheidung, ob Bergungsschlepper eingesetzt werden sollen und die Mobilisierung der Schlepper und deren Besatzung. Diese Zeitspanne variiert für die einzelnen Notschlepper. Die "Oceanic" (bzw. dessen Nachfolger) steht permanent für Notschleppeinsätze zur Verfügung und benötigt somit nur eine geringe Zeitspanne, um zu beginnen, in Richtung Einsatzgebiet zu fahren. Die "Neuwerk" und die "Mellum" benötigen gegebenenfalls längere Zeit, um sich zum Havaristen in Marsch zu setzen, sofern sie gerade mit anderen Aufgaben (Tonnenlegen, Messungen, etc.) beauftragt sind. Im Mittel kann von einer Zeit für die Alarmierung von 0.5 h ausgegangen werden, da die Erkennung über AIS und Radar innerhalb weniger Minuten möglich ist.

#### *t<sub>ar</sub> - Zeit für den Anfahrtsweg*

Nach dem Auslaufen benötigen die Schlepper eine gewisse Zeit, um bis zum Havaristen zu fahren. Diese Zeitspanne ist von der Distanz zum Havaristen und von der möglichen Geschwindigkeit des Schleppers abhängig. Zusätzlich haben auch die herrschenden Witterungsbedingungen wie Wind, Strömung und Seegang Einfluss auf die Geschwindigkeit des Schleppers. Die Zeitspanne für den Anfahrtsweg des Schleppers ist daher variabel. Pessimistisch kann die maximale Vorausschwindigkeit bei 9 bft Gegenwind und 5 m Wellenhöhe angenommen werden, die etwa 14 kn beträgt.

#### *t<sub>co</sub> - Zeit zum Herstellen der Leinenverbindung zwischen Havarist und Schlepper*

Ist der Schlepper beim Havaristen eingetroffen, so wird eine gewisse Zeit benötigt, um eine Schleppverbindung mit dem Havaristen herzustellen. Die benötigte Zeit schwankt zwischen 0.5 h unter normalen Bedingungen und evtl. mehreren Stunden bei schwerer See. Sie ist sowohl von der Ausrüstung des Schleppers (Leinenschussgeräte etc.) und des Havaristen (Notschleppgeschirre), von den Witterungsbedingungen (Seegang, Wind) als auch von Erfahrungen bzw. Fähigkeiten der Besatzungen an Bord beider Schiffe abhängig. In den Berechnungen wird diese Zeitspanne pessimistisch mit 1.0 h bei Windgeschwindigkeiten bis 8 bft angenommen. Bei Windverhältnissen ab 8 bft wird eine längere Zeitspanne für die Leinenverbindung von 3.5 h angenommen.

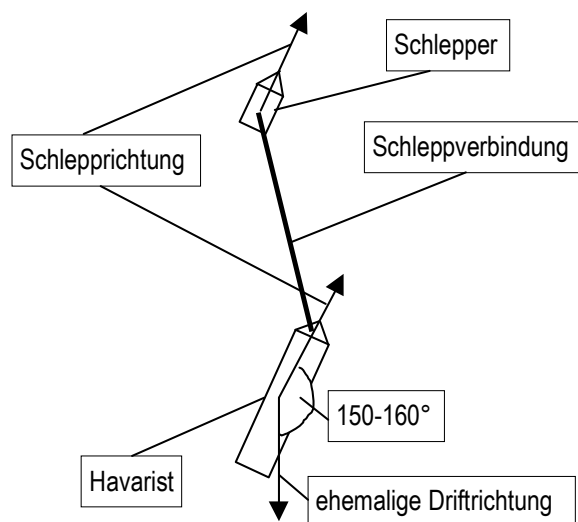
#### *t<sub>st</sub> - Zeit bis zur Stabilisierung der Lage des Havaristen*

Nachdem eine Schleppverbindung hergestellt wurde, kann damit begonnen werden, die Driftgeschwindigkeit des Havaristen zu verringern und ihn aus der Gefahrenzone zu schleppen. Die Zeit, die dafür benötigt wird, hängt wiederum von einer Reihe von Faktoren ab. Zunächst ist sie von der Leistung der Schlepper und von den vorhandenen Umweltbedingungen abhängig. Aber auch die Erfahrungen der Besatzung und die angewendete Schleppstrategie beeinflussen diesen Zeitraum. In Moore et al. /A-12/ wird eine mittlere Zeit von 15 min für Tanker bei 30 Kn Windgeschwindigkeit angegeben. Bei Schleppsimulationen am "Institut für Schiffsbetrieb, Seeverkehr und Simulation" (ISSUS) zeigte sich, dass diese Zeiträume auch bis zu einer Stunde lang sein können. Daher wird dieser Zeitraum  $t_{st}$  mit 0.5 h angenommen. Im Zeitraum  $t_{st}$  sinkt die Versagenswahrscheinlichkeit linear auf Null herab. Bei Windverhältnissen ab 8 bft wird eine längere Zeitspanne bis zur Stabilisierung der Lage des Havaristen (Aufstoppen der Drift) von 1.0 h angenommen.

#### - Berechnung der notwendigen Schleppkraft

Eine Voraussetzung für den Schlepper ist eine ausreichende Schleppleistung, so dass der Schlepper die Drift des Havaristen vor Erreichen des Windparks aufstoppen kann. Insofern muss geprüft werden, ob die zur Verfügung stehenden Schlepper in der Lage sind, bei den gegebenen Umweltbedingungen, Größe und Typ des Havaristen etc., den Havaristen zu bergen.

Wie schon bei der Berechnung der Driftgeschwindigkeit, benötigt man zur Ermittlung der notwendigen Schleppleistung die auf den Havaristen wirkenden Kräfte. Erfahrungswerte und Simulationen (siehe /A-13/) zeigten, dass sich in den meisten Fällen eine stabile Lage des Havaristen zum Schleppen bei etwa 150 –160 ° zur Driftrichtung ergibt, siehe Abbildung A-13.



**Abbildung A-13: Annahme zur Lage von Havarist und Schlepper bei Schleppmanövern**

In der Realität ist der Schleppvorgang natürlich ein sehr dynamischer Vorgang. Das bedeutet, dass sich die Lage zwischen Schlepper und Havaristen ständig verändert. Aus der jeweiligen Lage des Havaristen zu den wirkenden Kraftkomponenten (Wind, Wellen und Strömung) verändern sich die Angriffsflächen der jeweiligen Kraftkomponenten.

Nur wenn die Pfahlzugleistung des Schleppers größer als der erforderliche Pfahlzug  $\vec{F}_p$  ist, wird die Wahrscheinlichkeitsfunktion, Abbildung A-12, angewendet. Ansonsten wird der Schlepper als wirkungslos betrachtet. Als wirkende Kraft wird in den Berechnungen eine Trossenzugkraft der Schlepper in Höhe von 60% der angegebenen Pfahlzugkraft angenommen.

- *Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit*

Ist ein Simulationslauf abgeschlossen, so kann die Kollisionswahrscheinlichkeit pro Schiff  $P_{\text{coll}}$  berechnet werden. Diese ergibt sich aus der Zahl der durchgeführten Simulationsläufe mit erfolgter Kollision  $n_{\text{coll, sim}}$  und der Gesamtzahl an durchgeführten Simulationsläufen  $n_{\text{sim}}$  entsprechend Gleichung (A-14).

$$P_{\text{coll}} = \frac{n_{\text{coll, sim}}}{n_{\text{sim}}} \quad (\text{A-14})$$

- *Prüfen des Konvergenzkriteriums*

Als Konvergenzkriterium der Monte-Carlo Simulation wird der Standard Fehler des Mittelwertes SEM ("Standard Error of the Mean Statistic") verwendet. Diese statistische Größe, Gleichung (A-15), wird aus der Standardabweichung der Kollisionswahrscheinlichkeit und der Anzahl der Simulationsläufe berechnet.

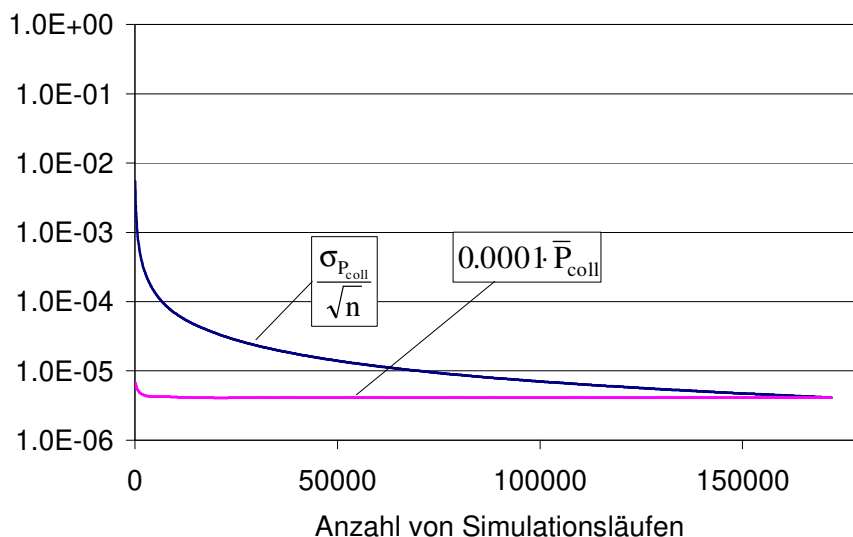
$$\text{SEM} = \frac{\sigma_{P_{\text{coll}}}}{\sqrt{n}} \quad (\text{A-15})$$

Ein gängiges Maß für die Konvergenz der Simulation ist wenn der SEM Wert kleiner als 1% des Mittelwertes der Kollisionswahrscheinlichkeit  $P_{\text{coll}}$  ist. In den Berechnungen des GL wird ein genaueres Konvergenzkriterium 0.01 % des Mittelwertes angewendet.

Daraus ergibt sich als Konvergenzkriterium der Simulation:

$$\frac{\sigma_{P_{\text{coll}}}}{\sqrt{n}} < 0.0001 \cdot \bar{P}_{\text{coll}} \quad (\text{A-16})$$

In Gleichung (A-16) ist  $\sigma_{P_{\text{coll}}}$  die Standardabweichung der Kollisionswahrscheinlichkeit,  $\bar{P}_{\text{coll}}$  der Mittelwert der Kollisionswahrscheinlichkeit und  $n$  die Anzahl der Simulationsläufe. Das Konvergenzverhalten der Monte-Carlo Simulation ist in Abbildung A-14 dargestellt. Die beiden Kurven stellen jeweils eine Seite der Ungleichung (A-16) dar. Deutlich ist die Annäherung der Kurven mit zunehmender Anzahl von Simulationsläufen zu erkennen. Am Schnittpunkt beider Kurven ist das Abbruchkriterium der Simulation erreicht und die Simulation wird beendet.



**Abbildung A-14: Konvergenz der Kollisionswahrscheinlichkeit innerhalb der Monte-Carlo Simulation**

- *Berechnung der Kollisionshäufigkeit*

Die Kollisionshäufigkeit von manövrierunfähigen Schiffen mit Installationen des Windparks wird mit Gleichung (A-17) berechnet.

$$n_{\text{coll}} = P_{\text{coll}} \cdot \bar{P}_{\text{fnn}} \cdot P_{\text{Ha}} \cdot n_{\text{S}} \quad (\text{A-17})$$

In Gleichung (A-17) ist  $\bar{P}_{\text{fnn}}$  die Versagenswahrscheinlichkeit von Notankerung, Selbstreparatur und Bergung,  $P_{\text{Ha}}$  - die Wahrscheinlichkeit der Havarie eines Schiffes auf dem betrachteten Routenabschnitt und  $n_{\text{S}}$  - die Anzahl der Schiffe auf dem Routenabschnitt.

Die Wirkung von Notankerung, Selbstreparatur und Bergung wird im Faktor  $\bar{P}_{\text{fnn}}$  für alle Simulationsläufe zusammengefasst.

$$\bar{P}_{\text{fnn}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{coll,sim}}} (P_{\text{f,Na},i} \cdot P_{\text{f,Re},i} \cdot P_{\text{f,Ns},i})}{n_{\text{coll,sim}}} \quad (\text{A-18})$$

Darin sind  $P_{\text{f,Na},i}$ ,  $P_{\text{f,Re},i}$  und  $P_{\text{f,Ns},i}$  - die Versagenswahrscheinlichkeiten der kollisionsverhindernden Maßnahmen unter der Bedingung, dass der Havarist auf das Objekt zu driftet.

$$P_{\text{Ha}} = \frac{l_{\text{k}}}{v_{\text{S}} \cdot t_{\text{f,PS}}} \quad (\text{A-19})$$

In Gleichung (A-19) ist  $l_{\text{k}}$  die Länge des betrachteten Routenabschnittes,  $t_{\text{f,PS}}$  das Ausfallintervall des Propulsionssystems und  $v_{\text{S}}$  die Schiffsgeschwindigkeit nach Tabelle A-4.

**Tabelle A-4: Tabelle der typspezifischen Schiffsgeschwindigkeiten**

Schiffstyp	durchschnittliche Schiffsgeschwindigkeit $v_{\text{S}}$ [Kn]
Stückgutschiffe	20.0
Containerschiffe	20.0*)
Ro-Ro Schiffe	20.0
Bulker	14.0
Fähren und Passagierschiffe	20.0
Öltanker	14.0
Gastanker	15.0
Chemikalien tanker	15.0
*) Die durchschnittliche Schiffsgeschwindigkeit für Containerschiffe wurde gegenüber den harmonisierten Annahmen konservativ mit einer Geschwindigkeit von 20.0 kn angenommen.	

### A.3.2 Berechnung der Kollisionskonsequenzen

Im Falle der Kollision von manövrierunfähigen Schiffen ist mit deutlich kleineren Kollisionsenergien zu rechnen als im Falle der Kollision von manövrierfähigen Schiffen, da Driftgeschwindigkeiten deutlich kleiner sind als die Fahrtgeschwindigkeiten der Schiffe.

Im Falle eines driftenden Schiffes kann davon ausgegangen werden, dass das Schiff seitlich mit dem Turm der OWEA in Kontakt kommt. Durch die geringe Auftreffgeschwindigkeit ist damit zu rechnen, dass der Turm am Fundament versagt und der Turm vom Schiff wegfällt. Dass die Gondel auf das Schiff fällt, ist bei diesem Szenario nicht zu erwarten.

Wie bereits erwähnt ist die Schiffstruktur in der Lage, begrenzt Kollisionsenergie zu absorbieren. Somit kann bei geringen Driftgeschwindigkeiten davon ausgegangen werden, dass die Schiffsaußenhaut sich verformt aber nicht aufreißt. Letztendlich kann bisher jedoch nicht gänzlich ausgeschlossen werden, dass es auch bei seitlichen Kollisionen zum Aufreißen der Schiffsaußenhaut kommt. Grundlage der Berechnungen zur Konsequenzanalyse (austretende Schadstoffmengen) ist ein Kollisionsgutachten, dass eine Aussage über die kritische Schiffsgeschwindigkeit gibt, bei der mit einem Versagen der Schiffsstruktur zu rechnen ist. Als pessimistische Annahme wird in den Berechnungen davon ausgegangen, dass bei allen höheren Geschwindigkeiten als bei der ermittelten immer ein Versagen der Schiffshaut zur Folge hat. Ein Kollaps der Windenergieanlage wird pessimistisch für jede Driftgeschwindigkeit angenommen.

Beim angenommenen Versagen der Schiffshaut wird in den Berechnungen sowohl von möglichen Schädigungen von Treibstoff- als auch von Ladetanks ausgegangen. Es werden zusätzlich Ölmengen berechnet, die im Falle einer Kollision durch umstürzende Windenergieanlagen freigesetzt werden. Bei Passagierschiffen wird wiederum angenommen, dass Brennstoff nur im Doppelboden und in Zwischentanks im Mitschiffsbereich gelagert wird. An diesen Positionen sind Schäden durch Kollisionen mit einer Windenergieanlage nicht zu erwarten und werden daher ausgeschlossen.

Die bei einer Kollision freigesetzte mittlere Ölmenge  $\bar{M}_{\text{Öl}}$  wird für manövrierunfähigen Schiffen mit Gleichung (A-20) berechnet. An dieser Stelle wird ebenfalls vereinfachend auf die Darstellung des Zähler k für jeden betrachteten Routenabschnitt verzichtet.

$$\bar{M}_{\text{Öl},\text{dis}} = \sum_s \sum_t (P_{\text{SE},\text{Br}} \cdot M_{\text{Br},\text{s},\text{t}} + P_{\text{SE},\text{La}} \cdot M_{\text{La},\text{dis},\text{s},\text{Tanker}}) \cdot P_s \cdot P_t + \sum_l P_{\text{WEA},\text{Typ},l} \cdot M_{\text{Öl},l} \quad (\text{A-20})$$

In Gleichung (A-20) werden für die Berechnung der durch Kollisionen manövrierunfähigen Schiffe freigesetzten Ölmengen die selben Elemente wie in Gleichung (A-3) für Kollisionen manövrierfähiger Schiffe im Abschnitt A.2.2 verwendet. Ausnahme bildet die freigesetzte Ladeölmenge  $M_{\text{La},\text{dis},\text{s},\text{Tanker}}$  für einen Tanker der Größenklasse s.

Bei der Berechnung der Menge des austretenden Ladeöls wird bei einem angenommenen Aufreißen der Schiffshaut konservativ davon ausgegangen, dass der ganze Inhalt eines<sup>3</sup> Ladetanks freigesetzt wird.

<sup>3</sup> Im Gegensatz zu den Annahmen bei der Kollision eines manövrierunfähigen Tankers wird bei einer Kollision eines manövrierfähigen Tankers aufgrund des eventuell auftretenden „Entlangschleifens“ von der Freisetzung des gesamten Ladeinhalts zweier Ladetanks ausgegangen.

Die freigesetzte Ladeölmenge  $M_{La,dis,s,Tanker}$  für einen manövrierunfähigen Tanker der Größenklasse  $s$  wird mit Gleichung (A-21) berechnet.

$$M_{La,dis,s,Tanker} = (a_k + b_k \cdot T + c_k \cdot T^2) \quad (A-21)$$

In Gleichung (A-21) sind  $a_k$ ,  $b_k$ ,  $c_k$  Koeffizienten, die statistisch aus den Klasseunterlagen von beim Germanischen Lloyd klassifizierten Tankern ermittelt wurden und  $T$  die Tonnage des betrachteten Schiffes (Tabelle A-3)

### A.3.3 Berechnung des Kollisionsrisikos

Das Kollisionsrisiko für das Szenario "Kollision von manövrierfähigen Schiffen mit Installationen des Windparks" ergibt sich für jeden betrachteten Routenabschnitt  $k$  aus der Kombination von Kollisionshäufigkeiten und Kollisionskonsequenzen.

$$R_{\ddot{O},dis,k} = n_{coll,dis,k} \cdot \overline{M}_{\ddot{O},dis,k} \quad \text{für jeden Routenabschnitt } k \quad (A-22)$$

## A.4 Literatur zum Anhang A

- /A-1/ Fujii, Y., Yamanouchi, H., Mizuki, N.: "Some Factors Affecting the Frequency of Accidents in Marine Traffic". Section II – The Probability of Stranding and Section III – The Effect of Darkness on the Probability of Collision and Stranding, Journal of Navigation, Vol. 27, pp. 235-247, 1974.
- /A-2/ MacDuff, J.: "The Probability of Vessel Collision", Ocean Industry, September 1974.
- /A-3/ Pedersen, P. T.: „Collision and Grounding Mechanics“; Department of Ocean Engineering; Technical University of Lyngby; in WEMT 95, Denmark, 1995.
- /A-4/ ISESO Project 7 and 8: Grounding and Collision: Basic Modelling Principles and Validation of Software for Prediction of Frequencies, 2000-05-30.
- /A-5/ Fujii, Y., Mizuki, N., "Design of VTS systems for water with bridges", Gluver & Olsen (eds) Ship Collision Analysis, Balkema ISBN 90 54 10 962 9, Rotterdam 1998.
- /A-6/ MARIN, DNV und Germanischer Lloyd: Harmonisierung der Grundannahmen für Kollisionsrisikoanalysen zwischen MARIN, DNV und GL; Hamburg, Dezember 2004.
- /A-7/ Dalhoff, P., J. Stein: Development of a Simplified Method for the Calculation of Consequences for the Windturbine / HV Station; SAFESHIP deliverable 7-1, [REDACTED] Germanischer Lloyd WindEnergie GmbH, Januar 2005.
- /A-8/ Verordnung zu den Internationalen Regeln von 1972 zur Verhütung von Zusammenstößen auf See vom 13. Juni 1977 (BGBl. I S. 813), zuletzt geändert durch die Verordnung seeverkehrsrechtlicher Vorschriften (Ausführungsverordnung zum Seerechtsübereinkommen), Kollisionsverhütungsregeln (KVR).
- /A-9/ VDI-Richtlinie 4008; Blatt 6; „Monte-Carlo-Simulation“; Beuth-Verlag; Berlin; 1999.
- /A-10/ Van der Tak, C.: Harmonization of assumptions; MARIN Memo, Netherlands, Dec. 2004.
- /A-11/ OCIMF; Prediction of Wind and Current Loads on VLCCs; published by Oil Companies International Marine Forum; London.
- /A-12/ Moore, C. et al.; "An Application of Collision and Grounding Simulation to Regulatory Assessment"; Proceedings of the International Conference of Collision and Grounding of Ships; Copenhagen; 2001.
- /A-13/ Otto, S.; Østergaard, C.; "Berechnung notwendiger Trossenzüge für Notschleppeinsätze in Nord- und Ostsee“; intern; Germanischer Lloyd; Hamburg; 2001.
- /A-14/ BMVBW: Genehmigungrelevante Richtwerte für Offshore-Windparks - Bericht einer Arbeitsgruppe; Referat LS 23, Bonn, März 2005.





## About DNV

DNV is the independent expert in risk management and assurance, operating in more than 100 countries. Through its broad experience and deep expertise DNV advances safety and sustainable performance, sets industry benchmarks, and inspires and invents solutions.

Whether assessing a new ship design, optimizing the performance of a wind farm, analyzing sensor data from a gas pipeline or certifying a food company's supply chain, DNV enables its customers and their stakeholders to make critical decisions with confidence.

Driven by its purpose, to safeguard life, property, and the environment, DNV helps tackle the challenges and global transformations facing its customers and the world today and is a trusted voice for many of the world's most successful and forward-thinking companies.

## Anlage 2

# Risikoanalyse 2

OFFSHORE-WINDPARKFLÄCHE WINDBOSTEL OST

# Technische Risikoanalyse

WINDBOSTEL OST GmbH,

**Berichtsnr.:** M-DR-E 2025.177, Rev. 2.2

**Datum:** 23.09.2025



Projektname: Offshore-Windparkfläche Windbostel Ost  
 Berichtstitel: Technische Risikoanalyse  
 Kunde: WINDBOSTEL OST GmbH,  
 RWE Platz 4,, 45141 Essen  
 Kontaktperson: [REDACTED]  
 Datum: 23.09.2025  
 Projektnr.: 10573854  
 Org-Einheit: Safety & Systems Engineering, M-DR-E  
 Berichtsnr.: M-DR-E 2025.177, Rev. 2.2

DNV SE – Maritime  
 Postfach 11 16 06  
 20416 Hamburg  
 Brooktorkai 18  
 20457 Hamburg  
 Tel.: +49 40 36149-[REDACTED]  
 Fax: +49 40 36149-[REDACTED]  
 HRB 115442

#### Inhalt:

In dieser technischen Risikoanalyse wird das kumulative Kollisionsrisiko für die geplante Offshore-Windparkfläche Windbostel Ost (FEP-Fläche: N-9.1) untersucht. Dabei werden unter Berücksichtigung der im Herbst 2004 für derartige Risikoanalysen harmonisierten Annahmen, sowie der im Sommer 2008 im Rahmen einer BMVBS-Arbeitsgruppe festgelegten Wirkung von risikomindernden Maßnahmen die Kollisionshäufigkeiten und das Kollisionsrisiko berechnet.

Die kumulative Betrachtung hat unter Berücksichtigung von AIS, einer Verkehrsüberwachung/Seeraumbeobachtung der Variante 3 und Notschleppern eine durchschnittliche statistische Wiederholperiode zwischen zwei Kollisionen von 75 Jahren ergeben. Es wurden 2.1 t/Jahr an austretenden Schadstoffen ermittelt.

Eine Einstufung des berechneten Risikos in die Risikoprioritätszahl (RPZ) nach dem BSH-Standard „Konstruktive Ausführung von Offshore-Windenergieanlagen“ ergab ein Risiko mit einer RPZ von 2 bis 3.

Erstellt von: [REDACTED] Geprüft durch: [REDACTED] freigegeben durch: [REDACTED]

Senior Project Engineer

Team Leader Risk Assessment

Head of Section

Copyright © DNV 2024. Alle Rechte vorbehalten. Sofern nicht anders schriftlich vereinbart: (i) Diese Publikation oder Teile davon dürfen nicht in irgendeiner Form oder mit irgendwelchen Mitteln, weder digital noch anderweitig, kopiert, reproduziert oder übertragen werden; (ii) Der Inhalt dieser Publikation ist vom Kunden vertraulich zu behandeln; (iii) kein Dritter darf sich auf ihren Inhalt verlassen; und (iv) DNV übernimmt keine Sorgfaltspflicht gegenüber Dritten. Ein Verweis auf einen Teil dieser Publikation, der zu Fehlinterpretationen führen kann, ist untersagt.

#### DNV Verteiler:

#### Schlüsselworte:

- ☐ OFFEN. Unbeschränkte Verteilung, intern und extern  
☐ ausschließlich INTERNE Verwendung. Internes DNV Dokument  
☒ VERTRAULICH. Beschränkte /unbeschränkte Verteilung innerhalb von DNV und Vertragsparteien, wie erforderlich Distribution within DNV according to applicable contract.  
☐ STRENG VERTRAULICH. Nur autorisierter Zugriff.

Referenznr	Datum	Grund der Ausstellung	Erstellt von	Geprüft durch	freigegeben durch
Rev. 1.0	27.06.2025	Erste finalisierte Version	<span style="background-color: black; color: black;">[REDACTED]</span>	<span style="background-color: black; color: black;">[REDACTED]</span>	<span style="background-color: black; color: black;">[REDACTED]</span>
Rev. 2.0	23.07.2025	Erweiterte kumulative Berücksichtigung	<span style="background-color: black; color: black;">[REDACTED]</span>	<span style="background-color: black; color: black;">[REDACTED]</span>	<span style="background-color: black; color: black;">[REDACTED]</span>
Rev. 2.1	25.07.2025	Erweiterte kumulative Berücksichtigung	<span style="background-color: black; color: black;">[REDACTED]</span>	<span style="background-color: black; color: black;">[REDACTED]</span>	<span style="background-color: black; color: black;">[REDACTED]</span>
Rev. 2.2	23.09.2025	Zus. Erklärung zur Berücksichtigung der Konverplattformen in Kap. 2.2.	<span style="background-color: black; color: black;">[REDACTED]</span>	<span style="background-color: black; color: black;">[REDACTED]</span>	<span style="background-color: black; color: black;">[REDACTED]</span>

Hinweis: DNV Maritime Advisory Germany liefert seine Dienstleistungen unabhängig und autonom von einer eventuellen Klassifikation / Zertifizierung durch andere organisatorische Einheiten innerhalb DNV.  
 Zur Sicherstellung der Unabhängigkeit befindet sich DNV Maritime Advisory Germany in einer separaten Berichtslinie.  
 Im Falle einer Klassifikation / Zertifizierung durch DNV kann die hierfür zuständige Einheit daher zu einem anderen Ergebnis kommen als Maritime Advisory. Dieses Grundprinzip ist in unsrem nach ISO 9001 zertifizierten Management System definiert.

## Inhaltsverzeichnis

1	ZUSAMMENFASSUNG .....	1
	EINLEITUNG .....	2
2	BERECHNUNGSGRUNDLAGEN .....	2
2.1	Harmonisierte Annahmen .....	3
2.2	Aufstellmuster der kumulativ betrachteten Windparks .....	4
2.3	Schiffsrouten .....	5
2.4	Beschreibung von Klima, Wetter und Hydrologie .....	7
3	RISIKOMINDERNDE MAßNAHMEN .....	12
3.1	Automatic Identification System (AIS) .....	12
3.2	Verkehrsüberwachung und Seeraumbeobachtung .....	13
3.3	Berücksichtigte Notfallschleppkapazitäten .....	20
4	KUMULATIVE KOLLISIONSHÄUFIGKEIT .....	22
4.1	Kollisionshäufigkeiten .....	22
4.2	Zwischenergebnisse ohne AIS, Notfallschlepper und Seeraumbeobachtung .....	25
4.3	Kumulatives Gesamtergebnis .....	26
5	SCHLEPPERWIRKSAMKEIT .....	27
6	KOLLISIONSRISIKO FÜR DIE OFFSHORE-WINDPARKFLÄCHE WINDBOSTEL OST .....	28
6.1	Risiko für die kumulative Betrachtung .....	29
7	RISIKOBEURTEILUNG.....	32
7.1	Umweltauswirkungen .....	32
7.2	Kollisionskonsequenzen Schiff-OWEA .....	34
7.3	Personensicherheit .....	34
8	LITERATUR .....	35
	ANHANG A METHODEN DER RISIKOBERECHNUNG .....	1
A.1	Risikoberechnungen für den Windpark .....	2
A.2	Verfahren zur Berechnung des Risikos für Kollisionen manövrierfähiger Schiffe mit Installationen des Windparks .....	4
A.3	Verfahren zur Berechnung von Risiken für die Kollisionen manövrierunfähiger Schiffe mit Installationen des Windparks .....	11
A.4	Literatur zum Anhang A .....	29

# 1 ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Bericht sind die Ergebnisse der quantitativen Risikoanalyse für die geplante Offshore-Windparkfläche Windbostel Ost (FEP Fläche: N-9.1) zusammengefasst. Zu Grunde liegt der Planungsstand Juni 2025. Hierzu wurde das kumulative Kollisionsrisiko für die Offshore-Windparkfläche Windbostel Ost zusammen mit den bebauten sowie nach Flächenentwicklungsplan geplanten benachbarten Offshore-Windparkplanungen im Radius von 20 Seemeilen ermittelt. Die Berechnungen werden unter Berücksichtigung der im Herbst 2004 für derartige Risikoanalysen harmonisierten Annahmen /1/ sowie der in 2008 in einer BMVBS-Arbeitsgruppe abgestimmten Wirkung risikomindernder Maßnahmen /3/ durchgeführt.

Die kumulative Betrachtung, unter Berücksichtigung von AIS-Geräten am Windpark, einer Verkehrsüberwachung/Seeraumbeobachtung der Variante 3 und berücksichtigter Notschlepper hat eine durchschnittliche statistische Wiederholperiode zwischen zwei Kollisionen von 75 Jahren ergeben. Es wurden durchschnittlich statistisch 2.1 t/Jahr an austretenden Schadstoffmengen ermittelt.

Weitere Ergebnisse unter Berücksichtigung unterschiedlicher Kombinationen der risikomindernden Maßnahmen sind in Tabelle 1 angegeben.

Eine Einstufung des berechneten Risikos in die Risikoprioritätszahl (RPZ) nach dem BSH-Standard „Konstruktive Ausführung von Offshore-Windenergieanlagen“ ergab ein Risiko einer RPZ von 2 bis 3.

## Hinweis:

Es wird auf den starken Einfluss der Aufstellmuster, Entfernungen der OWEAs und Sicherheitsabstände der noch ungewissen Windpark-Planungen der Kumulativbetrachtung, insbesondere zu den stark frequentierten Verkehrsrouten (SN 10), auf die in dieser Analyse ermittelten Ergebnisse hingewiesen (s. Kapitel 2.3). Die Ergebnisse dieser Analyse können daher in Zukunft, von den genannten Parametern abhängig, als relativ unsicher und veränderlich betrachtet werden.

**Tabelle 1: Ermittelte kumulative Kollisionswiederholperioden Offshore-Windparkfläche Windbostel Ost**

<b>Kumulative Betrachtung</b>	durchschnittliche statistische Kollisionswiederholperiode für manövrierfähige und manövrierunfähige Schiffe
Offshore-Windparkfläche Windbostel Ost inklusive benachbarter Offshore-Bebauungen und -Planungen (entsprechend Abbildung 1)	
unter Berücksichtigung der Wirkung von AIS-Geräten am Windpark	27 Jahre
unter Berücksichtigung der Wirkung von AIS-Geräten am Windpark und einer Verkehrsüberwachung/Seeraumbeobachtung der Variante 3	32 Jahre
unter Berücksichtigung der Wirkung von AIS-Geräten am Windpark, und einer Verkehrsüberwachung/Seeraumbeobachtung der Variante 3 + Notschlepper Nordic + betreiberseitiger 70t-Notschlepper	67 Jahre
unter Berücksichtigung der Wirkung von AIS-Geräten am Windpark, und einer Verkehrsüberwachung/Seeraumbeobachtung der Variante 3 + Notschlepper Nordic + betreiberseitiger 70t-Notschlepper + niederländischer Notschlepper „Guardian“	75 Jahre

## **EINLEITUNG**

In dieser Risikoanalyse wurde das Kollisionsrisiko für die Offshore-Windparkfläche Windbostel Ost bestimmt. Die Grundlagen zu den durchgeführten Berechnungen sind in Abschnitt 2 und 3 sowie im Anhang A zu finden.

Dieser Bericht gliedert sich in acht Abschnitte. Ausgehend von der Zusammenfassung im Abschnitt 1 und dieser Einleitung folgt eine Darstellung der verwendeten Berechnungsgrundlagen in Abschnitt 2, sowie eine Vorstellung der risikomindernden Maßnahmen und eine Erläuterung deren angesetzter Wirkung in Abschnitt 3. In Abschnitt 4 wird die kumulative Wirkung der Offshore-Windparkfläche Windbostel Ost und benachbarter Windparks untersucht. In Abschnitt 5 wird die Schlepperwirksamkeit aus den vorangegangenen Berechnungsergebnissen ermittelt. Eine Konsequenzanalyse bezüglich der austretenden Schadstoffmengen für die kumulative Betrachtung findet in Abschnitt 6 statt. In Abschnitt 7 wird eine Einstufung der ermittelten Risiken anhand des Anhang 1 des BSH Standards „Konstruktive Ausführung von Offshore-Windenergieanlagen“ vorgenommen.

## **2 BERECHNUNGSGRUNDLAGEN**

Für die Risikoberechnungen wurden die im Anhang A genannten Grundlagen und Methoden verwendet. Neben den im Jahr 2004 zwischen unterschiedlichen Gutachtern harmonisierten Annahmen (Abschnitt 2.1) werden weitergehende Annahmen für die Wirkung risikomindernder Maßnahmen entsprechend der im Jahr 2008 in einer BMVBS-Arbeitsgruppe abgestimmten Wirkung berücksichtigt /3/. Diese werden im Abschnitt 3 näher beschrieben.

Für die Berechnung der Kollisionen von manövrierunfähigen Schiffen mit Installationen von Windparks wurde in der Berechnungssoftware ein realitätsnahes Driftmodell verwendet, das die Strömung in der Nordsee in Abhängigkeit des Windes berücksichtigt. Zusätzlich wird die Bergung durch Notschleppkapazitäten innerhalb der Windparkfläche lediglich bis zu einer Windstärke von 4 Bft berücksichtigt, da eine erfolgreiche Bergung innerhalb der Windparkfläche bei höheren Windgeschwindigkeiten für unwahrscheinlich angesehen wird.

Im Abschnitt 2.2 sind die Aufstellmuster der unterschiedlichen Windparks dargestellt. Die an die Aufstellmuster angepassten Schiffsrouten werden im Abschnitt 2.3 erläutert. Abschnitt 2.4 beinhaltet Angaben zu den in der Simulationssoftware implementierten und verwendeten Klima- und Wetterbedingungen.

## 2.1 Harmonisierte Annahmen

Im Auftrag vom BMVBW wurde vom BSH eine Harmonisierung der Annahmen zwischen den unterschiedlichen Gutachtern für die Erstellung von Risikoanalysen zum Kollisionsrisiko mit Installationen von Offshore-Windparks veranlasst.

Zwischen den Gutachtern des Germanischen Lloyd, DNV und MARIN wurde Ende 2004 eine Harmonisierung von Annahmen vorgenommen. Im Einzelnen wurden gemeinsame Grundannahmen für die Szenarien mit manövrierfähigen und manövrierunfähigen Schiffen vereinbart, die eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse der unterschiedlichen Gutachter gewährleisten sollen. Detaillierte Angaben hierzu sind im Bericht zur Harmonisierung /1/ zu finden.

Durch die harmonisierten Annahmen wurden hauptsächlich folgende Parameter vereinheitlicht:

Allgemeine Daten:

- Zur bisherigen Lateralverteilung der Schiffe auf den einzelnen Schiffsrouten durch eine Gauß-Verteilung wurde eine zusätzliche gleichförmige Verteilung mit einem Anteil von 2% der Schiffe angenommen, um die Sensibilität zu reduzieren. Dabei reduziert sich der Anteil der Schiffe, die durch die Gauß-Verteilung betrachtet werden, auf 98%.

Szenario mit manövrierfähigen Schiffen

- Ein Causation Factor (Wahrscheinlichkeit  $P_{fm,k}$  von nicht erfolgten Maßnahmen zur Kursänderung) von  $3.0 \cdot 10^{-4}$  wurde gemeinsam vereinbart (vgl. Anhang A Abs. A.2.1).
- Die effektive Kollisionsbreite wurde mit dem 1.2-fachen der Schiffsbreite zzgl. des Durchmessers des Hindernisses festgelegt.

Szenario mit manövrierunfähigen Schiffen

- Die Ausfallrate der Antriebs- und Ruderanlage wurde mit  $2.5 \cdot 10^{-4}$  pro Stunde festgelegt.
- Des Weiteren wurden Anpassungen an den Versagenswahrscheinlichkeiten von einer Notankerung und von Reparaturmaßnahmen vorgenommen.



## 2.2 Aufstellmuster der kumulativ betrachteten Windparks

Entsprechend den harmonisierten Annahmen werden die der Offshore-Windparkfläche Windbostel Ost benachbarten gebauten und geplanten Offshore-Windparkplanungen in einem Radius von 20 Seemeilen für die kumulative Betrachtung berücksichtigt. Diese Kumulativbetrachtung berücksichtigt den geplanten Ausbau entsprechend des Flächenentwicklungsplanes /15/ sowie niederländische Planungen /16/.

In Abbildung 1 sind die in dieser Analyse berücksichtigten Aufstellmuster der umliegenden Offshore-Windparks dargestellt.

Für das Aufstellmuster der Offshore-Windparkfläche Windbostel Ost werden 136 OWEAs einem Fundamentdurchmesser von 9,6 m auf Höhe des Meeresspiegels berücksichtigt. Die Aufstellmuster der OWEAs von umliegenden Windparkplanungen sind generisch vom DNV entwickelt worden, falls diese noch nicht geplant und verfügbar sind. Für sämtliche Anlagen wird aufgrund der Forderungen der Genehmigungsbehörde eine kollisionsfreundliche Konstruktion der Fundamente angenommen. Weiterhin wurden die vorhandenen oder geplanten Konverterplattformen des untersuchten und der benachbarten Windparks entsprechend der Angaben des Flächenentwicklungsplanes /15/, sowie Annahmen für die Konverterplattformen für die ausländischen Planungen berücksichtigt.

Auf den starken Einfluss der Aufstellmuster, Entfernungen der OWEAs und Sicherheitsabstände der noch ungewissen Windpark-Planungen der Kumulativbetrachtung, insbesondere zu der stark frequentierten Verkehrsrouten (SN 10), auf die in dieser Analyse ermittelten Kollisionshäufigkeiten wird hingewiesen (s. Kapitel 2.3). Die Ergebnisse dieser Analyse können daher in Zukunft, von den genannten Parametern abhängig, als relativ unsicher und veränderlich betrachtet werden.

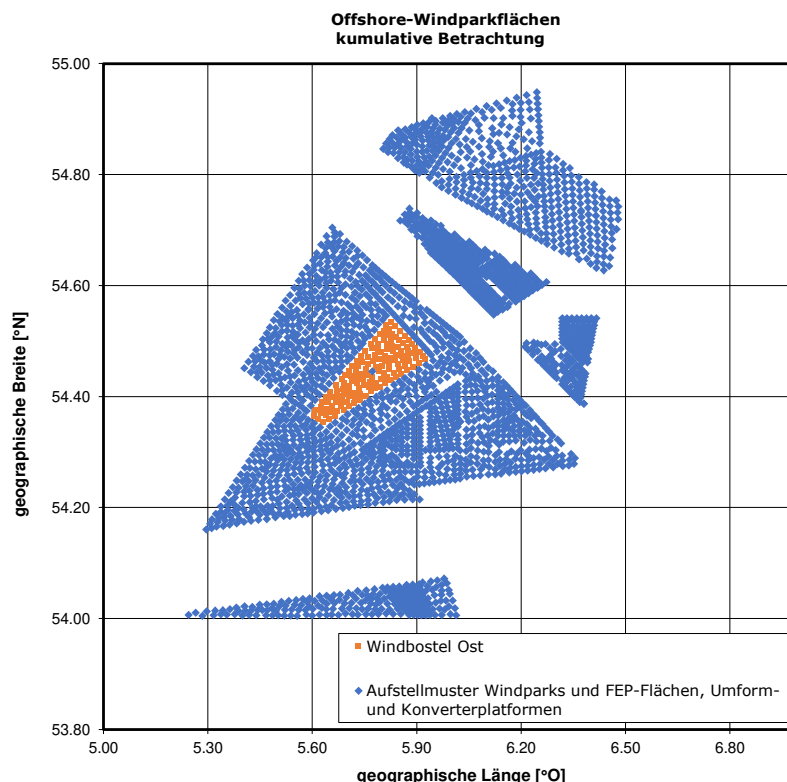


Abbildung 1: Aufstellmuster der kumulativen Betrachtung

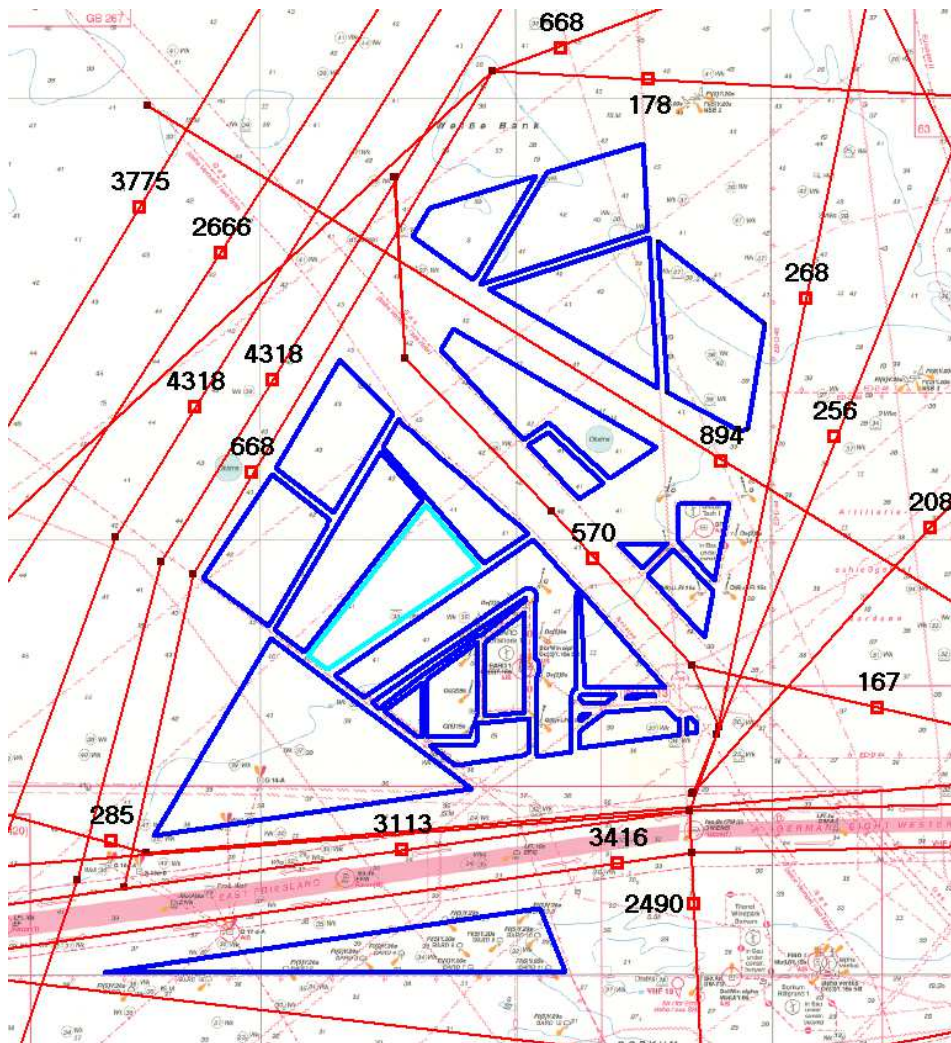
## 2.3 Schiffsrouten

Als Datenbasis wurde der Schiffsverkehr im betrachteten Seegebiet durch Auswertungen von pseudonymisierten AIS-Daten analysiert. Die hierbei verwendeten AIS-Daten wurden von der WSV zur Verfügung gestellt. Dabei wurde der Schiffsverkehr über die Monate April, Juli und Oktober des Jahres 2022 sowie Januar 2023 ausgewertet.

Die auf Basis von AIS-Auswertung identifizierten Schiffsrouten im Bereich der Windparkplanungen sind unter Berücksichtigung der Offshore-Windparks in Abbildung 2 dargestellt. Dabei sind die Routenführungen mit den jährlichen Schiffsbewegungen sowie die Offshore-Windparks eingezeichnet.

Die Schifffahrtsrouten SN6 und SN12 nach Raumordnung sind hierbei bereits versperrt. Die entsprechenden Schiffsbewegungen sind modellhaft auf andere vorhandene Routen umverlegt worden.

Die geplanten Flächen N-9.4, N-9.5, N-12.4 und N-12.5 erstrecken sich relativ weit in die momentan auf der SN10 süd-östlich verlaufenden Verkehre und werden diese nach nordwest verdrängen müssen. Eine zukünftige daraus resultierende Routenführung unter einer Annahme dieser Verdrängung muss im Rahmen dieser Analyse vorgenommen werden. Die dadurch entstehenden möglichen Konzentrierungen und Kanalisierungen des Schiffsverkehrs und die möglichen Effekte auf diesen, ist nicht Gegenstand der hier gemachten Untersuchungen. Auf den relativ großen Einfluss des Abstands und der Zusammenstellung dieses Verkehrs auf die Ergebnisse dieser Analyse wird hiermit hingewiesen. Der süd-östliche Anteil der Schifffahrtsroute SN10 wird in dieser Analyse modellhaft als gerichteter Verkehr eines Verkehrstrennungsgebietes (VTG) angenommen. Die Einbahnwege werden mit einem Abstand von 2 sm zur Sicherheitszone und mit Einbahnwegen mit jeweils einer Breite von 2 sm berücksichtigt. Diese Einstufung orientiert sich an der Option III, beschrieben in Kapitel 7 des „Verkehrlich- schifffahrtspolizeiliche Risikoanalyse der im Rahmen der Fortschreibung des FEP der deutschen AWZ der Nordsee festzulegenden Gebiete“ /14/.



**Abbildung 2: Schiffsrouten mit Angabe jährlicher Schiffsbewegungen unter Berücksichtigung der kumulativ berücksichtigten Windparks**



## 2.4 Beschreibung von Klima, Wetter und Hydrologie

In den Risikoanalysen werden Umwelteinflüsse wie Wind und Strömung berücksichtigt. In diesem Abschnitt sind die für die Analyse verwendeten Eingangsdaten erläutert.

Das Klima und Wetter im Bereich des Windparks ist im Handbuch „Naturverhältnisse – Nordsee und Englischer Kanal“ /11/ beschrieben. In diesem Handbuch wurden die Wetterdaten für den Bereich Deutsche Bucht entnommen:

- Wind
- Seegang

Die Strömungsverhältnisse wurden aus dem Strömungsatlas /11/ abgeleitet. Die Gezeitenverhältnisse werden in der Analyse mitberücksichtigt.

In den folgenden Abschnitten werden diese Einflüsse für das Seegebiet um den Windpark näher beschrieben.

## 2.4.1 Wind

Der Wind kommt im Sommer überwiegend aus westlicher Richtung (270°). Im Winter treten auch sehr häufig östlich Winde (90°) auf. Die Auftretenswahrscheinlichkeit und die Hauptwindrichtung sind in Tabelle 2 dargestellt.

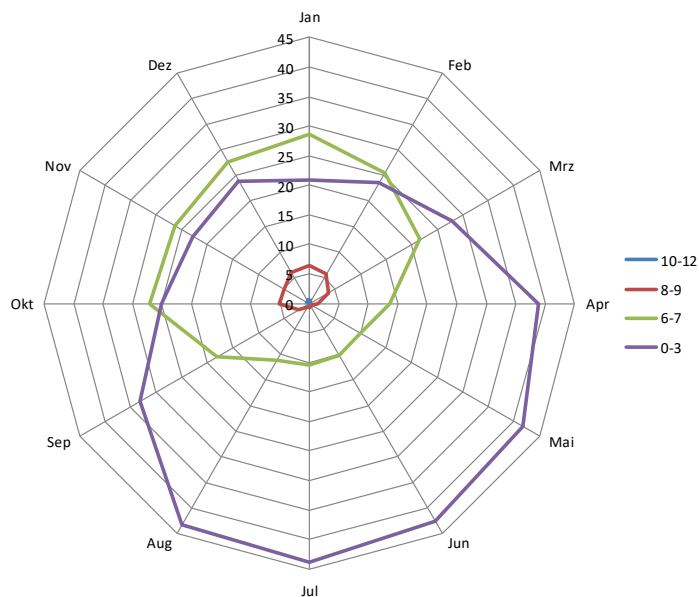
Die in Tabelle 2 gezeigten Werte aus /6/ wurden für den Bereich der Deutschen Bucht gemessen. Die gleiche Anzahl von Messungen wurde auch für auftretende Windgeschwindigkeiten gemacht. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Abbildung 3 dargestellt.

Die Verteilung zeigt eine maximale Auftretenswahrscheinlichkeit von Windgeschwindigkeiten im Bereich von 4 – 5 Bft.

**Tabelle 2: Deutsche Bucht, Relative monatliche Häufigkeit von Windstärkegruppen in [%] und Hauptwindrichtungen**

Bft	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
10-12	0.6	0.5	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.4	0.5	0.2
8-9	6.5	5.7	3.7	1.4	0.5	0.6	0.6	0.7	2.2	5.2	4.9	6.0	3.2
6-7	28.6	25.5	21.7	13.7	10.0	10.2	10.5	11.1	18.2	27.0	26.4	27.6	19.2
4-5	43.5	44.7	46.4	46.0	47.8	46.7	45.1	44.9	46.3	42.6	45.6	42.0	45.1
0-3	20.8	23.6	28.0	38.9	41.7	42.5	43.8	43.3	33.2	25.0	22.7	23.9	32.2
Richtung	S-W	SW-W	SW-W	keine	keine	SW-NW	SW-NW	SW-NW	SW-NW	S-W	S-SW	S-SW	SW-W

Die folgende Abbildung zeigt eine grafische Darstellung der Daten aus Tabelle 2:



**Abbildung 3: Windverteilung Deutsche Bucht**

## 2.4.2 Seegang

Für die Analyse werden ebenfalls Daten aus /7/ verwendet. Die Daten für den Bereich der Deutschen Bucht sind in Tabelle 3 dargestellt.

**Tabelle 3: Deutsche Bucht, Relative Häufigkeiten von Seegangsstufen [in % der Beobachtungen] und die mittlere Höhe des Seegangs [MSH; in m]**

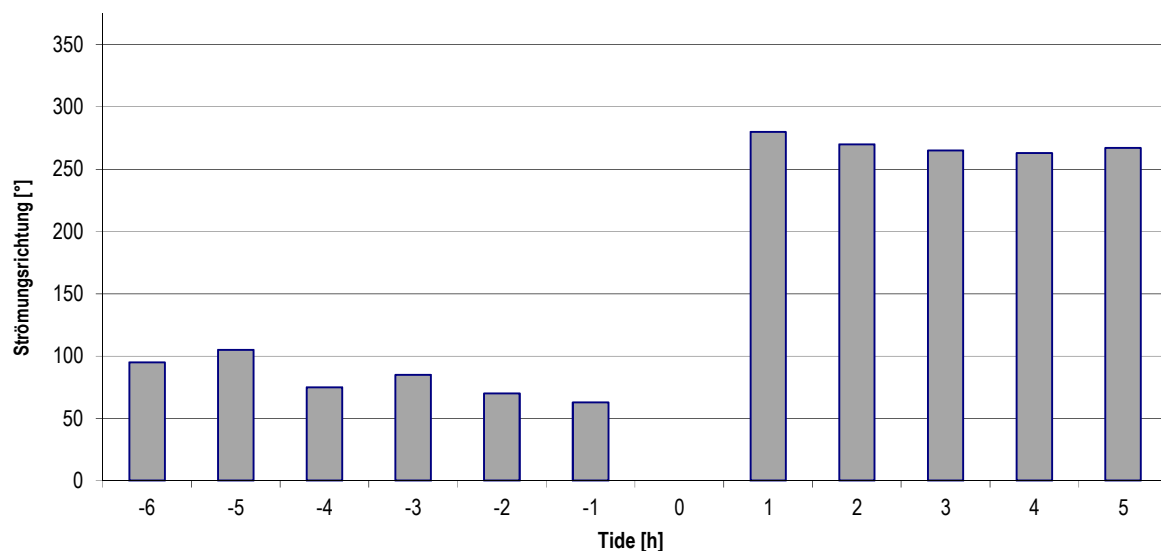
	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
> 4,70 m	<b>2.3</b>	1.9	1.2	0.6	0.2	0.1	0.3	0.3	1	1.6	<b>2.3</b>	2	1.1
2,8 - 4,7 m	<b>12.8</b>	11.2	9.5	4.5	2.8	3.7	3.6	4.1	8.6	9.9	11.3	12.3	7.9
1,3 - 2,7 m	<b>39.5</b>	34.4	29.6	23.2	23.5	24.5	24.6	26.4	33.5	36.1	36.2	35.6	30.6
0,0 - 1,2 m	45.4	52.4	59.7	71.8	<b>73.5</b>	71.7	71.5	69.2	57	52.4	50.2	50.1	60.4
MSH [m]	<b>1.6</b>	1.5	1.3	1	0.9	1	0.9	1	1.3	1.4	1.5	1.5	1.3

### 2.4.3 Strömung

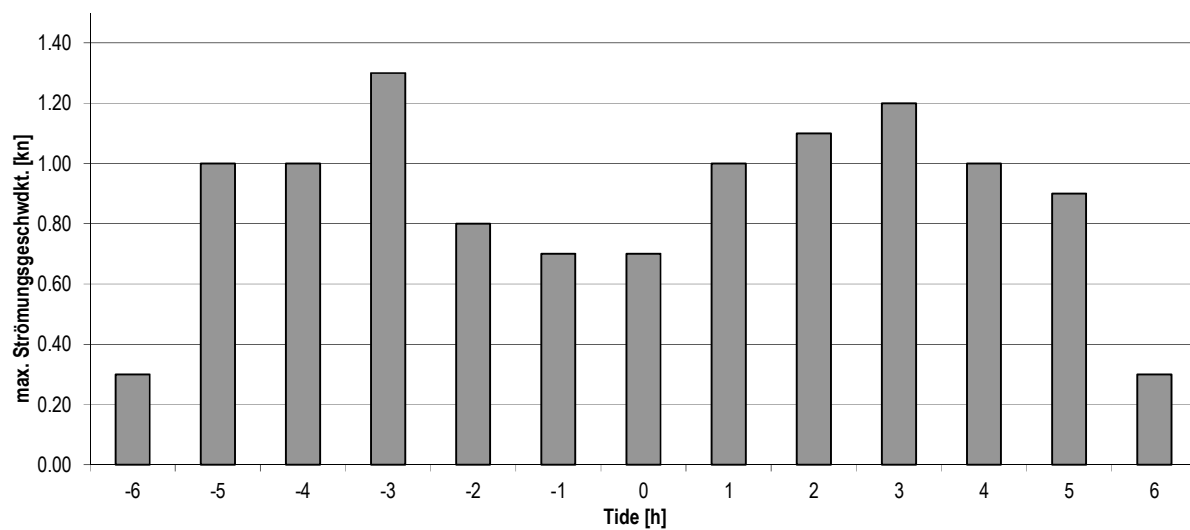
Die Strömungsverhältnisse im betrachteten Seegebiet lassen sich durch Geschwindigkeit und Richtung beschreiben. Für die statistische Beschreibung der Strömungsverhältnisse liegen die Daten des „ADMIRALTY TIDAL STREAM ATLAS“ /11/ zugrunde. Die sich ändernden Strömungsverhältnisse für das Seegebiet sind entsprechend dem Tidenprogress für jede Stunde definiert.

Nach vorliegenden Messwerten des BSH sind Strömungsgeschwindigkeiten um ca. 0.5 kn am häufigsten in der Deutschen Bucht anzutreffen. Starke Strömungen erreichen Geschwindigkeiten bis ca. 1.6 kn. In Abbildung 4 sind die Hauptströmungsrichtungen für einen Tidenprogress im Bereich der betrachteten Windparks aufgezeigt.

Abbildung 5 zeigt die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten für den Verlauf des Tidenprogresses in der Region der Windparks. Für die Seegebiete im Umkreis des Windparks werden entsprechend der Position die Strömungsdaten angesetzt.



**Abbildung 4: Strömungsrichtungen im Bereich der Windparks für jede Stunde des Tidenprogresses**



**Abbildung 5: Verteilung der Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich der Windparks**



### 3 RISIKOMINDERNDE MAßNAHMEN

Als risikomindernde Maßnahmen werden die Installation von AIS-Geräten an den Installationen der Windparks, verschiedene Varianten einer Verkehrsüberwachung/Seeraumbeobachtung und die Wirksamkeit von Schleppern betrachtet. Die Ausrüstung des Windparks mit AIS-Geräten und das Notschleppkonzept Deutsche Küste sind als vorhandene Maßnahmen anzusehen /2/. Als zusätzliche Maßnahme kann eine Verkehrsüberwachung/Seeraumbeobachtung vorgesehen werden, durch die auf Kollisionskurs fahrende Schiffe erkannt, identifiziert und gewarnt werden können und gegebenenfalls Unterstützung gegeben oder veranlasst werden kann.

#### 3.1 Automatic Identification System (AIS)

AIS ermöglicht der Schiffsführung das rechtzeitige Erkennen eines Kollisionskurses mit anderen Schiffen oder Offshore-Einrichtungen, die mit AIS ausgerüstet sind. Die Warnung erfolgt durch das jeweilige an Bord befindliche AIS-Gerät. Das Kollisionsrisiko manövrierfähiger Schiffe kann somit durch den Einsatz von AIS reduziert werden. Seit Anfang 2005 gilt für alle Schiffe auf internationaler Fahrt größer 300 BRZ die AIS-Ausrüstungspflicht.

Solange keine Erkenntnisse durch empirische Daten oder detaillierte analytische Modelle vorliegen, wird ein konservativer Wert als Faktor der Wirksamkeit von 1.25 angenommen /1/.

**Tabelle 4: Risikoreduzierungen aufgrund der Wirkung von AIS Geräten am Windpark**

Szenario	angesetzte Wirkung
Kollision manövrierfähiger Schiffe mit Installationen der Windparks	Faktor
<b>ohne AIS</b>	1.00
<b>mit AIS</b>	1.25

## 3.2 Verkehrsüberwachung und Seeraumbeobachtung

Eine weitere Verminderung der Risiken kann durch die Einbeziehung einer Seeraumbeobachtung seitens des Betreibers oder einer Verkehrsüberwachung durch staatliche Stellen erzielt werden. Ziel der Seeraumbeobachtung und Verkehrsüberwachung ist es, Schiffe zu erkennen und zu identifizieren, die einen Kurs auf die Sicherheitszone haben oder sich auf Kollisionskurs mit dem Windpark befinden, und diese zu warnen sowie gegebenenfalls Navigationshinweise oder Navigationsanweisungen zu geben.

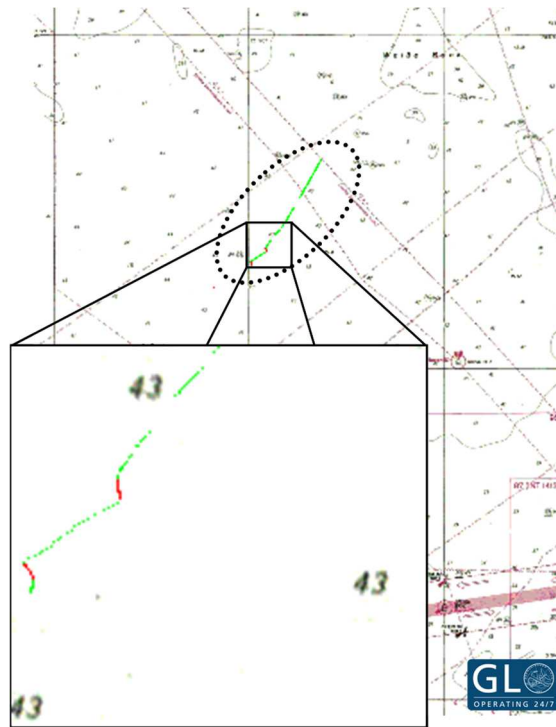
### 3.2.1 Wirkung auf manövrierunfähige Schiffe

Durch eine Verkehrsüberwachung können in Richtung Windpark driftende manövrierunfähige Schiffe erkannt, identifiziert und gezielt angesprochen, sowie gegebenenfalls Rettungsmaßnahmen eingeleitet werden. Ein solcher Vorgang wird durch die technischen Mittel AIS und Radar unterstützt. Dabei hat der Aufwand bei der Realisierung solcher Maßnahmen einen entscheidenden Einfluss auf die Wirksamkeit. Weiterhin sind der Schulungsgrad und die Anzahl der involvierten Personen von zentraler Wichtigkeit.

Durch eine AIS-Überwachung können mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit Schiffe erkannt werden, die durch einen Ausfall der Maschinenanlage oder andere Ereignisse manövrierunfähig werden. Dabei werden Schiffe erfasst, die mit einem AIS-Gerät ausgerüstet sind und AIS-Daten senden. Aufgrund der Ausrüstungspflicht seit Anfang 2005 ist die Mehrzahl der im Seegebiet des OWP fahrenden Schiffe mit AIS-Geräten ausgerüstet. In dem Forschungs- und Entwicklungsvorhaben SAFESHIP /10/ wurde pessimistisch eine Ausrüstung und die Sendung der AIS-Daten bei 90% aller Schiffe angenommen. Inzwischen ist mit einem deutlich über diesem Wert liegenden Anteil zu rechnen.

Sofern das manövrierunfähige Schiff sein Driften nicht selbst meldet, kann über verschiedene AIS- und Radar- auswertemethoden eine Identifikation erfolgen. Dabei bietet AIS gegenüber Radar den Vorteil, dass neben GPS gestützten Positions-, Lage- und Geschwindigkeitsdaten auch schiffsspezifische Daten und Statusmeldungen übertragen werden. Der Informationsgehalt von Radar ist zwar geringer, jedoch besteht hier der Vorteil, dass das Signal vom Schiff selbst unabhängig ist. Die höchste Wahrscheinlichkeit der Erkennung ist über eine Kombination von AIS und Radar zu erreichen.

Softwarealgorithmen, mit denen sich driftende Schiffe erkennen lassen, sind derzeit in der Entwicklung. Untersuchungen des GL deuten auf eine nahezu sichere Erkennung von driftenden Schiffen über AIS hin. Zum einen kann das AIS Gerät an Bord durch eine Statusmeldung (z.B. „not under command“ oder „restricted ability to manoeuvre“) auf ein Driften aufmerksam machen, zum anderen ist ein Erkennen durch Auswertung der Positionsmeldungen möglich. Letzteres ist durch ein Feststellen einer Differenz zwischen Kurs und Ausrichtung des Schiffes („course over ground“ und „heading“) und über komplexere Auswertung der zeitlichen Änderung verschiedener AIS-Parameter („speed over ground“, „course over ground“, „heading“) zu erreichen. Beispielfhaft ist in Abbildung 6 die Spur eines über AIS-Auswertung identifizierten Drifters dargestellt.



**Abbildung 6: Driftweg eines über AIS-Auswertung identifizierten driftenden Schiffes**

Durch einen Ereignisbaum, der die jeweiligen Teilwahrscheinlichkeiten für verschiedene Arten der Identifikation enthält, lässt sich eine Gesamtwahrscheinlichkeit für das Erkennen eines driftenden Schiffes durch eine Verkehrsüberwachung ermitteln, siehe Abbildung 7. Bei Annahme konservativer Werte, kann davon ausgegangen werden, dass ca. 88% aller manövrierunfähigen Schiffe identifiziert werden können.

Wird die Verkehrsüberwachung über AIS durch Radar ergänzt, ergibt sich eine höhere Wahrscheinlichkeit der Identifikation eines driftenden Schiffes. Einerseits ist man vom AIS-Signal unabhängig, andererseits können auftretende Differenzen zwischen beiden Signalen zusätzliche Informationen liefern. Über den in Abbildung 8 dargestellten Ereignisbaum wird bei Berücksichtigung einer AIS- und Radarüberwachung eine Erkennung des manövrierunfähigen Schiffes in 98% aller Fälle errechnet.

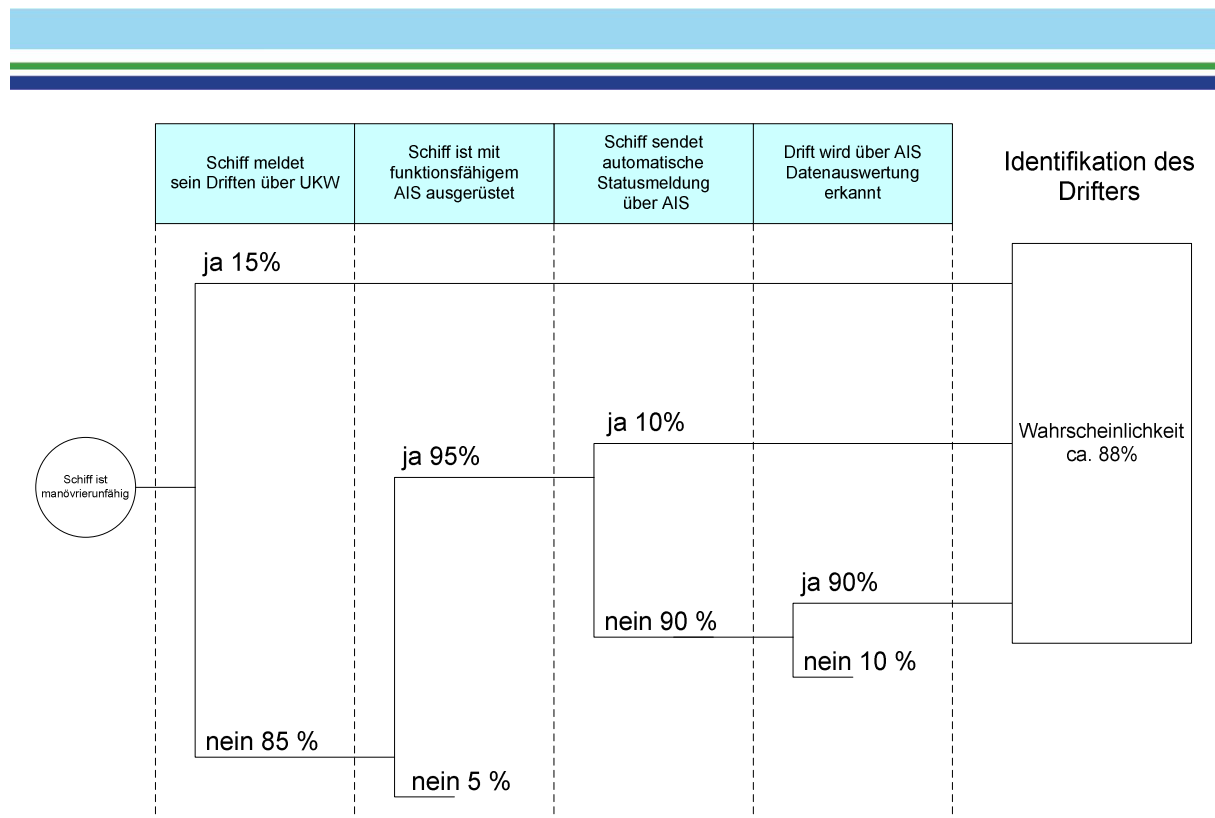


Abbildung 7: Ereignisbaum zur Identifikation driftender Schiffe durch Verkehrsüberwachung über AIS

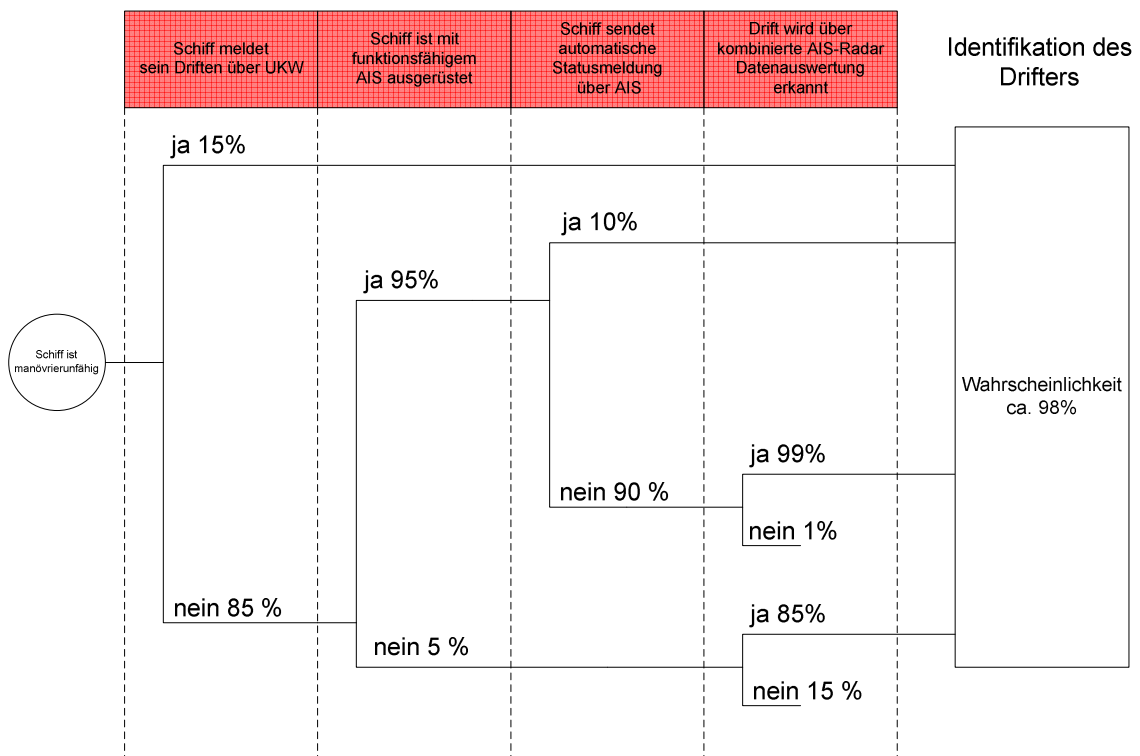



Abbildung 8: Ereignisbaum zur Identifikation driftender Schiffe durch Verkehrsüberwachung über AIS und Radar

Bei Verfolgung der Driftbewegung der erkannten manövrierunfähigen Schiffe sowie einer Kommunikation mit dem driftenden Schiff kann ein Gefährdungspotential durch das jeweilig driftende Schiff abgeschätzt werden. Für die



Beurteilung der risikomindernden Wirkung einer Verkehrsüberwachung auf Kollisionen manövrierunfähiger Schiffe mit Installationen der Windparks sind im Weiteren die Wirksamkeit der kommunikativen Unterstützung durch Verkehrsüberwachung und Bergungsmaßnahmen zu betrachten.

Kommunikative Unterstützung durch nautisch geschultes Personal kann zu einer Verminderung des Kollisionsrisikos führen. Dabei ist die Bereitstellung von Hinweisen zum gezielten Einsetzen von eventuell noch vorhandenen Bordmitteln, wie beispielsweise Bugstrahlruder, Ruderstellung oder Anker zur Beeinflussung der Drift zu nennen; hinzu kommt der psychologische Effekt der Beratung, der zu einer positiven Veränderung der Lage des Havaristen beitragen kann. Da dieser Effekt schwer zu quantifizieren ist, wird hier zunächst pessimistisch von einem Faktor 1.1 ausgegangen. Das heißt, in etwa 10% aller identifizierten Fälle kann eine Kollision zwischen manövrierunfähigen Schiffen und Windenergieanlagen durch kommunikative Mittel verhindert werden.

### 3.2.2 Wirkung auf manövrierfähige Schiffe

Für die Betrachtung und Quantifizierung der Maßnahmen der Verkehrsüberwachung/ Seeraumbeobachtung auf manövrierfähige Schiffe werden im Folgenden drei verschiedene Varianten unterschieden, die sich bezüglich ihrer Ausrüstung, Konzeption und Wirksamkeit unterscheiden.

### 3.2.3 Variante 1: Vollständige Verkehrsüberwachung/Seeraumbeobachtung

Eine vollständige Überwachung und Beobachtung schließt alle Maßnahmen der maritimen Verkehrssicherung ein. Dies beinhaltet eine permanente (manuelle) Beobachtung des Schiffsverkehrs durch ausgebildete Nautiker sowohl mit Hilfe von AIS, als auch mit Hilfe von Radar. Eine Quantifizierung der Wirksamkeit ist auf Grund der unterschiedlichen Ausrüstung der Schiffe und der jeweiligen nautischen Gegebenheiten des betrachteten Seeraums schwierig. Die Studien /7/ und /8/ geben für die Vergangenheit eine Spanne der Reduzierung der Kollisionshäufigkeiten von Faktor 2 bis 10 an. Es wird erwartet, dass sich die Wirksamkeit auf Grund der ständig fortschreitenden technischen Ausrüstung der Schiffe eher reduziert hat. Andererseits wird jedoch erwartet, dass sich die Möglichkeit einer gezielten Identifikation einzelner Schiffe durch AIS in Verbindung mit einer Seeraumbeobachtung positiv auswirkt /9/. Basierend auf Ergebnissen eines vom Germanischen Lloyd, MARIN und der Technical University of Denmark durchgeführten Forschungsprojektes /10/ wurde ein risikomindernder Faktor von 4.33 für eine umfassende Verkehrsüberwachung/Seeraumbeobachtung quantifiziert. Im Rahmen der Harmonisierung der Annahmen unterschiedlicher Gutachter wurde ein Faktor von 4 vereinbart /3/.

### 3.2.4 Variante 2: Automatische Überwachung/Beobachtung mit manueller Option

Grundlage der Variante 2 ist die ständige automatische Auswertung aller mit AIS ausgerüsteten Fahrzeuge. Parallel dazu erfolgt in regelmäßigen Abständen eine manuelle Auswertung. Werden Grenzparameter überschritten, das heißt, befindet sich beispielsweise ein Schiff in einem definierten Abstand auf Kollisionskurs mit dem Windpark, erfolgt in jedem Fall eine automatische Alarmierung/Warnung und eine weitere manuelle Überwachung/Beobachtung der entsprechenden Fahrzeuge durch Nautiker. Bei Identifikation eines Schiffes kann versucht werden, den potentiellen Kollisionsgegner rechtzeitig über Funk oder Satellitentelefon zu warnen. Für die hier vorgeschlagene automatische Beobachtung mit Hilfe von AIS-Signalen und einer zusätzlichen manuellen Beobachtung der in der Umgebung des Windparks fahrenden Schiffe ist ein geringerer Faktor als 4 anzusetzen, da einerseits nur AIS-Daten verwendet werden und andererseits teilweise eine automatische Beobachtung stattfindet. Mit diesen Einschränkungen gegenüber einer umfassenden Verkehrsüberwachung/Seeraumbeobachtung mit einer zusätzlichen Radarüberwachung und einer ständigen manuellen Auswertung sind Annahmen bezüglich einer reduzierten Wirksamkeit verbunden. Im Forschungsvorhaben SAFESHIP /10/ wurde eine Seeraumbeobachtung nur mit AIS-Geräten untersucht. Aufgrund der nicht 100%igen Verfügbarkeit der

Schiffsinformationen (nicht vorhandenes, defektes oder abgeschaltetes AIS-Gerät an Bord) ist eine geringere Wirksamkeit anzusetzen. Jedoch sind aufgrund der besseren Identifikation der Schiffe durchaus Vorteile gegenüber einer Radarüberwachung vorhanden. Insgesamt konnte für eine nur über AIS betriebene Seeraumbeobachtung in /10/ ein Faktor von 3.66 festgestellt werden. Zusätzlich ist für diese Variante zu berücksichtigen, dass die Auswertung der AIS-Signale zunächst teilweise automatisch erfolgt. Hierbei ist mit einer Reduzierung der Wirksamkeit zu rechnen, so dass ein risikomindernder Faktor von 3 als realistisch angenommen wird /3/.

### 3.2.5 Variante 3: Automatische Auswertung

Diese Variante unterscheidet sich gegenüber der oben beschriebenen Variante 2 in der Weise, dass die Auswertung des Schiffsverkehrs permanent automatisch über AIS vor dem Hintergrund der Einleitung von Sofortmaßnahmen bei besonderen Ereignissen vorgenommen wird und nur bei Überschreiten vorgegebener Grenzparameter ein Aufmerksamkeitssignal als Hinweis erfolgt. Nach Überprüfung können mögliche Maßnahmen ergriffen werden. Es ist auch denkbar, dass zusätzlich eine automatische Textmeldung über AIS an das entsprechende Schiff gesendet wird oder automatisch über den DSC-Kanal des UKW-Funkgerätes (Kanal 70) an das entsprechende Schiff eine Dringlichkeits- oder Sicherheitsmeldung abgesetzt wird. Aufgrund der zunächst nur automatisch vorgenommenen Auswertung ist von einer weiteren Verminderung der Wirksamkeit im Vergleich zu Variante 2 auszugehen. Deshalb wird für diese Variante von einem reduzierten risikomindernden Faktor von 2.5 ausgegangen /3/.

Tabelle 5 und Tabelle 6 zeigen die Faktoren zur Reduzierung der Kollisionshäufigkeiten, bedingt durch die Wirkung der Verkehrsüberwachung/Seeraumbeobachtung gemäß den verschiedenen Varianten.

In Tabelle 7 sind die erforderlichen Ausrüstungen und das erforderliche Personal für eine Verkehrsüberwachung/Seeraumbeobachtung gemäß Variante 3 näher beschrieben /3/.

**Tabelle 5: Risikoreduzierungen aufgrund der Wirkung einer Verkehrsüberwachung/Seeraumbeobachtung auf manövrierfähige Schiffe**

Szenario	angesetzte Wirkung
Kollision manövrierfähiger Schiffe mit Installationen des Windparks	Faktor
<b>ohne</b> Überwachung/Beobachtung und Warnmeldungen	1
<b>mit</b> Überwachung/Beobachtung nach Variante 1	4
<b>mit</b> Überwachung/Beobachtung nach Variante 2	3
<b>mit</b> Überwachung/Beobachtung nach Variante 3	2.5

**Tabelle 6: Risikoreduzierungen aufgrund der Wirkung einer Verkehrsüberwachung/ Seeraumbeobachtung und anschließender kommunikativer nautischen Unterstützung auf manövrierunfähige Schiffe**

Szenario	angesetzte Wirkung
Kollision manövrierunfähiger Schiffe mit Installationen des Windparks	Faktor
<b>ohne</b> kommunikative Unterstützung durch nautisch geschultes Personal	1
<b>mit</b> kommunikativer Unterstützung durch nautisch geschultes Personal	1.1

**Tabelle 7: Ausrüstung und Personal für eine Seeraumbeobachtung durch die Leitwarte**

<b>Ausrüstung:</b>	<b>Beschreibung</b>
AIS	Redundante AIS-Empfangsgeräte und redundante Datenweiterleitung
AIS-Auswertung	<p>Die am Windpark empfangenen AIS-Daten werden in geeigneter Art und Weise ausgewertet. Wenn sich in einem bestimmten Radius um den Windpark ein Schiff auf Kurs in Richtung des Windparks befindet, wird ein Alarm ausgegeben.</p> <p>Eventuell ist in Verbindung mit den AIS-Geräten und den UKW-Funkgeräten eine zusätzliche automatische Alarmierung der entsprechenden Schiffsführung realisierbar.</p>
UKW-Funk mit DSC	<p>Mindestens zwei redundant arbeitende Geräte</p> <p>Es können potenzielle Kollisionsgegner informiert und gewarnt werden (z.B. über UKW Kanal 16 oder über den DSC Kanal 70).</p>
Telefon	Zur Kommunikation mit dem Kollisionsgegner (Satellitentelefon) und mit Behörden/Verkehrszentrale zur Information und gegebenenfalls zur Einleitung von Hilfsmaßnahmen
Datenübertragung	Redundante Datenübertragung vom Windpark zur Leitwarte des Windparks zur Sicherstellung des Informationsaustausches (Funk und AIS)
Sicherheitshandbuch	Sicherheitshandbuch mit Verfahrensanweisungen und Notfallplänen für das Personal
Weitere Informationssysteme	<p>Informationssysteme zur Anzeige von hydrologischen und meteorologischen Daten (Windstärke und -richtung, Wasserstand, Sichtweite)</p> <p>Eventuell weitere Systeme, die den Status der einzelnen WEA anzeigen</p>
<b>Personal:</b>	
Betriebspersonal	Ausgebildetes Personal ist 24 Stunden am Tag notwendig.



### 3.3 Berücksichtigte Notfallschleppkapazitäten

Notschlepper werden zum Bergen von manövrierunfähigen Havaristen eingesetzt. Ihr risikomindernder Einfluss kommt daher nur beim Szenario der Kollision von manövrierunfähigen Schiffen mit Installationen des Windparks zur Wirkung. Die Möglichkeit der Bergung eines Havaristen durch einen oder mehrere Schlepper setzt neben der Erkennung und Identifikation des Schiffes die Einsatzbereitschaft der Schlepper voraus. Dafür können ebenfalls Annahmen getroffen werden.

Der Nordseeschlepper „Nordic“, seit Anfang 2019 auf der Bereitschaftsposition südlich Helgoland, kann ganzjährig für Notschleppsätze vom Havariekommando oder dem WSA Cuxhaven eingesetzt werden („hoheitlicher Notschlepper“). Er ist in der Regel innerhalb von 0,5 h einsatzklar. Bei diesem Schlepper kann von einer hohen Wahrscheinlichkeit der Bereitschaft von etwa 96% (d.h. an 16 Tagen im Jahr steht hier kein Schlepper zur Verfügung) ausgegangen werden, da er ausschließlich für Schleppmanöver, allerdings vorwiegend zum Küstenschutz, vorgehalten wird. Für den Fall des technischen Ausfalls, des Besatzungswechsels und Bunkerns von Treibstoff wird er adäquat durch andere Schiffe ersetzt.

Ergänzend kann ein betreiberseitiger Schlepper berücksichtigt werden, der zu einem Zeitpunkt verfügbar sein muss, an dem die „Nordic“ nicht ausreichend Notschleppkapazitäten aufweist, um die Kriterien für die entsprechenden Windparkflächen zu erfüllen. Exemplarisch wird dieser Schlepper mit 70t Pfahlzug und einer Bereitschaftsposition im Umfeld des Vorhabens Trianel Borkum II angenommen, da für Windparks dieses Gebietes bereits eine entsprechende Anordnung in der Vergangenheit erfolgt ist.


Da in dieser Analyse niederländische Offshore-Windparkplanungen berücksichtigt werden, bietet sich die Einbeziehung des niederländischen Notschleppers „Guardian“ an. Dieser hoheitlich vorgehaltene Notschlepper ist in Den Helder stationiert und dürfte einen gewissen risikomindernden Effekt auf insbesondere die westlich gelegenden Anlagen haben.

Für die Schlepper ergeben sich folgende Leistungsdaten:

**Tabelle 8: Leistungsdaten der Schlepper**

Notschlepper:	Hoheitlicher Notschlepper „Nordic“	Betreiberseitig vorzuhaltend Schlepper (bisheriges Anforderungsprofil)	Niederländischer Notschlepper „Guardian“
Geschwindigkeit:	19,5 kn	14,0 kn	18,0 kn
Pfahlzug:	200 t	70 t	180 t
Position	Bereitschaftsposition: -5 sm SE'lich Helgoland, zwischen Insel Helgoland und Außenelbe-Reede	Angenommene Bereitschaftsposition im Umfeld des Vorhabens Trianel Windpark Borkum II	Den Helder

In den Berechnungen wird konservativ die mögliche risikomindernde Wirkung der Mehrzweckschiffe „Mellum“ und „Neuwerk“ vernachlässigt.



Die Bergung durch einen Notschlepper innerhalb der Windparkfläche wird lediglich bis zu einer Windstärke von 4 Bft berücksichtigt, da eine erfolgreiche Bergung innerhalb der Windparkfläche bei höheren Windgeschwindigkeiten als unwahrscheinlich angesehen wird.

Bei Annahme einer Wahrscheinlichkeit für die Identifikation eines manövrierunfähigen Schiffes von 98% und einer Schlepperbereitschaft von 96% ergibt sich somit eine Gesamtwahrscheinlichkeit für die Initiierung eines Bergungsversuches von:

$$98\% \quad \times \quad 96\% \quad = \quad 94\%$$

Um den risikomindernden Einfluss der Notschlepper auf die Kollisionshäufigkeit von Schiffen mit dem Windpark zu untersuchen, wurde das von manövrierunfähigen Havaristen ausgehende Kollisionsrisiko unter Berücksichtigung der Wirkung eines Notschleppers entsprechend der Angaben in Anhang A berechnet.



## 4 KUMULATIVE KOLLISIONSHÄUFIGKEIT

Grundlage für die kumulativen Berechnungen dieses Abschnitts sind die an die Windparks angepassten Routen entsprechend Abbildung 2. In diesem Abschnitt wird das kumulative Kollisionsrisiko mit Installationen der Offshore-Windparkfläche Windbostel Ost und der kumulativ berücksichtigten Windparks angegeben.

In den folgenden Abschnitten 4.1 und 4.2 werden die Kollisionshäufigkeiten ohne risikomindernde Maßnahmen angegeben. Die Gesamtergebnisse der kumulativen Betrachtung mit und ohne risikomindernde Maßnahmen sind im Abschnitt 4.3 zusammengestellt.

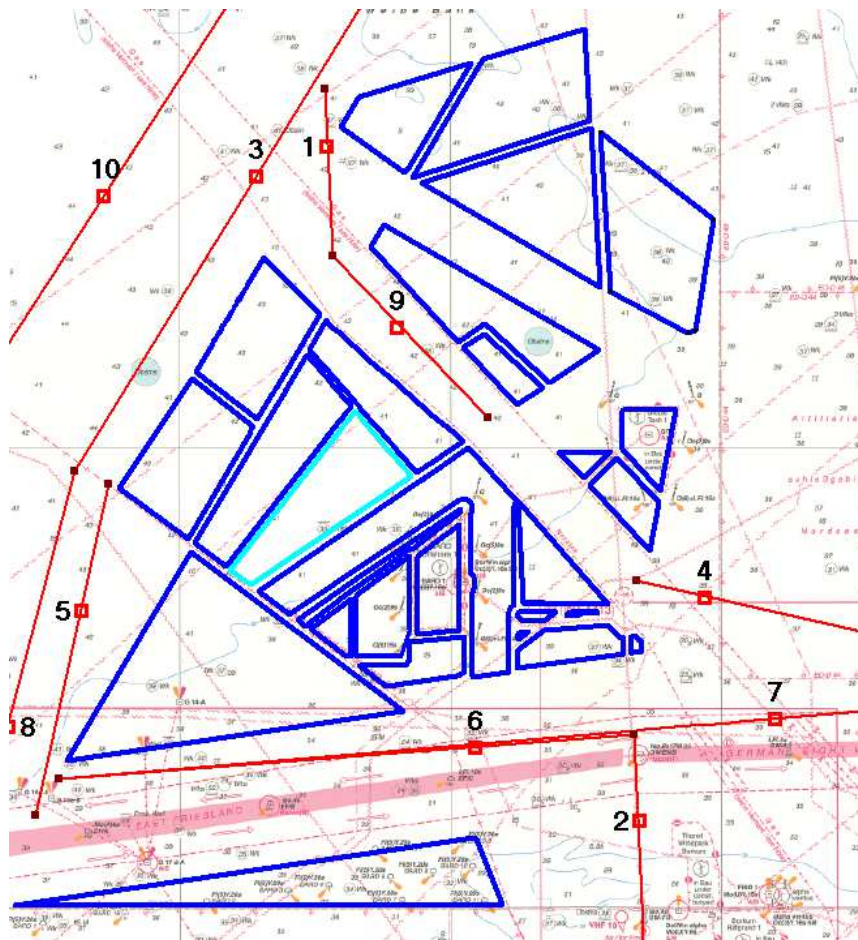
### 4.1 Kollisionshäufigkeiten

Die berechnete Kollisionshäufigkeit von manövrierfähigen Schiffen mit Installationen der Windparks ergibt eine Gesamtkollisionshäufigkeit aller Routenabschnitte von 0.0038 Kollisionen/Jahr, welches einer statistisch zu erwartenden Zeit zwischen zwei Kollisionen von 264 Jahren entspricht.

Die aufsummierte Kollisionshäufigkeit für manövrierunfähige Schiffe aller Routenabschnitte ergibt eine Häufigkeit von 0.0334 Kollisionen/Jahr. Dies entspricht einer statistisch zu erwartenden Zeit zwischen zwei Kollisionen von manövrierunfähigen Schiffen mit Installationen der Windparks von 30 Jahren.

**Tabelle 9: Kollisionshäufigkeiten von manövrierfähigen Schiffen mit Installationen der Windparks (ohne risikomindernde Maßnahmen), sortiert nach normierter Häufigkeit**

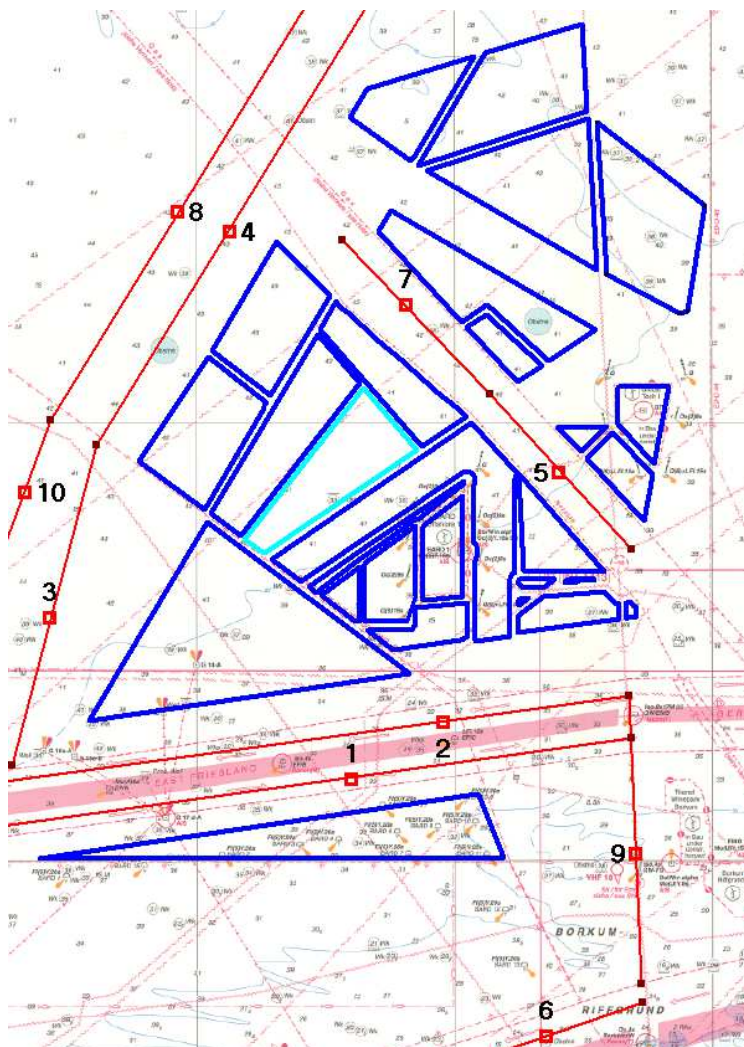
Nr.	Koordinaten des Abschnittsbeginns		Koordinaten des Abschnittsendes		Routenabschnittslänge [sm]	normierte Kollisionshäufigkeit [Kollisionen/Jahr/sm]	normierte mittlere Zeit zwischen den Kollisionen [Jahre/sm]	Kollisionshäufigkeit [Kollisionen/Jahr]	mittlere Zeit zwischen den Kollisionen [Jahren]
	geografische Breite	geografische Länge	geografische Breite	geografische Länge					
1	54° 53.209' N	05° 46.144' O	54° 42.462' N	05° 47.127' O	11	0.000052	19270	0.000559	1789
2	53° 51.540' N	06° 21.831' O	54° 11.400' N	06° 20.484' O	20	0.000041	24570	0.000810	1235
3	54° 28.565' N	05° 18.500' O	55° 38.905' N	06° 33.566' O	83	0.000014	72460	0.001140	877
4	54° 21.423' N	06° 20.650' O	54° 12.678' N	07° 26.518' O	39	0.000007	137200	0.000287	3479
5	54° 27.694' N	05° 22.188' O	54° 06.131' N	05° 14.155' O	22	0.000007	147100	0.000150	6667
6	54° 08.454' N	05° 16.782' O	54° 11.400' N	06° 20.483' O	37	0.000007	152000	0.000246	4065
7	54° 08.453' N	05° 16.784' O	54° 14.927' N	07° 26.730' O	76	0.000003	332200	0.000229	4367
8	54° 06.618' N	05° 08.649' O	54° 28.565' N	05° 18.500' O	23	0.000003	371700	0.000061	16370
9	54° 32.001' N	06° 04.193' O	54° 42.462' N	05° 47.127' O	14	0.000001	772800	0.000019	53560
10	53° 58.616' N	04° 29.117' O	55° 47.719' N	06° 30.882' O	130	0.000001	970900	0.000134	7463



**Abbildung 9: Darstellung der Routen mit den größten normierten Kollisionshäufigkeiten von manövrierfähigen Schiffen mit Installationen der Windparks**

**Tabelle 10: Kollisionshäufigkeiten von manövrierunfähigen Schiffen mit Installationen der Windparks (ohne risikomindernde Maßnahmen), sortiert nach normierter Häufigkeit**

Nr.	Koordinaten des Abschnittsbeginns		Koordinaten des Abschnittsendes		Routenabschnittslänge [sm]	normierte Kollisionshäufigkeit [Kollisionen/Jahr/sm]	normierte mittlere Zeit zwischen den Kollisionen [Jahren/sm]	Kollisionshäufigkeit [Kollisionen/Jahr]	mittlere Zeit zwischen den Kollisionen [Jahre]
	geografische Breite	geografische Länge	geografische Breite	geografische Länge					
1	53° 59.782' N	04° 35.294' O	54° 08.520' N	06° 20.678' O	62	0.000085	11810	0.005270	190
2	54° 11.400' N	06° 20.483' O	54° 02.831' N	04° 35.004' O	62	0.000081	12320	0.005060	198
3	54° 06.618' N	05° 08.649' O	54° 28.565' N	05° 18.500' O	23	0.000076	13160	0.001730	578
4	54° 28.565' N	05° 18.500' O	55° 38.905' N	06° 33.566' O	83	0.000047	21190	0.003900	256
5	54° 21.423' N	06° 20.650' O	54° 32.001' N	06° 04.193' O	14	0.000044	22730	0.000628	1592
6	53° 50.239' N	06° 21.950' O	53° 28.200' N	04° 36.000' O	66	0.000040	25250	0.002610	383
7	54° 32.001' N	06° 04.193' O	54° 42.462' N	05° 47.127' O	14	0.000037	27400	0.000527	1898
8	55° 39.333' N	06° 26.919' O	54° 30.223' N	05° 13.176' O	81	0.000029	35090	0.002310	433
9	53° 51.540' N	06° 21.831' O	54° 11.400' N	06° 20.484' O	20	0.000026	38310	0.000519	1927
10	54° 30.223' N	05° 13.176' O	53° 34.831' N	04° 38.880' O	59	0.000024	41840	0.001410	709



**Abbildung 10: Darstellung der Routen mit den größten normierten Kollisionshäufigkeiten von manövrierunfähigen Schiffen mit Installationen der Windparks**

## 4.2 Zwischenergebnisse ohne AIS, Notfallschlepper und Seeraumbeobachtung

**Tabelle 11: Kumulative Zwischenergebnisse der Risikoanalyse ohne risikomindernde Maßnahmen**

Szenario	Kollisionshäufigkeit [1/Jahr]	stat. zu erwartende Zeit zwischen zwei Kollisionen [Jahre]
Kollision eines manövrierfähigen Schiffes mit Installationen des Windparks	0.0038	264
Kollision eines manövrierunfähigen Schiffes mit Installationen des Windparks	0.0334	30
Gesamt	0.0372	27

### 4.3 Kumulatives Gesamtergebnis

Die Ergebnisse der kumulativen Betrachtung der Offshore-Windparkfläche Windbostel Ost und der kumulativ berücksichtigten Windparks mit und ohne Berücksichtigung der Wirkung risikomindernder Maßnahmen sind in Tabelle 12 zusammengestellt. Die Kollisionshäufigkeit für die kumulative Aufstellung von manövrierfähigen und manövrierunfähigen Schiffen ergibt, unter Berücksichtigung von AIS, einer Verkehrsüberwachung/-Seeraumbeobachtung der Variante 3 (s. Kapitel 3.2) und berücksichtigter Notschlepperkapazität, eine Wiederholfrequenz von 75 Jahren.

**Tabelle 12: Kumulative Analyseergebnisse ohne und unter Berücksichtigung der risikomindernden Maßnahmen**

Szenario  Kumulative Betrachtung	Kollisionshäufigkeit			
	für manövrierfähige Schiffe  [1/Jahr]	für manövrierunfähige Schiffe  [1/Jahr]	für manövrierfähige und manövrierunfähige Schiffe  [1/Jahr]	stat. zu erwartende Zeit zwischen zwei Kollisionen [Jahre]
ohne risikomindernde Maßnahmen (Verkehrsüberwachung/Seeraumbeobachtung, AIS, Notfallschlepper)	0.0038	0.0334	0.0372	27
mit AIS, ohne Verkehrsüberwachung/Seeraumbeobachtung und ohne Notfallschlepper	0.0030	0.0334	0.0364	27
mit AIS, mit Verkehrsüberwachung/Seeraumbeobachtung der Variante 3 und ohne Notfallschlepper	0.0012	0.0304	0.0316	32
mit AIS, Verkehrsüberwachung/Seeraumbeobachtung der Variante 3 und Notschlepper Nordic, 70t Schlepper	0.0012	0.0137	0.0149	67
mit AIS, Verkehrsüberwachung/Seeraumbeobachtung der Variante 3 und Notschlepper Nordic, 70t Schlepper und Guardian	0.0012	0.0122	0.0134	75



## 5 SCHLEPPERWIRKSAMKEIT

Wie die Ergebnisse aus Kapitel 4.3 zeigen, hat die Möglichkeit des Einsatzes von Notschleppern einen erheblichen Einfluss auf die Kollisionshäufigkeit von manövrierunfähigen Schiffen mit Installationen der Windparks. Eine Kollision mit einem driftenden Schiff kann in Abhängigkeit verschiedener Faktoren durch rechtzeitige Bergung von einem Schlepper verhindert werden (vgl.: A.3.1 Bergung mit Schleppunterstützung).

Die Schlepperwirksamkeit kann explizit aus den errechneten Ergebnissen für die Kollisionshäufigkeiten für manövrierunfähige Schiffe bestimmt werden. Die Wirksamkeit des Schleppers ergibt sich folgendermaßen:

$$\text{Schlepperwirksamkeit} = \frac{\text{Häufigkeit der Kollision zwischen Schiff und Windenergieanlage (ohne Schleppereinsatz)}}{\text{Häufigkeit der Kollision zwischen Schiff und Windenergieanlage (mit Schleppereinsatz)}}$$

Die errechneten Faktoren der Schlepperwirksamkeit der berücksichtigten drei Notschlepper sind bei Ansatz einer Verkehrsüberwachung/Seeraumbeobachtung der Variante 3 für die kumulative Betrachtung in der folgenden Tabelle aufgeführt.

**Tabelle 13: Schlepperwirksamkeit der berücksichtigten Schlepper für die Kumulativbetrachtung**

	Kumulative Betrachtung Offshore-Windparkfläche Windbostel Ost
Ermittelte Schlepperwirksamkeit für manövrierunfähige Schiffe	2,5



## 6 KOLLISIONSRISIKO FÜR DIE OFFSHORE-WINDPARKFLÄCHE WINDBOSTEL OST

In diesem Abschnitt werden die im vorangegangenen Kapitel ermittelten Kollisionswiederholperioden mit den bei Kollisionen auftretenden Konsequenzen verknüpft. Als Konsequenzen werden die Folgen einer Kollision zwischen Schiffen und Windenergieanlagen bezeichnet. Diese werden in Form von Mengen an austretenden Schadstoffen ermittelt. Bei der Betrachtung der Konsequenzen wird wiederum zwischen verschiedenen Kollisionsszenarien unterschieden. Dies ist in der Tatsache begründet, dass Kollisionen zwischen manövrierfähigen Schiffen und Windenergieanlagen grundsätzlich von solchen zwischen manövrierunfähigen Schiffen und Windenergieanlagen zu unterscheiden sind.

Aufgrund der angenommenen kollisionsfreundlichen Konstruktion der Fundamente wird als kritische Driftgeschwindigkeit eine Geschwindigkeit von 2,0 m/s angesetzt, auch wenn diese für das jeweilige verwendete OWEA-Fundament noch im Detail nachgewiesen werden muss. Bei einem Überschreiten dieser Geschwindigkeit wird angenommen, dass die Schiffshülle beschädigt wird und es zu einem Schadstoffaustritt kommt. Eine Zerstörung der Windkraftanlage und ein Austritt der in der Anlage vorhandenen Schadstoffe wird bei jeder Kollision angenommen.

Bei einer kleineren Kollisionsgeschwindigkeit als 2,0 m/s wird angenommen, dass der Schiffskörper intakt bleibt und keine Schadstoffe aus dem Schiff austreten. Die kritische Geschwindigkeit von 2,0 m/s wird von driftenden Schiffen nur bei starken Winden und/oder Strömungen erreicht und ist außerdem vom Schiffstyp und Schiffgröße abhängig.

## 6.1 Risiko für die kumulative Betrachtung

In Tabelle 14 sind die mittleren freigesetzten Schadstoffmengen für unterschiedliche Schiffstypen aufgelistet

**Tabelle 14: Mittlere freigesetzte Treibstoff- und Ladeölmengen für manövrierfähige und manövrierunfähige Schiffe**

Konsequenzanalyse manövrierfähige und manövrierunfähige Schiffe		
Schiffstyp	Mittlere freigesetzte Treibstoffmenge [t/Kollision]	Mittlere freigesetzte Ladeölmenge [t/Kollision]
Tankschiffe	9.3	400.7
Cargoschiffe	2.4	0.0
Fähren & Passagierschiffe	0.5	0.0

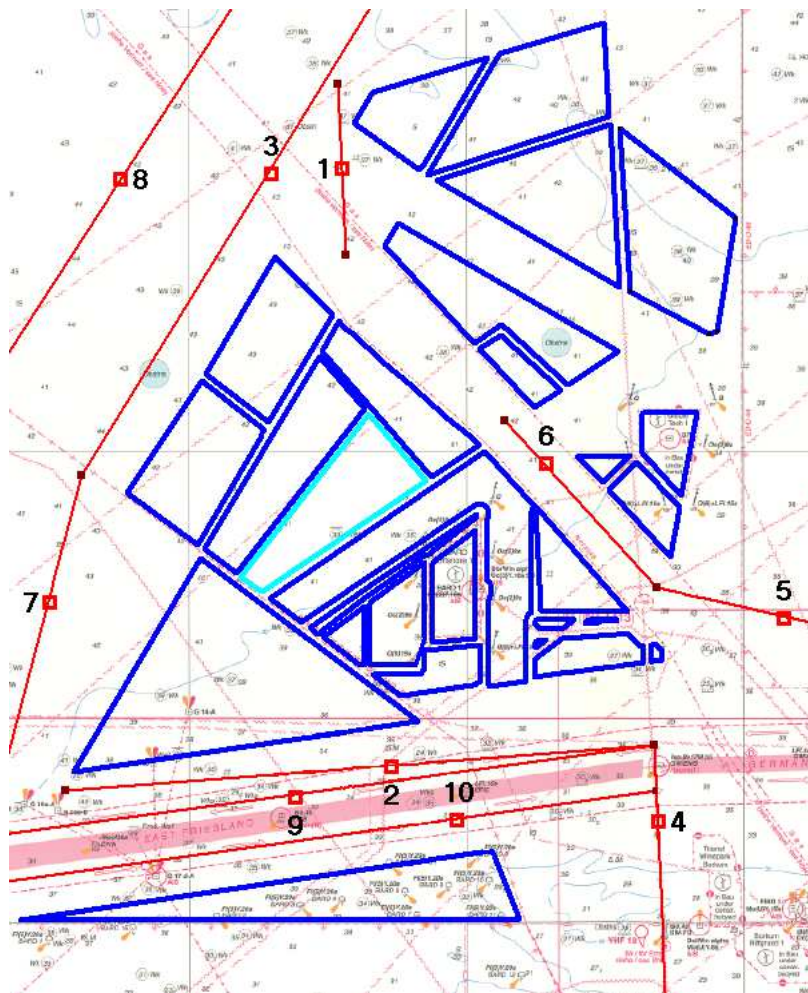
Das Gesamtrisiko an austretenden Schadstoffen für die kumulative Betrachtung beträgt 6.4 t/Jahr. Das schiffsspezifische Risiko für manövrierfähige und manövrierunfähige Schiffe ist in Tabelle 15 und das routenspezifische Risiko für die Routen mit den größten auf die Routenlänge normierten Risikoanteilen in Tabelle 16 dargestellt. Diese Routenabschnitte der Tabelle 16 sind in Abbildung 11 dargestellt und entsprechend nummeriert.

**Tabelle 15: Schiffsspezifisches Risiko**

Schiffstypspezifisches Risiko			
Schiffstyp	Risiko $R_{öl,k}$ [t/Jahr] für manövrierfähige Schiffe	Risiko $R_{öl,k}$ [t/Jahr] für manövrierunfähige Schiffe	Risiko $R_{öl,k}$ [t/Jahr] für manövrierfähige und manövrierunfähige Schiffe
Tankschiffe	4.29	0.50	4.79
Cargoschiffe	0.10	1.47	1.58
Fähren & Passagierschiffe	0.00	0.05	0.05
		Gesamtrisiko	6.42

**Tabelle 16: Routenspezifisches Risiko**

normiertes Routenabschnittsspezifisches Risiko									
Nr.	Koordinaten des Abschnittsbeginns		Koordinaten des Abschnittsendes		Routenabschnittslänge[sm]	normiertes Risiko $R_{0,k}$ [t/Jahr/sm] für manövrierfähige Schiffe	normiertes Risiko $R_{0,k}$ [t/Jahr/sm] für manövrierunfähige Schiffe	normiertes Risiko $R_{0,k}$ [t/Jahr/sm] für manövrierfähige und manövrierunfähige Schiffe	Risiko $R_{0,k}$ [t/Jahr] für manövrierfähige und manövrierunfähige Schiffe
	geografische Breite	geografische Länge	geografische Breite	geografische Länge					
1	54° 53.209' N	05° 46.144' O	54° 42.462' N	05° 47.127' O	11	0.063700	0.000794	0.064490	0.694000
2	54° 08.454' N	05° 16.782' O	54° 11.400' N	06° 20.483' O	37	0.023300	0.000822	0.024120	0.900000
3	54° 28.565' N	05° 18.500' O	55° 38.905' N	06° 33.566' O	83	0.016100	0.002110	0.018210	1.510000
4	53° 51.540' N	06° 21.831' O	54° 11.400' N	06° 20.484' O	20	0.011100	0.003270	0.014370	0.284900
5	54° 21.423' N	06° 20.650' O	54° 12.678' N	07° 26.518' O	39	0.007041	0.000259	0.007300	0.288000
6	54° 21.423' N	06° 20.650' O	54° 32.001' N	06° 04.193' O	14	0.001431	0.005040	0.006471	0.092500
7	54° 06.618' N	05° 08.649' O	54° 28.565' N	05° 18.500' O	23	0.002470	0.003520	0.005990	0.136000
8	53° 58.616' N	04° 29.117' O	55° 47.719' N	06° 30.882' O	130	0.004840	0.000337	0.005177	0.672000
9	54° 11.400' N	06° 20.483' O	54° 02.831' N	04° 35.004' O	62	0.000000	0.005150	0.005150	0.320000
10	53° 59.782' N	04° 35.294' O	54° 08.520' N	06° 20.678' O	62	0.000000	0.004780	0.004780	0.297000
Gesamtrisiko [t/Jahr] aller Routenabschnitte									6.41



**Abbildung 11: Darstellung der Routen mit dem größten normierten Risikoanteil für die kumulative Betrachtung**

In Tabelle 17 sind die austretenden Schadstoffmengen ohne und mit Berücksichtigung risikomindernder Maßnahmen für die kumulative Anordnung angegeben.

**Tabelle 17: Analyseergebnisse ohne und mit Berücksichtigung der risikomindernden Maßnahmen für die kumulative Betrachtung**

Szenario	Austretende Schadstoffmengen [t/Jahr]
ohne risikomindernde Maßnahmen	6.4
mit AIS, ohne Verkehrsüberwachung/ Seeraumbeobachtung und ohne Notfallschlepper	5.5
mit AIS, mit Verkehrsüberwachung/See- raumbeobachtung der Variante 3 und ohne Notfallschlepper	3.2
mit AIS, Verkehrsüberwachung/Seeraum- beobachtung der Variante 3 und Notschlepper Nordic, 70t Schlepper	2.2
mit AIS, Verkehrsüberwachung/Seeraum- beobachtung der Variante 3 und Notschlepper Nordic, 70t Schlepper und Guardian	2.1

Die Ergebnisse der Konsequenzbetrachtung für die kumulative Aufstellung sind als gering einzustufen. Aufgrund der kritischen Driftgeschwindigkeit von 2.0 m/s werden bei Kollisionen mit manövrierunfähigen Schiffen annähernd keine Schadstoffaustritte am Schiff ermittelt. Bei geringeren kritischen Driftgeschwindigkeiten würde dieser Anteil der Schadstoffmengen einen größeren Beitrag zum Risiko liefern. Der Hauptanteil der ermittelten austretenden Schadstoffe resultiert aus den möglichen Kollisionen manövrierfähiger Schiffe mit Anlagen der Windparks.

## 7 RISIKOBEURTEILUNG

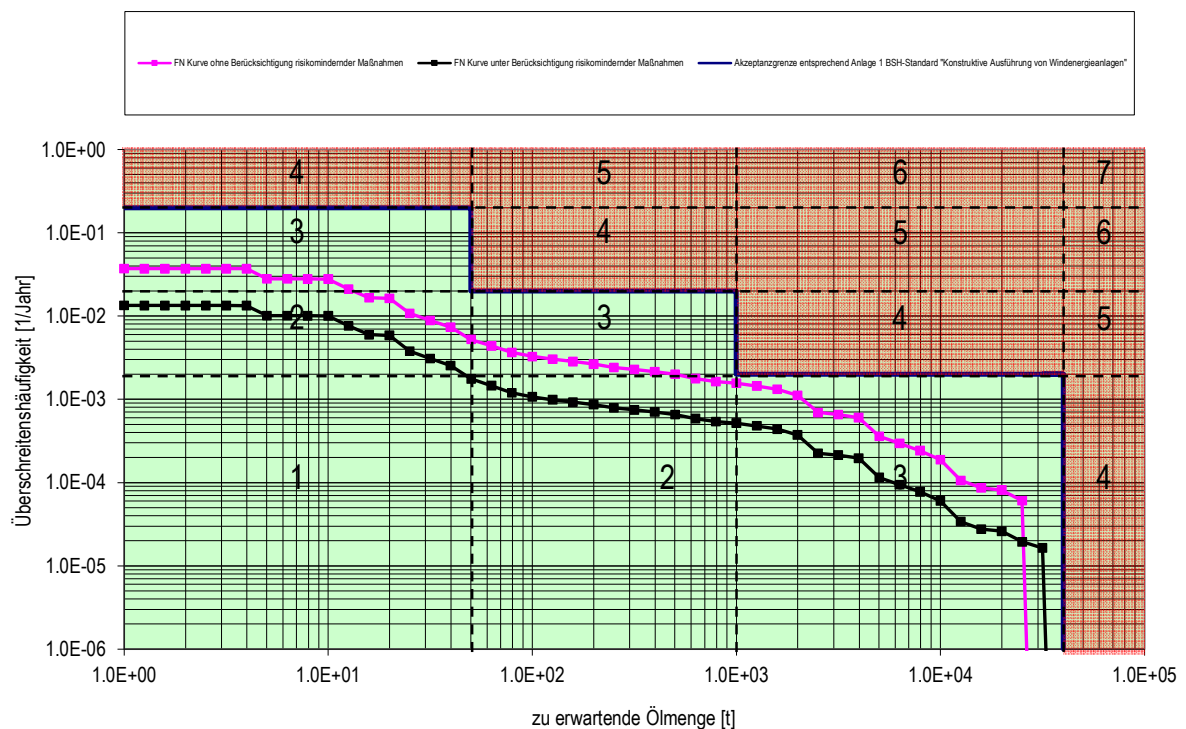
In diesem Abschnitt wird die Einstufung des berechneten Risikos in die Risikomatrix des Anhang 1 des BSH-Standards „Konstruktive Ausführung von Offshore-Windenergieanlagen“ /12/ vorgenommen. Neben der Einstufung des Umweltrisikos werden Einstufungen des Risikos in Bezug auf die Kollisionskonsequenzen Schiff-OWEA und Personensicherheit angegeben.

### 7.1 Umweltauswirkungen

Bei Kollisionen mit driftenden Schiffen ist entsprechend der Annahme eines kollisionsfreundlichen Fundamentes bei einer Driftgeschwindigkeit bis 2 m/s kein Aufreißen der Außenhaut des Schiffes zu erwarten /12/. Höhere Driftgeschwindigkeiten treten äußerst selten auf, da in der Regel Driftgeschwindigkeiten unter 2m/s (4 kn) festgestellt werden. Nur bei äußerst ungünstigen Verhältnissen muss eventuell mit leicht höheren Driftgeschwindigkeiten und somit mit der Möglichkeit des Aufreißens der Schiffshülle gerechnet werden. Hinzu kommen Kollisionen manövrierfähiger Schiffe, bei denen ebenfalls in ungünstigen Konstellationen mit einem Aufreißen der Schiffshülle im Tankbereich gerechnet werden muss. Insgesamt kann die Einstufung der Häufigkeit eines Ölaustritts aus einem Schiff bei Berücksichtigung der in der Risikoanalyse angegebenen risikomindernden Maßnahmen in die Häufigkeitsklasse „äußerst selten“ vorgenommen werden. Die beschriebenen Szenarien mit einem Ölaustritt aus dem Schiff können in die Konsequenzklassen „beträchtlich“ bis „schwerwiegend“ und somit in der Risikomatrix mit einer Risikoprioritätszahl (RPZ) von 2 bis 3 eingestuft werden.

Ein ähnliches Bild (RPZ = 2 bis 3) liefert die Auswertung der FN-Diagramme. Die FN-Diagramme stellen den Zusammenhang zwischen Schadstoffaustrittsmengen und Häufigkeiten her und liefern somit die notwendigen Informationen für eine Einstufung des Risikos in die Risikoprioritätszahlen (RPZ). In Abbildung 12 ist das FN-Diagramm mit der zugehörigen RPZ dargestellt. Als risikomindernde Maßnahmen sind in dem Diagramm die Installation von AIS-Geräten an den Windparkinstallationen, eine Verkehrsüberwachung/Seeraumbeobachtung der Variante 3 sowie Notschlepper Nordic berücksichtigt. Für die Abgrenzung der einzelnen Konsequenzklassen der Anlage 1 des BSH-Standards wurden folgende Einstufungen anhand der austretenden Schadstoffe vorgenommen.

Konsequenzklasse	Freigesetzte Schadstoffmenge in t <sub>Öl</sub>
Unbedeutend	1 bis 50 t <sub>Öl</sub>
Beträchtlich	50 bis 1.000 t <sub>Öl</sub>
Schwerwiegend	1.000 bis 40.000 t <sub>Öl</sub>
Katastrophal	Mehr als 40.000 t <sub>Öl</sub>



**Abbildung 12: Einstufung des Risikos anhand des FN-Diagramms für die kumulative Betrachtung**

Eine Auswertung der im FN-Diagramm dargestellten Kurven liefert für die kumulative Betrachtung folgende Kollisionshäufigkeitswerte, bei denen gewisse Ölmengen überschritten werden (Tabelle 18).

**Tabelle 18: Einstufungen der Konsequenzen anhand der austretenden Schadstoffe für die kumulative Betrachtung**

Konsequenz- klasse Umwelt	Ölmenge [t]	Überschreitenshäufigkeit [1/Jahr] (Wiederholperiode in Jahren)	
		ohne Berücksichtigung risikomindernde Maßnahmen	mit Berücksichtigung risikomindernder Maßnahmen
<b>unbedeutend</b>	≥ 1 t	0.037 (27 Jahre)	0.013 (75 Jahre)
<b>beträchtlich</b>	≥ 50 t	0.0052 (191 Jahre)	0.0018 (567 Jahre)
<b>schwerwiegend</b>	≥ 1000 t	0.0016 (638 Jahre)	0.00051 (1931 Jahre)

## 7.2 Kollisionskonsequenzen Schiff-OWEA

Die berechneten Kollisionshäufigkeiten von Schiffen mit Installationen der betrachteten Offshore-Windparks in der Nähe der Offshore-Windparkfläche Windbostel Ost beziehen sich auf alle möglichen Kollisionsfälle. Die Ergebnisse unter Berücksichtigung der risikomindernden Maßnahmen sind in die Kategorie „äußerst selten“ (10<sup>-3</sup>≥H) einzustufen. Bei einer Kollision eines Seeschiffes mit einer OWEA wird diese in der Regel beschädigt oder zerstört, so dass diese nicht weiter betrieben werden kann. Eine derartige Beschädigung kann bereits bei Kollisionen mit Driftgeschwindigkeiten unter 2,0 m/s auftreten. Es kann davon ausgegangen werden, dass eine Zerstörung der OWEA nicht in allen berechneten Kollisionsfällen eintritt. Die zu erwartenden Konsequenzen sind in die Konsequenzklassen „beträchtlich“ bis „schwerwiegend“ einzustufen. Somit kann eine RPZ für die Risiken im Bereich der OWEA mit 2 bis 3 berechnet werden.

Eine Einstufung der Risiken in Bezug auf Kollisionskonsequenzen im Bereich der Anlagen der kumulativ betrachteten Windparks wurde an dieser Stelle nicht vorgenommen, da diese nach Auffassung des DNV einzeln für jeden Windpark vorgenommen werden sollten.

## 7.3 Personensicherheit

Die Sicherheit von beteiligten Personen wurde in dieser Risikoanalyse nicht explizit betrachtet. Jedoch können die Gefährdungen aus früheren Arbeiten des DNV abgeleitet werden, in denen eine Gefahrenanalyse für Offshore-Windparks vorgenommen wurde. In dieser Gefahrenanalyse wurden mögliche Personenschäden der Kategorie „schwerwiegend“ in die Kategorien „äußerst selten“ und somit in die RPZ 3 eingestuft.

## 8 LITERATUR

- /1/ MARIN, DNV und Germanischer Lloyd: Harmonisierung der Grundannahmen für Kollisionsrisikoanalysen zwischen MARIN, DNV und GL; Hamburg, Dezember 2004.
- /2/ BMVBW: Genehmigungrelevante Richtwerte für Offshore-Windparks - Bericht einer Arbeitsgruppe; Referat LS 23, Bonn, März 2005.
- /3/ Germanischer Lloyd: Offshore Windparks – Wirksamkeit kollisionsverhindernder Maßnahmen – Abschlußbericht, Bericht Nr. NB-ER 2008.178, Version 1.8, Risk Assessment and Mechanical Engineering/NB-ER, 2008-11-24
- /4/ Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie: Häufigkeitsverteilungen der signifikanten Wellenhöhe gegen die Windgeschwindigkeit, Hamburg, 2000.
- /5/ <http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Vorhersagen/Gezeiten/810.jsp>
- /6/ Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie. Nr. 20062 "Naturverhältnisse - Nordsee und Englischer Kanal" Hamburg und Rostock; 2009.
- /7/ Olsen, D., H.-H. Gotfredsen, Y. Fujii: Risk Reducing Effect of the Great Belt VTS System; Publ. no. 810, VTS 92 – 7th International VTS Symposium, Vancouver, Canada, 1992.
- /8/ Fujii, Y., N. Mizuki: Design of VTS systems for water with bridges; Proc. of the International Symposium on Advances in Ship Collision Analysis. Gluver & Olsen eds.; Copenhagen, Denmark; 1998.
- /9/ Foxwell, D.: AIS: The next big thing in navigation; Fairplay, Nov. 2003.
- /10/ SAFESHIP – Reduction of Ship Collision Risks for Offshore Wind Farms, Report, Germanischer Lloyd AG, MARIN, Technical University of Denmark, January 2005.
- /11/ Hydrographic Office; „Admiralty Tidal Stream Atlas – north sea eastern part“; Taunton; Edition 2 2004
- /12/ Standard „Standard Konstruktion“, BSH- Nr: 7005, BSH 2015
- /13/ „Voruntersuchung zur verkehrlich-schifffahrtspolizeilichen Eignung von Flächen in der AWZ der Nord- und Ostsee“, DNV GL SE Maritime Advisory, M-W-ADER 2019.137, Rev. 1.00, 2019-12-06
- /14/ „Verkehrlich- schifffahrtspolizeiliche Risikoanalyse der im Rahmen der Fortschreibung des FEP der deutschen AWZ der Nordsee festzulegenden Gebiete“, DNV GL SE Maritime Advisory, M-W-ADE 2020.170.B, Rev. 1.10, 2021-04-24
- /15/ Flächenentwicklungsplan 2025 für die deutsche Nordsee und Ostsee“, BSH, Hamburg, 30. Januar 2025
- /16/ Development Framework for Offshore Wind Energy“, Adopted by the Council of Ministers on 20 December 2024, VERSION 4 February 2025





# ANHANG A

## METHODEN DER RISIKOBERECHNUNG

- A.1 Risikoberechnungen für den Windpark
- A.2 Verfahren zur Berechnung des Risikos für Kollisionen **manövrierfähiger Schiffe** mit Installationen des Windparks
  - A.2.1 Berechnung der Kollisionshäufigkeiten
  - A.2.2 Berechnung der Kollisionskonsequenzen
  - A.2.3 Berechnung des Kollisionsrisikos
- A.3 Verfahren zur Berechnung von Risiken für die Kollisionen **manövrierunfähiger Schiffe** mit Installationen des Windparks
  - A.3.1 Berechnung der Kollisionshäufigkeit
  - A.3.2 Berechnung der Kollisionskonsequenzen
  - A.3.3 Berechnung des Kollisionsrisikos
- A.4 Literatur zum Anhang A

## A.1 Risikoberechnungen für den Windpark

Verfahren zur Berechnung von Risiken können in statistische<sup>1</sup> und analytische<sup>2</sup> Verfahren eingeteilt werden.

Statistischen Verfahren basieren auf der Erfassung ("Zählung") von Sachverhalten. Bezogen auf Kollisionsereignisse sind das z.B. die Zahl von Schiff-Schiff Kollisionen in einem bestimmten Seegebiet. Sofern sich die Randbedingungen der Statistik nicht ändern, können aus den statistisch ermittelten Werten Prognosen abgeleitet werden. Bei analytischen Verfahren wird versucht, die Einflussgrößen des Sachverhaltes (z.B. Windeinfluss, Zusammensetzung des Schiffsverkehrs) und das Zusammenspiel der Einflussfaktoren zu ermitteln. Bei der Beschreibung der Einflussgrößen werden dann wiederum statistische Methoden verwendet.

Sowohl statistische als auch analytische Verfahren zur Risikoberechnung werden in der Technik angewendet. Welche Vorgehensweise besser geeignet ist, um bestimmte Sachverhalte zu klären, ergibt sich aus einer Abwägung der Vor- und Nachteile der jeweiligen Verfahren.

### Vorteile statistischer Verfahren

- Statistische Verfahren beinhalten alle Einflussgrößen  
Da statistische Verfahren auf Messungen und Zählungen basieren, erfassen sie naturgemäß alle wirkenden Einflussfaktoren und deren Zusammenwirken.
- Grundlage sind historische Daten  
Da Statistiken auf tatsächlich geschehenen Ereignissen basieren, liefern sie ein exaktes Abbild des Sachverhaltes.
- Einfache Ermittlung von Statistiken  
Sofern der Sachverhalt direkt messbar ist, können statistische Werte sehr schnell und einfach ermittelt werden.

### Nachteile statistischer Verfahren

- Vertrauen statistischer Ergebnisse  
Das Gesetz der großen Zahlen besagt, dass sich die relative Häufigkeit (Wahrscheinlichkeit) eines Zufallsergebnisses immer weiter an die theoretische Wahrscheinlichkeit für dieses Ergebnis (Erwartungswert) annähert, je häufiger das Zufallsexperiment durchgeführt wird. Das bedeutet, um eine "sichere" statistische Aussage über zufällige Ereignisse zu machen, müssen diese in ausreichender Menge vorhanden sein bzw. gemessen werden. Bei sehr selten auftretenden Ereignissen ist dies häufig nicht gegeben. Kollisionsereignisse von Schiffen mit Installationen von Windparks sind bisher nicht bekannt geworden. Eine Auswertung von Kollisionsereignissen aus statistischen Unfallzahlen für genau dieses Szenario ist daher nicht möglich.
- Übertragung statistischer Ergebnisse  
Die Übertragung statistischer Werte von einem System auf ein anderes System ist nur begrenzt möglich. Mit Bezug auf Kollisionen von Schiffen mit Installationen eines Windparks bedeutet das, dass bei statistisch ermittelten Kollisionshäufigkeiten eine Übertragung von einem Windpark zu einem anderen Windpark nur zulässig ist, sofern die Randbedingungen (nautische Gegebenheiten, Umwelteinflüsse, etc.) bei beiden Windparks die gleichen sind. In der Regel unterscheiden sich diese.
- Entwicklung des Systems  
Aus den ersten beiden Nachteilen ergibt sich ein dritter Nachteil. Sind die zu beobachtenden Ereignisse sehr selten, so vergeht ein großer Zeitraum bevor statistisch sichere Aussagen formuliert werden können. Innerhalb dieses Zeitraums verändert sich das System jedoch selbst. Beispiele hierfür sind die Veränderungen der Schiffsbewegungen auf Grund wirtschaftlicher Veränderungen oder die Entwicklung neuer Hilfsmittel für die Navigation bzw. neuer Schiffsmaschinenanlagen. Das bedeutet, dass sich das System an sich geändert hat und statistische Aussagen auf der Basis früherer Ereignisse nicht mehr dem aktuellen Systemzustand entsprechen.

<sup>1</sup> Statistik, allg.: (meist in Tabellenform zusammengestellte) Ergebnisse von zahlenmäßigen Erfassungen bestimmter Sachverhalte (z.B. Bevölkerungs-, Ind., Landwirtschafts-, Verkehrs- und Preisstatistik).

<sup>2</sup> Analyse allg.: Verfahren, bei dem Erkenntnisse durch die Untersuchung der einzelnen, elementaren Bestandteile eines Ganzen gewonnen werden (Ggs.: Synthese).

### Vorteile analytischer Verfahren

- Unabhängigkeit von historischen Kollisionsereignissen  
Ein Vorteil analytischer Verfahren ist, dass sie auch zur Prognose seltener Ereignisse geeignet sind, weil für sie keine historischen Daten des Ereignisses selbst notwendig sind. Bei analytischen Verfahren werden die elementaren Bestandteile und deren Zusammenspiel betrachtet. Mit Bezug auf Kollisionsszenarien bedeutet das, dass einzelne Einflussgrößen (z.B. auftretende Windrichtungen) separat untersucht werden können und nicht nur im Zusammenhang mit Kollisionen von Schiffen zu betrachten sind. Das Erfassen der elementaren Bestandteile wiederum kann auf statistischem Wege erfolgen.
- Berücksichtigung der Entwicklung des Systems  
Durch die Kenntnis des Zusammenwirkens der einzelnen Einflussfaktoren können auch neue Einflussgrößen in das System eingearbeitet werden. Das bedeutet, dass neue Entwicklungen (z.B. die Wirkung von AIS) in der Schiffstechnik bei der Prognose von Kollisionsereignissen berücksichtigt werden können.

### Nachteile analytischer Verfahren

- Komplexes mathematisches Modell  
Je mehr Einflussfaktoren vorhanden sind und je komplexer deren Zusammenspiel ist, umso schwieriger ist es, ein mathematisches Modell für deren Beschreibung zu finden. Um die Komplexität des mathematischen Modells in Grenzen zu halten, werden wesentliche und unwesentliche Einflüsse voneinander getrennt. Die Vernachlässigung von unbedeutenden Einflüssen führt zu Ungenauigkeiten in den Ergebnissen.
- Prüfung des analytischen Verfahrens  
Um die Qualität des analytischen Verfahrens zu überprüfen, ist eine Überprüfung des Verfahrens notwendig. Sofern vorhanden, werden dafür statistische Daten historischer Ereignisse herangezogen. Exemplarisch wird dann ein Vergleich der Ergebnisse des analytischen Verfahrens mit den statistisch ermittelten Werten vorgenommen.

## A.2 Verfahren zur Berechnung des Risikos für Kollisionen manövrierfähiger Schiffe mit Installationen des Windparks

### A.2.1 Berechnung der Kollisionshäufigkeiten

Basierend auf Arbeiten von Fujii /A-1/ und MacDuff /A-2/ wurde von Pedersen /A-3/ ein Verfahren präsentiert, dass die Berechnung der Häufigkeit von Kollisionen von Schiffen mit im Wasser befindlichen Objekten ermöglicht.

Das Verfahren basiert auf zwei Bedingungen, die gleichzeitig erfüllt sein müssen, damit es zur Kollision eines Schiffes mit einem Objekt kommt.

1. Das Schiff muss sich auf Kollisionskurs mit einer Windenergieanlage oder Umspannstation des Windparks befinden (die Wahrscheinlichkeit dafür wird mit  $P_{fK,k}$  bezeichnet).
2. Die Schiffsführung unternimmt keine Kurskorrektur, um die drohende Kollision zu vermeiden oder die Kurskorrektur erfolgt zu spät, um die Kollision zu vermeiden (die Wahrscheinlichkeit dafür wird mit  $P_{fM,k}$  bezeichnet).

Für beide Bedingungen muss die Eintrittswahrscheinlichkeit bestimmt werden.

Für die Berechnung der Kollisionshäufigkeit werden diese Wahrscheinlichkeiten ( $P_{fM,k}$ ,  $P_{fK,k}$ ) mit der Zahl der Schiffsbewegungen  $n_{S,k}$  (Zahl der Schiffspassagen einer Routenabschnitts) multipliziert, siehe Gleichung (A-1).

Die Berechnung der Wahrscheinlichkeiten  $P_{fM,k}$  und  $P_{fK,k}$  wird im Folgenden erläutert.

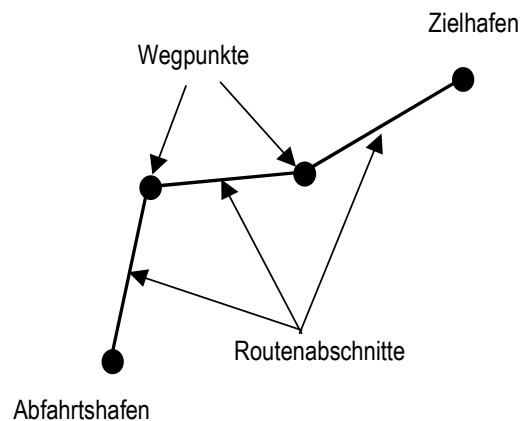
$$n_{\text{coll,pow}} = \sum_K n_{\text{coll,pow},k} = \sum_K P_{fM,k} \cdot P_{fK,k} \cdot n_{S,k} \quad (\text{A-1})$$

Befinden sich in einem Seegebiet mehrere Schifffahrtsrouten, so kann die Gesamtkollisionshäufigkeit  $n_{\text{coll,pow}}$  aller Routen durch Addition der Kollisionshäufigkeiten  $n_{\text{coll,pow},k}$  der einzelnen Routenabschnitte der Schifffahrtsrouten bestimmt werden.

#### - Wahrscheinlichkeit $P_{fK,k}$ von Schiffen auf Kollisionskurs

Für die Berechnung der Kollisionshäufigkeit muss die Wahrscheinlichkeit  $P_{fK,k}$  bestimmt werden. Diese Wahrscheinlichkeit beschreibt den Anteil von Schiffen des Seegebietes, der sich auf Kollisionskurs mit dem Windpark befinden.

Für die Berechnung dieser Wahrscheinlichkeit wird modellhaft davon ausgegangen, dass Schiffe auf idealisierten Routen fahren, die typischerweise aus dem kürzesten Weg zwischen Abfahrts- und Zielhafen bestehen. Aufgrund nautischer Restriktionen wie Tiefgang, markierten Wasserwegen, Zwangswegen etc. muss der Kurs im Allgemeinen an so genannten Wegpunkten geändert werden. Eine Route besteht somit aus mindestens einem Routenabschnitt. Ein Routenabschnitt wird durch Abfahrts-, Zielhafen oder durch Wegpunkte begrenzt (siehe Abbildung A-1).



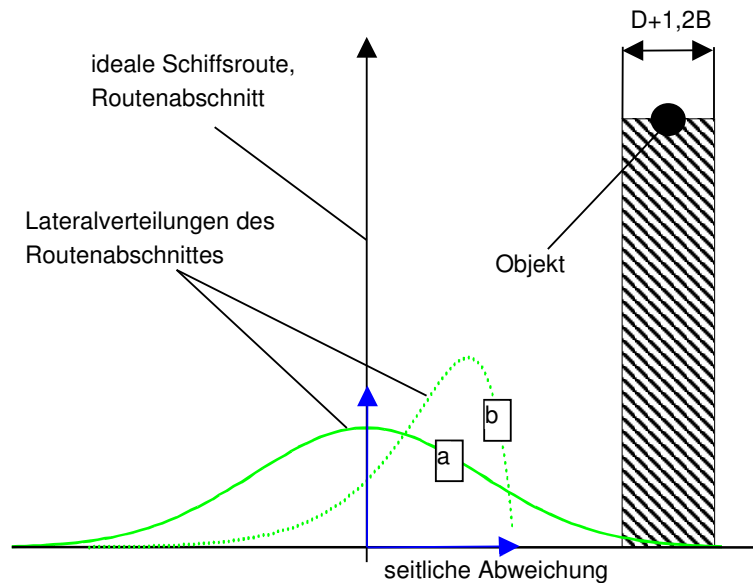
#### Abbildung A-1: Zusammenhang von Schiffsroute, Routenabschnitt und Wegpunkten

Aufgrund von Ungenauigkeiten beim Abstecken des Kurses beziehungsweise Versatz durch Wind, Strömung und Wellen weichen die tatsächlich gefahrenen Routen der Schiffe jedoch mehr oder weniger stark von der im Programm verwendeten, idealisierten Route ab.

Es wird davon ausgegangen, dass die Schiffsführung bestrebt ist, die ideale, kürzeste Route aus Zeit- und Kostengründen zu fahren. Folglich kann man auch davon ausgehen, dass die Wahrscheinlichkeit von kleinen Abweichungen größer ist, als die Wahrscheinlichkeit von großen Abweichungen.

Die Abweichung der Schiffe orthogonal zur idealen Route wird über sog. Lateralverteilungen (statistischen Verteilungsfunktionen) in die Berechnung einbezogen.

Bei Schifffahrtsrouten, die keinen nautischen Restriktionen unterliegen, geht man von Gauß'schen Normalverteilungen aus. Eine typische Lateralverteilung dieses Typs ist in Abbildung A-2 als "a" dargestellt. Bei dieser Verteilung geht man davon aus, dass die Abweichungen der Schifffahrtsrouten von der idealen Route nach beiden Seiten in gleichem Maße auftreten, also symmetrische Verteilungen vorhanden sind. Auf Zwangswegen wie Verkehrstrennungsgebieten oder betonnten Fahrwassern (Verteilungsfunktion "b" in Abbildung A-2) verschiebt sich das Maximum der Verteilungsfunktion (Modalwert) zum Rand des Fahrwassers, weil die Betonnung häufig als Orientierungspunkt genutzt wird und nach den Kollisionsverhütungsregeln ein Rechtsfahrgebot vorliegt.



**Abbildung A-2: Lateralverteilungen für den Schiffsverkehr**

Die Wahrscheinlichkeit  $P_{fk,k}$ , dass sich ein Schiff auf Kollisionskurs mit einer Windenergieanlage oder der Umspannstation befindet, ergibt sich aus der Fläche unter der jeweiligen Lateralverteilung  $h_i = f(x)$  des Routenabschnittes  $k$ , die von der Schattenfläche der OWEA/Umspannwerk (UW) plus 1.2 mal der Schiffsbreite  $B$  überdeckt wird. Für die  $i$ -te Installation mit dem Durchmesser  $D_i$  wird diese Wahrscheinlichkeit mit Gleichung (A-2) berechnet.

$$P_{fk,k} = \sum_i P_{fk,k,i} = \sum_i \int_{D_i+1,2B} f_k(x) dx \quad (A-2)$$

Durch Annahme der 1.2-fachen Schiffsbreite wird die Möglichkeit einer seitlichen Kollision berücksichtigt. Dies kann auftreten, wenn ein Schiff sich mit einem kleinen Schiebewinkel relativ zur Kurslinie fortbewegt (z. B. durch Windeinfluss).

Neben den Kollisionen der Kategorie I durch eine laterale Verteilung der Schiffe werden auch Kollisionen der Kategorie II durch einen Verpassen des Wegpunkt entsprechend den Angaben in /A-4/ berücksichtigt.

- *Wahrscheinlichkeit  $P_{fm,k}$  von Maßnahmen zur Kursänderung*

Die Wahrscheinlichkeit  $P_{fm,k}$ , dass ein Kollisionskurs auf einem Routenabschnitt nicht geändert wird, kann aus statistischen Daten oder mit Hilfe analytischer Methoden (Fehlerbaummethode, Bayes'sche Netzwerke) ermittelt werden.

Statistische Daten von Schiffsunfällen mit Offshore-Windparks liegen z. Z. nicht vor. Somit kann derzeit die Wahrscheinlichkeit  $P_{fm,k}$  nicht aus statistischen Daten abgeleitet werden. Eine Orientierung der Größenordnung dieser

Wahrscheinlichkeit liefern jedoch Unfallszenarien mit Brücken, Schiffsstrandungen oder Schiff-Schiff-Kollisionen aus unterschiedlichen Seegebieten. In Tabelle A-1 sind Minimal- und Maximalwerte für die Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{IM},k}$  aus unterschiedlichen Unfallszenarien der Schifffahrt gemäß /A-4/ dargestellt.

**Tabelle A-1: Bereiche der Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{IM},k}$  aus anderen Unfallszenarien der Schifffahrt /A-4/**

Szenario	Minimaler Wert	Maximaler Wert
Schiff - Schiff Kollisionen (frontale Kollisionen)	4.9E-05	5.18E-04
Schiff - Schiff Kollisionen (seitliche Kollision)	9.5E-05	1.11E-04
Schiffsstrandungen	8.0E-05	6.3E-04
Schiff - Brücke Kollisionen	4.0E-05	5.4E-04

Fujii und Mizuki geben in /A-5/ wird für die Kollision von Schiffen mit fixen Objekten ein Bereich für die Wahrscheinlichkeit von  $8.12\text{E-}05 < P_{\text{IM},k} < 5.26\text{E-}04$  an. Das angegebene Intervall für die Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{IM},k}$  wurde auf der Grundlage von Radarbeobachtungen erhoben und enthält alle möglichen Ursachen für Kollisionsunfälle einschließlich aller Aspekte menschlichen Versagens. Der entsprechend der Harmonisierung /A-6/ in den vorliegenden Berechnungen verwendete Wert für die Wahrscheinlichkeit  $P_{\text{IM},k} = 3.0\text{E-}04$  entspricht dem Mittelwert des angegebenen Wahrscheinlichkeitsintervalls.

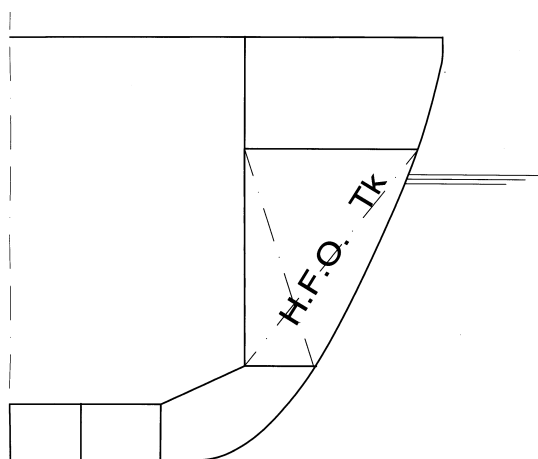
## A.2.2 Berechnung der Kollisionskonsequenzen

Je nach Ablauf einer Kollision eines Schiffes mit einer Installation eines Windparks sind unterschiedliche Konsequenzen zu erwarten.

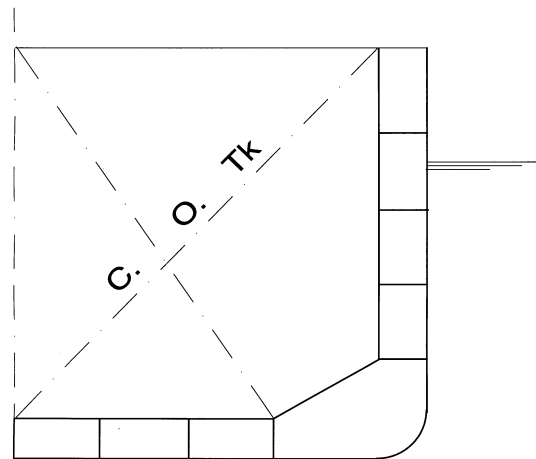
Ein mögliches Szenario des Auftreffens von Schiffen bei Kollisionen ist die frontale Kollision, bei der der Bug des Schiffes den Turm der OWEA zentral trifft. Bei einer derartigen Kollision ist damit zu rechnen, dass es zum Versagen des Turmes kommt. Dabei kann der Turm am Fundament oder in der Nähe des Kollisionspunktes abknicken. Bei einem zentralen Stoß ist mit einem Aufreißen der Außenhaut im Bereich von Tanks nicht zu rechnen.

Trifft das Schiff nicht zentrisch, sondern streift seitlich am Bug des Schiffes entlang, so ist ebenfalls mit dem Versagen des Turmes zu rechnen. Das relative steife konische Vorschiff kann einen großen Teil der Kollisionsenergie umwandeln, in dem das Schiff beim seitlichen Entlangschleifen vom Turm weggedrückt wird. Schäden am Vorschiff sind zu erwarten. Inwieweit ein seitliches Streifen des Schiffes am Turm zu einem Aufreißen der Schiffsaußenhaut im Bereich möglicher Ladetanks oder Brennstofftanks führen kann, ist derzeit nicht abschließend geklärt. Bei Einhüllenschiffen ist ein lokal begrenztes Aufreißen der Außenhaut denkbar. Bei Doppelhüllenschiffen ist ein Aufreißen der inneren Wand nur schwer vorstellbar, kann jedoch bisher nicht vollständig ausgeschlossen werden. Eine detaillierte Quantifizierung dieser Szenarien für manövrierfähige Schiffe erfolgte bisher nicht in einem vergleichbaren Rahmen wie die Quantifizierung der möglichen Szenarien für manövrierunfähige driftende Schiffe. Die Kollisionskonsequenzen durch Kollisionen manövrierunfähiger Schiffe mit Windenergieanlagen wurden intensiv in Forschungsvorhaben der TU Harburg (F. Biehl) und im europäischen SAFESHIP-Vorhaben /A-7/ betrachtet.

Zur Veranschaulichung der Lage von Brennstofftanks und Ladeölkzellen sind in Abbildung A-3 typische Schiffsquerschnitte dargestellt.



Typischer Achterschiffsquerschnitt eines Trockenfrachters/Containerschiffs mit einem Brennstoffseitentank (H.F.O. Tk)



Typischer Mittschiffsquerschnitt eines Doppelhüllentankers mit Ladeölzelle (C.O.Tk)

### Abbildung A-3: Typische Schiffsquerschnitte

Die Frage, ob die Gondel auf das kollidierende Schiff fällt und dadurch weitere Schäden bewirkt oder nicht auf das Schiff fällt, ist ebenfalls nicht abschließend wissenschaftlich untersucht.

Die Berechnung der Kollisionskonsequenzen konzentrieren sich auf die Freisetzung von Öl und Brennstoff sowie in den Installationen des Windparks enthaltene wassergefährdende Schadstoffe. Bei der Berechnung der Konsequenzen werden sowohl die Treibstofftanks als auch die Ladetanks von Schiffen betrachtet. Es werden zusätzlich Ölmengen berechnet, die im Falle einer Kollision durch umstürzende Windenergieanlagen freigesetzt werden. Bei Passagierschiffen wird angenommen, dass Brennstoff nur im Doppelboden und in Zwischentanks im Mitschiffsbereich gelagert wird. An diesen Positionen sind Schäden durch Kollisionen mit einer Windenergieanlage nicht zu erwarten und werden daher ausgeschlossen.

Grundlage der Berechnungen zur Konsequenzanalyse (austretende Schadstoffmengen) ist ein Kollisionsgutachten, dass eine Aussage über die kritische Schiffsgeschwindigkeit gibt, ab der mit einem Versagen der Schiffsstruktur und der Windkraftanlage zu rechnen ist.

Die bei einer Kollision freigesetzte mittlere Ölmenge  $\bar{M}_{\text{Öl}}$  wird für manövrierfähige Schiffe mit Gleichung (A-3) berechnet. Vereinfachend wird auf die Darstellung des Zählers k für jeden betrachteten Routenabschnitt an dieser Stelle verzichtet.

$$\bar{M}_{\text{Öl,pow}} = \sum_s \sum_t (P_{\text{SE,Br}} \cdot M_{\text{Br,s,t}} + P_{\text{SE,La}} \cdot M_{\text{La,pow,s,Tanker}}) \cdot P_s \cdot P_t + \sum_I P_{\text{WEA,Typ,I}} \cdot M_{\text{Öl,I}} \quad (\text{A-3})$$

In Gleichung (A-3) ist  $P_{\text{SE,Br}}$  - die Wahrscheinlichkeit, dass bei der Kollision ein Brennstofftank getroffen wird,  $M_{\text{Br,s,t}}$  - die freigesetzte Brennstoffmenge für ein Schiff der Größenklasse s und des Typs t,  $P_{\text{SE,La}}$  - die Wahrscheinlichkeit, dass bei einer Kollision ein Ladetank getroffen wird,  $M_{\text{La,s,Tanker}}$  - die freigesetzte Ladeölmenge für einen Tanker der Größenklasse s,  $P_s$  - die Auftretenswahrscheinlichkeit der Schiffsgrößenklasse s und  $P_t$  die Auftretenswahrscheinlichkeit des Schiffstyps t,  $P_{\text{WEA,Typ,I}}$  die Wahrscheinlichkeit des Typs I (OWEA oder Umspannwerk (UW)) und  $M_{\text{Öl,I}}$  die freiwerdende Ölmenge Typs I (OWEA oder UW). Die betrachteten Schiffsgrößenklasse s und die unterschiedlichen



Schiffstypen  $t$  werden der Schiffsverkehrsdatenbank entnommen und sind aus den Schiffsverkehrsdaten abgeleitet. Die unterschiedlichen Anlagentypen  $l$  des Windparks definieren sich durch die Angaben der Planer. Es wird zwischen unterschiedlichen Anlagen der Windenergieanlagen (OWEA) und der Umspannwerke (UW) unterschieden.

Eine Bedingung, dass bei der Kollision ein Brennstofftank getroffen wird, ist dass die Kollisionsstelle im Bereich eines an der Außenhaut des Schiffes liegenden Brennstofftanks liegt. Die Wahrscheinlichkeit dafür ist 0.15, da die Länge der Tanks im Verhältnis zur Schiffslänge nur 15 % ausmacht.

Die zweite Bedingung, dass ein Brennstofftank geschädigt wird ist, dass das Schiff überhaupt einen an der Außenhaut liegenden Brennstofftank besitzt. Dies ist bei etwa 25 % der Schiffe der Fall.

Berücksichtigt man beide Bedingungen so ergibt sich ein Faktor  $P_{SE,Br} = 0.0375$ .

$$P_{SE,Br} = P_{tt} \cdot P_{ta} = 0.25 \cdot 0.15 = 0.0375 \quad (A-4)$$

Die freigesetzte Brennstoffmenge für ein Schiff der Größenklasse  $s$  und des Schiffstyps  $t$  ergibt sich aus Gleichung (A-5).

$$M_{Br,s,t} = \frac{(a_k + b_k \cdot T + c_k \cdot T^2)}{6} \quad (A-5)$$

In Gleichung (A-5) sind  $a_k$ ,  $b_k$ ,  $c_k$  - die angewendeten schiffstypspezifischen Koeffizienten aus Tabelle A-2 und  $T$  die Tonnage des betrachteten Schiffes. Die Koeffizienten der Tabelle A-2 wurden statistisch ermittelt, in dem stichprobenartig beim Germanischen Lloyd klassifizierte Schiffe ausgewählt wurden. Aus den Klasseunterlagen konnte deren Brennstoffmenge ermittelt werden und durch eine Regressionsfunktion approximiert werden.

**Tabelle A-2: Schiffstypspezifische Koeffizienten für Gleichung A-5, Brennstoff**

Schiffstyp $k$	Obere Tonnagebegrenzungen [tdw]	Koeffizienten		
		$a_k$	$b_k$	$c_k$
Stückgut & Containerschiffe	100 000	1.886E+01	8.560E-02	4.000E-07
Massengut	300 000	5.480E+01	4.940E-02	0.000E+00
RoRo-Schiffe	50 000	1.89E+01	8.560E-02	4.000E-07
Gastanker	70 000	1.750E+02	7.09E-02	-1.69E-07
Chemikalentanker	200 000	4.761E+01	2.760E-02	0.000E+00
Öltanker	200 000	7.12E+02	2.98E-02	0.000E+00
Fähren- und Passagierschiffe	50 000	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00

Für Öltanker wird ebenfalls der Austritt von Ladeöl im Berechnungsverfahren berücksichtigt. Bedingung für den Austritt von Ladeöl ist, dass die Kollision im Bereich eines Ladeöltanks erfolgt. Dieser Faktor wird  $P_{SE,La} = 0.75$  angenommen, was dem Verhältnis der Länge der Ladöltanks zur Schiffslänge 75 % entspricht.

Bei der Berechnung der Menge austretenden Ladeöls wird konservativ davon ausgegangen, dass der komplette Inhalt zweier Ladetanks freigesetzt wird und dass 50% der Tanker voll beladen sind.

Die freigesetzte Ladeölmenge  $M_{La,k}$  für einen Tanker der Größenklasse  $k$  wird mit Gleichung (A-6) berechnet.

$$M_{La,pow,s,Tanker} = 2 \cdot (a_k + b_k \cdot T + c_k \cdot T^2) \quad (A-6)$$

In Gleichung (A-6) sind  $a_k$ ,  $b_k$ ,  $c_k$  Koeffizienten, die statistisch aus den Klasseunterlagen von beim Germanischen Lloyd klassifizierten Tankern ermittelt wurden, und  $T$  die Tonnage des betrachteten Schiffes.

**Tabelle A-3: Schiffstypspezifische Koeffizienten für Gleichung (A-6) und (A-21), Ladeöl**

Schiffstyp $k$	Obere Tonnage- begrenzung [tdw]	Koeffizienten		
		$a_k$	$b_k$	$c_k$
Öltanker	200 000	0.000E+00	8.02E-02	4.000E-08

### A.2.3 Berechnung des Kollisionsrisikos

Das Kollisionsrisiko für das Szenario "Kollision von manövrierfähigen Schiffen mit Installationen des Windparks" ergibt sich für jeden betrachteten Routenabschnitt  $k$  aus der Kombination von Kollisionshäufigkeiten und Kollisionskonsequenzen.

$$R_{öl,k} = n_{coll,pow,k} \cdot \bar{M}_{öl,pow,k} \quad \text{für jeden Routenabschnitt } k \quad (A-7)$$

## A.3 Verfahren zur Berechnung von Risiken für die Kollisionen manövrierunfähiger Schiffe mit Installationen des Windparks

In den internationalen Kollisionsverhütungsregeln /A-8/ (KVR 1972, Teil A, Regel 3) wird ein manövrierunfähiges Schiff wie folgt definiert:

"Der Ausdruck "manövrierunfähiges Fahrzeug" bezeichnet ein Fahrzeug, das wegen außergewöhnlicher Umstände nicht so manövrieren kann, wie es die Regeln vorschreiben, und daher einem anderen Fahrzeug nicht ausweichen kann."

Manövrierunfähige Schiffe müssen ihre Manövrierunfähigkeit durch Setzen entsprechender Signalkörper bzw Lichter (KVR 1972, Teil C, Regel 27) deutlich machen.

" Ein manövrierunfähiges Schiff muss führen:

- (i) zwei rote Rundumlichter senkrecht übereinander dort, wo sie am besten gesehen werden können;
- (ii) zwei Bälle oder ähnliche Signalkörper senkrecht übereinander dort, wo sie am besten gesehen werden können;
- (iii) bei Fahrt durch Wasser zusätzlich zu den unter diesem Buchstaben vorgeschriebenen Lichtern Seitenlichter und ein Hecklicht."


Zusätzlich müssen manövrierunfähige Schiffe im Falle verminderter Sicht alle 2 min die Signaltöne - lang, kurz, kurz - (KVR 1972, Teil D, Regel 35) geben.

Eine häufige Ursache für Manövrierunfähigkeit sind Ausfälle der Antriebs- oder Ruderanlage. Solche Ausfälle bewirken, dass Schiffe aufgrund von Seegangs-, Wind- und Strömungskräften anfangen zu driften. Die Driftrichtung und Driftgeschwindigkeit hängt jeweils von der Größe der am Schiff angreifenden Kräfte ab. In Abhängigkeit vom Ort, an dem ein Schiff manövrierunfähig wird, müssen bestimmte Kombinationen von Wind-, Strömungs- und Seegangskräften vorhanden sein, so dass das Schiff in Richtung Windpark treibt. Zusätzliche Einflussgrößen für die Driftbewegung sind Schiffstyp und Schiffsgröße.

Bevor es zu einer Kollision mit Installationen des Windparks kommt, besteht die Möglichkeit einer Notankerung, einer erfolgreichen Reparatur und somit die Wiedererlangung der Manövrierfähigkeit, oder die Bergung durch andere Fahrzeuge. Die zur Verfügung stehende Zeit ist vom Havarieort, den Wetter-/Stömungsbedingungen und dem Abstand zum Windpark abhängig.

### A.3.1 Berechnung der Kollisionshäufigkeit

Die Kollisionshäufigkeit von manövrierunfähigen Schiffen wird je Routenabschnitt aus der Kombination der Wahrscheinlichkeit der Manövrierunfähigkeit, der Kollisionswahrscheinlichkeit durch entsprechende Driftbewegungen, der Versagenswahrscheinlichkeit der kollisionsverhindernden Maßnahmen und der Anzahl der Schiffe auf dem Routenabschnitt bestimmt. Eine Erläuterung der Berechnung der einzelnen Wahrscheinlichkeiten wird in diesem Abschnitt vorgenommen.

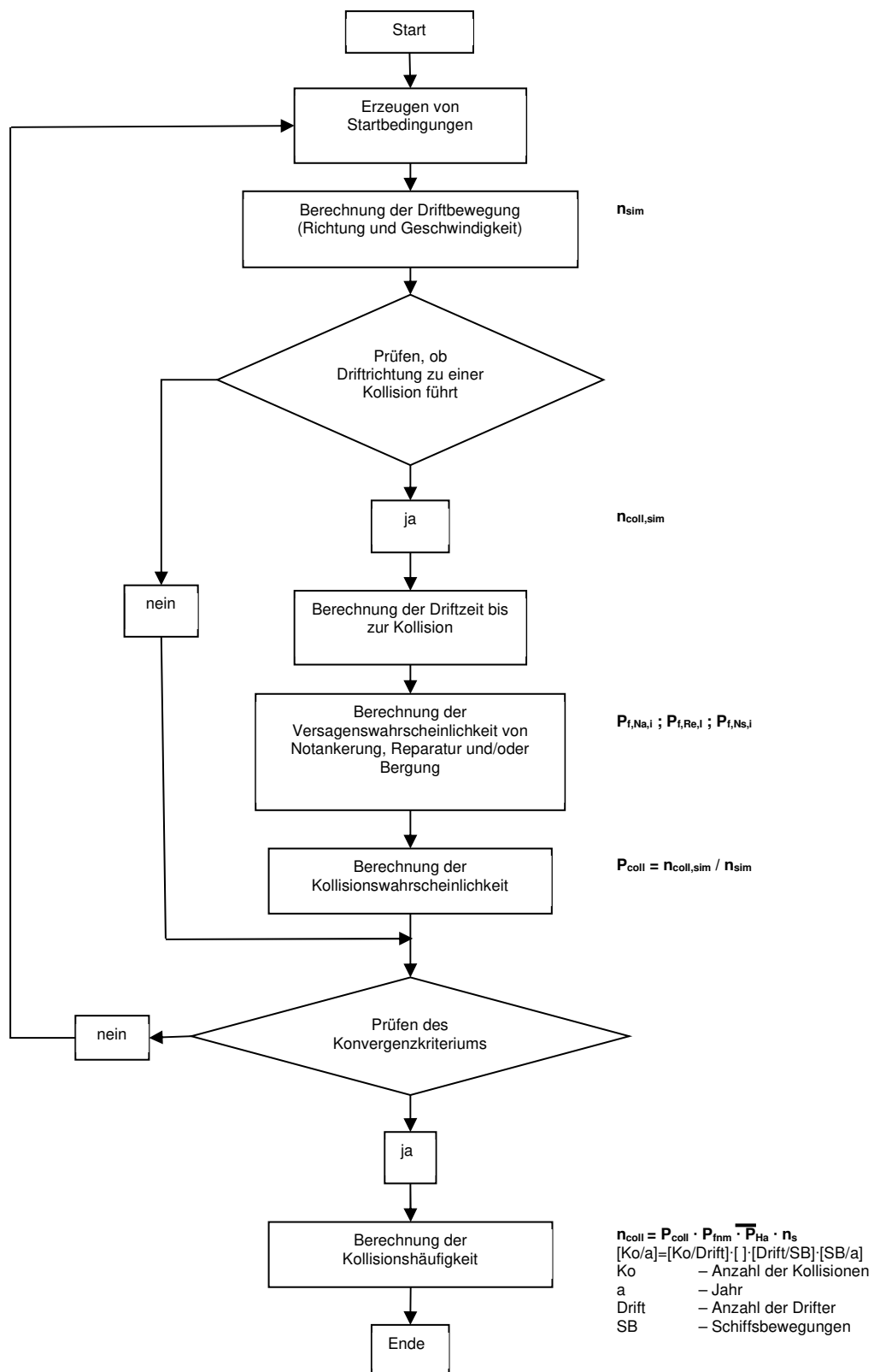


Als Grundannahme für die Manövrierunfähigkeit wird die Ausfallrate des Propulsionssystems (Antriebs- und Rudersystem) verwendet. Entsprechend der Harmonisierung der Grundannahmen für Kollisionsrisikoanalysen /A-6/ wird für diese Ausfallrate ein Wert von  $2,5 \cdot 10^{-4}$  pro Stunde angesetzt. Dies entspricht einem durchschnittlichen statistischen Ausfallintervall von 4.000 Stunden.

Die Kollisionswahrscheinlichkeit aufgrund der Driftbewegung wird berechnet, indem alle Kombinationen aus den genannten Einflussgrößen herausgefiltert, die zu einer Kollision führen. Dies wird mit Hilfe einer Monte-Carlo Simulation durchgeführt. Eine ausführliche Beschreibung des Verfahrens ist in /A-9/ gegeben.

Bei der angewendeten Monte-Carlo Simulation /A-9/ wird die Wahrscheinlichkeit der Kollision von Schiffen mit Installationen des Windparks ermittelt, in dem mögliche Driftvorgänge von manövrierunfähigen Schiffen rechnerisch simuliert werden. Hierzu werden eine Vielzahl von Simulationsläufen durchgeführt, bei denen für jeden Simulationslauf die den Driftvorgang bestimmenden Einflussfaktoren als Startbedingungen vorgegeben werden. Als Ergebnis eines Simulationslaufes ergibt sich, ob ein Schiff unter den angenommenen Startbedingungen in Richtung einer Anlage driftet oder nicht und eine Kollisionsgefahr besteht. Es wird eine Vielzahl von Simulationsläufen durchgeführt, wobei die Startbedingungen für jeden Simulationslauf neu generiert werden.

Die Kollisionswahrscheinlichkeit ergibt sich aus dem Quotienten der Anzahl von Simulationsläufen mit Kollision und der Gesamtzahl an durchgeführten Simulationsläufen. Bei der Ermittlung der Kollisionswahrscheinlichkeit werden zunächst risikomindernde Maßnahmen nicht miteinbezogen. Diese werden in einem späteren Schritt bei der Berechnung der Kollisionshäufigkeit berücksichtigt. In Abbildung A-4 ist der Ablauf der Monte-Carlo Simulation grafisch dargestellt. Die einzelnen Schritte der Simulation werden im Folgenden erläutert.

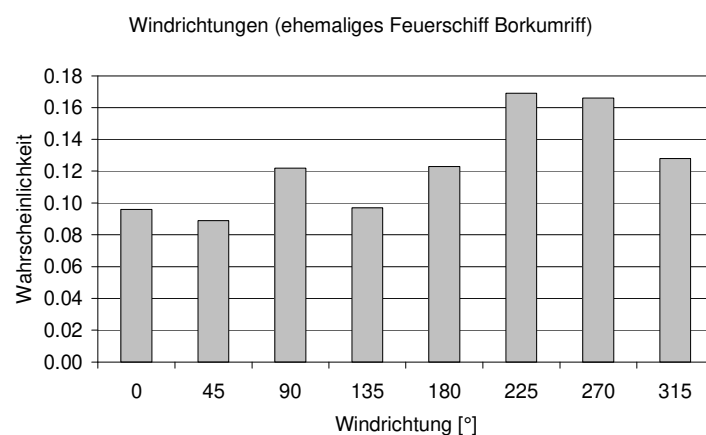


**Abbildung A-4: Schematische Darstellung des Ablaufs der Monte-Carlo Simulation**

- *Generierung von zufälligen Startbedingungen*

In einer Monte-Carlo Simulation werden Zufallsvariablen betrachtet, die durch Verteilungsfunktionen beschrieben werden. Im Gegensatz zu deterministischen Variablen, denen jeweils ein bestimmter Wert zugewiesen wird, können Zufallsvariablen ein ganzes Spektrum von Werten annehmen, denen jeweils eine Auftretenswahrscheinlichkeit oder Auftretenshäufigkeit zugeordnet wird.

Eine typische Zufallsvariable ist z.B. die Windrichtung. Einer deterministischen Variablen kann nur ein Wert zugewiesen werden, z.B. Windrichtung Ost (90°). Bei einer Zufallsvariable werden alle Windrichtungen mit ihrer entsprechenden Auftretenswahrscheinlichkeit beschrieben. Sie umfasst somit das gesamte Spektrum möglicher Werte, z.B. die Windrichtungen 0-360°.



**Abbildung A-5: Beispiel einer Zufallsvariable (Windrichtung)**

Im Falle der Kollisionsberechnungen von manövrierunfähigen Schiffen mit Installationen des Windparks werden die folgenden Zufallsvariablen betrachtet werden.

- schiffsbezogen
  - Schiffstyp
  - Schiffgröße
- routenbezogen
  - Ort, an dem das Schiff manövrierunfähig wird
- umweltbezogen
  - Wind (Geschwindigkeit und Richtung)
  - Strömung (Geschwindigkeit und Richtung sind zeitenabhängig)
  - Seegang (Wellenrichtung, Wellenhöhe)
  - Wassertiefe, (Gezeiten)

In einer Monte-Carlo Simulation werden eine Reihe von Simulationsläufen durchgeführt. In jedem Simulationslauf wird der Prozess deterministisch untersucht. Das bedeutet, dass jeder Simulationslauf mit deterministischen Variablen durchgeführt werden muss. Im Falle der Kollision von manövrierunfähigen Schiffen mit Installationen des Windparks bedeutet dies, dass ein Simulationslauf mit genau einem Schiff einer bestimmten Größe, eines bestimmten Typs, bei einer definierten Windrichtung und Windstärke, etc. durchgeführt wird. Die Problematik besteht nun darin, aus den Zufallsvariablen (den Verteilungen) Werte (z.B. eine Windrichtung) zu finden, mit denen die einzelnen Simulationsläufe durchzuführen sind. Hinzu kommt, dass die deterministischen Variablen so ausgewählt werden sollen, dass sie in ihrer Gesamtheit (alle Simulationsläufe zusammen betrachtet) den Häufigkeiten ihres Auftretens entsprechen. Das bedeutet,

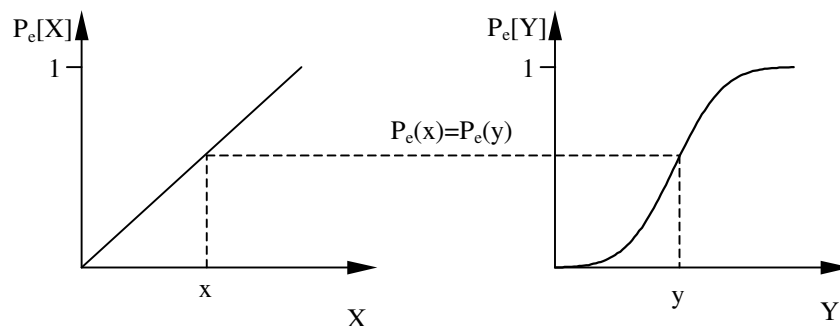
dass Windrichtungen, die in der Realität häufiger vorkommen auch häufiger in den Simulationsläufen verwendet werden sollen. Für den einzelnen Simulationslauf ist die Auswahl der Startbedingungen zufällig. In der Gesamtheit aller Simulationsläufe entsprechen sie den real existierenden Verteilungen.

Diese Forderung an das Berechnungsverfahren wird umgesetzt, in dem Zufallszahlen gebildet werden, die an die Verteilungsfunktionen der Zufallsvariablen angepasst werden. Zufallsgeneratoren können im Allgemeinen nur gleichverteilte Zufallszahlen zwischen 0 und 1 erzeugen. Das bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit aller Zahlen in besagtem Intervall gleich groß ist. Die Anpassung die Verteilungsfunktionen der Zufallsvariablen erfolgt über eine mathematische Transformation.

Die Transformationsvorschrift lautet:

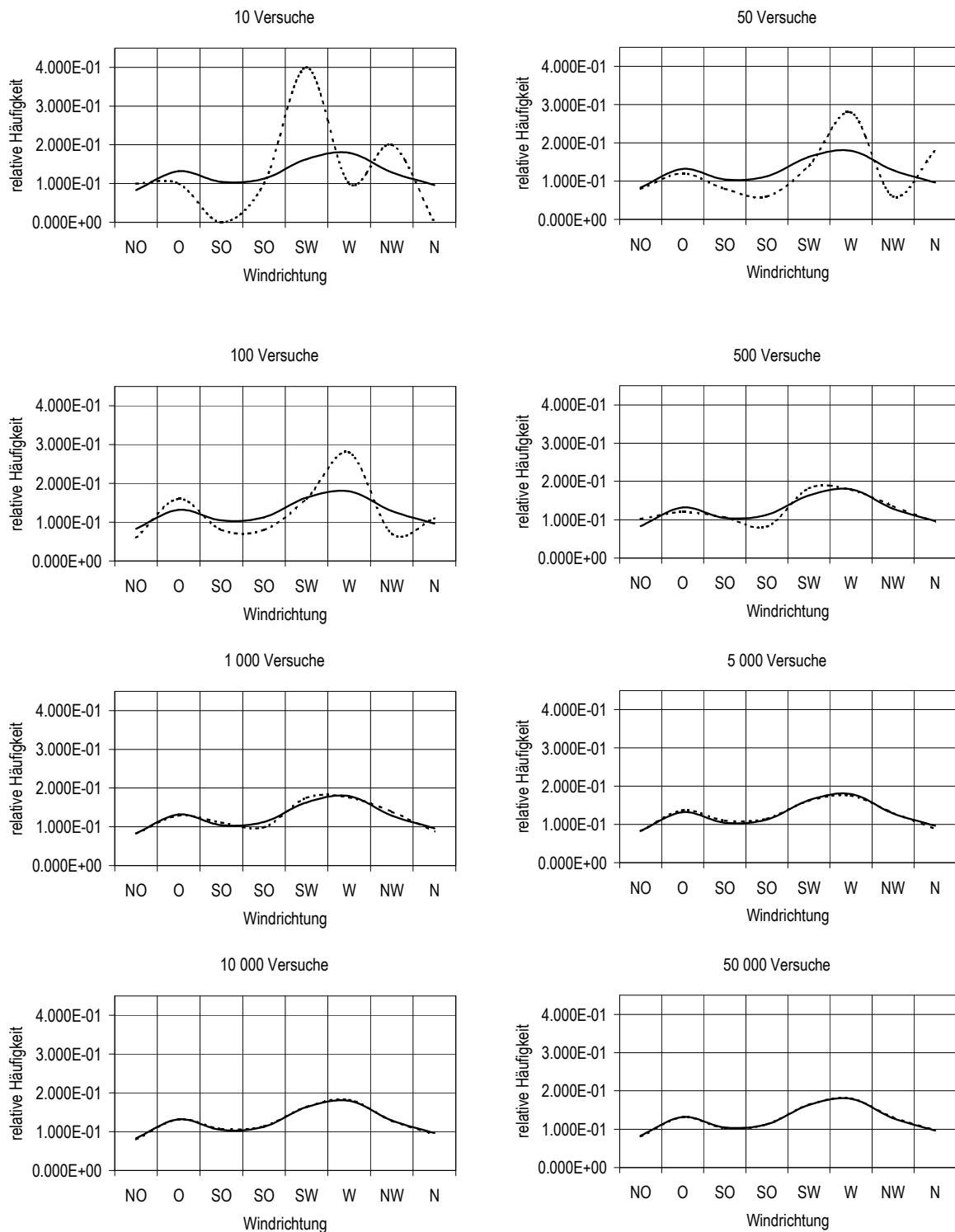
$$P_e[X] = P_e[Y] \quad (\text{A-8})$$

In Gleichung (A-8) ist  $P_e[X]$  die Überschreitenswahrscheinlichkeit der gleichverteilten Zufallszahlen des Zufallsgenerators und  $P_e[Y]$  die Überschreitenswahrscheinlichkeit der anzupassenden Zufallsvariablen (z.B. Windrichtung). In Abbildung A-6 ist der Algorithmus der Berechnung zufälliger Startbedingungen graphisch dargestellt. Es wird per Zufallsgenerator eine Zahl  $x$  erzeugt und der entsprechende Funktionswert  $P_e(x)$  berechnet. Dann wird die Zahl  $y$  gesucht, bei der  $P_e(y)$  gleich  $P_e(x)$  ist.



**Abbildung A-6: Transformation gleichverteilter Zufallszahlen**

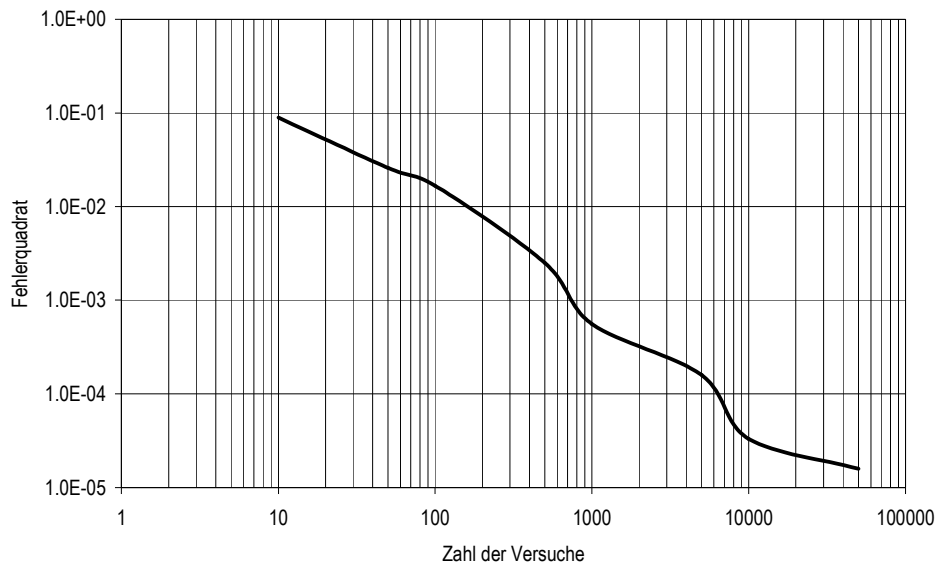
Die Genauigkeit, mit der die einzelnen Einflussfaktoren von der Monte-Carlo Simulation abgebildet werden, steigt mit der Zahl der Simulationsläufe. In Abbildung A-7 wird dieses konvergierende Verhalten für eine jeweils unterschiedliche Anzahl von Simulationsläufen beispielhaft an der Verteilung der Windrichtungen gezeigt. In den einzelnen Bildern stellt die durchgezogene Kurve jeweils die Verteilung der original gemessenen Daten dar. Die gestrichelte Kurve zeigt die relative Häufigkeit der simulierten Windrichtungen an. Es ist deutlich zu erkennen, wie die gestrichelte Kurve der simulierten Windrichtungen sich mit wachsender Zahl von Simulationsversuchen der originalen Kurve anpasst.



**Abbildung A-7: Konvergenz der simulierten Windrichtungen mit steigender Zahl von Versuchen**

Bildet man das Quadrat des Fehlerintegrals, also das Quadrat der Fläche zwischen den beiden Kurven, so kann man die Konvergenz erkennen. In Abbildung A-8 ist das Quadrat des Fehlerintegrals über die Zahl von Versuchen der Simulation dargestellt. Deutlich ist die Abnahme des Fehlerintegrals zu erkennen.





**Abbildung A-8: Quantitative Beschreibung des Konvergenzverhaltens der berechneten Startbedingungen**

Die Kombination der einzelnen deterministischen Variablen wird in den Berechnungen unabhängig vorgenommen. Das bedeutet, dass der für einen Simulationslauf ausgewählte Schiffstyp unabhängig davon ist, welche Windrichtung für den Simulationslauf ausgewählt wird. Am Ende der Auswahl der Startbedingungen liegen für einen Simulationslauf ein Satz Startbedingungen (ein Schiffstyp, eine Schiffsgröße, eine Windrichtung, eine Windgeschwindigkeit, Ort der Havarie, etc.) vor, mit dem die Driftbewegung des Schiffes berechnet werden kann.

- *Berechnung der Driftbewegung*

Für jeden Simulationslauf muss für die gewählten Startbedingungen die Berechnung der Driftbewegung erfolgen, um festzustellen, ob das Schiff in Richtung des Windparks driftet oder nicht. Diese Driftbewegung wird 24 Stunden lang für jede Stunde neu berechnet. So können die Einflüsse der Tidenströmungen, die abhängig von der Position des Havaristen und dem Tidenprogress sind, mit in die Driftbewegung einfließen.

Die Driftbewegung eines Schiffes ergibt sich allgemein aus dem Gleichgewicht der auf das Schiff wirkenden Wind-, Wellen- und Strömungskräfte. Um die Driftbewegung des Havaristen berechnen zu können, müssen die jeweils wirkenden Kraftkomponenten berechnet werden. Für die einzelnen Kraftkomponenten wurden die folgenden Berechnungsformeln /A-11/ angewendet:

- Windkräfte

Die auf das manövrierunfähige Schiff wirkenden Windkräfte werden mit Gleichung (A-9) berechnet.

$$\vec{F}_{Wi,90} = c_{d,Win,90} \frac{\rho_{Air}}{2} \cdot (\vec{v}_{Wi} + \vec{v}_S)^2 \cdot A_{l,Win} \quad (A-9)$$

In Gleichung (A-9) ist  $c_{d,Win,90} = 0.855$  - der Widerstandsbeiwert des Überwasserschiffes,  $\rho_{Air} = 1.3 \text{ kg/m}^3$  - die Dichte von Luft,  $v_{Wi}$  - die Windgeschwindigkeit,  $A_{l,Win}$  - die Lateralfäche des Überwasserschiffes und  $v_S$  - die Geschwindigkeit des Schiffes über Grund. Die Lateralfäche  $A_{l,Win}$  des Überwasserschiffes ergibt sich aus der Länge multipliziert mit dem Freibord des Schiffes. Dazu wird die Fläche addiert, die sich aus dem Produkt der Länge und Höhe der Decksaufbauten ergibt. Die laterale Fläche der Decksaufbauten schließt bei Frachtschiffen die Flächen der möglichen Ladung ein, dies gilt insbesondere für Containerschiffe.

- Wellendriftkräfte

Die resultierende Wellendriftkraft wird mit Gleichung (A-10) berechnet.

$$\vec{F}_{We,90} = c_{d,We,90} \frac{\rho_W}{2} \cdot g \cdot \nabla^{1/3} \cdot \xi_a^2 \quad (A-10)$$

In Gleichung (A-10) ist  $c_{d,We,90} = 0.5$  - der Beiwert der Wellendriftkraft,  $\rho_W = 1024 \text{ kg/m}^3$  - die Dichte von Seewasser,  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$  - die Erdbeschleunigung,  $\nabla$  - die Verdrängung des Havaristen und  $\xi_a$  - die signifikante Wellenamplitude ( $H_s/2$ ).

- Strömungskräfte

Die resultierende Strömungskraft wird mit Gleichung (A-11) berechnet.

$$\vec{F}_{St,90} = c_{d,St,90} \cdot \frac{\rho_W}{2} \cdot (\vec{v}_S + \vec{v}_{T,Wd})^2 \cdot A_{l,St} \quad (A-11)$$

In Gleichung (A-11) ist  $c_{d,St,90} = 0.6$  - der Beiwert der Strömungskraft,  $\vec{V}_S$  - die Geschwindigkeit des Schiffes über Grund,  $\vec{V}_{T,Wd}$  - die Geschwindigkeit der Strömung von Gezeiten und Winddrift und  $A_{l,St}$  - die Lateralfäche des Unterwasserschiffes. Die Lateralfäche des Unterwasserschiffes ergibt sich aus dem Produkt der Schiffslänge zwischen den Loten und dem Schiffstiefgang.

Unter der Annahme, dass bei konstanter Driftbewegung alle am Schiff angreifenden Kräfte im Gleichgewicht stehen, ergibt sich die Driftgeschwindigkeit (Fahrt des Schiffes über Grund) als Lösung von Gleichung (A-12).

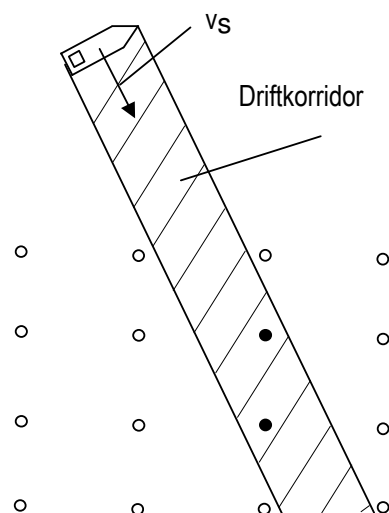
$$\vec{0} = \vec{F}_{Wi,90} + \vec{F}_{We,90} + \vec{F}_{St,90} \quad (A-12)$$

Die Driftrichtung ergibt sich aus der komponentenweisen Betrachtung der Vektorgleichung (A-12).

Vergleichsberechnungen mit realen Driftbewegungen von manövrierfähigen Schiffen haben gezeigt, dass unter Einbeziehung der Windkräfte und der Kräfte aus Wind- und Tidenströmung eine realistische Driftbewegung berechnet werden kann. Somit bleibt die Wellenkraft für die Berechnung der Driftbewegung unberücksichtigt. Unabhängig davon wird diese Kraftkomponente bei der Ermittlung der erforderlichen Schleppleistung eines Notschleppers berücksichtigt.

- *Prüfen ob Driftrichtung zu einer Kollision führt*

Im nächsten Schritt des Berechnungsverfahrens wird geprüft, ob die Driftbewegung des Havaristen zu einer Kollision zwischen Schiff und OWEA bzw. UW führen kann. Hierfür wird die Fläche (Driftkorridor) berechnet, über die das Schiff manövrierunfähig driftet, siehe Abbildung A-9. Liegen OWEA oder UW des Windparks innerhalb dieses Korridors, so ist das Schiff kollisionsgefährdet.



**Abbildung A-9: Driftkorridor eines manövrierunfähigen Schiffes (nicht maßstäblich)**

- *Berechnung der Driftzeit bis zur Kollision*

Liegen im Driftkorridor Installationen des Windparks, so kann aus der Driftgeschwindigkeit  $v_s$  und der Distanz  $d$  (Strecke zwischen der Position an der die Drift des Schiffes begann und der dichtesten OWEA im Driftkorridor) die Driftzeit  $t_d$  bis zur Kollision berechnet werden.

$$t_d = \frac{d}{v_s} \quad (\text{A-13})$$

- *Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit von Notankerung, Reparatur und/oder Bergung*

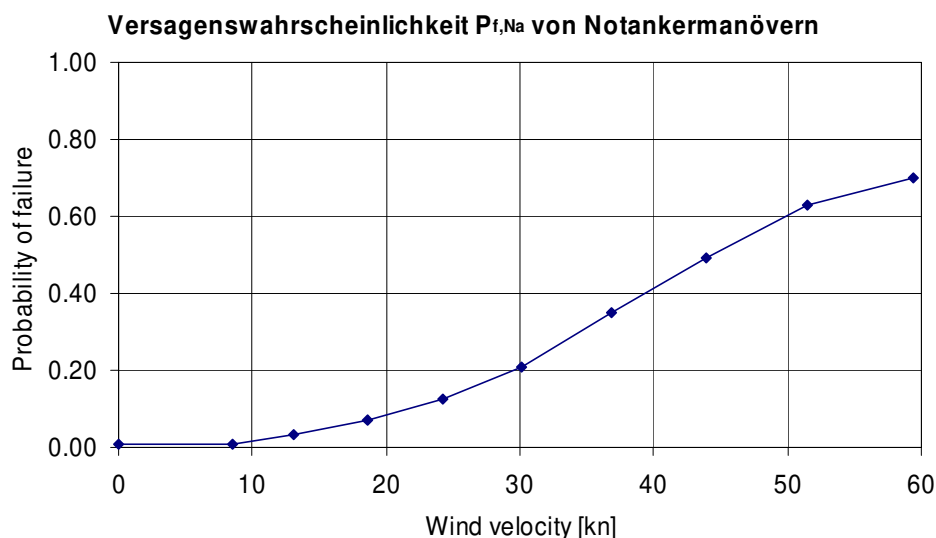
In der Simulation werden drei Arten von kollisionsverhindernden Maßnahmen berücksichtigt, die von jeder Schiffsführung eingeleitet werden können, deren Schiff manövrierunfähig geworden ist. Diese Maßnahmen sind Notankerung, Reparatur und Bergung.

Hierfür wird bei jedem Simulationslauf die Wahrscheinlichkeit ermittelt, die den Erfolg oder Misserfolg dieser risikomindernden Maßnahmen ausdrücken.

## - Notankerung

Eine Möglichkeit, die Drift des manövrierunfähigen Schiffes aufzuhalten oder zu verlangsamen, ist die Notankerung. Dabei werden einer oder beide Anker geworfen und es wird versucht, das Schiff aufzustoppen. Gelingt die Notankerung, so besteht für das Schiff keine weitere Kollisionsgefahr.

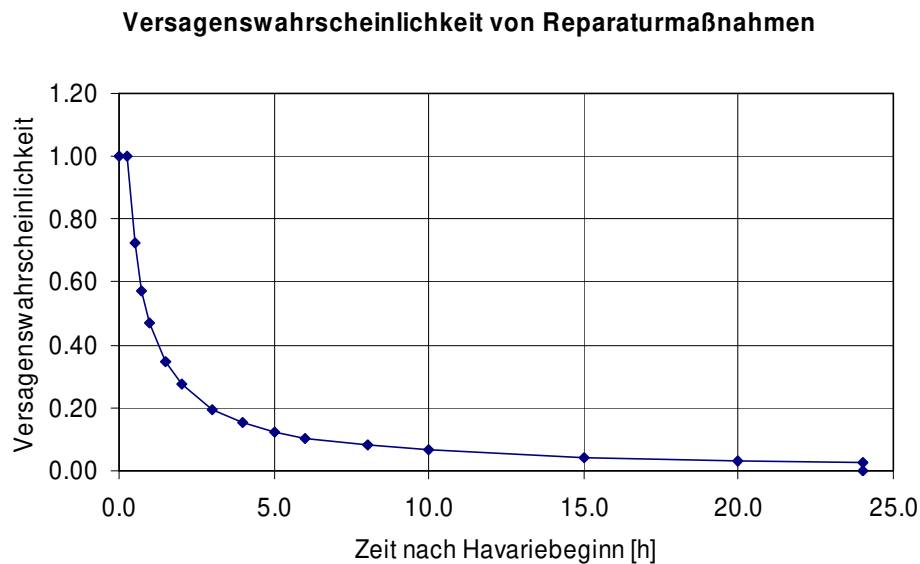
Um die mögliche risikoreduzierende Wirkung einer Notankerung in die Berechnung einfließen zu lassen, wird eine Funktion (Abbildung A-10) eingeführt, welche die Versagenswahrscheinlichkeit von Notankermanövern in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit beschreibt. Diese Funktion entspricht den harmonisierten Grundannahmen /A-6/.



**Abbildung A-10: Risikomindernde Wirkung von Notankerung**

## - Reparaturmaßnahmen

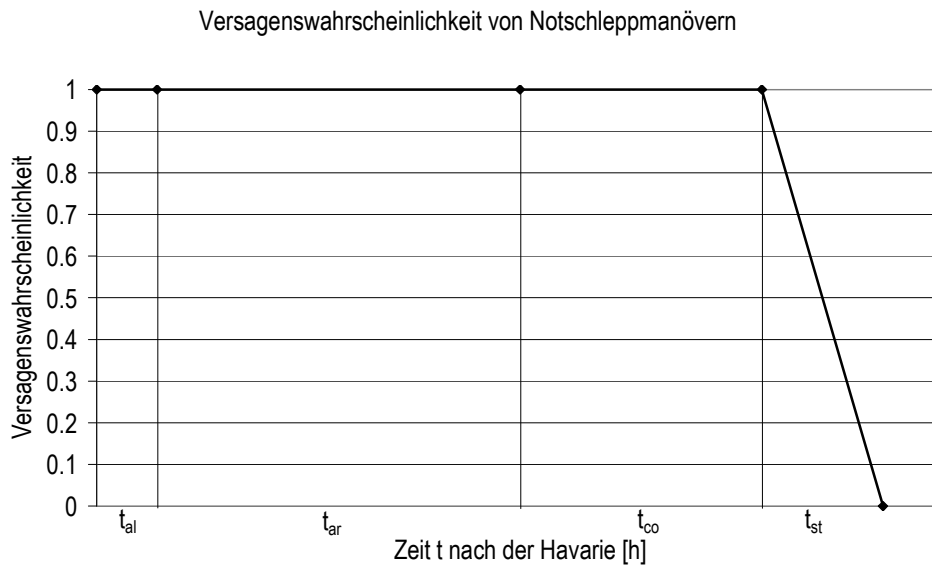
Manövrierunfähigkeit ist immer mit dem Ausfall der Antriebs- und/oder der Ruderanlage verbunden. Somit besteht in den meisten Fällen auch die Möglichkeit einer Reparatur der ausgefallenen Anlage und somit der Wiedererlangung der Manövrierfähigkeit. Kritisch für die Wiederherstellung der Manövrierfähigkeit ist daher die dafür zur Verfügung stehende Zeit. Die Versagenswahrscheinlichkeit von Reparaturmaßnahmen wird deshalb als zeitabhängige Funktion in der Simulation berücksichtigt (Abbildung A-11). Diese Funktion entspricht den harmonisierten Grundannahmen /A-6/ und wurde von MARIN aus der Datenbank über manövrierunfähige Schiffe der niederländischen Coastguard aus den Jahren 2002 und 2003 abgeleitet (siehe /A-10/). Die Datenbank ermöglicht aufgrund der enthaltenen Informationen die Ableitung des Zusammenhangs zwischen Ausfall des Antriebs- und Rudersystems und der Dauer der Manövrierunfähigkeit.



**Abbildung A-11: Berücksichtigung von Reparaturmaßnahmen in der Monte-Carlo Simulation**

## - Bergung mit Schlepperunterstützung

Der Einsatz von Bergungsschleppern ist eine weitere Möglichkeit, die drohende Kollision eines manövrierunfähigen Schiffes mit OWEA oder der UW abzuwenden. Es wird eine zeitabhängige Funktion der Versagenswahrscheinlichkeit (Abbildung A-12) eingeführt. Die einzelnen Zeitabschnitte müssen entsprechend der Position des Windparks sowie des Havaristen und der Kapazitäten von verfügbaren Bergungsschleppern angepasst werden. In Abbildung A-12 ist daher der Verlauf der Funktion nur schematisch dargestellt.



**Abbildung A-12: Berücksichtigung von Bergungseinsätzen in der Monte-Carlo Simulation**

Die Zeit, die für eine erfolgreiche Bergung benötigt wird, lässt sich durch die in der Abbildung A-12 schematisch dargestellten Faktoren  $t_{al}$ ,  $t_{ar}$ ,  $t_{co}$  und  $t_{st}$  beschreiben. Wird diese Zeit überschritten, kommt es auf jeden Fall zu einem Versagen des Bergungsmanövers. Ansonsten sinkt die Versagenswahrscheinlichkeit erst im Laufe der Zeitperiode für die Stabilisierung und Anschleppens des manövrierunfähigen Schiffes langsam auf Null ab. D.h., sollte keine ausreichende Zeit für die Stabilisierung und das Anschleppen verbleiben, kann nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden, dass es trotz Leinenverbindung zwischen Schlepper und driftendem Schiff zu einer Kollision mit einer Windenergieanlage kommen kann. Das Notschleppmanöver gilt als gescheitert, wenn es innerhalb der Summe der hier aufgezeigten Teilzeiten (Alarmierung, Anfahrt, Leinenverbindung und Stabilisieren) zu einer Kollision zwischen Drifter und OWEA kommt bzw. wenn das manövrierunfähige Schiff bei Windstärken größer 4 Bft in einen Windpark driftet. Die Bergung gilt als erfolgreich, wenn der Schlepper den Havaristen mit Ablauf der Zeit für die Stabilisierung angeschleppt hat und es bis dahin zu keiner Kollision gekommen ist bzw. das Schiff bei Windstärken größer 4 Bft nicht in einen Windpark gedriftet ist.

Entsprechend den harmonisierten Annahmen von 2005 /A-14/ berücksichtigt das Rechenmodell des GL eine detaillierte Modellierung der Bergung durch Notschlepper mit Berücksichtigung der zeitlichen Abläufe sowie der Schleppkapazitäten. Eine Begrenzung der Notschleppereinsätze auf Windbedingungen kleiner 8 Bft wird nicht vorgenommen.

#### *t<sub>al</sub> - Zeit für die Alarmierung und Aktivierung*

Die Zeit  $t_{al}$  umfasst den Zeitraum von der Havarie bis zum Auslaufen des Bergungsschleppers von seinem Stationierungsort. Diese Zeitspanne enthält die Zeit zur Feststellung der Havarie bei, die Zeit bis zur Entscheidung, ob Bergungsschlepper eingesetzt werden sollen und die Mobilisierung der Schlepper und deren Besatzung. Diese Zeitspanne variiert für die einzelnen Notschlepper. Die "Oceanic" (bzw. dessen Nachfolger) steht permanent für Notschleppeinsätze zur Verfügung und benötigt somit nur eine geringe Zeitspanne, um zu beginnen, in Richtung Einsatzgebiet zu fahren. Die "Neuwerk" und die "Mellum" benötigen gegebenenfalls längere Zeit, um sich zum Havaristen in Marsch zu setzen, sofern sie gerade mit anderen Aufgaben (Tonnenlegen, Messungen, etc.) beauftragt sind. Im Mittel kann von einer Zeit für die Alarmierung von 0.5 h ausgegangen werden, da die Erkennung über AIS und Radar innerhalb weniger Minuten möglich ist.

#### *t<sub>ar</sub> - Zeit für den Anfahrtsweg*

Nach dem Auslaufen benötigen die Schlepper eine gewisse Zeit, um bis zum Havaristen zu fahren. Diese Zeitspanne ist von der Distanz zum Havaristen und von der möglichen Geschwindigkeit des Schleppers abhängig. Zusätzlich haben auch die herrschenden Witterungsbedingungen wie Wind, Strömung und Seegang Einfluss auf die Geschwindigkeit des Schleppers. Die Zeitspanne für den Anfahrtsweg des Schleppers ist daher variabel. Pessimistisch kann die maximale Vorausschwindigkeit bei 9 bft Gegenwind und 5 m Wellenhöhe angenommen werden, die etwa 14 kn beträgt.

#### *t<sub>co</sub> - Zeit zum Herstellen der Leinenverbindung zwischen Havarist und Schlepper*

Ist der Schlepper beim Havaristen eingetroffen, so wird eine gewisse Zeit benötigt, um eine Schleppverbindung mit dem Havaristen herzustellen. Die benötigte Zeit schwankt zwischen 0.5 h unter normalen Bedingungen und evtl. mehreren Stunden bei schwerer See. Sie ist sowohl von der Ausrüstung des Schleppers (Leinenschussgeräte etc.) und des Havaristen (Notschleppgeschirre), von den Witterungsbedingungen (Seegang, Wind) als auch von Erfahrungen bzw. Fähigkeiten der Besatzungen an Bord beider Schiffe abhängig. In den Berechnungen wird diese Zeitspanne pessimistisch mit 1.0 h bei Windgeschwindigkeiten bis 8 bft angenommen. Bei Windverhältnissen ab 8 bft wird eine längere Zeitspanne für die Leinenverbindung von 3.5 h angenommen.

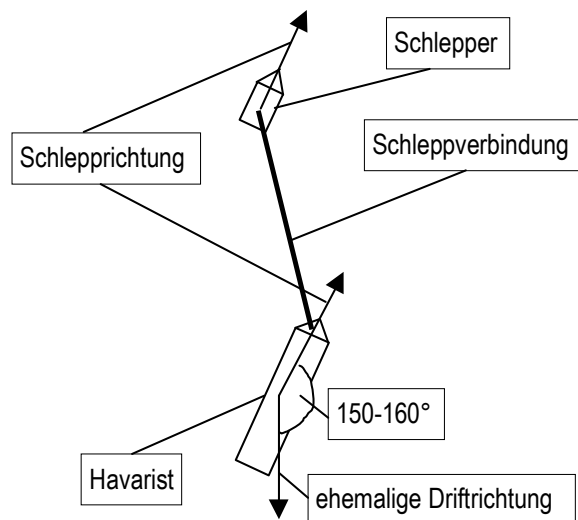
#### *t<sub>st</sub> - Zeit bis zur Stabilisierung der Lage des Havaristen*

Nachdem eine Schleppverbindung hergestellt wurde, kann damit begonnen werden, die Driftgeschwindigkeit des Havaristen zu verringern und ihn aus der Gefahrenzone zu schleppen. Die Zeit, die dafür benötigt wird, hängt wiederum von einer Reihe von Faktoren ab. Zunächst ist sie von der Leistung der Schlepper und von den vorhandenen Umweltbedingungen abhängig. Aber auch die Erfahrungen der Besatzung und die angewendete Schleppstrategie beeinflussen diesen Zeitraum. In Moore et al. /A-12/ wird eine mittlere Zeit von 15 min für Tanker bei 30 Kn Windgeschwindigkeit angegeben. Bei Schleppsimulationen am "Institut für Schiffsbetrieb, Seeverkehr und Simulation" (ISSUS) zeigte sich, dass diese Zeiträume auch bis zu einer Stunde lang sein können. Daher wird dieser Zeitraum  $t_{st}$  mit 0.5 h angenommen. Im Zeitraum  $t_{st}$  sinkt die Versagenswahrscheinlichkeit linear auf Null herab. Bei Windverhältnissen ab 8 bft wird eine längere Zeitspanne bis zur Stabilisierung der Lage des Havaristen (Aufstoppen der Drift) von 1.0 h angenommen.

#### - Berechnung der notwendigen Schleppkraft

Eine Voraussetzung für den Schlepper ist eine ausreichende Schleppleistung, so dass der Schlepper die Drift des Havaristen vor Erreichen des Windparks aufstoppen kann. Insofern muss geprüft werden, ob die zur Verfügung stehenden Schlepper in der Lage sind, bei den gegebenen Umweltbedingungen, Größe und Typ des Havaristen etc., den Havaristen zu bergen.

Wie schon bei der Berechnung der Driftgeschwindigkeit, benötigt man zur Ermittlung der notwendigen Schleppleistung die auf den Havaristen wirkenden Kräfte. Erfahrungswerte und Simulationen (siehe /A-13/) zeigten, dass sich in den meisten Fällen eine stabile Lage des Havaristen zum Schleppen bei etwa 150 –160 ° zur Driftrichtung ergibt, siehe Abbildung A-13.



**Abbildung A-13: Annahme zur Lage von Havarist und Schlepper bei Schleppmanövern**

In der Realität ist der Schleppvorgang natürlich ein sehr dynamischer Vorgang. Das bedeutet, dass sich die Lage zwischen Schlepper und Havaristen ständig verändert. Aus der jeweiligen Lage des Havaristen zu den wirkenden Kraftkomponenten (Wind, Wellen und Strömung) verändern sich die Angriffsflächen der jeweiligen Kraftkomponenten.

Nur wenn die Pfahlzugleistung des Schleppers größer als der erforderliche Pfahlzug  $\vec{F}_p$  ist, wird die Wahrscheinlichkeitsfunktion, Abbildung A-12, angewendet. Ansonsten wird der Schlepper als wirkungslos betrachtet. Als wirkende Kraft wird in den Berechnungen eine Trossenzugkraft der Schlepper in Höhe von 60% der angegebenen Pfahlzugkraft angenommen.

- *Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit*

Ist ein Simulationslauf abgeschlossen, so kann die Kollisionswahrscheinlichkeit pro Schiff  $P_{coll}$  berechnet werden. Diese ergibt sich aus der Zahl der durchgeführten Simulationsläufe mit erfolgter Kollision  $n_{coll,sim}$  und der Gesamtzahl an durchgeführten Simulationsläufen  $n_{sim}$  entsprechend Gleichung (A-14).



$$P_{\text{coll}} = \frac{n_{\text{coll, sim}}}{n_{\text{sim}}} \quad (\text{A-14})$$

- *Prüfen des Konvergenzkriteriums*

Als Konvergenzkriterium der Monte-Carlo Simulation wird der Standard Fehler des Mittelwertes SEM ("Standard Error of the Mean Statistic") verwendet. Diese statistische Größe, Gleichung (A-15), wird aus der Standardabweichung der Kollisionswahrscheinlichkeit und der Anzahl der Simulationsläufe berechnet.

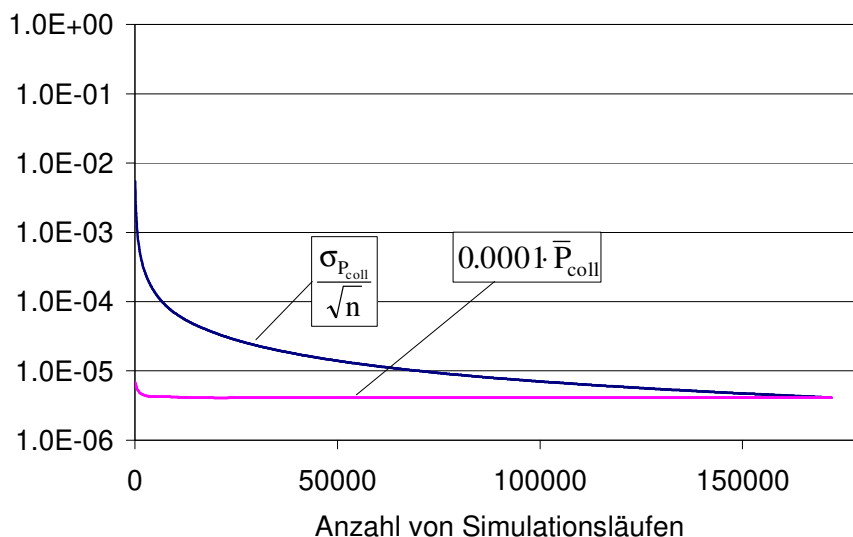
$$\text{SEM} = \frac{\sigma_{P_{\text{coll}}}}{\sqrt{n}} \quad (\text{A-15})$$

Ein gängiges Maß für die Konvergenz der Simulation ist wenn der SEM Wert kleiner als 1% des Mittelwertes der Kollisionswahrscheinlichkeit  $P_{\text{coll}}$  ist. In den Berechnungen des GL wird ein genaueres Konvergenzkriterium 0.01 % des Mittelwertes angewendet.

Daraus ergibt sich als Konvergenzkriterium der Simulation:

$$\frac{\sigma_{P_{\text{coll}}}}{\sqrt{n}} < 0.0001 \cdot \bar{P}_{\text{coll}} \quad (\text{A-16})$$

In Gleichung (A-16) ist  $\sigma_{P_{\text{coll}}}$  die Standardabweichung der Kollisionswahrscheinlichkeit,  $\bar{P}_{\text{coll}}$  der Mittelwert der Kollisionswahrscheinlichkeit und  $n$  die Anzahl der Simulationsläufe. Das Konvergenzverhalten der Monte-Carlo Simulation ist in Abbildung A-14 dargestellt. Die beiden Kurven stellen jeweils eine Seite der Ungleichung (A-16) dar. Deutlich ist die Annäherung der Kurven mit zunehmender Anzahl von Simulationsläufen zu erkennen. Am Schnittpunkt beider Kurven ist das Abbruchkriterium der Simulation erreicht und die Simulation wird beendet.



**Abbildung A-14: Konvergenz der Kollisionswahrscheinlichkeit innerhalb der Monte-Carlo Simulation**

- *Berechnung der Kollisionshäufigkeit*

Die Kollisionshäufigkeit von manövrierunfähigen Schiffen mit Installationen des Windparks wird mit Gleichung (A-17) berechnet.

$$n_{\text{coll}} = P_{\text{coll}} \cdot \bar{P}_{\text{fnn}} \cdot P_{\text{Ha}} \cdot n_{\text{S}} \quad (\text{A-17})$$

In Gleichung (A-17) ist  $\bar{P}_{\text{fnn}}$  die Versagenswahrscheinlichkeit von Notankerung, Selbstreparatur und Bergung,  $P_{\text{Ha}}$  - die Wahrscheinlichkeit der Havarie eines Schiffes auf dem betrachteten Routenabschnitt und  $n_{\text{S}}$  - die Anzahl der Schiffe auf dem Routenabschnitt.

Die Wirkung von Notankerung, Selbstreparatur und Bergung wird im Faktor  $\bar{P}_{\text{fnn}}$  für alle Simulationsläufe zusammengefasst.

$$\bar{P}_{\text{fnn}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{coll,sim}}} (P_{\text{f,Na},i} \cdot P_{\text{f,Re},i} \cdot P_{\text{f,Ns},i})}{n_{\text{coll,sim}}} \quad (\text{A-18})$$

Darin sind  $P_{\text{f,Na},i}$ ,  $P_{\text{f,Re},i}$  und  $P_{\text{f,Ns},i}$  - die Versagenswahrscheinlichkeiten der kollisionsverhindernden Maßnahmen unter der Bedingung, dass der Havarist auf das Objekt zu driftet.

$$P_{\text{Ha}} = \frac{l_{\text{k}}}{v_{\text{S}} \cdot t_{\text{f,PS}}} \quad (\text{A-19})$$

In Gleichung (A-19) ist  $l_{\text{k}}$  die Länge des betrachteten Routenabschnittes,  $t_{\text{f,PS}}$  das Ausfallintervall des Propulsionssystems und  $v_{\text{S}}$  die Schiffsgeschwindigkeit nach Tabelle A-4.

**Tabelle A-4: Tabelle der typspezifischen Schiffsgeschwindigkeiten**

Schiffstyp	durchschnittliche Schiffsgeschwindigkeit $v_{\text{S}}$ [Kn]
Stückgutschiffe	20.0
Containerschiffe	20.0*)
Ro-Ro Schiffe	20.0
Bulker	14.0
Fähren und Passagierschiffe	20.0
Öltanker	14.0
Gastanker	15.0
Chemikalien tanker	15.0
*) Die durchschnittliche Schiffsgeschwindigkeit für Containerschiffe wurde gegenüber den harmonisierten Annahmen konservativ mit einer Geschwindigkeit von 20.0 kn angenommen.	

### A.3.2 Berechnung der Kollisionskonsequenzen

Im Falle der Kollision von manövrierunfähigen Schiffen ist mit deutlich kleineren Kollisionsenergien zu rechnen als im Falle der Kollision von manövrierfähigen Schiffen, da Driftgeschwindigkeiten deutlich kleiner sind als die Fahrtgeschwindigkeiten der Schiffe.

Im Falle eines driftenden Schiffes kann davon ausgegangen werden, dass das Schiff seitlich mit dem Turm der OWEA in Kontakt kommt. Durch die geringe Auftreffgeschwindigkeit ist damit zu rechnen, dass der Turm am Fundament versagt und der Turm vom Schiff wegfällt. Dass die Gondel auf das Schiff fällt, ist bei diesem Szenario nicht zu erwarten.

Wie bereits erwähnt ist die Schiffstruktur in der Lage, begrenzt Kollisionsenergie zu absorbieren. Somit kann bei geringen Driftgeschwindigkeiten davon ausgegangen werden, dass die Schiffsaußenhaut sich verformt aber nicht aufreißt. Letztendlich kann bisher jedoch nicht gänzlich ausgeschlossen werden, dass es auch bei seitlichen Kollisionen zum Aufreißen der Schiffsaußenhaut kommt. Grundlage der Berechnungen zur Konsequenzanalyse (austretende Schadstoffmengen) ist ein Kollisionsgutachten, dass eine Aussage über die kritische Schiffsgeschwindigkeit gibt, bei der mit einem Versagen der Schiffsstruktur zu rechnen ist. Als pessimistische Annahme wird in den Berechnungen davon ausgegangen, dass bei allen höheren Geschwindigkeiten als bei der ermittelten immer ein Versagen der Schiffshaut zur Folge hat. Ein Kollaps der Windenergieanlage wird pessimistisch für jede Driftgeschwindigkeit angenommen.

Beim angenommenen Versagen der Schiffshaut wird in den Berechnungen sowohl von möglichen Schädigungen von Treibstoff- als auch von Ladetanks ausgegangen. Es werden zusätzlich Ölmengen berechnet, die im Falle einer Kollision durch umstürzende Windenergieanlagen freigesetzt werden. Bei Passagierschiffen wird wiederum angenommen, dass Brennstoff nur im Doppelboden und in Zwischentanks im Mitschiffsbereich gelagert wird. An diesen Positionen sind Schäden durch Kollisionen mit einer Windenergieanlage nicht zu erwarten und werden daher ausgeschlossen.

Die bei einer Kollision freigesetzte mittlere Ölmenge  $\bar{M}_{\text{Öl}}$  wird für manövrierunfähigen Schiffen mit Gleichung (A-20) berechnet. An dieser Stelle wird ebenfalls vereinfachend auf die Darstellung des Zähler k für jeden betrachteten Routenabschnitt verzichtet.

$$\bar{M}_{\text{Öl},\text{dis}} = \sum_s \sum_t (P_{\text{SE},\text{Br}} \cdot M_{\text{Br},s,t} + P_{\text{SE},\text{La}} \cdot M_{\text{La},\text{dis},s,\text{Tanker}}) \cdot P_s \cdot P_t + \sum_l P_{\text{WEA},\text{Typ},l} \cdot M_{\text{Öl},l} \quad (\text{A-20})$$

In Gleichung (A-20) werden für die Berechnung der durch Kollisionen manövrierunfähigen Schiffe freigesetzten Ölmengen die selben Elemente wie in Gleichung (A-3) für Kollisionen manövrierfähiger Schiffe im Abschnitt A.2.2 verwendet. Ausnahme bildet die freigesetzte Ladeölmenge  $M_{\text{La},\text{dis},s,\text{Tanker}}$  für einen Tanker der Größenklasse s.

Bei der Berechnung der Menge des austretenden Ladeöls wird bei einem angenommenen Aufreißen der Schiffshaut konservativ davon ausgegangen, dass der ganze Inhalt eines<sup>3</sup> Ladetanks freigesetzt wird.

<sup>3</sup> Im Gegensatz zu den Annahmen bei der Kollision eines manövrierunfähigen Tankers wird bei einer Kollision eines manövrierfähigen Tankers aufgrund des eventuell auftretenden „Entlangschleifens“ von der Freisetzung des gesamten Ladeinhalts zweier Ladetanks ausgegangen.

Die freigesetzte Ladeölmenge  $M_{La,dis,s,Tanker}$  für einen manövrierunfähigen Tanker der Größenklasse  $s$  wird mit Gleichung (A-21) berechnet.

$$M_{La,dis,s,Tanker} = (a_k + b_k \cdot T + c_k \cdot T^2) \quad (A-21)$$

In Gleichung (A-21) sind  $a_k$ ,  $b_k$ ,  $c_k$  Koeffizienten, die statistisch aus den Klasseunterlagen von beim Germanischen Lloyd klassifizierten Tankern ermittelt wurden und  $T$  die Tonnage des betrachteten Schiffes (Tabelle A-3)

### A.3.3 Berechnung des Kollisionsrisikos

Das Kollisionsrisiko für das Szenario "Kollision von manövrierfähigen Schiffen mit Installationen des Windparks" ergibt sich für jeden betrachteten Routenabschnitt  $k$  aus der Kombination von Kollisionshäufigkeiten und Kollisionskonsequenzen.

$$R_{\ddot{O},dis,k} = n_{coll,dis,k} \cdot \bar{M}_{\ddot{O},dis,k} \quad \text{für jeden Routenabschnitt } k \quad (A-22)$$

## A.4 Literatur zum Anhang A

- /A-1/ Fujii, Y., Yamanouchi, H., Mizuki, N.: "Some Factors Affecting the Frequency of Accidents in Marine Traffic". Section II – The Probability of Stranding and Section III – The Effect of Darkness on the Probability of Collision and Stranding, Journal of Navigation, Vol. 27, pp. 235-247, 1974.
- /A-2/ MacDuff, J.: "The Probability of Vessel Collision", Ocean Industry, September 1974.
- /A-3/ Pedersen, P. T.: „Collision and Grounding Mechanics“; Department of Ocean Engineering; Technical University of Lyngby; in WEMT 95, Denmark, 1995.
- /A-4/ ISESO Project 7 and 8: Grounding and Collision: Basic Modelling Principles and Validation of Software for Prediction of Frequencies, 2000-05-30.
- /A-5/ Fujii, Y., Mizuki, N., "Design of VTS systems for water with bridges", Gluver & Olsen (eds) Ship Collision Analysis, Balkema ISBN 90 54 10 962 9, Rotterdam 1998.
- /A-6/ MARIN, DNV und Germanischer Lloyd: Harmonisierung der Grundannahmen für Kollisionsrisikoanalysen zwischen MARIN, DNV und GL; Hamburg, Dezember 2004.
- /A-7/ Dalhoff, P., J. Stein: Development of a Simplified Method for the Calculation of Consequences for the Windturbine / HV Station; SAFESHIP deliverable 7-1, [REDACTED] Germanischer Lloyd WindEnergie GmbH, Januar 2005.
- /A-8/ Verordnung zu den Internationalen Regeln von 1972 zur Verhütung von Zusammenstößen auf See vom 13. Juni 1977 (BGBl. I S. 813), zuletzt geändert durch die Verordnung seeverkehrsrechtlicher Vorschriften (Ausführungsverordnung zum Seerechtsübereinkommen), Kollisionsverhütungsregeln (KVR).
- /A-9/ VDI-Richtlinie 4008; Blatt 6; „Monte-Carlo-Simulation“; Beuth-Verlag; Berlin; 1999.
- /A-10/ Van der Tak, C.: Harmonization of assumptions; MARIN Memo, Netherlands, Dec. 2004.
- /A-11/ OCIMF; Prediction of Wind and Current Loads on VLCCs; published by Oil Companies International Marine Forum; London.
- /A-12/ Moore, C. et al.; "An Application of Collision and Grounding Simulation to Regulatory Assessment"; Proceedings of the International Conference of Collision and Grounding of Ships; Copenhagen; 2001.
- /A-13/ Otto, S.; Østergaard, C.; "Berechnung notwendiger Trossenzüge für Notschleppeinsätze in Nord- und Ostsee“; intern; Germanischer Lloyd; Hamburg; 2001.
- /A-14/ BMVBW: Genehmigungrelevante Richtwerte für Offshore-Windparks - Bericht einer Arbeitsgruppe; Referat LS 23, Bonn, März 2005.



## About DNV

DNV is the independent expert in risk management and assurance, operating in more than 100 countries. Through its broad experience and deep expertise DNV advances safety and sustainable performance, sets industry benchmarks, and inspires and invents solutions.

Whether assessing a new ship design, optimizing the performance of a wind farm, analyzing sensor data from a gas pipeline or certifying a food company's supply chain, DNV enables its customers and their stakeholders to make critical decisions with confidence.

Driven by its purpose, to safeguard life, property, and the environment, DNV helps tackle the challenges and global transformations facing its customers and the world today and is a trusted voice for many of the world's most successful and forward-thinking companies.