



Überbordgehen von Containern von der MSC ZOE

1.–2. Januar 2019

25. Juni 2020

Liste der Akronyme und Abkürzungen	4
1 Einleitung	5
1.1 Ereignis	5
1.2 Untersuchung.....	5
2 Unfallhergang	7
2.1 Fahrtverlauf der MSC ZOE.....	7
2.2 Zeitlicher Ablauf	12
2.3 Untersuchung zu den verlorenen Containern	13
2.4 Schäden am Fahrzeug	17
2.5 Umweltschäden	19
2.6 Bergung der verlorenen gegangenen Container	21
2.7 Daten des Schiffsdatenschreibers.....	27
2.8 Abfolge der Ereignisse	30
3 Schiff und Besatzung	32
3.1 Ultragroßes Containerschiff MSC ZOE	32
3.2 Informationen über die Besatzung	32
4 Stauung und Sicherung der Container	34
4.1 Allgemeine Ladungsinformationen	34
4.2 Ladungssicherung.....	37
4.3 Laschung	38
4.4 Ladungssicherungshandbuch	40
4.5 Ladungsrechner	45
5 Entwicklung bei Containerschiffen	51
5.1 Größe von Containerschiffen	51
5.2 Einfluss des GM-Wertes	54
6 Bedingungen auf See und Schiffsbewegungen	61
6.1 Umweltbedingungen	61
6.1.1 Wetter	61
6.1.2 Bedingungen auf See.....	63
6.1.3 Wettervorhersage-Informationen, die der Besatzung zur Verfügung standen	67
6.2 Schiffsbewegungen.....	69
6.3 Simulationen und Modellversuche	72
6.4 Rollbewegungen	74
6.4.1 Maximale Rollwinkel.....	74
6.4.2 Ablesen des Inklinometers	76

6.5	Schiffsverhalten im Zusammenhang mit Containerverlust.....	77
6.5.1	Extreme Schiffsbewegungen und Beschleunigungen.....	78
6.5.2	Kontakt oder Beinahekontakt mit dem Meeresboden.....	80
6.5.3	Grünes Wasser.....	83
6.5.4	Slamming, das zu Impulsbelastungen führt.....	84
7	Wegeführung.....	87
7.1	Schiffswegeführung.....	87
7.2	Passageplanung.....	88
8	FAZIT.....	91
9	Ergriffene Maßnahmen.....	96
10	Sicherheitsempfehlungen.....	99
ANHANG A:	Schiffsdaten.....	102
ANHANG B:	SCHAUBILDER DEUTSCHER WETTERDIENST.....	104
ANHANG C:	TECHNISCHER BERICHT DELTARES.....	107
ANHANG D:	TECHNISCHER BERICHT MARIN.....	108
ANHANG E:	TECHNISCHER BERICHT TUHH.....	109

LISTE DER AKRONYME UND ABKÜRZUNGEN

BSU	Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung
CSM	Cargo Securing Manual (Ladungssicherungshandbuch)
CSS	Code of safe practice for cargo Stowage and securing
DSB	Dutch Safety Board (Niederländischer Untersuchungsrat für Sicherheit, Niederländisch: Onderzoeksraad voor Veiligheid)
DWD	Deutscher Wetterdienst
IMO	International Maritime Organization (Internationale Seeschiffahrtsorganisation)
ISM	International Safety Management (Maßnahmen zur Organisation eines sicheren Schiffsbetriebs)
OT	Ortszeit (zum Zeitpunkt des Unfalls war die Ortszeit UTC + 1 Stunde)
MSC	Mediterranean Shipping Company
MSL	Mean Sea Level (mittlerer Meeresspiegel)
MV	Motor Vessel (Motorschiff)
PMA	Panama Maritime Authority (Schiffahrtsbehörde von Panama)
PSC	Port State Control (Hafenstaatkontrolle)
ROT	Rate of turn (Drehgeschwindigkeit)
RPM	Revolutions per minute (Umdrehungen pro Minute)
TEU	Twenty-foot Equivalent Unit (Zwanzig-Fuß-Standardcontainer)
SOLAS	Safety of Life at Sea
STCW	Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers
UKC	Under Keel Clearance (Kielfreiheit)
ULCS	Ultra Large Container Ship (Ultragroßes Containerschiff)
UTC	Universal Time Coordinated (Koordinierte Weltzeit)
VkZ	Verkehrszentrale
VTG	Verkehrstrennungsgebiet
VTS	Vessel Traffic Service

1.1 Ereignis

Im Verlauf des späten Abends des 1. Januar 2019 und des frühen Morgens des 2. Januar 2019 verlor das Containerschiff MSC ZOE insgesamt 342 Container während der Fahrt im Verkehrstrennungsgebiet (VTG) Terschelling–German Bight. Das unter der Flagge von Panama fahrende Schiff befand sich auf der Fahrt von Sines (Portugal) nach Bremerhaven (Deutschland). Zum Zeitpunkt des Unfalls wehte der Wind aus Nord-Nordwest mit 8 Bft und die Wellen kamen von Backbord querab. Das Schiff rollte ständig. Die Besatzung stellte zum ersten Mal am 2. Januar gegen 01:00 Uhr Ortszeit¹ (OZ) fest, dass nördlich der niederländischen Watteninsel Schiermonnikoog Fracht verloren gegangen war. Nördlich der Insel Borkum, gegen 01:30 Uhr, wurde die Besatzung Zeuge des Überbordgehens von Containern. Die MSC ZOE änderte ihren Kurs nach Nordwesten und reduzierte die Geschwindigkeit. Die Verkehrszentrale (VkZ) Wilhelmshaven wurde über den Verlust von Containern informiert. Um 14:00 Uhr wurde die Fahrt in Richtung des VTG German Bight Western Approach mit Kurs auf Bremerhaven fortgesetzt und die MSC ZOE legte am 3. Januar um 01:00 Uhr sicher am Eurogate-Terminal an.

Die Folgen des Unfalls für die niederländische und deutsche Küste waren am 2. Januar unmittelbar erkennbar. Der Sturz aus der Höhe und die Wellen zerstörten die die meisten Container, und Ladungsrückstände wurden an den niederländischen und deutschen Watteninseln und an der niederländischen Küste an Land gespült. Es traten keine Schmiermittel und/oder Öle der MSC ZOE aus und kein Besatzungsmitglied wurde verletzt. Der Verlust von Fracht und dessen Auswirkungen auf die niederländische und deutsche Küste und die Umwelt erregten in der Öffentlichkeit sowohl in den Niederlanden als auch in Deutschland große Besorgnis.

1.2 Untersuchung

Das Überbordgehen von Containern führte zu schweren Umweltschäden. Vor diesem Hintergrund wird der Unfall als sehr schwerer Seeunfall eingestuft, wie im Unfall-Untersuchungs-Code der Internationalen Seeschiffahrtsorganisation (IMO) und der Richtlinie 2009/18/EG² der Europäischen Union definiert. Die in diesen Unfall maßgeblich involvierten Staaten sind der Flaggenstaat Panama sowie die Küstenstaaten Deutschland und die Niederlande.

Die Behörden zur Untersuchung von Seeunfällen der drei beteiligten Staaten einigten sich auf ein gemeinsames Vorgehen bei der Sicherheitsuntersuchung des Unfalls. Panama ist

¹ Alle Zeiten im Bericht sind Ortszeiten, sofern nicht anders angegeben (Ortszeit = UTC +1).

² Richtlinie 2009/18/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Festlegung der Grundsätze für die Untersuchung von Unfällen im Seeverkehr.

als Flaggenstaat für die Durchführung der Sicherheitsuntersuchung verantwortlich und daher war die Panama Maritime Authority (PMA) federführend bei der Untersuchung der Ursache(n) des Containerverlustes. Die deutsche Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung (BSU) und der niederländische Untersuchungsrat für Sicherheit (DSB, *Onderzoeksraad voor Veiligheid*) beteiligten sich an der Untersuchung.

Der einzige Zweck der durchgeführten Sicherheitsuntersuchung besteht darin, Seeunfälle und andere Vorkommnisse auf See in Zukunft zu vermeiden. Die Untersuchung dient nicht der Feststellung des Verschuldens oder der Haftung.

Die Originalfassung des Untersuchungsberichtes ist in englische Sprache verfasst. Diese ist verbindlich.

Die Hauptfragen im Rahmen der Untersuchung waren:

- Was verursachte das Überbordgehen von Containern von der MSC ZOE am 1. und 2. Januar 2019?
- Wie lassen sich die Risiken eines Überbordgehens besser handhaben?

Die Untersuchung erstreckte sich nicht auf die Reaktionen auf den Vorfall und das Krisenmanagement nach dem Unfall.

Am 6. Januar 2019 trafen sich die Untersuchungsteams von PMA, BSU und DSB an Bord der MSC ZOE in Bremerhaven und leiteten die Sicherheitsuntersuchung ein. Während der Untersuchung vor Ort wurden relevante Daten und Informationen gesichert, darunter kurze Aussagen einiger Besatzungsmitglieder, VDR-Daten, Daten aus dem Ladungsrechner und dem Laschprogramm, der Stauplan, Stabilitätsunterlagen und Logbuchauszüge. Darüber hinaus wurden Schäden untersucht und protokolliert. Um die Zwischenergebnisse zu besprechen und das weitere Vorgehen zu vereinbaren, trafen sich die Untersuchungsbehörden aus Panama, Deutschland und den Niederlanden mehrmals in Den Haag und Hamburg und einmal in Neapel³, sowie in Telefonkonferenzen um im Rahmen der Untersuchung und dem Verfassen des Berichts zusammenzuarbeiten. Um die Untersuchung der technischen Aspekte zu unterstützen, konsultierten sowohl die BSU als auch das DSB Experten auf den Gebieten des Schiffsverhaltens auf See und der Bedingungen entlang der Fahrtroute nördlich der Watteninseln:

- Die BSU arbeitete mit der Technischen Universität Hamburg (TUHH, Technische Universität Hamburg) bei einer Simulation der Schiffsbewegungen und der daraus resultierenden Beschleunigungskräfte (siehe Anhang E) zusammen.
- Das DSB arbeitete mit den Forschungsinstituten Deltares und dem Maritime Research Institute Netherlands (MARIN), zusammen, um die meteorologischen und Wellenbedingungen entlang der Fahrtroute der MSC ZOE und die Auswirkungen dieser Bedingungen auf ultragroße Containerschiffe wie die MSC ZOE zu ermitteln (siehe Anhänge C und D).

³ Auf dem 28. Marine Accident Investigators' International Forum, das in Neapel stattfand, waren die drei in den Unfall involvierten Staaten Panama, Deutschland und die Niederlande anwesend.

2 UNFALLHERGANG

2.1 Fahrtverlauf der MSC ZOE

Am Samstag, dem 24. November 2018, lief das unter der Flagge von Panama fahrende Containerschiff MSC ZOE aus dem Hafen von Xingang in China aus. Das Schiff lief die Häfen Gwangyang (Korea), gefolgt von Ningbo (China), Shanghai (China), Yantian (China) und Tanjung Pelepas (Malaysia) an, bevor es Kurs auf Europa nahm. Während dieser Zeit gehörten der 22-köpfigen Besatzung Mitglieder aus Italien, Montenegro, Kroatien, Indonesien, Samoa und Madagaskar an.

Nach dem Einlaufen in den Hafen von Sines (Portugal) löschte die MSC ZOE 2.173 Container und nahm weitere 249 an Bord. Am Sonntag, dem 30. Dezember, um 03:30 Uhr Ortszeit legte das Schiff mit 8.062 Containern beladen (entspricht 13.465 TEU⁴, was 70 % der Gesamtladekapazität entspricht) ab und nahm Kurs auf Bremerhaven (Deutschland).

Die MSC ZOE befuhr am 1. Januar 2019 zwischen 06:30 und 07:35 Uhr den Ärmelkanal. Zu diesem Zeitpunkt wehte der Wind aus nordwestlicher Richtung mit einer Stärke von 4 bis 5 Beaufort (Bft), was dem Schiff eine ruhige Fahrt ermöglichte. Nach der Passage des Ärmelkanals setzte die MSC ZOE die Fahrt entlang der belgischen und niederländischen Küste in nördlicher Richtung fort. Im Laufe des Tages nahm die Windgeschwindigkeit von ursprünglich 4 bis 5 Bft auf 8 Bft um etwa 18:00 Uhr zu. Um etwa 18:50 Uhr (siehe Abbildung 1) näherte sich das Schiff Texel und änderte den Kurs nach Steuerbord, um in die südliche Fahrspur des Verkehrstrennungsgebiets (VTG) Terschelling–German Bight einzulaufen. Der Erste Offizier hielt zu dieser Zeit Wache. Um etwa 19:00 Uhr übernahm der Kapitän die Wache vom Ersten Offizier und der Erste Offizier zog sich in seine Kajüte zurück. Zu diesem Zeitpunkt wehte der Wind mit einer Stärke von 9 Bft und der Steuermann steuerte das Schiff von Hand. Nach Angaben der Besatzung rollte das Schiff zwischen 5° und 10°, mit gelegentlichen Spitzen bis zu 15°. Dem Logbuch zufolge wurden zwischen 16:00 Uhr und 20:00 Uhr die Laschausrüstung der Container, die Gefahrstoffcontainer, der Laderaum und die Bilgen überprüft und für in Ordnung befunden.

Laut Aussagen der Besatzung begann die MSC ZOE am Abend des 1. Januar 2019 um 23:00 Uhr plötzlich für einen Zeitraum von etwa 30 Sekunden heftig zu rollen, was sich wie Rollwinkel von 20 bis 30° anfühlte. Diese Bewegungen waren so heftig, dass die Geräte im Fitnessbereich verrutschten und auf der Brücke verschiedene Gegenstände, darunter der Drucker, durch die Luft flogen. Nach Angaben der Besatzung reduzierten sich die Bewegungen des Schiffes nach dieser Phase heftigen Rollens wieder auf das vorherige Ausmaß von 5° bis 10°. Zu diesem Zeitpunkt fuhr die MSC ZOE mit einer Geschwindigkeit zwischen 8 und 10 Knoten. Der Kapitän, der Dritte Offizier und der Steuermann befanden

⁴ Zwanzig-Fuß-Standardcontainer basierend auf einem Bezugscontainer, der eine Länge von 20 Fuß hat. TEU ist eine Maßeinheit im Containerverkehr, die zur Beschreibung der Ladekapazität von Containerschiffen verwendet wird.

sich auf der Brücke. Der durch die heftigen Bewegungen aufgewachte Erste Offizier überprüfte die Unterkünfte und die Brücke auf lose Möbelstücke hin und kehrte dann in seine Kajüte zurück. Um Mitternacht beendete der Dritte Offizier seinen Wachdienst und der Zweite Offizier stieß zum Kapitän und Steuermann auf der Brücke hinzu.

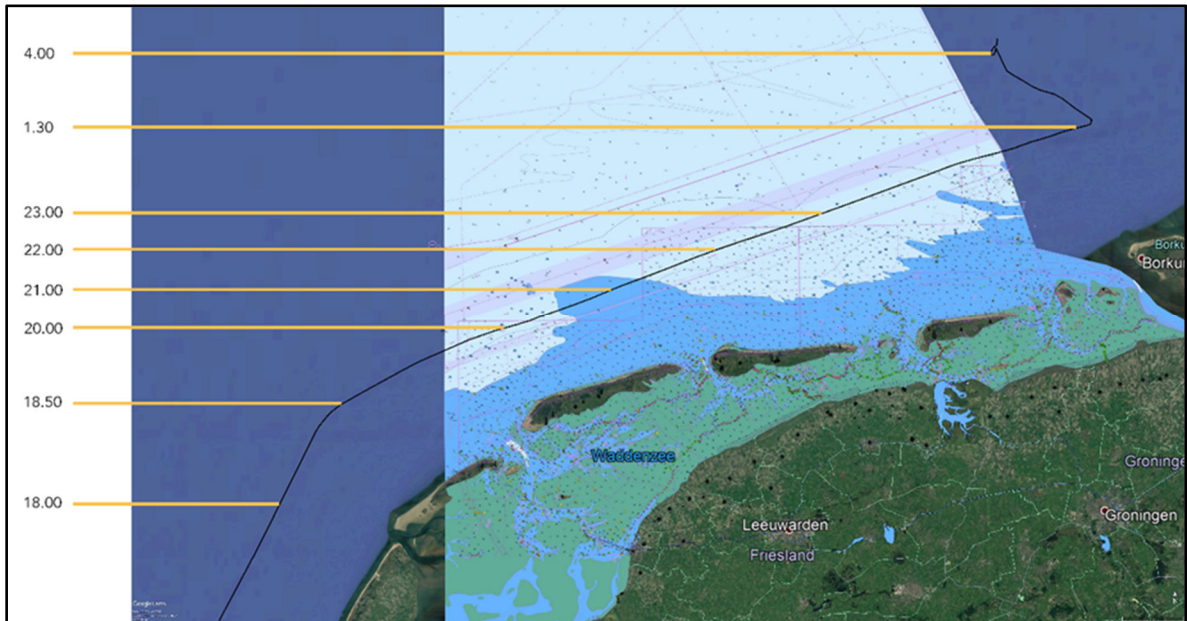


Abbildung 1: Fahrspur der MSC ZOE (Zeitangabe in Ortszeit).

Um etwa 01:00 Uhr morgens am 2. Januar 2019 ging der Kapitän in den hinteren Bereich der Brücke und betrachtete aus dem Brückenfenster die hinter der Brücke befindlichen Container. Als der Kapitän feststellte, dass sich einige Container nicht mehr an ihrer vorgesehenen Position befanden, bat er den Zweiten Offizier, eine Aldislampe (eine Tageslichtsignallampe) auf die Container zu richten. Das Licht brachte zum Vorschein, dass einige der Container umgefallen waren. Der Kapitän weckte daraufhin den Ersten Offizier, der kurze Zeit später die Brücke betrat. Der Kapitän informierte auch die Unternehmensleitung an Land. Der Erste Offizier und der Bootsmann begaben sich auf das Hauptdeck, um nach weiteren Schäden zu suchen. Sie stellten fest, dass einige Container über die Bordkante ragten, konnten aber nicht sehr viel erkennen.

Um 01:30 Uhr rollte die MSC ZOE erneut heftig für eine kurze Zeit, was sich laut Aussage der Besatzung wieder wie Rollwinkel von 20 bis 30° anfühlte. Während dieser Zeit beobachtete der Kapitän, wie die Container in (wie sich später herausstellen sollte) Bay 26 zusammenstürzten. Der Erste Offizier und der Bootsmann waren an Deck und sie beobachteten ebenfalls, wie die Containerstapel aus Bay 26 zusammenstürzten und über Bord gingen. Der Erste Offizier meldete diesen Vorfall sofort dem Kapitän auf der Brücke. Der Zweite Offizier informierte die Verkehrszentrale Wilhelmshaven. Der Kapitän änderte den Kurs von 074° nach 315° und reduzierte die Geschwindigkeit auf 2 kn, um das Schiff in Richtung Wind und Wellen zu drehen und so die Bewegungen zu stabilisieren. Die Besatzung versuchte, den Schaden einzuschätzen, doch aufgrund der Dunkelheit und der auf das Deck gefallenen Container war dies schwierig.

Der Erste Offizier und der Bootsmann versuchten an mehreren Stellen, das Deck zu erreichen. Vom Ausgang des Maschinenraums aus stellten sie fest, dass Bay 58 zusammengebrochen war und Container über die Bordkante ragten. Vom Arbeitsraum des Bootsmannes im Vorschiff aus stellten sie eine ähnliche Situation in den Bays 10 und 26 fest. Danach kehrten sie auf die Brücke zurück, um Bericht zu erstatten. Auf der Brücke informierte der Kapitän die Verkehrszentrale Wilhelmshaven über die Anzahl der verloren gegangenen Container und darüber, ob einer von ihnen Gefahrstoffe enthielt. Die erste Schätzung lag bei etwa 30 Containern. Da die Möglichkeiten in der Dunkelheit begrenzt waren und die Gefahr von herunterfallenden Containern, Trümmern oder Ladung nicht sachgemäß bewertet werden konnte, wartete der Kapitän, bis es hell war, bevor er weitere Leute nach draußen schickte. Das Schiff fuhr weiter gegen Wind und Wellen in Richtung des VTG German Bight Western Approach.

Als der Tag anbrach, begann die Besatzung, sich ein Bild von der Situation an Deck zu machen (siehe Abbildungen 2 und 3). Der Erste und der Zweite Offizier machten sich auf die Suche nach den Gefahrgutcontainern, und fünf Besatzungsmitglieder schlossen sich dem Bootsmann an, um die losen Laschings nachzuspannen. Der Erste und der Zweite Offizier stellten fest, dass zwei der drei Gefahrgutcontainer fehlten. Der dritte Container ragte halb über die Steuerbordseite des Schiffes. Die Besatzung gab an, bei ihren Rundgängen an Deck verschiedene lose Teile der Laschausrüstung gefunden zu haben, darunter Spanner von Laschstangen, Haken und Sicherungstifte sowie Twistlocks, die in zwei Teile zerbrochen waren.



Abbildung 2: Seitenansicht der MSC ZOE. (Quelle: Niederländische Küstenwache)

Um ca. 14:00 Uhr am Nachmittag des 2. Januar erreichte die MSC ZOE das nördlich liegende VTG German Bight Western Approach (siehe Abbildung 4), und um ca. 15:00 Uhr nach einer Drehung nach Steuerbord lief das Schiff in die südliche Fahrspur ein, um seine Reise nach Bremerhaven fortzusetzen. Um 19:15 Uhr ging der Lotse an Bord, um das Schiff

in den Hafen zu leiten. Am Morgen des 3. Januar 2019 um 01:00 Uhr legte die MSC ZOE in Bremerhaven an.



Abbildung 3: Draufsicht auf die MSC ZOE nach dem Überbordgehen der Container. (Quelle: Niederländische Küstenwache)

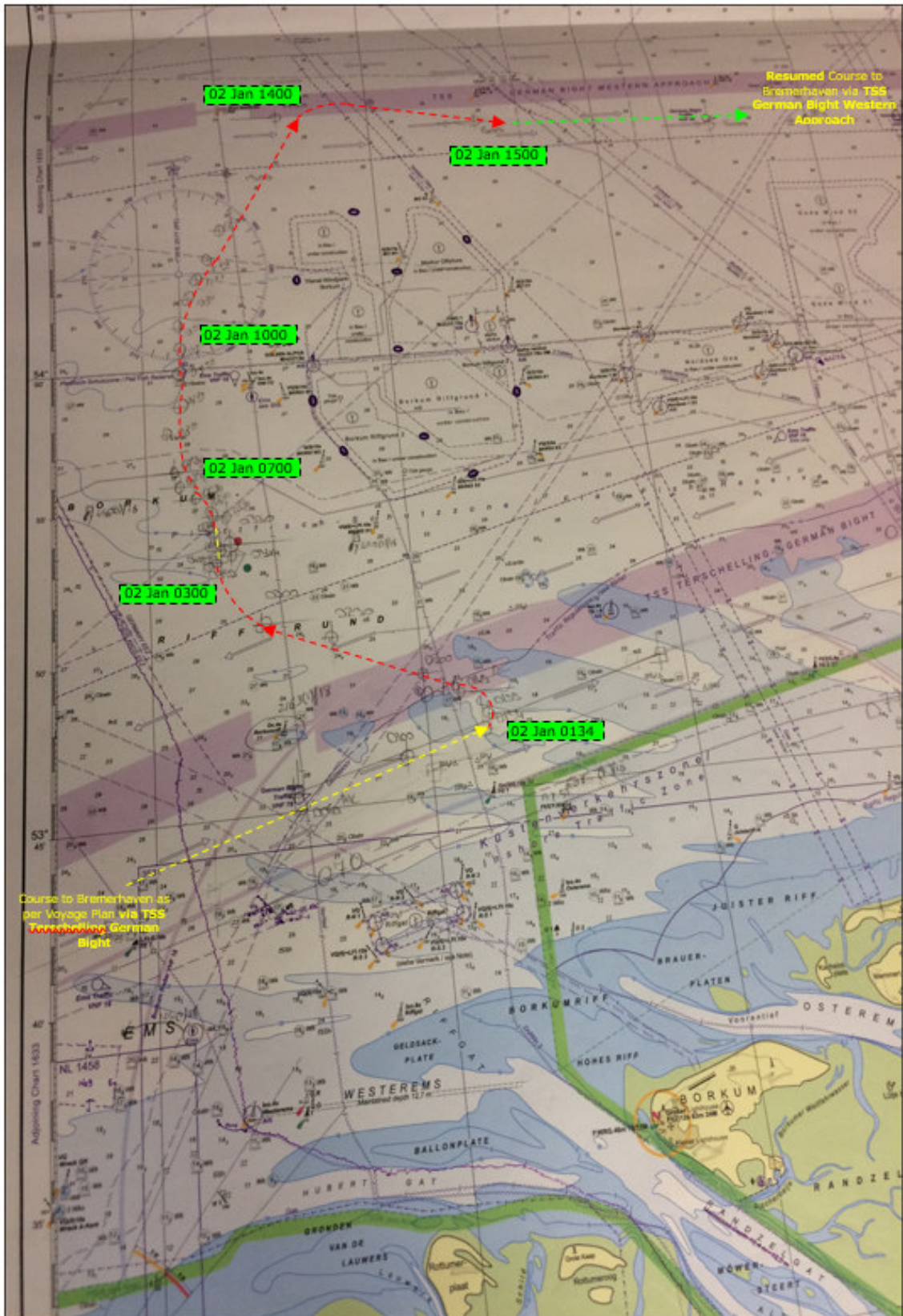
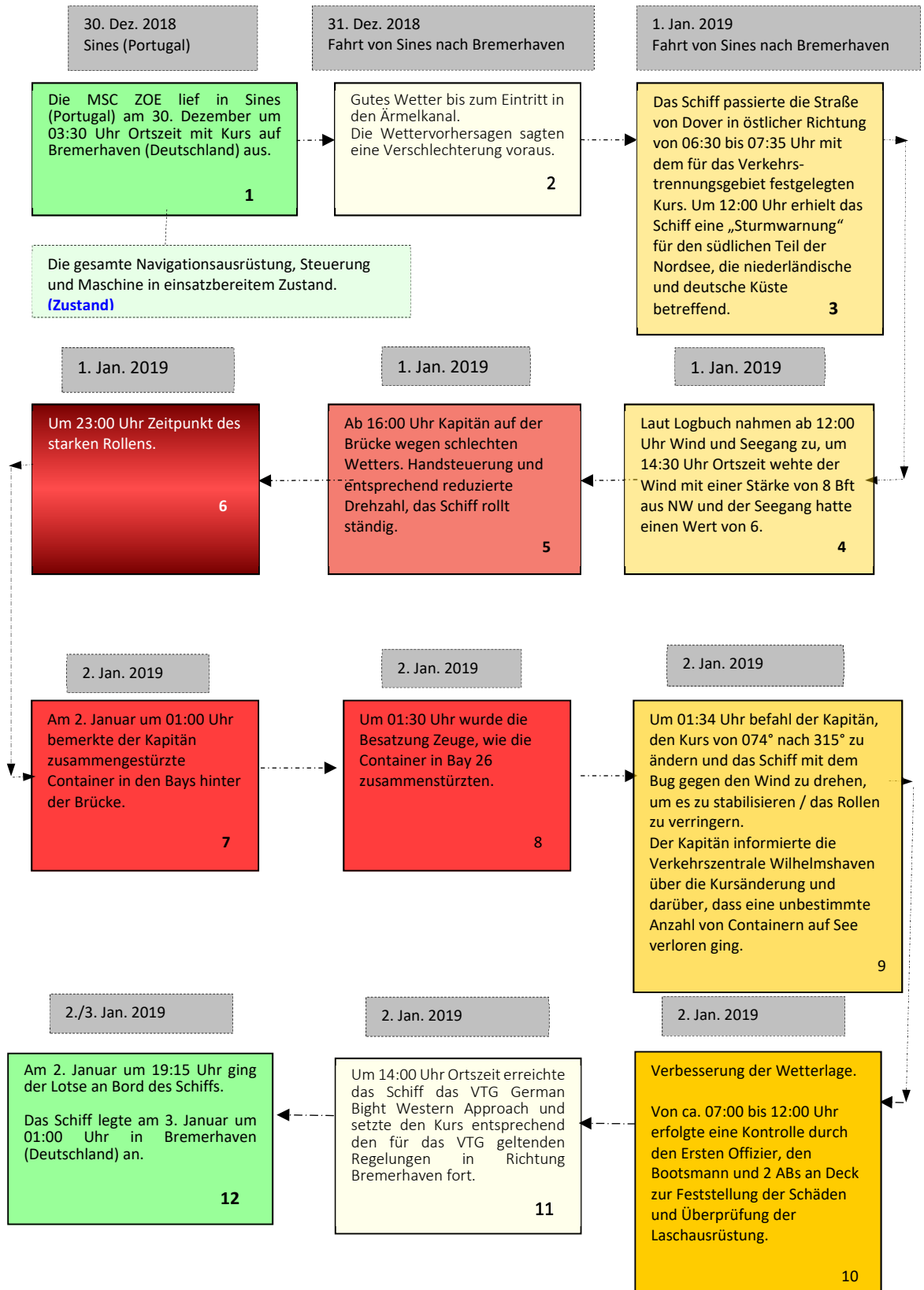


Abbildung 4: Fahrspur der MSC ZOE nach der Kursänderung nach Norden im Anschluss an das Feststellen des Containerverlustes. (Quelle: Papierseekarte der MSC ZOE)

2.2 Zeitlicher Ablauf

Die folgende Übersicht zeigt den Ablauf der Ereignisse auf der Grundlage der Aussagen der Besatzung und der Daten des Schiffsdatenschreibers.



2.3 Untersuchung zu den verlorenen Containern

Am frühen Morgen des Mittwochs, 2. Januar, informierte der Zweite Offizier der MSC ZOE die Verkehrszentrale Wilhelmshaven darüber, dass das Schiff während einer Phase starken Rollens Container verloren habe. Die erste Schätzung ergab, dass etwa 30 Container über Bord gegangen waren. Im Anschluss an den Bericht des Zweiten Offiziers an die Verkehrszentrale Wilhelmshaven wurden die niederländische Küstenwache und das Amt für Wasserwirtschaft⁵ (Rijkswaterstaat) ordnungsgemäß informiert. Es existierte ein Notfallplan für den Verlust von Ladung – ein allgemeines Szenario, das bei diesem Vorfall angewendet wurde.

Im Laufe des Tages wurde jedoch die Zahl der verlorenen Container wiederholt nach oben korrigiert und ein Aktionsplan zur Bergung der Container erstellt. Besonderes Augenmerk wurde auf das Risiko für die Schifffahrt durch in der Fahrrinne schwimmende Container oder Containergruppen gelegt. Rijkswaterstaat setzte sich mit dem Eigentümer der MSC ZOE, der Mediterranean Shipping Company (MSC), in Verbindung und machte sie für die Wiedererlangung der verlorenen Ladung haftbar. Als Reaktion darauf beauftragte die Versicherungsgesellschaft der MSC ein Bergungsunternehmen. In der Zwischenzeit setzte die niederländische Küstenwache im Verkehrstrennungsgebiet ein Wachschiff ein, um den Schiffsverkehr zu dem nördlicher liegenden Verkehrstrennungsgebiet German Bight Western Approach umzuleiten.

In Absprache mit Rijkswaterstaat und der niederländischen Küstenwache erstellte das Bergungsunternehmen einen Aktionsplan zur Bergung der Container. Zu diesem Zeitpunkt, am Abend des Mittwochs, 2. Januar, war die Zahl der als verloren gegangen identifizierten Container auf 270 gestiegen. Innerhalb von vierundzwanzig Stunden war die Küstenwache im Besitz des vollständigen Ladungsverzeichnisses, aber es dauerte länger, genau festzustellen, welche Container verloren gegangen waren.

Bay-Plan

Für die Zuordnung eines Containers an Bord eines Schiffes wird ein Bay-Reihe-Lage-System genutzt, das einem numerischen Koordinatensystem in Bezug auf Länge, Breite und Höhe folgt.

Die Containerreihen auf einem Schiff sind mit geraden Zahlen von der Mitte nach Backbord und ungeraden Zahlen von der Mitte nach Steuerbord nummeriert.

⁵ Rijkswaterstaat ist Teil des niederländischen Ministeriums für Infrastruktur und Wasserwirtschaft und verantwortlich für den Entwurf, den Bau, den Betrieb und die Instandhaltung der wichtigsten Infrastruktureinrichtungen (Straßen, Wasserwege und Wassersystem) in den Niederlanden. Rijkswaterstaat verwaltet und unterhält das Wasserstraßennetz: die wichtigsten Flüsse und Kanäle sowie den niederländischen Teil der Nordsee.

Die Lagen sind mit geraden Zahlen nummeriert, beginnend im Laderaum mit 02, und zählen dann aufwärts mit 04, 06 usw. Bei der Decksladung beginnt die Nummerierung mit 76 oder 78.



Die Bays werden vom Bug zum Heck nummeriert. Eine Bay kann gleichzeitig 20 und 40-Fuß-Container enthalten. Die ungeraden Zahlen werden für die 20-Fuß-Container benutzt und die geraden Zahlen für die 40-Fuß-Container. Zum Beispiel besteht die Bay 10 aus den Bays 9 und 11⁶.

Die Untersuchung an Bord am 2. Januar 2019 ergab, dass zumindest in den Bays 10(9/11), 26(25/27), 42(41/43), 50(49/51) und 58(57/59) Schäden aufgetreten waren. Eine große Anzahl von Containern fehlte und viele weitere waren beschädigt. Insgesamt befanden sich in den fraglichen Bays etwa 1.047 Container. Besonderes Interesse galt den Gefahrstoffcontainern. Bay 26 beherbergte einen 20-Fuß-Container mit 160 Behältern mit Beuteln, die eine Mischung aus 50 % Dibenzoylperoxid und 50 % Dicyclohexylphthalat (50 %) enthielten, und 120 Behälter mit Beuteln, die eine Mischung aus 34 % Dibenzoylperoxid und 66 % Dicyclohexylphthalat enthielten. Bay 26 beherbergte außerdem einen 20-Fuß-Container mit 467 Kisten mit Lithium-Ionen-Batterien mit einem Gesamtgewicht von 1.400 kg. Beide Container befanden sich nicht mehr an Bord. Ein dritter 40-Fuß-Container ragte halb über die Steuerbordseite des Schiffes (siehe Abbildung 5). Durch die Beschädigung und den offenen Deckel verlor der Container den größten Teil seines Inhalts, der aus 22,5 Tonnen winziger Polymerkügelchen bestand.

Mitarbeiter von Rijkswaterstaat reisten auch nach Bremerhaven, wo die MSC ZOE noch im Hafen lag, um festzustellen, welche Container sich noch an Bord befanden. Dieses Vorgehen wurde jedoch dadurch erschwert, dass eine Reihe von Containern, die sich noch an Bord befanden, vollständig zerquetscht worden waren (Abbildung 6).

Nachdem die MSC ZOE ihre letzten Container in Danzig gelöscht hatte, ergab sich die endgültige Zahl von 342 verlorenen Containern.

Siehe Abbildungen 7 bis 12 für einen Überblick zu den beschädigten Containern an Deck.

⁶ Die Abbildung ist erläuternd.

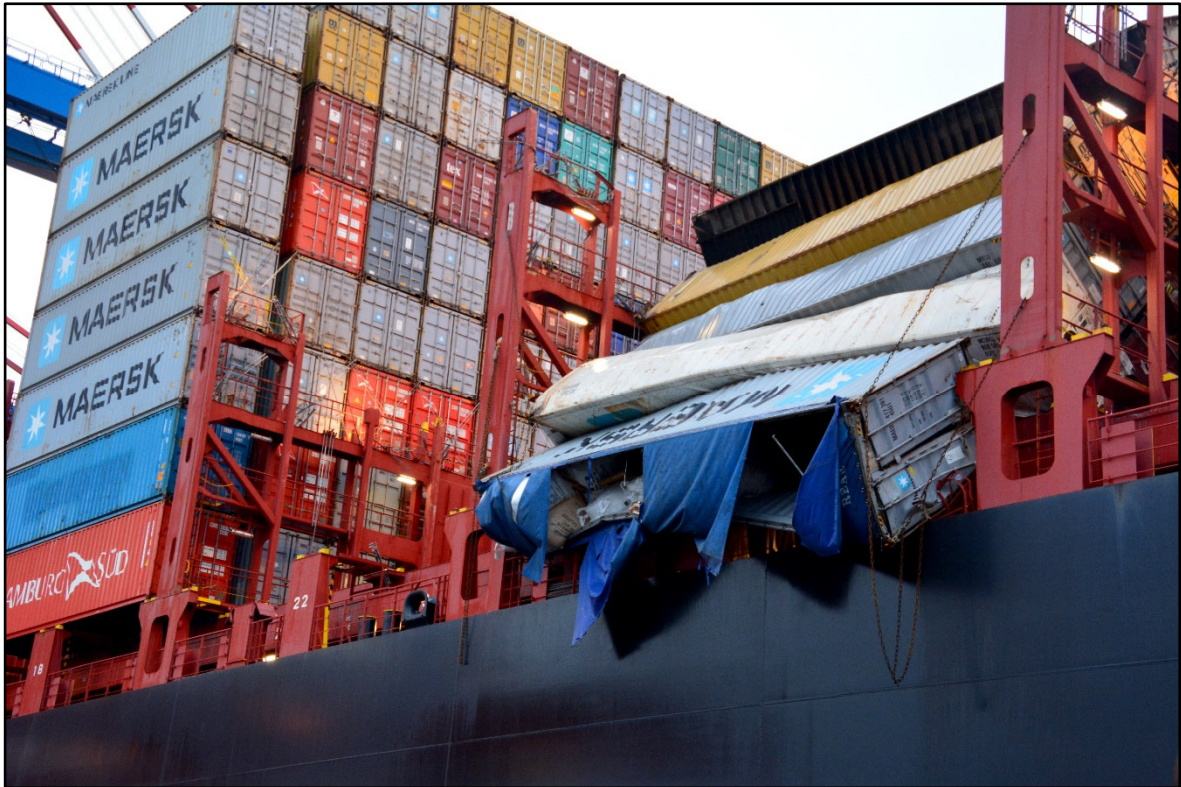


Abbildung 5: Container mit seitlich herabhängenden Beuteln mit Styroporkügelchen. (Quelle: DSB)



Abbildung 6: Zerquetschte Container an Bord der MSC ZOE. (Quelle: DSB)



Abbildung 7: Blick auf Bay 26 (Quelle: DSB)



Abbildung 8: Zusammengestürzte Container in Bay 26. (Quelle: BSU)



Abbildung 9: Zusammengestürzte Reihen in Bay 42 und 50. (Quelle: BSU)

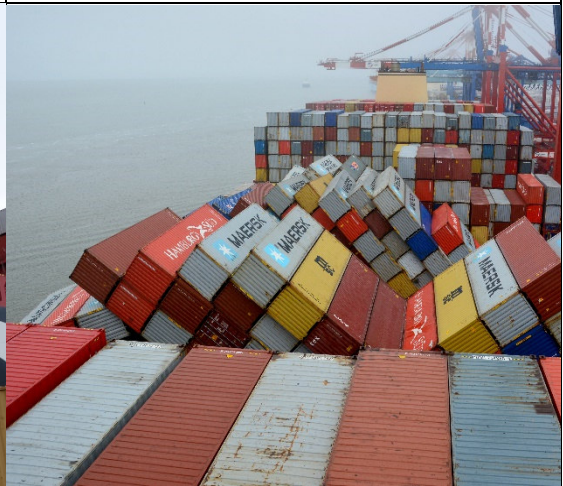


Abbildung 10: Blick auf Bays 42, 50, 54 (Quelle: DSB)

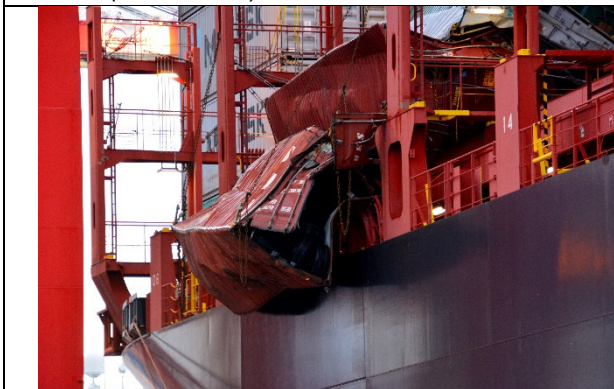


Abbildung 11: Blick auf Bay 10, Backbordseite. (Quelle: DSB)



Abbildung 12: Blick auf Bay 10, Steuerbordseite. (Quelle: Niederländische Küstenwache)

2.4 Schäden am Fahrzeug

Nach dem Einlaufen in Bremerhaven am 3. Januar 2019 wurde die MSC ZOE einer Reihe von Inspektionen und Untersuchungen durch verschiedene Parteien unterzogen. Unter anderem wurde das Schiff einer Hafenstaatkontrolle unterzogen. Dieser Inspektionsprozess führte zu einer Auflage (condition of class) durch die Klassifikationsgesellschaft. Für die MSC ZOE ist der DNV—GL die Klassifikationsgesellschaft. Auflage bedeutet, dass Instandsetzungen unter Aufsicht einer Klassifikationsgesellschaft durchgeführt werden müssen. Die Instandsetzungen müssen dann von einem Sachverständigen der Klassifikationsgesellschaft freigegeben und der Hafenstaatkontrolle zurückgemeldet werden. In Bremerhaven wurde auch mit dem Löschen von Containern begonnen.

Die Hafenstaatkontrolle führte zu einer Bestandsaufnahme der Schäden. Sowohl an Deck als auch an den Laschbrücken waren eine Reihe von Handläufen verbogen oder gebrochen. Auch die Laschbrücken selbst sowie die Feuerklappen und Lüftungsöffnungen waren beschädigt. Ebenfalls war eine Reihe von Luken⁷ beschädigt. Die Bays 10 (9/11), 26 (25/27), 50 (49/51) und 54 (53/55) waren so stark beschädigt, dass sie vorübergehend stillgelegt wurden. Das Schiff wies auch eine Reihe kleinerer Beulen im Rumpf oberhalb der Wasserlinie auf. Keiner der Schäden beeinträchtigte die Seetüchtigkeit des Schiffes dermaßen, dass das Schiff nicht zu seinem späteren Bestimmungshafen fahren konnte.

Die Klassifikationsgesellschaft erlaubte es der MSC ZOE, nach Danzig zu fahren, um die restlichen Container zu löschen. Das Schiff lief am 16. Januar 2019 aus. Während der Fahrt mussten die Ballasttanks im Doppelboden ständig überwacht werden, um sicherzustellen, dass im Zusammenhang mit der Möglichkeit, dass die MSC ZOE in der Phase des starken Rollens mit dem Meeresboden in Kontakt kam, kein Wasser an Bord gelangte. Darüber hinaus legte die Hafenstaatkontrolle fest, dass das Schiff wegen einer möglichen Beschädigung des Schiffsbodens in Danzig inspiziert werden müsse.

In Danzig löschte die MSC ZOE die restlichen Container. Zu diesem Zeitpunkt konnte das endgültige Ausmaß des Schadens bestimmt werden. Im Hafen von Danzig führten Taucher eine Unterwasserinspektion der gesamten Boden- und Bilgenbereiche des Schiffes (der Übergang vom Schiffsboden zur Seitenwand) durch. Im Untersuchungsbericht der Klassifikationsgesellschaft DNV GL heißt es, dass die Taucher *keine Schäden durch Grundberührung* feststellten.

⁷ Luken 3-CS, 3-CP, 3-P, 3-S, 7-P, 7-S, 7-CS, 13-P, 13-S, 13-CS, 13-CP, 14-S.



Abbildung 13: Verbogener Wantenspanner (Quelle: Wasserschutzpolizei BHV)



Abbildung 14: Defekte Befestigung der Laschbrücke (Quelle: Wasserschutzpolizei BHV)



Abbildung 15: Defektes Twistlock an einem verbogenen Decksbeschlag (Quelle: Wasserschutzpolizei BHV)



Abbildung 16: Defekter Wantenspanner (Quelle: Wasserschutzpolizei BHV)



Abbildung 17: Defektes Twistlock am Decksbeschlag (Quelle: Wasserschutzpolizei BHV)



Abbildung 18: Defektes Twistlock (Quelle: Wasserschutzpolizei BHV)

Die Abbildungen 13 bis 18 stellen Nachweise für die Schäden am Laschmaterial und den Decksbeschlägen dar. Einige Containerstapel blieben selbst in Seitenlage durch Twistlocks sicher miteinander verbunden. In den Bays mit beschädigten oder verloren gegangenen

Containern wurden gebrochene Twistlocks gefunden. Es wurden auch verbogene oder deformierte Laschstangen und Wantenspanner sowie gebrochene Halterungen von den Laschbrücken mit einem noch angebrachten Wantenspanner gefunden.

2.5 Umweltschäden

Die MSC ZOE verlor ihre Container nördlich der niederländischen und deutschen Watteninseln. Es wurde geschätzt, dass etwa 3.257 Tonnen (Container und deren Inhalt) ins Meer fielen. Der Großteil des Inhalts der über Bord gegangenen Behälter bestand aus Verbrauchsgütern und dem zugehörigen Verpackungsmaterial. Vor allem Plastikgegenstände wurden in den Tagen nach dem Unfall an die Küste der Watteninseln gespült.

Zwei der verloren gegangenen Container enthielten Gefahrstoffe. Ein Container enthielt 160 Behälter mit Beuteln, die eine Mischung aus 50 % Dibenzoylperoxid und 50 % Dicyclohexylphthalat (50 %) enthielten, und 120 Behälter mit Beuteln, die eine Mischung aus 34 % Dibenzoylperoxid und 66 % Dicyclohexylphthalat enthielten⁸ ⁹. Der zweite Container enthielt 467 Kisten mit Lithium-Ionen-Batterien¹⁰ mit einem Gesamtgewicht von 1.400 kg. Darüber hinaus entstand großer Schaden durch den Verlust von Rohstoffen für die Kunststoffindustrie in Form von Millionen kleiner Kunststoffpartikel. Ein Container enthielt 22,5 Tonnen winzige Polymere Kügelchen¹¹ und winzige Kügelchen aus Polyethylen mit einem Durchmesser von 4 mm, die unmittelbar nach dem Vorfall¹² an die Strände gespült wurden. Der Wind hat diese Plastikpartikel, die aufgrund ihrer geringen Abmessungen nur schwer aus der Umwelt zu beseitigen sind, weitergetragen.

Groß angelegte Säuberungs- und Bergungsarbeiten an der Küste und auf See waren insofern erfolgreich, als der Großteil der verloren gegangenen Ladung geborgen werden konnte. Mitte November 2019 waren 87 % der Container und 75 % der Ladung gefunden und entfernt worden. Es wird erwartet, dass der größte Teil des restlichen verlorenen Inhalts nicht mehr zurückverfolgt und beseitigt werden kann. Schwimmende Objekte breiten sich durch Wind und Meeresströmungen aus, andere landen auf dem Meeresboden.

Die Verschmutzung von Meeren und Ozeanen durch Plastik ist ein weltweites Problem. Es wird geschätzt, dass täglich 13 bis 35 Tausend Tonnen Plastik im Meer verschwinden, das entspricht dem 4- bis 10-Fachen der verloren gegangenen Ladung der MSC ZOE. Da sich Plastik nur sehr langsam abbaut, nimmt die Verschmutzung der Ozeane durch Plastik rasch zu. Auf globaler Ebene scheint der Anteil der MSC ZOE am Plastikproblem von untergeordneter Bedeutung zu sein. Bei regionaler Betrachtung ergibt sich jedoch ein völlig anderes Bild: Nicht nur die Menge der über Bord gegangenen Ladung bestimmte die Schwere der Folgen, auch der Ort, an dem dies geschah, ist von großer Bedeutung. Die MSC ZOE verlor ihre Ladung in der Nähe des Wattenmeeres, einem besonderen Naturschutzgebiet, das von den Vereinten Nationen als Weltnaturerbe gelistet ist.

⁸ UN3106 CLASS 5.2.

⁹ WUR, *Mogelijke ecologische gevolgen containerramp MSC Zoe voor Waddenzee en Noordzee – Een quickscan*, März 2019.

¹⁰ UN3480 CLASS 9.

¹¹ UN2211, Polymeric Beads EXPANDABLE (-) CLASS9(-) PG III.

¹² NIOZ & WUR, *Notitie over de status van het onderzoek naar ecologische effecten van het MSC ZOE incident met focus op microplastics*, 30. Januar 2020.

Wattenmeer

Das Wattenmeer erstreckt sich entlang der Küsten von Dänemark, Deutschland und den Niederlanden und ist das größte Wattengebiet der Welt. Aufgrund der besonderen Umweltbedingungen ist das Wattenmeer zum Lebensraum einer äußerst vielfältigen Flora und Fauna geworden. Zu den Bewohnern gehören Meeressäuger wie der Seehund, die Kegelrobbe und der Schweinswal. Zehn bis zwölf Millionen Vögel ziehen jedes Jahr in das Wattengebiet, um dort Futter zu suchen, zu brüten und zu überwintern.¹³

Ein komplexes Ökosystem mit einer solch großen Vielfalt kann leicht gefährdet sein. Umwelt- und Naturschutzorganisationen unternehmen daher große Anstrengungen, um den natürlichen Lebensraum des Wattengebiets zu erhalten und seine Flora und Fauna zu schützen. Auch die Regierungen betreiben eine Politik zur Erhaltung des Wattenmeeres. Der internationale Status des Wattenmeeres kommt im Folgenden zum Ausdruck:

- Das Gebiet ist auf der von der Europäischen Kommission erstellten Liste der Natura-2000-Gebiete¹⁴ aufgeführt. Die betreffenden Mitgliedstaaten müssen sicherstellen, dass die Gebiete sowohl ökologisch als auch wirtschaftlich nachhaltig bewirtschaftet werden, und daher geeignete Erhaltungsmaßnahmen und Bewirtschaftungspläne aufstellen.
- Die Verwundbarkeit des Wattenmeeres wurde im Jahre 2002 offiziell von der IMO anerkannt, in dem sie das Wattenmeer in Dänemark, Deutschland und Niederlanden als besonders sensibles Seegebiet (PSSA) auswies. Die internationale Anerkennung solcher Gebiete als PSSA eröffnet die Möglichkeit, zusätzliche Schutzmaßnahmen, wie Wegeführung, innerhalb des Mandats der IMO einzuführen
- Seit 2009 ist das Wattenmeer als UNESCO¹⁵-Weltnaturerbe gelistet. Dieser Status verpflichtet die Staaten Dänemark, Deutschland und die Niederlande, gemeinsam für den Schutz und die Erhaltung dieses Naturerbes zu sorgen.¹⁶

¹³ UNESCO World Heritage Centre (2014).

¹⁴ Natura 2000 ist ein Netzwerk von wichtigen Rast- und Brutplätzen für seltene und bedrohte Arten und einige seltene natürliche Lebensraumtypen, die eigenständigen Schutz genießen. Das Netzwerk umfasst alle 27 EU-Länder, sowohl land- als auch seeseitig. Ziel des Netzwerks ist es, das langfristige Überleben der wertvollsten und bedrohtesten Arten und Lebensräume Europas zu sichern, die sowohl in der Vogelschutzrichtlinie als auch in der Habitat-Richtlinie aufgeführt sind. https://ec.europa.eu/environment/nature/natura2000/index_en.htm

¹⁵ United Nations Educational, Scientific and Cultural Organisation.

¹⁶ Convention concerning the protection of the world cultural and natural heritage (1972).

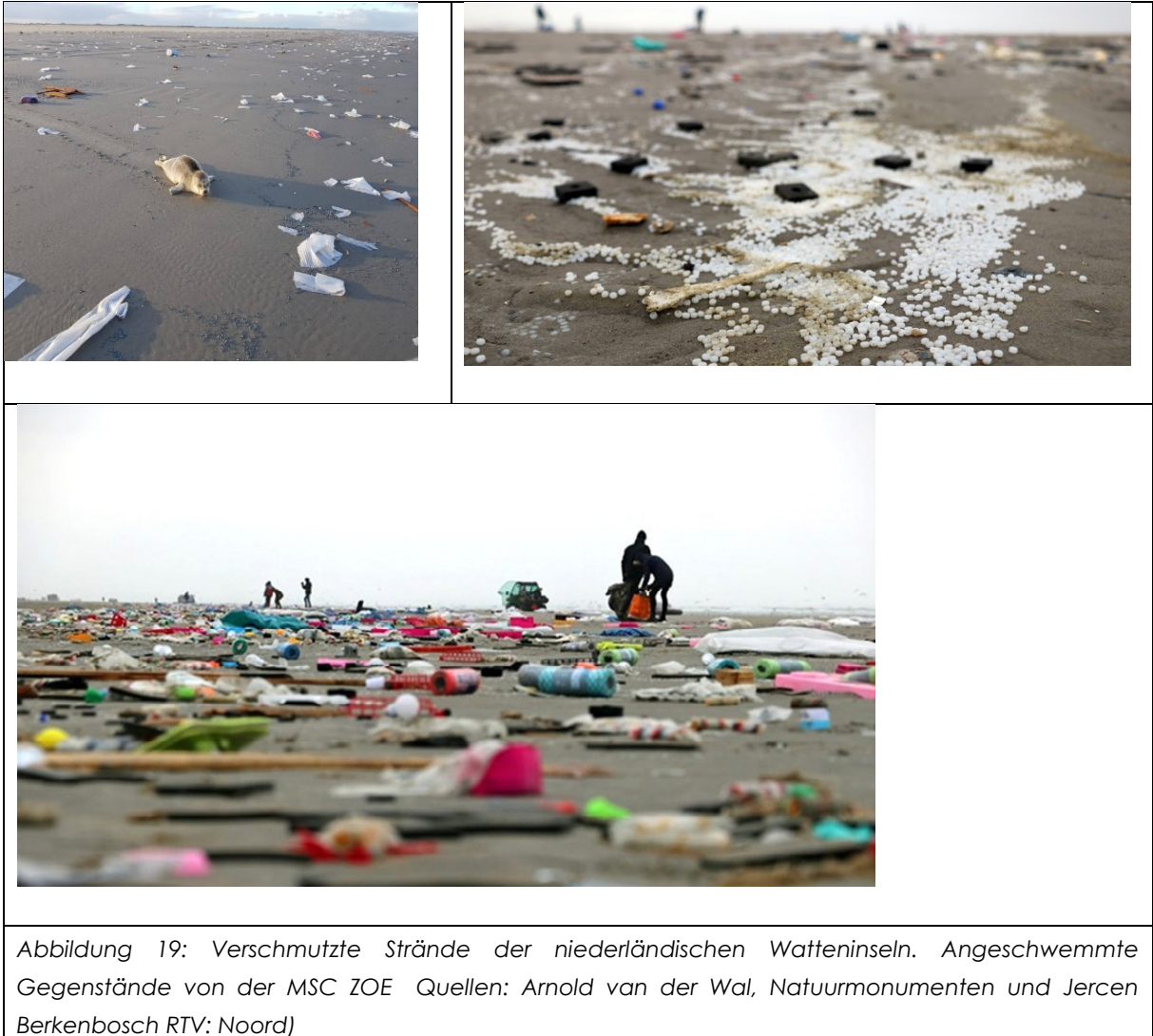


Abbildung 19: Verschmutzte Strände der niederländischen Watteninseln. Angeschwemmte Gegenstände von der MSC ZOE Quellen: Arnold van der Wal, Naturmonumenten und Jercen Berkenbosch RTV: Noord)

2.6 Bergung der verlorenen gegangenen Container

Nach dem Unfall begannen die niederländischen und deutschen Behörden Rijkswaterstaat und das Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Emden gemeinsam mit dem Betreiber des Schiffes und seinem P & I Club unverzüglich die Zusammenarbeit und starteten sofort mit der Organisation der Bergungsarbeiten. Zur Bergung der Container wurden verschiedene Spezialausrüstungen eingesetzt, darunter Schwimmkräne, ein Lastkahn zur Entsorgung der Abfälle, ein Schiff zum Sammeln von schwimmenden Abfällen und Schiffe zur Untersuchung des Meeresbodens.

Das zu untersuchende Gebiet war beträchtlich. Insgesamt wurden rund 4.200 km² überprüft. Zuerst wurde die südliche Fahrrinne des VTG Terschelling–German Bight untersucht, gefolgt von dem Bereich zwischen Fahrrinne und Küste. Die Entscheidung, den Schifffahrtsweg vorübergehend zu sperren, wurde erwogen, aber als sich herausstellte, dass keine wesentlichen Untiefen durch herabgestürzte Containerstapel entstanden waren, wurde entschieden, dass diese Maßnahme nicht notwendig war. Im Rahmen einer Untersuchung des Meeresbodens wurden mehr als sechstausend Objekte identifiziert.

Diese wurden für jeden einzelnen km² kartiert. Die geborgenen Containerreste wurden von der Bergungsfirma zu einer zentralen Sammelstelle transportiert. Für jede einzelne identifizierbare Komponente wurde ein Bergungsbericht erstellt.

Auf der Grundlage der identifizierten Teile (unabhängig davon, ob sie vom Meeresboden geborgen wurden oder nicht) stellte Rijkswaterstaat fest, welche Teile in welchen Containern enthalten waren und wo sie an Bord der MSC ZOE verstaut worden waren, indem die Bergungsberichte mit dem Ladungsverzeichnis abgeglichen wurden.

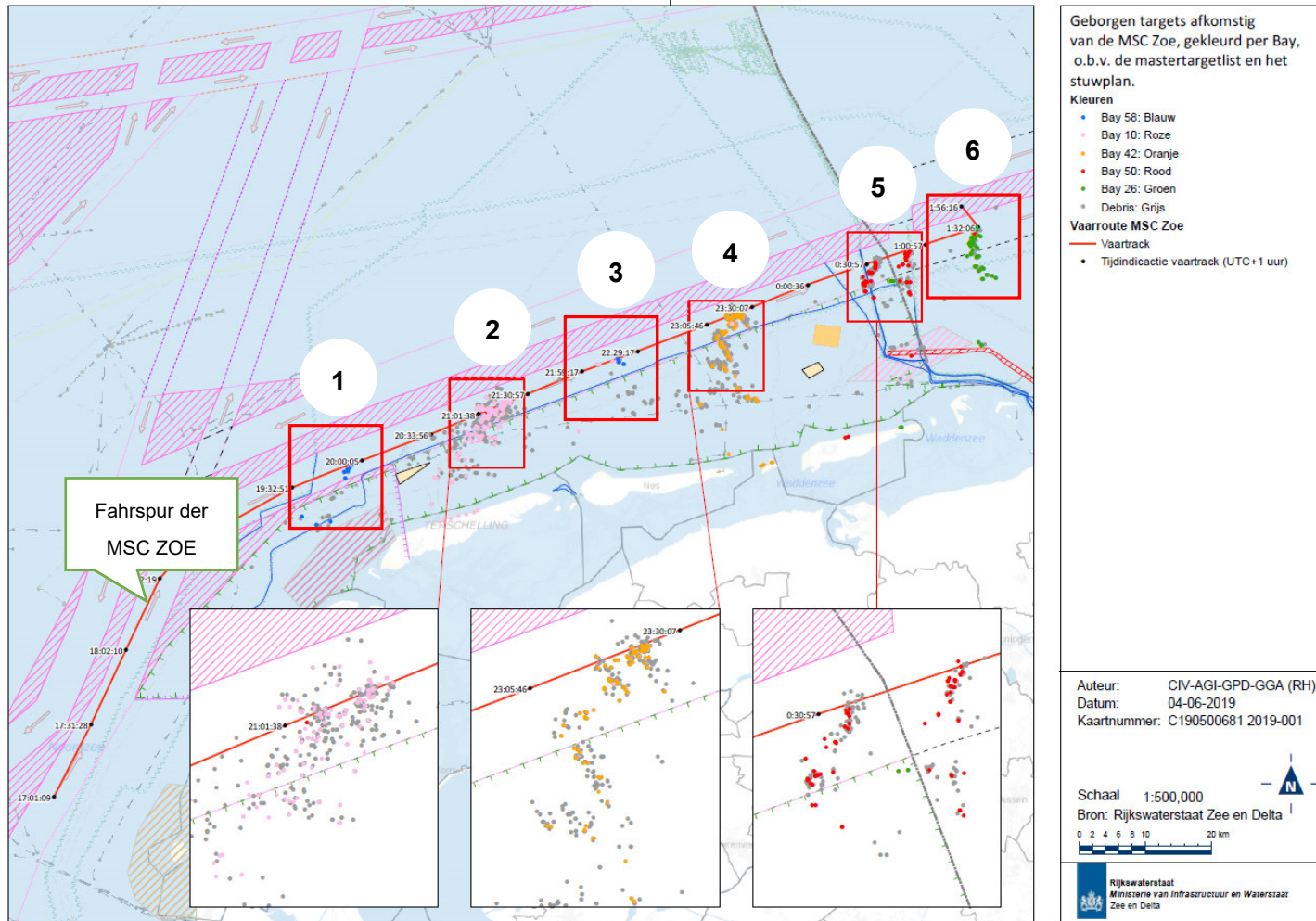


Abbildung 20: Bergungsorte der verloren gegangenen Container. Es konnten sechs Hauptorte identifiziert werden. Die Farben entsprechen den Bay-Nummern an Bord des Schiffes: Blau=Bay 58, Rosa=Bay 10, Orange=Bay 42, Rot=Bay 50, Grün=Bay 26, Grau=Trümmer. Fahrspur der MSC ZOE in Rot. (Quelle: Rijkswaterstaat, die sechs Standorte wurden vom Untersuchungsteam hinzugefügt)

Abbildung 20 zeigt, dass an sechs Orten eine größere Anzahl von Containern geborgen wurde. Anhand der Fahrtroute der MSC ZOE konnte rekonstruiert werden, wo und wann welche Container über Bord gingen. Die MSC ZOE verlor Container aus den Bays 10 (9/11) (Rosa), 26 (Grün), 42 (Orange), 50 (Rot) und 58 (Blau). Die Bays 46 und 54 enthielten ebenfalls beschädigte Container, die jedoch nicht über Bord gingen (siehe Kapitel 4).

Die ersten Container gingen kurz vor 20:00 Uhr über Bord (blaue Punkte in Abbildung 20). Zu dieser Zeit befand sich die MSC ZOE nördlich des östlichsten Punktes von Vlieland. Diese Container stammten aus Bay 58 in der Mitte des Schiffes (siehe Abbildung 21). Die auffälligste Tatsache bezogen auf das anfängliche Überbordgehen war, dass alle Container auf der Steuerbordseite über Bord gingen (siehe Abbildung 22).

Das zweite Überbordgehen von Containern ereignete sich zwischen 21:05 und 21:20 Uhr (rosa Punkte in Abbildung 20). Zu dieser Zeit befand sich die MSC ZOE nördlich von Terschelling. Diese Container stammten aus Bay 10 am Bug des Schiffes (siehe Abbildung 21). An beiden Seiten des Schiffes ging ungefähr die gleiche Anzahl an Containern über Bord (siehe Abbildung 22).

Das dritte Überbordgehen ereignete sich um etwa 22:20 Uhr. Eine Reihe zusätzlicher Container aus den Bays 58 und 10 ging dabei über Bord. Insgesamt gingen 21 Container aus Bay 58 verloren, sowohl beim ersten als auch beim dritten Überbordgehen. Es ist nicht mehr möglich, genau zu bestimmen, wie viele Container aus dieser Bay beim ersten bzw. dritten Überbordgehen verloren gingen. Nur die Gesamtzahl der Container, die zu diesen beiden Zeitpunkten aus Bay 58 über Bord gingen, ist bekannt. Dasselbe gilt für die Container aus Bay 10 (9/11), die beim zweiten und dritten Überbordgehen verloren gingen. Insgesamt gingen 93 Container aus Bay 10 (9/11) verloren (siehe Abbildung 22).

Das vierte Überbordgehen von Containern ereignete sich um ca. 23:20 Uhr (orange Punkte in Abbildung 20). Zu dieser Zeit befand sich die MSC ZOE nördlich des östlichsten Punktes von Ameland. Diese Container stammten aus Bay 42, die hinter der Brücke liegt (siehe Abbildung 20). Auf der Steuerbordseite ging eine etwas größere Zahl Container über Bord als auf der Backbordseite. Einige Container aus dem mittleren Bereich der Bay gingen ebenfalls über Bord sowie 65 Container aus Bay 42 (siehe Abbildung 22).

Das fünfte Überbordgehen von Containern ereignete sich zwischen 00:35 und 00:50 Uhr (rote Punkte in Abbildung 20). Zu dieser Zeit befand sich die MSC ZOE nördlich der östlichen Spitze von Schiermonnikoog. Diese Container stammten aus Bay 50 in der Mitte des Schiffes (siehe Abbildung 21). Auf der Steuerbordseite ging eine etwas größere Zahl Container über Bord als auf der Backbordseite. Insgesamt gingen 80 Container aus Bay 50 über Bord (siehe Abbildung 22).

Das sechste und letzte Überbordgehen von Containern ereignete sich um ca. 01:30 Uhr (grüne Punkte in Abbildung 20). Zu dieser Zeit befand sich die MSC ZOE nördlich von Rottumerplaat und Rottumeroog. Diese Container stammten aus Bay 26, direkt vor der Brücke des Schiffes (siehe Abbildung 21). Auch hier gingen etwas mehr Container von der Steuerbordseite als von der Backbordseite über Bord; letztendlich gingen 83 Container aus

Bay 26 über Bord. Unter diesen Containern befanden sich auch zwei Container mit Gefahrstoffen. Im Gegensatz zu den vorangegangenen Verlusten wurde dieses Überbordgehen von Containern vom Kapitän und einigen Besatzungsmitgliedern beobachtet.

2.7 Daten des Schiffsdatenschreibers

Die MSC ZOE war mit einem Schiffsdatenschreiber (VDR) ausgestattet¹⁷, die mehrere Parameter und Audiosignale aufzeichnete, unter anderem während der Passage des VTG Terschelling–German Bight. Die Daten aus dem VDR standen für die Untersuchung zur Verfügung.

Abbildung 23 zeigt relevante Informationen des VDR vom 1. Januar 2019, 17:10 Uhr Ortszeit bis 02:53 Uhr am 2. Januar 2019.

Um etwa 18:50 Uhr, als die MSC ZOE in das VTG Terschelling–German Bight einlief, begann die Drehrate (ROT) zu steigen. Das Schiff fuhr zu dieser Zeit mit einer Geschwindigkeit von etwa 13–14 Knoten. Das Schiff begann ständig zu rollen: Wenn ein Schiff zu krängen beginnt, beginnt es auch, sich zu drehen.

Um etwa 20:08 Uhr reduzierte sich die Motordrehzahl (Umdrehungen pro Minute), gefolgt von einer Verringerung der Schiffsgeschwindigkeit auf etwa 9 Knoten. Etwa zur gleichen Zeit ist zu beobachten, dass als Folge der Umstellung von automatischer auf manuelle Steuerung sowohl die Rudersteuerung als auch der Ruderwinkel plötzlich zunahm. Infolgedessen stieg die Drehrate (ROT) weiter an.

Der VDR zeichnete auch die durch die Echolote gemessene Kielfreiheit (under keel clearance, UKC) auf. Die MSC ZOE verfügt über zwei Echolote, eines an Steuerbord, 4,40 m achtern entlang der Mittellinie des Schiffes und eines auf der Mittellinie des Schiffes vorne installiert. Die Echolote ermitteln die Tiefe, die vom Echolot bis zum Meeresboden gemessen wird, und geben auch den Versatz zwischen dem Echolot und der Wasseroberfläche an. Letzterer muss manuell eingestellt werden. Bei den angezeigten Daten handelt es sich um die gemessene Tiefe vom Echolot zum Meeresboden. Die Daten zeigen, dass die gemessene Kielfreiheit zwischen 11 m und 19 m schwankte. Von 20:00 bis 21:00 Uhr nahm die Kielfreiheit ab und es wurden Werte bis zu 5 m gemessen. Ab 21:30 Uhr zeigen die Daten wieder Werte über 10 m. Um 01:30 Uhr wurden dann Werte von 6 m Kielfreiheit aufgezeichnet. Nach dem Kurswechsel um 01:34 Uhr beginnt auch die gemessene Kielfreiheit zu steigen. Die Daten zeigen einige unrealistische Amplituden in kurzer Zeit und können daher als Störsignale wie unten erläutert angesehen werden.

Echolote und Störsignale

Ein Echolot misst die Wassertiefe, indem es einen Ton (einen „Ping“) zum Grund des Gewässers sendet und dann die Reflexion (Echo) des Schalls mithilfe des Empfängers empfängt. Die Zeit zwischen dem Senden des Schalls und dem Empfang des Schalls multipliziert mit der Schallgeschwindigkeit im Wasser geteilt durch zwei (der Schall geht nach unten und wieder nach oben) ergibt die Wassertiefe. Dies folgt zwar einem einfachen

¹⁷ Bei dem VDR handelte es sich um einen Consilium F2 VDR dessen jährliche Funktionsprüfung am 25. Juli 2018 stattgefunden hatte.

Prinzip, aber es gibt verschiedene Arten von Störungen, die bei der Messung der Wassertiefe auftreten können. Störsignale sind eine unerwünschte Änderung eines Signals, die Messfehler verursacht.

Nachfolgend finden Sie eine Liste mit Beispielen, die bei Echolot-Messungen Störsignale verursachen können.^{18, 19} Diese Liste erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

- Wasser- und Bodenbeschaffenheit. Die Schallgeschwindigkeit ändert sich bei unterschiedlichen Wassertemperaturen, Salzgehalt und Druck. Die Reflexion des „Ping“ des Echolots ändert sich je nach Bodentyp, z. B. Fels gegenüber Schlamm, und Neigung des Bodens.
- Elektronische Interferenzen. Andere elektronische Geräte, die sich in der Nähe der Echolotverkabelung befinden, können Störsignale verursachen.
- Schiffsgeräusche. Das Schiff selbst erzeugt Geräusche, z. B. durch den Propeller und Vibrationen des Rumpfes, die die Messungen des Echolots stören können.
- Ein vorangegangener „Ping“, der mehrmals reflektiert wird, bevor er zum Empfänger gelangt, kann den nächsten „Ping“ stören.
- Stampfen und Rollen des Schiffes. Wenn der Rollwinkel des Schiffes zu groß wird, kann es passieren, dass der „Ping“ nicht mehr gerade nach unten geht, sondern stattdessen in einem Winkel misst, wodurch die gemessene Wassertiefe fälschlicherweise vergrößert wird (Ausreißer)²⁰.

Einige Störungen können durch Software reduziert werden, aber das ist nicht immer möglich. In Abbildung 23 ist die Messung des Echolots dargestellt. Es zeigen sich mehrere Spitzen bei 50 m oder sogar 100 m. Diese werden als Störsignale betrachtet, da solche Wassertiefen an diesen Standorten der MSC ZOE nicht vorkommen. Da diese Spitzen während der Zeit aufzutreten beginnen, in der auch die Rollbewegung zunimmt, handelt es sich wahrscheinlich um Störungen (Ausreißer), die durch das Rollen des Schiffes verursacht sind oder durch Schiffsgeräusche, die während dieser Phase der Reise verstärkt auftreten.

¹⁸ EA640 Hydrographic single beam echo sounder Installation Manual, Kongsberg, 2018.

¹⁹ FE-800 Operator's Manual Navigational Echo Sounder, Furuno, 2014.

²⁰ Der Fehler, der aufgrund von Rollen und Stampfen auftritt, ist den Herstellern bekannt und wird, je nach Hersteller, durch Datenreduzierungs-Methoden korrigiert.

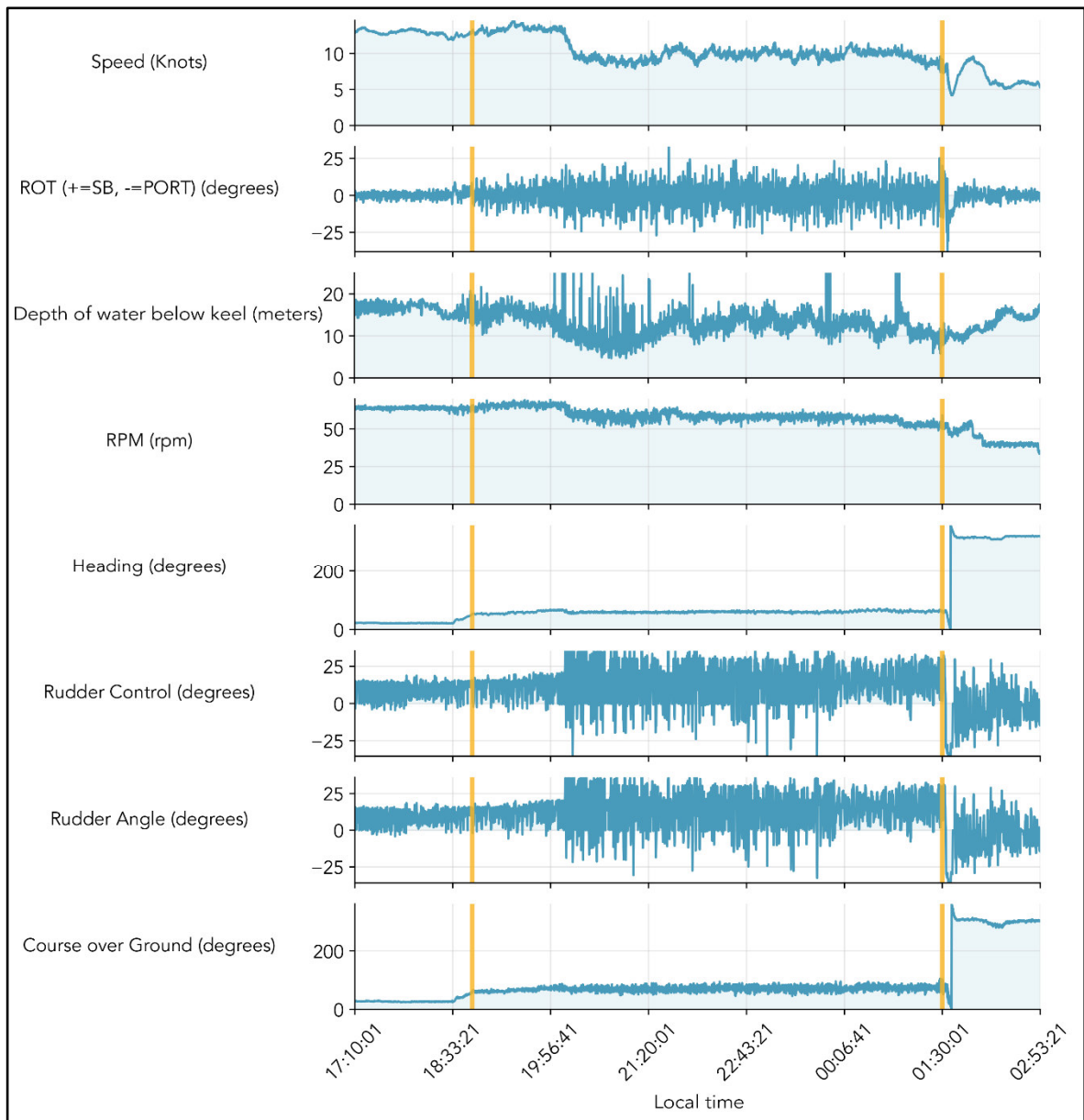


Abbildung 23: Ausgewählte Daten des Schiffsdatschreibers (VDR) zur Ortszeit

2.8 Abfolge der Ereignisse

Vergleicht man die Aussagen der Besatzung mit den Bergungsdaten der Container, so zeigt sich, dass während der Passage zu mindestens sechs Zeitpunkten größere Mengen an Containern über Bord gingen, dass aber fünf dieser Verluste von der Besatzung nicht bemerkt wurden. Um 01:00 Uhr bemerkte der Kapitän zusammengestürzte Containerstapel hinter der Brücke. Erst der sechste Verlust von Containern um 01:30 Uhr wurde von der Besatzung tatsächlich beobachtet. Die Schiffsgröße, die ständigen Bewegungen des Schiffes, Geräusche auf der Brücke aufgrund von Wind und sich verschiebenden Gegenständen sowie die nächtlichen Bedingungen haben wahrscheinlich dazu beigetragen, dass das Überbordgehen unbemerkt blieb.

Das erste Überbordgehen betraf nur Container auf der Steuerbordseite. In den anderen fünf Fällen gingen Containern an beiden Seiten des Schiffes über Bord.

Abbildung 24 fasst die Abfolge der Ereignisse zusammen und kombiniert sie mit Daten des VDR, den auf Aussagen der Besatzung über die wahrgenommenen Schiffsbewegungen basierenden Informationen und den auf den Containerbergungsdaten basierenden Hauptverlustzeitpunkten der Container.

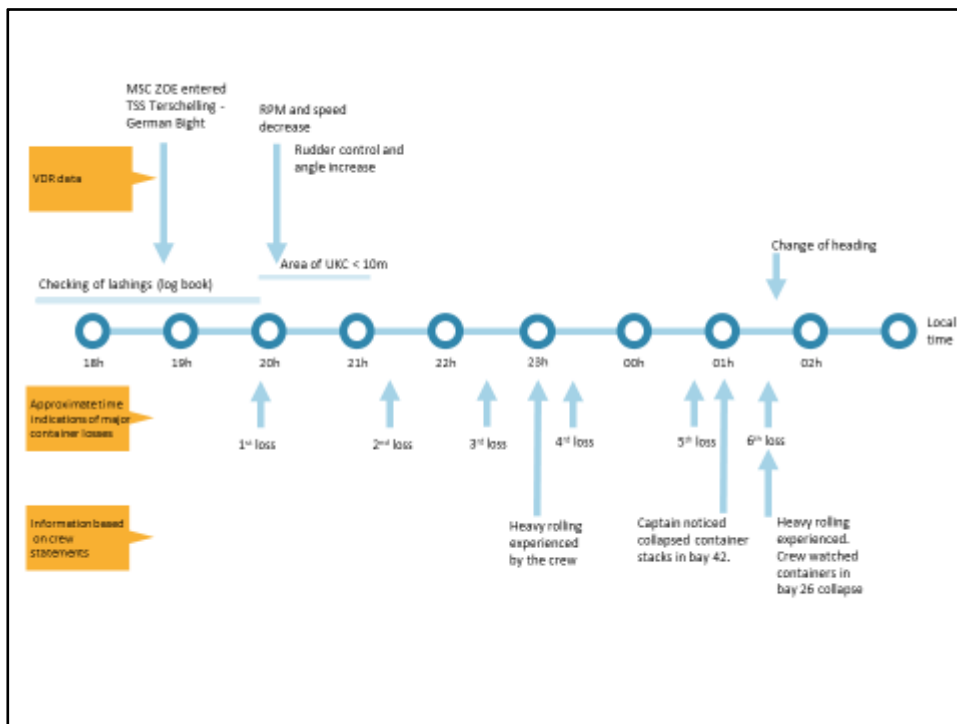


Abbildung 24: Abfolge der Ereignisse

Laut Aussagen der Besatzung war die MSC ZOE im VTG Terschelling–German Bight kontinuierlichen Rollbewegungen von 5° bis 10° mit gelegentlichen Phasen stärkeren Rollens (15°- 30° Spitzen) ausgesetzt. Die VDR-Daten bestätigen, dass die MSC ZOE beim Einlaufen in das VTG Terschelling–German Bight ständig rollte.

Der erste Überbordgehen von Containern von der MSC ZOE ereignete sich am 1. Januar um 20:00 Uhr Ortszeit. Insgesamt gingen zu mindestens sechs Zeitpunkten Container über Bord. Die Besatzung stellte den Verlust oder das Zusammenstürzen der Container erst am 2. Januar um 01:00 Uhr fest. Das letzte Überbordgehen, von Bay 26, ereignete sich eine halbe Stunde später, gegen 01:30 Uhr, und wurde von der Besatzung beobachtet.

In den Bays mit beschädigten oder über Bord gegangenen Containern wurden gebrochene Twistlocks, gebrochene oder verbogene Wantenspanner und gebrochene Halterungen von den Laschbrücken gefunden.

Es wurde kein Besatzungsmitglied verletzt, aber insgesamt gingen 342 Container über Bord. Die Container und ihr Inhalt haben die Wattenmeerregion in den Niederlanden und Deutschland stark verschmutzt.

3 SCHIFF UND BESATZUNG

3.1 Ultragroßes Containerschiff MSC ZOE

Das unter der Flagge von Panama fahrende Containerschiff MSC ZOE ist ein DNV GL SE modernes Containerschiff neuester Generation. Es wurde 2014 in der Republik Korea von Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co. gebaut und 2015 an MSC geliefert. Das Schiff hat eine Container-Gesamtkapazität von 19.224 TEU, was einer Tragfähigkeit von fast 200.000 Tonnen entspricht. Das Schiff hat eine Gesamtlänge von 395,4 m und eine Breite von 59 m. Es verfügt über 24 40-Fuß-Container-Bays an Deck (zwei 20-Fuß-Container passen in eine 40-Fuß-Bay), die von 2 bis 94 nummeriert sind. Die Firma MSC setzt das Schiff im Liniendienst zwischen Europa und dem Fernen Osten ein. Die Schiffsdaten sind in Anhang A aufgeführt.

3.2 Informationen über die Besatzung

Die Besatzung der MSC ZOE bestand aus 22 Personen. Die Zusammensetzung der Besatzung entsprach den Vorgaben des Schiffsbesatzungszeugnisses, und die Offiziere verfügten über die erforderlichen Qualifikationen. Aus den Aufzeichnungen der Ruhezeiten geht hervor, dass die Offiziere der Brückenwache und der Kapitän die Ruhezeiten eingehalten haben, die sogar über die gesetzlichen Mindestanforderungen gemäß dem Seearbeitsübereinkommen (MLC) hinausgehen.

Der Kapitän, zum Zeitpunkt des Unfalls 64 Jahre alt, ging am 5. November 2018 in Singapur an Bord und verfügt über ein italienisches STCW II/2 Zeugnis. Er trat 1973 als Kadett in das Unternehmen ein, wurde befördert und 1986 Erster Offizier und ab 1997 Kapitän. Er fuhr auf Massengutschiffen, Stückgutfrachtern und Containerschiffen. Es war sein erster Kontrakt auf der MSC ZOE, aber der vierte Kontrakt auf vergleichbaren Schiffsgößen und -typen.

Der 33-jährige Erste Offizier, der am 2. November 2018 in Singapur an Bord kam, verfügt über ein STCW II/2 Zeugnis aus Montenegro. Er trat 2004 als Kadett in das Unternehmen ein, war ab 2006 bzw. 2008 Dritter bzw. Zweiter Offizier und ist seit 2012 Erster Offizier.

Der Zweite Offizier, 24 Jahre alt, ging am 2. November 2018 in Singapur an Bord, verfügt über ein STCW II/2 Zeugnis aus Montenegro und trat 2013 als Kadett in das Unternehmen ein. Er wurde 2015 zum Dritten Offizier befördert, ist seit 2017 als Zweiter Offizier tätig und hatte den dritten Kontrakt mit der Firma MSC.

Der dritte Offizier, 31 Jahre alt, ging am 2. November 2018 in Singapur an Bord. Er begann seine Karriere im Jahr 2010 als Kadett und ist seit 2016 Dritter Offizier. Er verfügt über ein

italienisches STCW II/2 Zeugnis und war im ersten Kontrakt auf der MSC ZOE, war aber zuvor auf der MSC ERICA, ein Schiff mit ähnlichen Abmessungen, im Einsatz.

Die Brückenbesetzung ist in der nachstehenden Tabelle dargestellt. Die Brücke war mit dem wachhabenden Offizier und dem Rudergänger/Ausguck besetzt. Im regulären Plan war der Kapitän nicht als wachhabender Offizier vorgesehen. Er hatte die Möglichkeit, flexibel zu arbeiten und stand bei Bedarf auf Abruf zur Verfügung. Aufgrund der sich verschlechternden Wetterbedingungen befand sich am 1. Januar ab ca. 16:00 Uhr auch der Kapitän auf der Brücke und übernahm ab 19:00 Uhr das Kommando (siehe Tabelle 1).

Brückenbesetzung der (1. Januar)		Zus. Informationen
00:00 – 04:00 Uhr	Zweiter Offizier + Rudergänger/Ausguck	
04:00 – 08:00 Uhr	Erster Offizier + Rudergänger/Ausguck	
08:00 – 12:00 Uhr	Dritter Offizier + Rudergänger/Ausguck	
12:00 – 16:00 Uhr	Zweiter Offizier + Rudergänger/Ausguck	
16:00 – 19:00 Uhr	Erster Offizier + Rudergänger/Ausguck	<i>Kapitän auf der Brücke, nicht im Kommando</i>
19:00 – 24:00 Uhr	Dritter Offizier + Rudergänger/Ausguck	<i>Kapitän auf der Brücke, im Kommando</i>
00:00 – 04:00 Uhr	Zweiter Offizier + Rudergänger/Ausguck	<i>Kapitän auf der Brücke, im Kommando</i>

Tabelle 1: Brückenbesetzung

Am 1. Januar vermerkte der wachhabende Erste Offizier im Logbuch, dass von 16:00 Uhr bis 20:00 Uhr die Laschausrüstung der Container, Gefahrgüter, Kühlcontainer, Laderäume und Bilgen überprüft und „alles in Ordnung“ gemeldet wurde. Aufgrund der sich ständig verschlechternden Wetterbedingungen befahl der Kapitän, mit Handsteuerung fortzufahren, und die Umdrehungszahl wurde ebenfalls reduziert, was zu einer Verringerung der Geschwindigkeit führte.

Bei der MSC ZOE handelt es um ein ultragroßes Containerschiff mit einer Container-Gesamtkapazität von 19.224 TEU. Das Schiff wird im Liniendienst zwischen Europa und dem Fernen Osten eingesetzt.

Für die Fahrt von Sines (Portugal) nach Bremerhaven (Deutschland) bestand die Besatzung aus 22 Mitgliedern. Die Offiziere an Bord wiesen die erforderlichen Qualifikationen auf.

Aufgrund der Verschlechterung des Wetters am 1. Januar 2019 blieb der Kapitän auf der Brücke und ordnete Handsteuerung und eine Reduzierung der Geschwindigkeit an.

4 STAUUNG UND SICHERUNG DER CONTAINER

4.1 Allgemeine Ladungsinformationen

Auf der Fahrt von Sines nach Bremerhaven beförderte die MSC ZOE 8.062 Container²¹ (siehe Tabelle 2). Die Container wurden auf Deck der MSC ZOE in sieben bzw. acht Lagen auf den Lukendeckeln gestapelt.

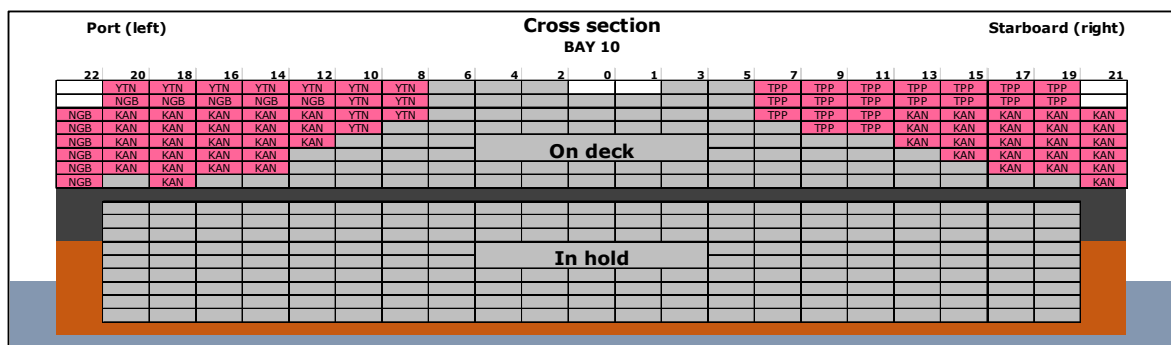
	Laderaum	An Deck	Gesamt
20 Fuß	2.392	267	2.659
40 Fuß/45 Fuß	2.090	3.313	5.403 ²²
Gesamt	4.482	3.580	8.062

Tabelle 2: Übersicht über die Anzahl der Container

Die Container wurden in Häfen in China geladen: Xingang (TXG), Ningbo (NGB), Shanghai (SHA) und Yantian (YTN). Das Schiff lud auch Container in Malaysia: Tanjung Pelepas (TPP) und in Korea: Gwangyang (KAN). Die Container waren für Sines (Portugal), Bremerhaven (Deutschland) und Danzig (Polen) bestimmt.

In den folgenden Bay-Plänen sind die verloren gegangenen Container je Bay farblich gekennzeichnet, je nachdem, wo die Container oder Teile der Container gefunden wurden. Die MSC ZOE verlor Container aus den Bays 10 (9/11) (Rosa), 26 (Grün), 42 (Orange), 50 (Rot) und 58 (Blau). Die Container, die an Bord in den jeweiligen Bays verblieben sind, sind grau²³gefärbt.

Die von Bay 10²⁴ über Bord gegangenen Container wurden in allen oben genannten asiatischen Häfen mit Ausnahme von Xinyang und Shanghai geladen und waren für Danzig



²¹ Siehe Anhang A.

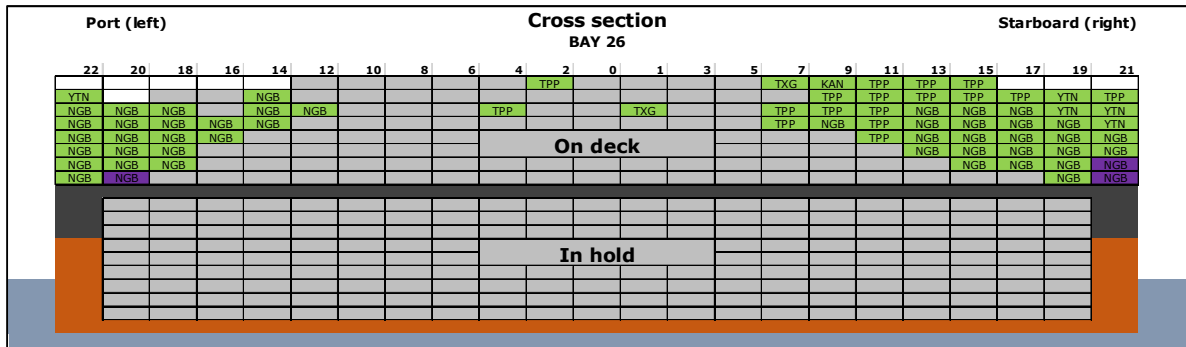
²² Davon 2.656 45-Fuß-Container.

²³ Die im Laderaum angezeigten Container entsprechen nicht der tatsächlichen Situation.

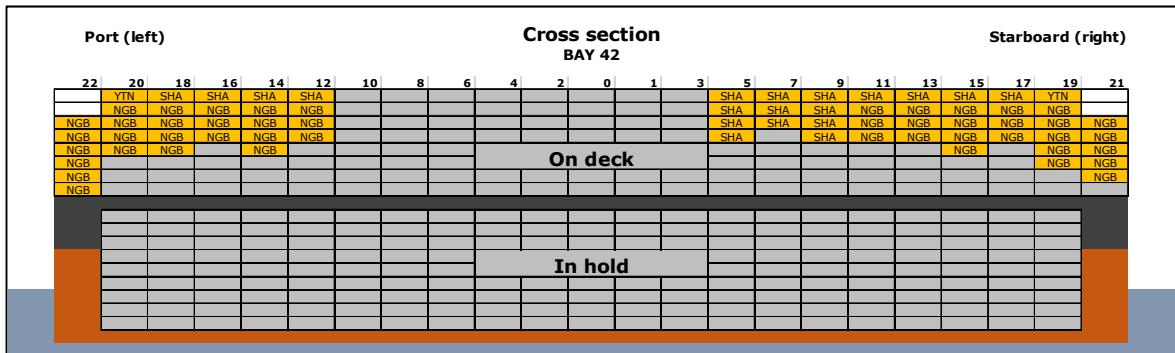
²⁴ Bays 9 und 11.

bestimmt.

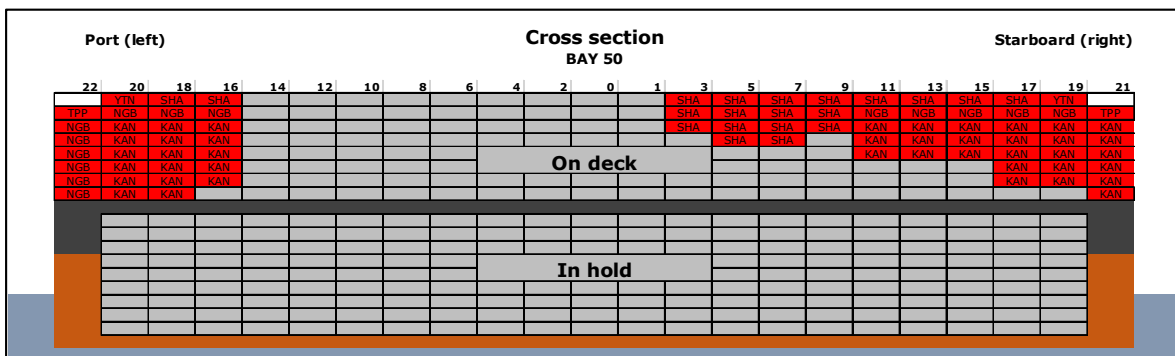
Die von Bay 26 über Bord gegangenen Container wurden in allen asiatischen Häfen mit Ausnahme von Shanghai geladen und waren für Danzig bestimmt. Bay 26 enthielt 3 Container mit Gefahrgütern (violett markiert). Die beiden Container auf der Steuerbordseite gingen über Bord, der Container auf der Backbordseite verblieb an Bord, verlor jedoch einiges von seiner Ladung.



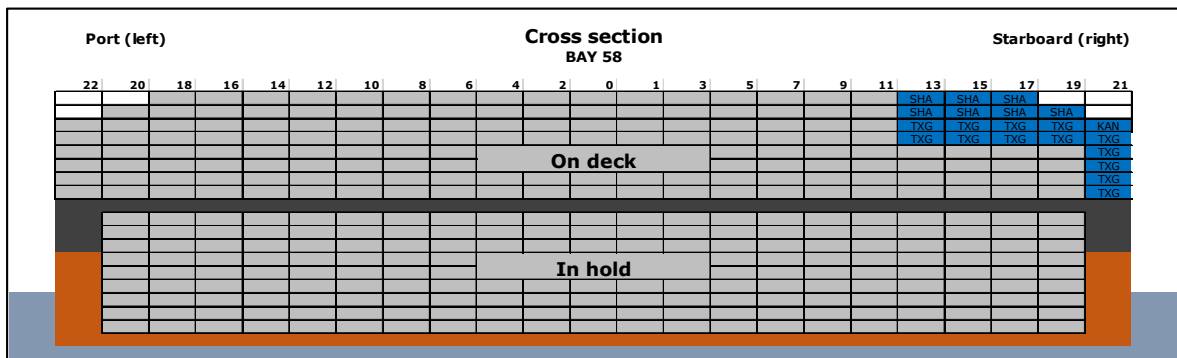
Die von Bay 42 über Bord gegangenen Container wurden in Ningbo, Shanghai und Yantian geladen und waren für Danzig bestimmt.



Die von Bay 50 über Bord gegangenen Container wurden in allen asiatischen Häfen mit Ausnahme von Gwangyang und Shanghai geladen und waren für Danzig bestimmt.



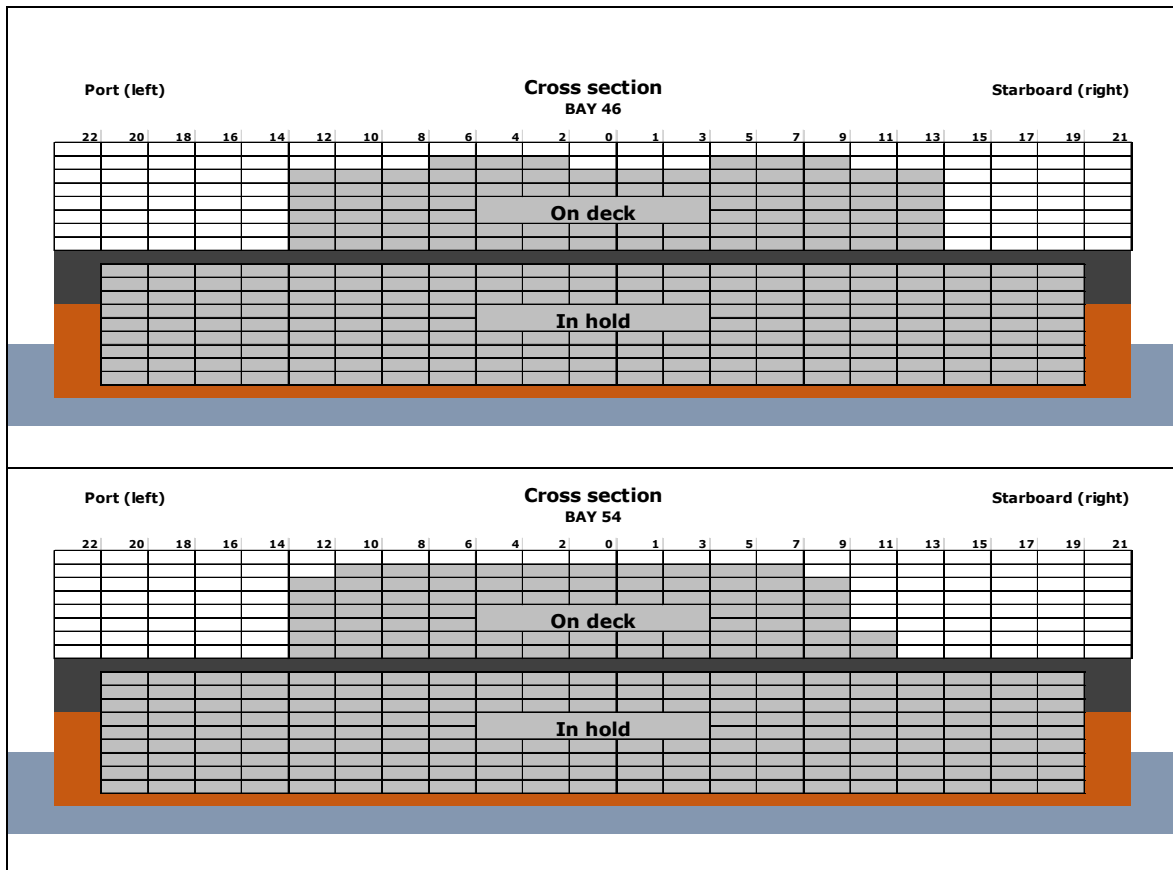
Die von Bay 58 über Bord gegangenen Container wurden in Xinyang, Gwanyang und Shanghai geladen und waren für Danzig bestimmt.



Es gingen keine Container von Bay 46 und Bay 54 über Bord, aber sie befinden sich zwischen Bays, von denen Container über Bord gingen. Aus den Bay-Plänen von Bay 46 und Bay 54 ist ersichtlich, dass sie keine Container enthielten, die sich nahe an den Seiten des Schiffes befanden.



Abbildung 25: Draufsicht auf die Bays mit über Bord gegangenen Containern.
(Quelle: Niederländische Küstenwache)



Die über Bord gegangenen Container waren mit einer Vielzahl von Gütern beladen: von Autoteilen bis hin zu Möbeln, Handtaschen, Werkzeugen, Körben, Lampen und Beleuchtungskörpern, Fernsehern, Reifen, Sportartikeln, Spielzeug und Batterien. Die MSC ZOE beförderte auch Kühlcontainer, aber keiner von ihnen ging über Bord.

4.2 Ladungssicherung

Die Vorschriften des Internationalen Übereinkommens zum Schutz des menschlichen Lebens auf See (SOLAS) sehen vor, dass die Ladung während der gesamten Fahrt in Übereinstimmung mit dem Code of Safe Practice for Cargo Stowage and Securing (CSS-Code²⁵) zu laden, zu stauen und zu sichern ist. Der Code liefert Informationen zum richtigen Stauen und Sichern der Ladung und soll als Grundlage des Ladungssicherungshandbuchs (CSM) dienen. Das Ladungssicherungshandbuch ist speziell auf das Schiff abgestimmt und beschreibt das Stauen und die Laschaurüstung für Container. Die im Ladungssicherungshandbuch des Schiffes beschriebenen Vorkehrungen zur Ladungssicherung sollten auf den zu erwartenden Kräften basieren, die auf die vom Schiff beförderte Ladung wirken, berechnet nach der in Anhang 13 des CSS-Codes beschriebenen Methode oder nach einer von der Verwaltung freigegebenen oder der von einer Klassifikationsgesellschaft genehmigten Verfahrensweise.

²⁵ IMO Res. A.714(17) (MSC/Circ.1026).

Die Container werden anhand eines Bay-Reihe-Lage-Systems geladen, das einem numerischen Koordinatensystem folgt (siehe auch Abschnitt 2.3). Das Stauen und Sichern der Ladung dient dem Ableiten von Kräften. Die Querkräfte nehmen u. a. mit der Stauhöhe zu. Die wirkenden Querkräfte nehmen direkt mit dem GM-Wert (Stabilität) des Schiffes zu.

Die meisten Containerschiffe sichern die Container im Laderaum mithilfe von vertikalen Stellgerüsten und stauen sie an Deck in Form von Stapeln auf den Lukendeckeln. Bei der Sicherung von Containern an Deck greift man auf eine Verriegelung der Container mittels Decksbeschlägen, die Verbindung der Container untereinander mit Twistlocks und ein System von Laschstangen zurück. Die Container der untersten Lage auf dem Lukendeckel werden dabei auf fest montierten Twistlocks positioniert. Die Container der weiteren Lagen werden übereinandergestapelt und mit Twistlocks verbunden. Laschings werden bis zur dritten Lage angebracht, obwohl dies je nach Schiff variieren kann. Die Laschings werden diagonal befestigt, sodass der Container und die Laschings zusammenwirken, um einer Querverwindung entgegenzuwirken. Kein Stapel ist mit einem anderen Stapel verbunden, um einen flexiblen Umschlag zu ermöglichen.

Die allgemeinen Informationen im CSS-Code umfassen Handhabungs- und Sicherheitsanweisungen für die Ladungssicherung, schweres Wetter und Ladungsüberprüfungen. Der CSS-Code enthält Anweisungen für den Fall, dass das Schiff in schweres Wetter gerät. Die folgenden Maßnahmen sind aufgeführt, um übermäßige Kräfte zu vermeiden:

- Änderung des Kurses oder der Geschwindigkeit,
- Beidrehen²⁶,
- Vermeidung von Gebieten mit ungünstigen Wetter- und Seebedingungen,
- rechtzeitige Ballastverteilung, um das Verhalten des Schiffes zu verbessern.

Der CSS-Code besagt auch, dass durch die Überwachung der Ladevorgänge eine unsachgemäße Stauung verhindert werden soll. Während der Reise sollte die Ladung regelmäßig überprüft werden.

4.3 Laschung

Die MSC ZOE ist, wie nahezu alle modernen Containerschiffe, mit einer Laschbrücke ausgestattet (siehe Abbildung 26), einer Stahlkonstruktion, die zwischen den einzelnen 40-Fuß-Containerbays quer verläuft. Dies ermöglicht neben der Verwendung von Twistlocks die Sicherung der vierten und fünften Containerlage an der Brücke mittels Laschstangen und Wantenspannern. Zum Zeitpunkt des Unfalls hatte die MSC ZOE maximal acht (von elf) Lagen an Deck geladen.

Die Laschstangen, die diagonal angebracht werden (Außenlaschung oder Kreuzlaschung), reduzieren die Kippmomente, die beim Rollen eines Schiffes auf einen Stapel wirken. Die Auslegung der Brücken für 40-Fuß-Bays hat zur Folge, dass 20-Fuß-Container nur an einem Ende an den Brücken bis zur vierten oder fünften Containerlage und am anderen

²⁶ Beidrehen: um Fahrt aus dem Schiff zu nehmen, insbesondere indem man den Bug des Schiffes in den Wind bringt.

Ende bis zu den Lukendeckeln bis zur zweiten oder dritten Containerlage befestigt werden können.

Die Verwendung eines Laschrechners zusammen mit dem Ladungssicherungshandbuch sind die Grundlage für einen auf die Ladung abgestimmten Laschplan. Im Hafen führen die Stauer das Laschen und Entlaschen durch. Die Decksbesatzung, die vom Ersten Offizier koordiniert wird, ist für die korrekte Ausführung verantwortlich und überprüft die Umsetzung.

Laschings und Sicherungsmaterialien sollten ordnungsgemäß gewartet werden. Anhang 1 des Ladungssicherungshandbuchs enthält das Nachweisbuch für die Inspektionen und Wartungen der gesamten Laschausrüstung. Die letzte Inspektion vor dem Unfall wurde am 15. Dezember 2018 auf See durchgeführt und in das Nachweisbuch eingetragen: „Überprüfung der gesamten Laschausrüstung durchgeführt: Alle Wantenspanner wurden nach Bedarf geschmiert, beschädigtes Laschmaterial mit neuem repariert“

Verriegelung mithilfe von Twistlocks

Die erste Containerlage auf der MSC ZOE wurde mithilfe von fixen Decksbeschlägen verriegelt, die auf die Lukendeckel aufgeschweißt sind. Die Container der weiteren Lagen wurden übereinandergestapelt und mit Twistlocks verbunden. Ein Twistlock und ein Eckbeschlag bilden zusammen eine standardisierte Drehverriegelung zur Sicherung von Schiffscontainern. Die auf der MSC ZOE verwendeten Twistlocks wurden von German Lashing geliefert, ihre Spezifikationen sind im Ladungssicherungshandbuch beschrieben.



Abbildung 26: Laschbrücke der MSC ZOE (Quelle: DSB)

Aus den Aufzeichnungen an Bord der MSC ZOE geht hervor, dass die Inspektionen der Laschings und deren Qualität den Vorgaben entsprachen. Es wurden keine systematischen Abweichungen von den internationalen Vorgaben festgestellt.

4.4 Ladungssicherungshandbuch

Die MSC ZOE verfügt über ein genehmigtes Ladungssicherungshandbuch (Cargo Securing Manual, CSM), das vom Hersteller der Laschasrüstung (German Lashing Co.) erstellt wurde. Das Ladungssicherungshandbuch entsprach den Richtlinien für dessen Erstellung gemäß dem Code of Safe Practice for Cargo Stowage and Securing (CSS-Code) und wurde von der Klassifikationsgesellschaft DNV GL SE genehmigt.

Das Ladungssicherungshandbuch der MSC ZOE enthält ein Kapitel über die Stauung und Sicherung von Containern. Dieses Kapitel umfasst Abschnitte über Handhabung und Sicherheitshinweise, Stau- und Sicherungsanweisungen, alternative Staumuster, auf die Ladung wirkende Kräfte und den Plan zur Anbringung der Containersicherung. Die Kräfte, die auf die jeweiligen Containerstapel und Sicherungsvorrichtungen einwirken, gehen auf äußere Kräfte zurück. Die quer wirkende Komponente des dreidimensionalen Kraftspektrums überwiegt.

Das Ausmaß und die Verteilung dieser Kräfte hängen von folgenden Faktoren ab:

- Gesamtmasse des Stapels,
- vertikale Anordnung der Massen im Stapel,
- Ausgesetzt sein gegenüber Windkräften,
- Verwendung von Sicherungsvorrichtungen,
- GM-Wert und die Bewegung des Schiffes aufgrund der Wellenmuster

Die Container-Stau- und -Laschausrüstung an Bord der MSC ZOE wurde von German Lashing geliefert und von DNV GL SE zertifiziert.

Die Güteklassen von fester und loser Container-Laschausrüstung sind genormt. Die Obergrenzen²⁷ (siehe Abbildung 27) ergeben sich aus der zulässigen Belastungsgrenze (Safe Working Load, SWL). Zulässige Kräfte für die Containersicherungseinrichtungen sind als die vorgesehene zulässige Belastungsgrenze zu betrachten. Ebenso sind die maximal zulässigen Kräfte für Container standardisiert (siehe Tabelle 3).

²⁷ Diese Grenzen werden gemäß statischer Bedingungen gesetzt.



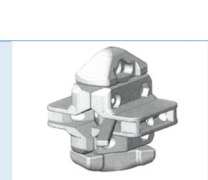

Securing device	Figure	Safe Working Load (SWL)	Proof Load (PL)	Minimum Tension Breaking Load		
Lashing rod ²⁸		245kN	306kN	490kN		
Turnbuckle		245kN	306kN	490kN		
Twistlock		250kN	313kN	500kN		
Container	Figure	Transverse Racking force	Longitudinal Racking force	Corner post compression	Corner post compression 45ft on top of 40ft	Maximum payload standard 20 ft
ISO Container		150kN	125kN	848kN	270kN	approx. 28.000kg

Abbildung 27: Typische SWL-Werte für Containersicherungseinrichtungen (Quelle: DNV GL SE)

Für die Stau- und Laschausrüstung für Container an Bord der MSC ZOE besteht ein Test- und Prüfzertifikat. Wenn neue und Ersatz-Sicherheitsausrüstung an Bord kommen, sollten sie mit einem entsprechenden Zertifikat versehen sein, das zusammen mit dem Ladungssicherungshandbuch aufbewahrt werden sollte.

Vorhandene Sicherungsausrüstung, die sich im Einsatz als zufriedenstellend erwiesen hat, unterliegt nicht der Prüfung, sofern sie ordnungsgemäß gewartet und für den vorgesehenen Zweck verwendet wird.

Für bestehende feste Einbauten gilt, dass bei Zweifeln an der Leistungsfähigkeit bestehender fester Sicherungsvorrichtungen einschließlich der Tragkonstruktion die festen Einbauten auf eine Belastbarkeit in Höhe der angegebenen maximal zulässigen Belastung +25 % hin nachgewiesen werden sollten. Die Prüflast ist sowohl für mittlere Winkel als auch für Grenzwinkel, die im Einsatz auftreten können, anzuwenden.

Im Extremfall kann die Überschreitung der Belastbarkeit der Laschausrüstung zum Zusammenstürzen von Containerstapeln oder zum Überbordgehen von Containern führen.

Bei der Auslegung und Berechnung der einzelnen Laschkonfiguration für jeden Stapel werden nicht nur die Güteklasse der Sicherungsmittel, sondern auch die Eigenschaften der Container berücksichtigt.

²⁸ Die Laschstangen für die äußeren Laschings haben ein SWL von 200 kN. Die inneren Laschings sind zertifiziert für ein SWL of 245 kN.

Das Ladungssicherungshandbuch macht in übersichtlicher schematischer Form folgende Angaben für jede Bay:

- die maximal zulässige Anzahl von Containern pro Stapel,
- das maximal zulässige Gewicht jedes Stapels,
- die Laschkonfiguration für jede Bay.

Die Kapitel im Ladungssicherungshandbuch über die Stauung und Sicherung von Containern beziehen sich auf Situationen, die zur Beschädigung und zum Verlust von Containern führen können und enthalten die folgenden Warnhinweise:

- Überschreiten der zulässigen Masse für den Stapel,
- Nichtbeachtung der zulässigen Anordnung der Massen im Stapel,
- Twistlocks sind nicht korrekt verriegelt,
- es wird nicht die im zugehörigen Bay-Plan vorgesehene Laschausrüstung verwendet,
- Überschreiten der empfohlenen Vorspannung von 5 kN bei den Laschings,
- extreme Teilbelastungen,
- Überschreitung des im Stauplan angegebenen maximalen GM-Wertes.

Das Ladungssicherungshandbuch der MSC ZOE gibt an, dass das im Handbuch beschriebene Stau- und Sicherungssystem für Bedingungen von $GM \leq 2,08$ m ausgelegt ist. Ebenfalls wird angegeben, dass sich beim Betrieb des Schiffes mit größeren GM-Werten die zu erwartenden Beschleunigungswerte entsprechend erhöhen. Ebenfalls wird erwähnt, dass, wenn ein GM-Wert von mehr als 2,08 m nicht vermieden werden kann, eine Reduzierung der Stapelmassen oder -höhen oder eine Verlagerung der größeren Massen zu niedrigeren Lagen im Stapel erfolgen sollte. Das Ladungssicherungshandbuch gibt weiterhin an, dass angesichts der Komplexität des Problems der ordnungsgemäßen Stauung und Sicherung von Containern mit unterschiedlichen Bruttomassen und dem GM-Wert des Schiffes die tatsächliche Stauung und Sicherung mit der an Bord befindlichen Lade- und Laschsoftware überprüft werden muss. Die Überschreitung der Kräfte aus den zuvor genannten Gründen wird von einer solchen Software aufgezeigt, sodass die Schiffsbesatzung die Sicherung in den jeweiligen Beladungssituationen besser handhaben kann.

ULCS Beschleunigungen gemäß dem Ladungssicherungshandbuch

Das Ladungssicherungshandbuch für standardisierte Containerschiffe legt eine Laschausrüstung fest, die vermutlich für alle auftretenden Belastungen im Schiffsbetrieb ausreichend ist. Es ist nicht konzipiert für bestimmte Ladungsgewichte, aber für eine festgelegte maximale Tragfähigkeit aufgrund von Beschleunigungen, Gewichten von Containerstapeln, Wind und Wellen. Für jede Reise sind das maximale Containerstapelgewicht und die Verteilung mit den maximal zulässigen Belastungen auf den Ladezustand abgestimmt, so dass die festgelegten Tragfähigkeiten nicht überschritten werden. Dies geschieht durch eine Kombination von erwarteten Beschleunigungen mit festgelegten Gewichten.

Das Ladungssicherungshandbuch nimmt explizit nur auf die Beschleunigungsstufen für nicht standardisierte Ladung Bezug. Für die Berechnung von Containerladungen verweist das Ladungshandbuch auf den Ladungscomputer. Die Beschleunigungsstufen für nicht-standardisierte Ladung werden geprüft, obwohl Beschleunigungen schiffsspezifisch sind und nicht in Verbindung mit der einzelnen Ladung stehen.

Die Basistabelle für zulässige Beschleunigungen (siehe Abbildung 27) können einer Tabelle im CSS-Code entnommen werden. Die Tabelle zeigt Werte für Quer-, Längs- und Vertikalbeschleunigung.

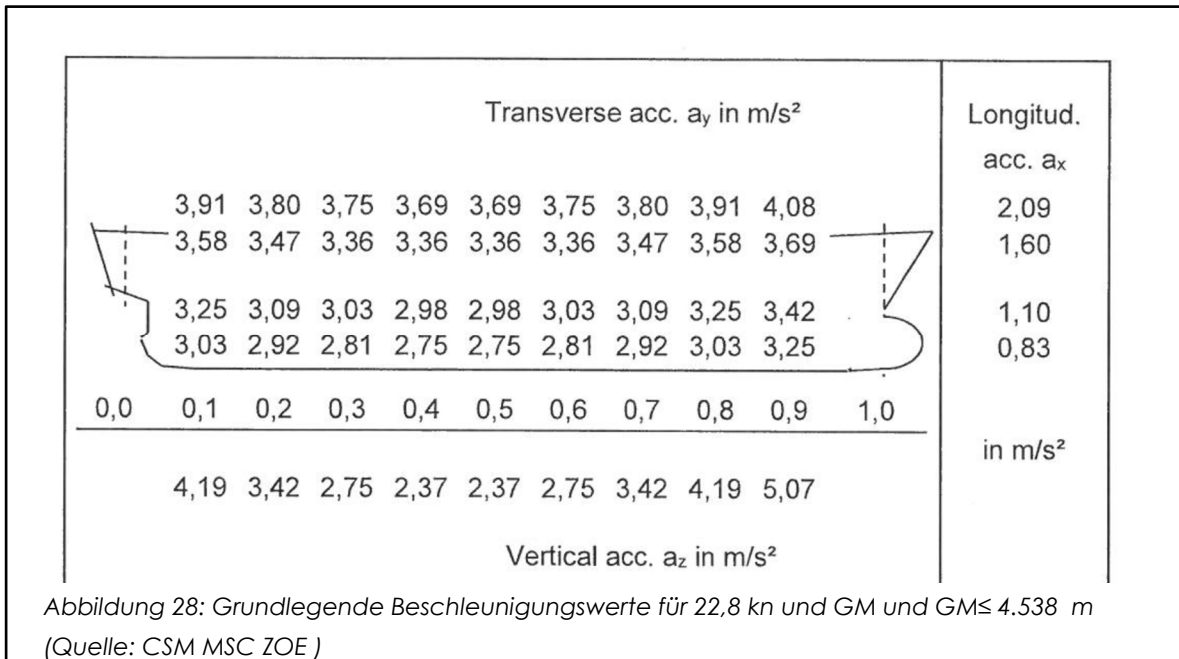
Transverse acceleration a_y in m/s^2										Longitudinal acceleration a_x in m/s^2	
on deck, high	7.1	6.9	6.8	6.7	6.7	6.8	6.9	7.1	7.4	3.8	
on deck, low	6.5	6.3	6.1	6.1	6.1	6.1	6.3	6.5	6.7	2.9	
'tween-deck	5.9	5.6	5.5	5.4	5.4	5.5	5.6	5.9	6.2	2.0	
lower hold	5.5	5.3	5.1	5.0	5.0	5.1	5.3	5.5	5.9	1.5	
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	L
Vertical acceleration a_z in m/s^2											
	7.6	6.2	5.0	4.3	4.3	5.0	6.2	7.6	9.2		

Abbildung 27: Grundlegende Beschleunigungswerte entsprechend dem CSS-Code (Quelle: CSS-Code)

Die Beschleunigungen müssen entsprechend der Korrekturfaktorformel im CSS-Code für Schiffe korrigiert werden, wobei L die Länge zwischen den Loten in Metern und v die Dienstgeschwindigkeit des Schiffes in Knoten ist. Für die MSC ZOE gilt LPP = 379 m und v = 22,8 Knoten.

$$correction\ factor = \left(0.345 + \frac{v}{\sqrt{L}}\right) + \frac{(58.62L - 1035.5)}{L^2} = 0.55$$

Das führt zu den folgenden Werten für die MSC ZOE, wie im Ladungshandbuch der MSC ZOE erwähnt, siehe Abbildung 28.



Die Beschleunigungswerte aus der Tabelle in Abbildung 28 müssen korrigiert werden, wenn das GM größer oder gleich 4,538 m ist. Der CSS-Code enthält eine Korrekturtabelle²⁹ für Werte von $B/GM = 7$ bis 13+ (siehe Tabelle 4). Bei einer Schiffsbreite von 59 m entspricht dies einem GM^{30} -Bereich von 4,5 bis 8,4 m.

B/GM	7	8	9	10	11	12	13+
an Deck oben	1,56	1,40	1,27	1,19	1,11	1,05	1,00
an Deck unten	1,42	1,30	1,21	1,14	1,09	1,04	1,00
Laderaum oben	1,26	1,19	1,14	1,09	1,06	1,03	1,00
Laderaum unten	1,15	1,12	1,09	1,06	1,04	1,02	1,00

Tabelle 4: Korrekturfaktoren für $B/GM < 13$ (Quelle: CSS-Code)

	Achtern	Mitte	Vorn	Längsbeschl.
	Querbeschleunigung (m/s^2)			
an Deck oben	6,1	5,76	6,33	2,09
an Deck unten	5,08	4,77	5,24	1,6
Laderaum oben	4,10	3,75	4,31	1,1
Laderaum unten	3,48	3,16	3,74	0,8
Vertikalbeschl.	4,19	2,37	4,19	

Tabelle 5: Berechnete Beschleunigungen in m/s^2 für die MSC ZOE gemäß CSS-Code (Quelle: MARIN)

²⁹ Diese Tabelle wird auch in dem CSM der MSC ZOE angegeben.

³⁰ Das maßgebliche GM für die Beschleunigungen ist tatsächlich der SOLID GM.

Fasst man die Ergebnisse zusammen (siehe Tabelle 5), so sollte die Decksladung derart gesichert werden, dass sie auf Deckshöhe Querbeschleunigungen von 5 m/s^2 und in höheren Lagen bis zu $6,33 \text{ m/s}^2$ standhält. Die Vertikalbeschleunigung sollte an Bug und Heckspiegel auf $4,2 \text{ m/s}^2$ zu begrenzen.

Es ist jedoch zu beachten, dass:

- die Länge der MSC ZOE (397 m) den Anwendungsbereich der Korrekturfaktorformel (50–300 m) überschreitet,
- das tatsächliche GM von 10,23 m den Anwendungsbereich der GM-Korrekturtabelle überschreitet,
- die beschriebenen Methoden auf nichtstandardisierte Ladungen angewendet werden sollten, nicht aber auf Container auf Containerschiffen.
- die in der Anlage 13 des CSS-Codes genannten Beschleunigungen niemals für die Berechnung von Container-Laschings³¹ auf Containerschiffen konzipiert waren, da die Methode zur Berechnung von Beschleunigungen in den Klasse-Regeln einheitlich in Verbindung mit den Laschkräften-Berechnungs-Algorithmen angewendet werden müssen.

Das bedeutet, dass dieser Teil des CSS-Codes nicht für die Berechnung der zulässigen Beschleunigungen für die MSC ZOE oder andere ULCS mit einem LPP > 300 m verwendet werden kann.

In den Bays mit beschädigten oder über Bord gegangenen Containern wurden zerbrochene Twistlocks gefunden. Auch verbogene oder deformierte Laschstangen und Wantenspanner sowie zerbrochene Befestigungen der Laschbrücken mit den weiterhin befestigten Wantenspannern wurden gefunden. Die festgestellten Beschädigungen sind ein Anzeichen für Überlastungsbrüche.

Teile des CSS-Codes sind für ULCS wie die MSC ZOE nicht anwendbar. Obwohl Containerschiffe die gleichen Beschleunigungen erfahren, sollte nach dem CSS-Code die Methode zur Berechnung der zulässigen Beschleunigungen auf nichtstandardisierte Ladungen und nicht auf Container auf Containerschiffen angewandt werden. Außerdem überschreitet die Länge des Schiffes den Anwendungsbereich der Korrekturformel. Zudem überschreitet das tatsächliche GM der MSC ZOE den Anwendungsbereich der GM-Korrekturtabelle. Die Berechnungen der Beschleunigungen und Lasch-Kräfte werden mit der Laschsoftware im Ladungscomputer mittels Algorithmen durchgeführt. Deshalb ist es für die Besatzung nicht immer klar, welchen maximalen Beschleunigungen das System aus Containern und Laschmaterial standhalten muss.

4.5 Ladungsrechner

Aufgrund der Bandbreite der GM-Werte und der Stapelkonfigurationen sind die zur Bestimmung der zulässigen Belastung erforderlichen Berechnungen zu komplex, um sie

³¹ Laut Stellungnahme des DNV GL SE

manuell durchzuführen. Der Ladungsrechner an Bord der MSC ZOE musste t unterstützende Informationen für die Beladung, Stauung, Betriebsfunktionen, Ballastverteilung und Stabilität (Software Total Soft Bank CASP) bieten. Die Laschsoftware, die ein Modul des Ladungsrechners darstellt, berechnet den tatsächlichen Beladezustand.

Die Software legt die tatsächliche Stauweise und die relevanten GM sowie die Schiffsabmessungen bei der Bestimmung der zulässigen Belastung zugrunde. Der Ladungsrechner zeigt deutliche Warnungen an, wenn bestimmte Ladebeschränkungen überschritten werden.

Im Handbuch der Ladungssoftware an Bord der MSC ZOE werden sechs Gründe für Warnungen genannt. Die Warnungen sind mit roten Kästchen im Bay Plan markiert.

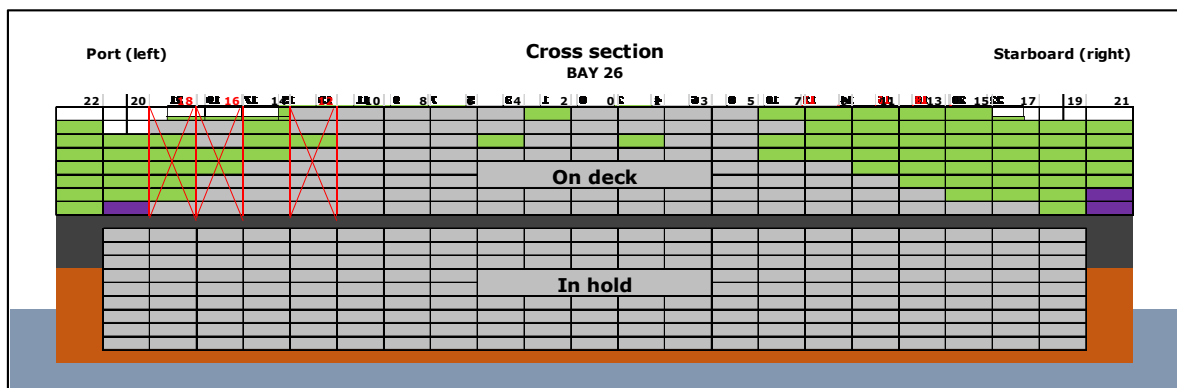
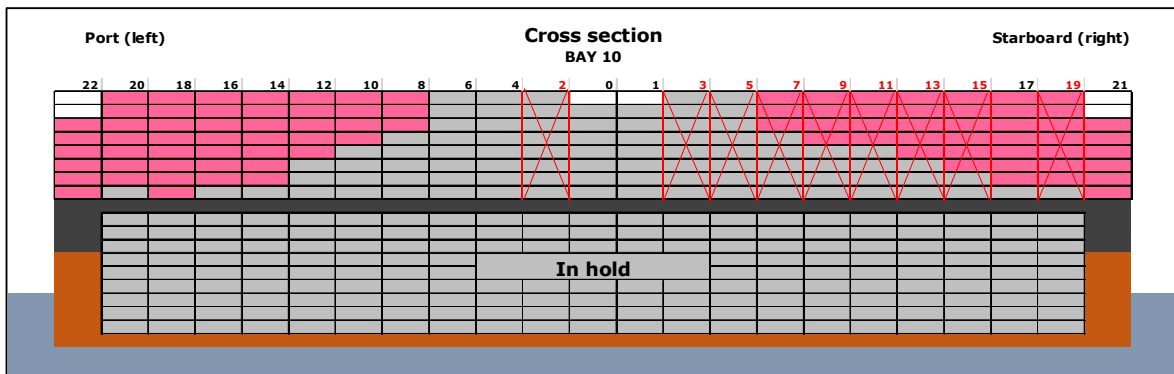
- Querverwindungskraft
- Seitenwand-Querverwindungskraft
- Vertikalspannung
- vertikale Kompression
- Eckpfosten
- Scherkraft am Twistlock

Der Ladungsrechner wurde von der Klassifikationsgesellschaft DNV GL SE getestet und zugelassen. Bei der Abnahme des Ladungsrechners durch die Klassifikationsgesellschaft akzeptiert diese eine Ungenauigkeit der Berechnungsergebnisse von 1 %. Die meisten Ladungsrechner alarmieren jedoch den Benutzer, sobald die oben genannten Belastungswerte überschritten werden. Die Nutzung der Kräftebewertungen, die in der Software des Laschcomputers umgesetzt ist, wird entweder numerisch oder in Prozenten dargestellt. Der ausgedruckte Bericht zeigt numerische Werte, wobei die Auslegungsgrenzen in der Kopfzeile aufgeführt werden. Die Prüfung des Lasch-Zustands gibt einen Überblick über übermäßige Kräfte von jeder Kräfte-Bewertung in Prozenten für jede Bay. Laut DNV GL SE basiert die Software der Klassifikationsgesellschaft auf vorab beschriebenen Auslegungsgrenzen aus Bewegungs- und Beschleunigungsanalysen, die über 20 Jahre lang für verschiedene Containerschiffskonstruktionen durchgeführt wurden. Im Extremfall kann die Überschreitung der Belastbarkeit zum Zusammenstürzen von Containerstapeln oder zum Überbordgehen von Containern führen. Die Methode, nach der Beschleunigungen und andere äußere Kräfte in Laschkräfte umgesetzt werden, ist in den DNV GL SE-Regeln dargestellt. Details zum Ladungsrechner und dem Laschsoftware-Modul sind aufgrund der Komplexität der Berechnungen jedoch nicht vollständig transparent. Es wird nicht darauf hingewiesen, wie die Trägheits- und Windlasten in zulässige Belastung, das Kippverhalten von Stapeln, Querverwindungs- und Kompressionskräfte etc. umgesetzt werden.

Rote-Warnfelder

Der Ladungsrechner an Bord der MSC ZOE zeigte für die Unfallfahrt rote Warnfelder für die Bays 10 (9/11), 18, 26, 30, 50, 62 und 70. Ein rotes Warnfeld zeigt eine Überschreitung der Toleranzgrenze von einem der oben aufgeführten sechs möglichen Gründe. Die Überschreitung der Toleranzgrenzen wurde aber nicht weiter spezifiziert. Von Bay 10 (09/11), 26 und 50, welche rote Warnfelder auf der Basis der in Bremerhaven erhaltenen

Information zeigte, gingen Container über Bord. Jedoch hatten die Bays 42 und 58, von denen ebenfalls Container über Bord gingen, keine roten Warnfelder.



Die gängige Praxis für Staupläne an Bord von MSC betriebenen Schiffen sieht vor, dass die Besatzung zunächst einmal die vorab erstellten Staupläne (es handelt sich um vorläufige Pläne, die dem Schiff vor Ankunft im Hafen zugeleitet werden), auf die Belastungen für das Schiff (Biegemomente, Scherkräfte und Torsionskräfte) hin prüft, die Schiffsstabilität berechnet und die Gewichte der Containerstapel verifiziert. Sie arbeiten dabei eng mit dem Lade-Terminal und dem Planungsbüro zusammen, damit sie auf mögliche Änderungen des vorläufigen Plans während der Beladung reagieren können. Solche Änderungen kommen immer vor, da es technisch unmöglich ist, während der vorläufigen Stauplanung allen Containern ihre endgültigen Stauplätze zuzuweisen. Deshalb müssen die Terminals das Planungsbüro und die Besatzung informieren, wenn sich die Gewichtsverteilung der Containerstauung signifikant ändert. Um sicherzustellen, dass die richtigen Parameter für die Berechnung verwendet werden, werden alle Pläne vom Planungsbüro und der Besatzung überprüft. Nach dem Beladen erhält die Besatzung vom Terminal den Abfahrtsplan und lädt ihn in digitalem Format in den Bordcomputer hoch. Die Containerdaten werden mittels Standard-EDIFACT-Dateien automatisch in den Computer hochgeladen und keine Daten müssen händisch eingegeben werden.

Trotz der Vorbereitung für die Reise von Sines nach Bremerhaven, zeigte der Ladungscomputer an Bord der MSC ZOE rote Warnfelder in den Bays 10 (9/11), 18, 26, 30, 50, 62 und 70 an. Es war während der Sicherheitsuntersuchung nicht möglich festzustellen, welche Toleranzgrenzen überschritten worden waren. Der maßgebliche Bereich kann mittels eines Markierungsfeldes (zum Beispiel Asien-Europa) in der

Laschsoftware des Ladungscomputers gewählt werden. Parameter für die Berechnungen können in Abhängigkeit von dem Arbeitsgebiet differieren. MSC stellte mit der Laschsoftware eine Simulation zur Verfügung, die auf dem Ladungszustand der Unfallreise basiert. Die Simulation zeigte einen deutlichen Unterschied beim Anklicken des Feldes uneingeschränkter Service oder Asien-Europa im Menü des Service-Bereiches. Jedoch konnten die Werte, die während der Vor-Ort-Untersuchung abgelesen wurden, nicht wiedergegeben werden, da es nicht möglich war, alle benutzten Einstellungen wiederherzustellen. MSC gibt an, dass eine Änderung einiger Markierungsfelder im Computer alle Berechnungen ändern könnte und dass dies auf der MSC ZOE passiert sein könnte, da viele Personen an dem Computer arbeiteten, bevor den Untersuchern in Bremerhaven die Daten gezeigt wurden.

Auf der Basis der durch die Untersuchung in Bremerhaven erhaltenen Information und der MSC gestellten Fragen, vermutet MSC, dass die Software auf dem Ladungscomputer im Ladungsbüro wahrscheinlich nicht auf den richtigen Servicebereich eingestellt war. Auf dem Computer, der während der Untersuchung gezeigt wurde, war für die Berechnungen möglicherweise nicht der Servicebereich Asien-Europa gewählt worden. Jedoch zeigte die Simulation des Servicebereiches Asien-Europa ebenso rote Warnfelder, aber in unterschiedlichen Bereichen.

Die MSC ZOE hatte mehrere Ladungscomputer mit Lasch-Software. Es gab mindestens einen auf der Brücke und einen im Ladungsbüro. Während der Untersuchung in Bremerhaven wurde den Untersuchern der Ladungscomputer im Ladungsbüro gezeigt. Es konnte nicht festgestellt werden, warum den Untersuchern der Computer im Ladungsbüro, aber nicht der auf der Brücke gezeigt wurde oder ob in den Computern der richtige Servicebereich für die aktuelle Reise gewählt worden war. Deshalb kann nicht festgestellt werden, ob die MSC ZOE mit den richtigen Einstellungen in der Lasch-Software des Ladungscomputers gefahren ist.

MSC gibt an, dass sie immer darauf abzielen, übermäßige Beanspruchung, also Kräfte die die Toleranzgrenzen (100%) überschreiten, zu vermeiden. Dies ist jedoch aufgrund der Stauraumbeschränkungen, Beschränkungen im Terminal, Planänderungen etc. nicht immer möglich. In solchen Fällen führen sie eine Risikobewertung durch, um zu prüfen, ob einige Überschreitungen gerechtfertigt sind. Die Gründe dafür an manchen Orten eine Überschreitung zu rechtfertigen, gründen sich auf die Tatsache, dass die festgelegten maximal erlaubten Werte für die Laschings die Tragfähigkeit sind. Zum Beispiel würde 120% bedeuten, dass die Kräfte sich immer noch innerhalb der Sicherheitsmarge zwischen Tragfähigkeit (100%) und der Belastung, in der erwartet wird, dass Laschings versagen (200%).

MSC vermutet, dass die Daten, die den Untersuchern gezeigt wurden falsch waren (versehentliche Änderungen, bevor sie den Untersuchern gezeigt wurden, falsches Laden des Computers, falsche Einstellungen). Die Untersucher ziehen deshalb den Schluss, dass der Ladungscomputer, der den Untersuchern gezeigt wurde, eine Überschreitung von Toleranzgrenzen ohne weitere Spezifizierung anzeigt, und dass nicht festgestellt werden kann, ob und wenn wie diese Überschreitung der Toleranzgrenzen bemerkt und wie ihnen

begegnet wurde. Die Simulation mit dem Service-Bereich Asien-Europa zeigte ebenfalls rote Warnfelder an, aber in unterschiedlichen Bereichen. Die roten Warnfelder im Ladungsrechner sagen nicht das Überbordgehen voraus, aber in den rot gekennzeichneten Bereichen, in denen Container verloren gingen, können Fehler bei der Stauung zum Unfall beigetragen haben, da sie die Bay und/oder einen bestimmten Stapel möglicherweise anfälliger für übermäßige Kräfte gemacht haben.

Sowohl der Ladungscomputer der MSC ZOE, der den Untersuchern vorgeführt wurde, als auch die nachträgliche Simulation des Unfalls zeigte rote Warnfelder an, die sich auf den Beladungszustand der Unfallreise bezogen. Dies deutet darauf hin, dass eine oder mehrere Toleranzgrenzen überschritten wurden. Die roten Warnfelder sagen jedoch nicht den Verlust voraus, aber in den rot markierten Bereichen, wo Container über Bord gingen, könnten Fehler im Beladungszustand zu dem Unfall beigetragen haben, da es die Bay und/oder einen bestimmten Containerstapel anfälliger für übermäßige Kräfte gemacht haben könnte.

Benutzung des Ladungsrechners der MSC ZOE

Abschnitt 4.4 des Ladungssicherungshandbuchs der MSC ZOE gibt an, dass das im Handbuch beschriebene Stau- und Sicherungssystem für Bedingungen von $GM \leq 2,08$ m ausgelegt ist. Ebenfalls wird angegeben, dass sich bei Betrieb des Schiffes mit größeren GM-Werten die zu erwartenden Beschleunigungswerte entsprechend erhöhen. Das heißt, wenn ein GM-Wert von mehr als 2,08 m nicht vermieden werden kann, sollte eine Reduzierung der Stapelmassen oder -höhen oder eine Umschichtung der Massen hin zu niedrigeren Lagen im Stapel erfolgen.

Das Laschsystem der MSC ZOE als Standardsystem ist auf jede Beladungssituation innerhalb jedes Arbeitsbereiches des Schiffes ausgelegt. Jedoch ist der im Ladungshandbuch dargestellte Zustand, der für ein maximales GM von 2,08 berechnet wurde, ein Prüfzustand. Die manuelle Neuberechnung von Laschzuständen ist nicht mehr möglich, da jeder Beladungszustand sehr individuell ist. Die Nutzung des Laschsystems ist essenziell. Alle Berechnungen und Bewertungen hinsichtlich der Tragfähigkeit werden somit vom Computer durchgeführt. Der Teil des Ladungshandbuchs, der die Containersicherungsrichtung betrifft, ist möglicherweise nicht maßgeblich für die derzeitigen Beladungszustände, wird jedoch, unter anderem, als Grundlage für die Genehmigung von Laschcomputersystemen genutzt. Deshalb kann nicht überprüft werden, ob die Container gemäß den Regeln des Ladungshandbuchs und den Regeln und Leitlinien für das Laschen gesichert sind.

Die Details des Ladungscomputers und der Lasch-Software-Module sind nicht vollkommen transparent. Das Ladungshandbuch führt Verfahren, nach dem der Laschcomputer die wahrscheinlichsten Beschleunigungen für bestimmte Beladungszustände und GM-Werte berechnet, nicht weiter aus. Die Methode ist von DNV GL SE genehmigt, da die umfangreiche Berechnungsmethode den Regeln der Klasse entspricht.

Die Anforderungen des Ladungssicherungshandbuchs sind für ultragroße Containerschiffe nicht geeignet. In den meisten Beladungszuständen der MSC ZOE werden Berechnungen und Validierungen hinsichtlich der zulässigen Belastungsgrenzen mithilfe des Ladungsrechners durchgeführt, da der GM-Wert außerhalb des zulässigen GM des Ladungssicherungshandbuchs liegt.

Die Einzelheiten der Vorgänge im Ladungsrechner und in der Laschsoftware werden im Ladungssicherungshandbuch nicht weiter ausgeführt. Die Berechnungsmethode für die Beschleunigungen und anderen äußeren Kräfte wird in die Laschkkräfte umgesetzt und ist in den DNV GL SE-Regeln beschrieben.

Die Details zum Ladungsrechner und zum Laschsoftware-Modul sind nicht vollständig transparent, daher ist auch nicht nachzuvollziehen, auf welchen zulässigen Beschleunigungswerten die Software basiert.

5 ENTWICKLUNG BEI CONTAINERSCHIFFEN

5.1 Größe von Containerschiffen

Die Zunahme des Welthandels hat stark zu dem enormen Wachstum des Seeverkehrs beigetragen. Aufgrund dieses Wachstums wurden immer größere Containerschiffe entwickelt. Ihre Anzahl und ihre Größe haben in den letzten 60 Jahren rapide zugenommen – vom ersten Containerschiff mit einer Kapazität von 60 Containern zur größten Version, die heute Ultra Large Container Ship (ULCS) heißt. Dies ist der Gattungsname für Containerschiffe mit einer nominalen Container-Gesamtkapazität von 10.000 TEU und mehr. Die MSC ZOE mit einer Kapazität von 19.224 TEU ist ebenfalls ein ULCS. Die Kapazität der einzelnen Schiffe hat sich in den letzten 15 Jahren verdoppelt (siehe Abbildung 29).

Die Schiffe nahmen hinsichtlich Größe, Länge und Breite, aber auch hinsichtlich der Stapelhöhe zu. Das Kapazitätswachstum führte dazu, dass Containerschiffe mehr Container an Deck befördern. Im Jahr 2018 waren 451 ULCS weltweit im Einsatz, weitere 129 sollen 2020 ausgeliefert werden.

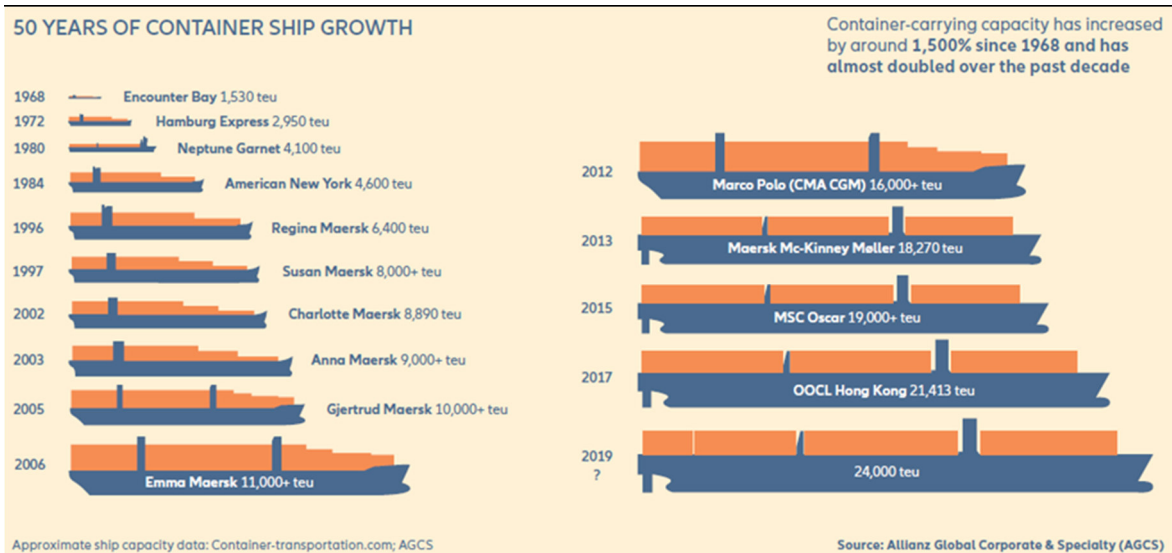


Abbildung 29: Größe von Containerschiffen (Quelle: Safety and Shipping Review 2019, Allianz)

Die meisten Containerschiffe, die auf der Route Nordeuropa–Fernost und umgekehrt verkehren, sind ULCS mit mehr als 18.000 TEU. Die Größe eines ULCS hat praktische Grenzen, nur einige wenige Häfen können sie aufnehmen. Die Möglichkeiten des Hafens hinsichtlich der Liegeplatzlänge, der freien Höhe unter der Containerbrücke oder des Freiraums, der zum Drehen innerhalb des Hafens erforderlich ist, sind begrenzende Faktoren.

Konstruktive Auslegung von ULCS

Die Bauweise des Containerschiffes ist durch eine große Decksöffnung gekennzeichnet. Dies und die immer größer werdende Länge und Breite der ULCS führen zu einer erhöhten Empfindlichkeit gegenüber Torsions- und horizontalen Biegebelastungen. Containerschiffe sind nicht starr, sie reagieren auf die welleninduzierten periodischen Belastungen. Die dynamischen Kräfte, die durch die Wellen, die Bewegung des Schiffes und die Ladung entstehen, wirken in verschiedener Art und Richtung auf den Rumpf.

Belastung in Längsrichtung: Hogging und Sagging

Hogging tritt auf, wenn ein Wellenberg in der Mitte des Schiffes ansetzt. Der Auftrieb in diesem Bereich vergrößert sich in Folge. Befinden sich Heck und Bug im Wellental, ist der Auftrieb hier reduziert, und in Verbindung mit dem Beladungszustand tritt das maximale Biegemoment auf. Man spricht hier vom Hogging des Schiffes.

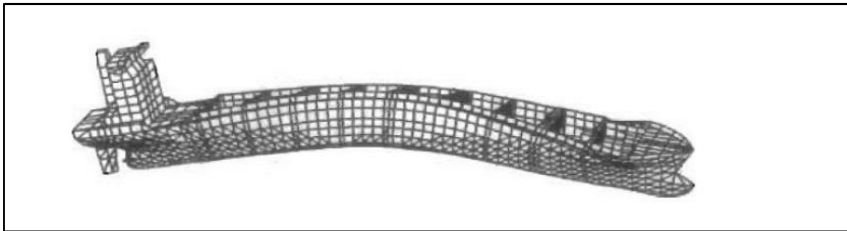


Abbildung 301: Hogging des Schiffes (Quelle: Ship Knowledge, K. van Dokkum)

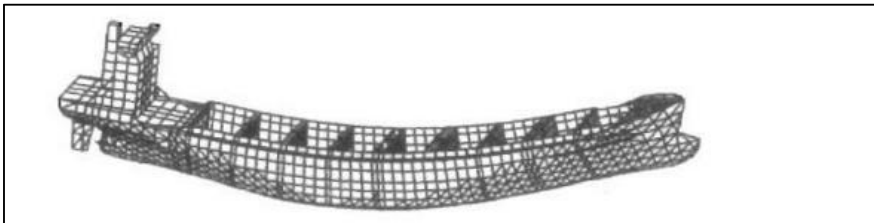


Abbildung 31: Sagging des Schiffes (Quelle: Ship Knowledge, K. van Dokkum)

Sagging ist das Gegenteil von Hogging. Das Schiff wird an den Enden von Wellenbergen gestützt, während in der Mitte die Auftriebskraft abnimmt.

Querspannung: Querverwindung

Wenn ein Schiff im Seegang rollt, entstehen Querverwindungskräfte in der Struktur, die zu einer Verdrehung in Querrichtung führen und Verformungen verursachen können. Das Deck neigt dazu, sich seitlich relativ zur darunterliegenden Struktur zu bewegen, und die Außenhülle auf der einen Seite neigt dazu, sich vertikal relativ zur anderen Seite zu bewegen.

Torsionsbeanspruchung:

Das Torsionsmoment hat zwei Hauptkomponenten: statische Torsionsmomente (abhängig von der Ladung) und dynamische Torsionsmomente bzw. durch Seegang hervorgerufene Torsionsmomente. Auf ein Schiff, das schräg auf eine Welle zusteuert, wirken an seinen Enden aufrichtende Momente in entgegengesetzter Richtung, die den Rumpf verdrehen und ihn Torsionskräften aussetzen. Bei Schiffen mit extrem breiten und langen Decksöffnungen, wie großen Containerschiffen, sind diese Torsionsmomente und Spannungen erheblich. Das Ausmaß und die Verteilung der Torsionsmomente hängen auch von der Vortriebsrichtung des Schiffes relativ zu den auftretenden Wellen ab.

Belastungen durch Whipping:

Unter Whipping versteht man das schnelle Biegen des Schiffskörpers infolge der Einwirkung einer Welle auf den Rumpf. Das Schiff erfährt Impulsbelastungen, die in Stoßbelastungen wie zum Beispiel Slamming resultieren und das Schiff in seiner Eigenfrequenz vibrieren lassen. Daraus können hohe Belastungen resultieren.

Die Belastungen und Beschleunigungskräfte übertragen sich vom Schiff auf den Containerstapel. Sie verursachen statische und dynamische Reaktionen im Containerstapel. Laschings und Decksbeschläge müssen diesen Belastungen und Bewegungen standhalten. Im Rahmen von mehreren Projekten³² durchgeführte Messungen zeigen:

- Die Deckstruktur kann sich in Querrichtung um bis zu 50 mm bewegen und die Container können nach vorne und achtern schwanken, während das Schiff sich seinen Weg durch schräg von vorn oder heckseitig einfallende See bahnt, der Rumpf biegt sich und die Lukenöffnungen verformen sich.
- Die von den Beschleunigungsschreibern eines 350-Meter-Containerschiffes aufgezeichneten Gesamtbiegeamplituden des Rumpfes lassen auf Biegeauslenkungen in der Größenordnung von 1 bis 2 m und eine Hog-Sag-Auslenkung von etwa 1,4 m schließen.
- Es findet eine Verformung des Rumpfes statt, die die Containerstützen dehnt.
- Es bilden sich zusätzliche lokale Beschleunigungen, die vom Schiffsrumpf auf die Ladung einwirken.
- Aufgrund der Biegung des Schiffsrumpfes ist mit Ladelukenbewegungen um ca. 2 cm zu rechnen
- Es wurde festgestellt, dass die dynamischen Reaktionen die tatsächlichen Beschleunigungsbelastungen maßgeblich erhöhen.
(Quelle: NNPC und Lashing@sea)

Die Hauptschlussfolgerung in Bezug auf Biegeverformungen ist, dass vertikale Biegeauslenkungen die induzierten Vertikalbeschleunigungen um 40 % bis 50 % im Vergleich zu der alleinigen Beschleunigung des starren Körpers erhöhen dürften.

Die Berechnung dieser Kräfte für die Laschausrüstung ist eindeutig eine sehr komplexe Angelegenheit.

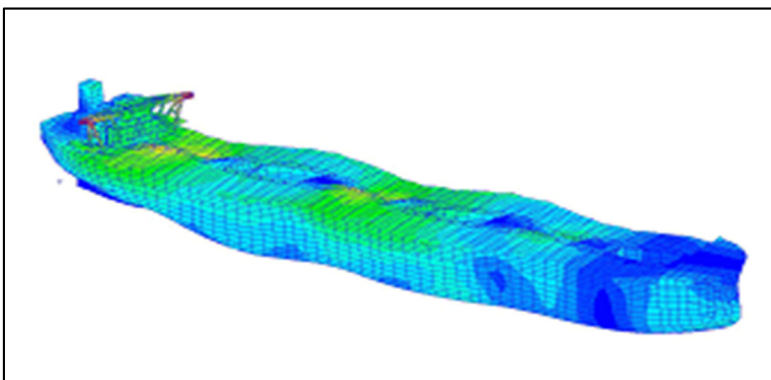


Abbildung 32: Simulation der Rumpfschwingungen (Quelle: JMU)

In den letzten 15 Jahren sind Containerschiffe immer größer geworden und die Kapazität der einzelnen Schiffe hat sich verdoppelt. Die Konstruktion eines sehr großen

³² NNPC und Lashing@sea

Containerschiffes hat große Decksöffnungen, welche sie für Drehbiegebeanspruchungen und horizontale Biegebeanspruchungen anfällig macht. Die flexible Reaktion des Schiffes auf dynamische Kräfte verursacht Beschleunigungen an verschiedenen Stellen und in verschiedenen Richtungen, mit verschiedenen Kräften und belasten den Schiffsrumpf und die Ladung. Die Berechnungen dieser Beschleunigungen sind komplex.

5.2 Einfluss des GM-Wertes

Die Schiffsstabilität ist die Fähigkeit eines Schiffes, sich wieder selbstständig aufzurichten, nachdem es aus dem Gleichgewicht gebracht wurde. Die Stabilität hängt von der Form des Schiffes (Schiffskonstruktion) und der Beladung (dem Betriebszustand) ab.

Die Fähigkeit eines Schiffes, in seine ursprüngliche Gleichgewichtsposition zurückzukehren, wird durch das Moment zwischen dem Gewichtsschwerpunkt (G) und dem Auftriebsschwerpunkt (B) bestimmt, siehe Abbildung 33:

- G ist der Schwerpunkt des gesamten Schiffes einschließlich Ladung,
- B ist der Auftriebsschwerpunkt, der Schwerpunkt des unter Wasser befindlichen Teils des Schiffes,
- M ist das Metazentrum, der Schnittpunkt der beiden Auftriebsvektoren des Schiffes.

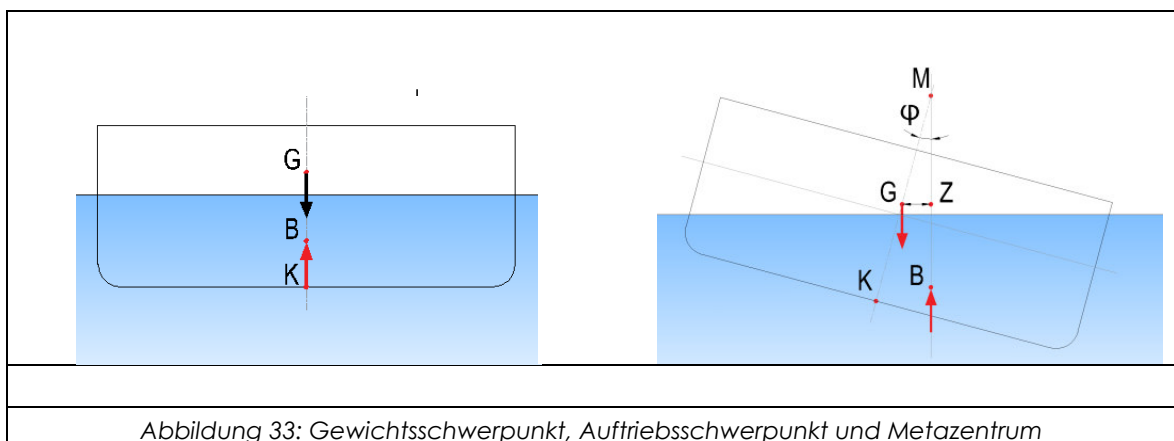


Abbildung 33: Gewichtsschwerpunkt, Auftriebsschwerpunkt und Metazentrum

In der Gleichgewichtssituation liegen der Gewichtsschwerpunkt (G) und der Auftriebsschwerpunkt (B) senkrecht übereinander, sodass die Kräfte ausgerichtet sind. Wenn das Schiff gezwungen wird, zur Seite zu krängen, verschiebt sich der unter Wasser befindliche Teil des Schiffskörpers ebenso wie die Position des Auftriebsschwerpunkts (B). Die Schwerkraft und die Auftriebskraft sind nicht länger gleich ausgerichtet, und dies erzeugt ein Moment.

Die metazentrische Höhe (der Abstand zwischen G und M, auch GM genannt) ist ein Maß für die Vermögen des Schiffes, ins Gleichgewicht zurückzukehren. Je größer die metazentrische Höhe, desto besser die Stabilität des Schiffes. Ein Schiff mit einem sehr großen GM-Wert, das eine besonders hohe Stabilität aufweist, wird als steifes Schiff bezeichnet. Die Merkmale eines steifen Schiffes sind eine sehr kurze Phase des Rollens,

was bedeutet, dass sich das Schiff nach dem Rollen sehr schnell und ruckartig wieder aufrichtet, was zu einer sehr ruckeligen und unbequemen Fahrt führt. Wenn der GM-Wert klein ist, handelt es sich um ein sogenanntes Tender-Schiff, das ausgedehnter, aber langsamer schwingt, sodass es angenehmer ist, darauf zu reisen. Der GM-Wert des Schiffes ist ein Schlüsselfaktor, der die Kräfte beeinflusst, die auf Container und deren Sicherung wirken, während sich das Schiff auf See befindet.

Hohe Stabilität der MSC ZOE

Bei der Trimm- und Stabilitätsunterlage handelt es sich um ein Handbuch, das von der Klassifikationsgesellschaft DNV GL genehmigt werden und vom Kapitän zu dem Zweck verwendet werden muss, das Schiff sicher betreiben zu können. Es enthält unter anderem Angaben über die

- Intakstabilität: Schiffsstabilität in normaler Situation,
- Leckstabilität: Schiffsstabilität bei Flutung eines Bereichs³³
- Längsfestigkeit: konstruktive Auslegung des Schiffes,
- Informationen zur Stauung von Containern,
- Berechnung von Tiefgang³⁴ und Trimm³⁵,
- Tabelle der Sichtweite,
- Freibord³⁶,
- Fassungsvermögen des Tanks.

Die Stabilitätsunterlagen an Bord sollten die voraussichtlichen Betriebsbedingungen abdecken können. Die IMO-Normen legen ein minimales GM fest, nennen jedoch kein Maximum. Zum Zeitpunkt des Unfalls betrug der durchschnittliche Tiefgang der MSC ZOE 12,4 m. Mit diesem Tiefgang muss das minimale GM gemäß der Tabelle in der Stabilitätsunterlage 3,5 m betragen.

Die Beispielbedingungen im Ladungssicherungshandbuch basieren auf einem GM-Wert von $\leq 2,08$ m, für alle anderen GM-Werte sollte der Ladungsrechner an Bord verwendet werden, um die entsprechenden Berechnungen durchzuführen. Die MSC ZOE fuhr mit einem Solid³⁷ GM von 10,23 m, das bezüglich der (teilweise) gefüllten Tanks korrigiert wurde, die sogenannte Free Surface Correction. Im Ladungsrechner wurde das korrigierte GM von 9,01 m verwendet. Demzufolge fuhr die MSC ZOE mit hoher Stabilität.

Die Tabelle in der Stabilitätsunterlage bestätigt, dass ein festes GM von 10,23 zwar einen hohen Wert darstellt, dies aber für die MSC ZOE keine ungewöhnliche Situation war (siehe Abbildung 34).

³³ Aufgrund eines Wassereintrages.

³⁴ Der Tiefgang des Schiffsrumpfes ist der vertikale Abstand zwischen der Wasserlinie und der Unterkante des Rumpfes (Kiel).

³⁵ Trimm ist der Unterschied im Tiefgang vorn und achtern.

³⁶ Der Freibord eines Schiffes ist der Abstand von der Wasserlinie bis zum Oberdeck.

³⁷ Ein Solid GM wird auf Basis eines Schwerpunktes berechnet, der nicht um den Free Surface Effekt korrigiert ist. Die Wirkung der Flüssigkeit in den Schiffstanks kann zu einer Verlagerung des Schwerpunkts führen und dadurch ein anderes GM ergeben.

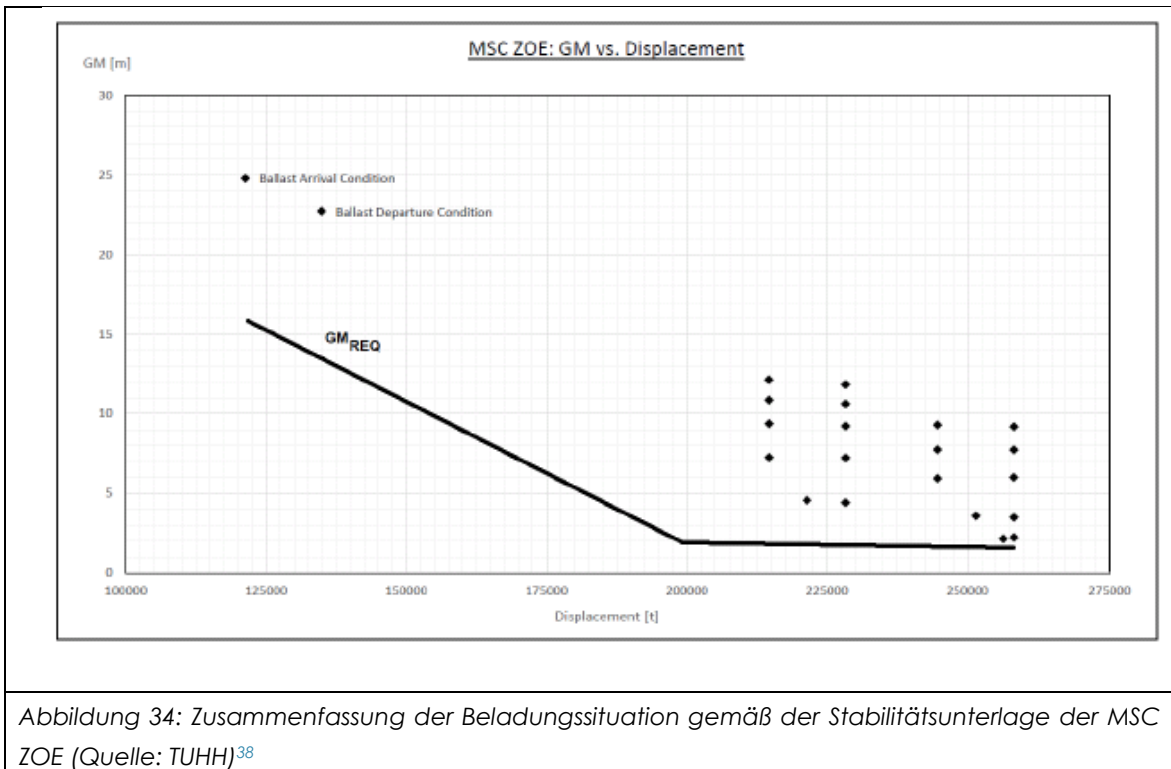


Abbildung 34: Zusammenfassung der Beladungssituation gemäß der Stabilitätsunterlage der MSC ZOE (Quelle: TUHH)³⁸

Einfluss des GM-Wertes auf die Rollbewegung

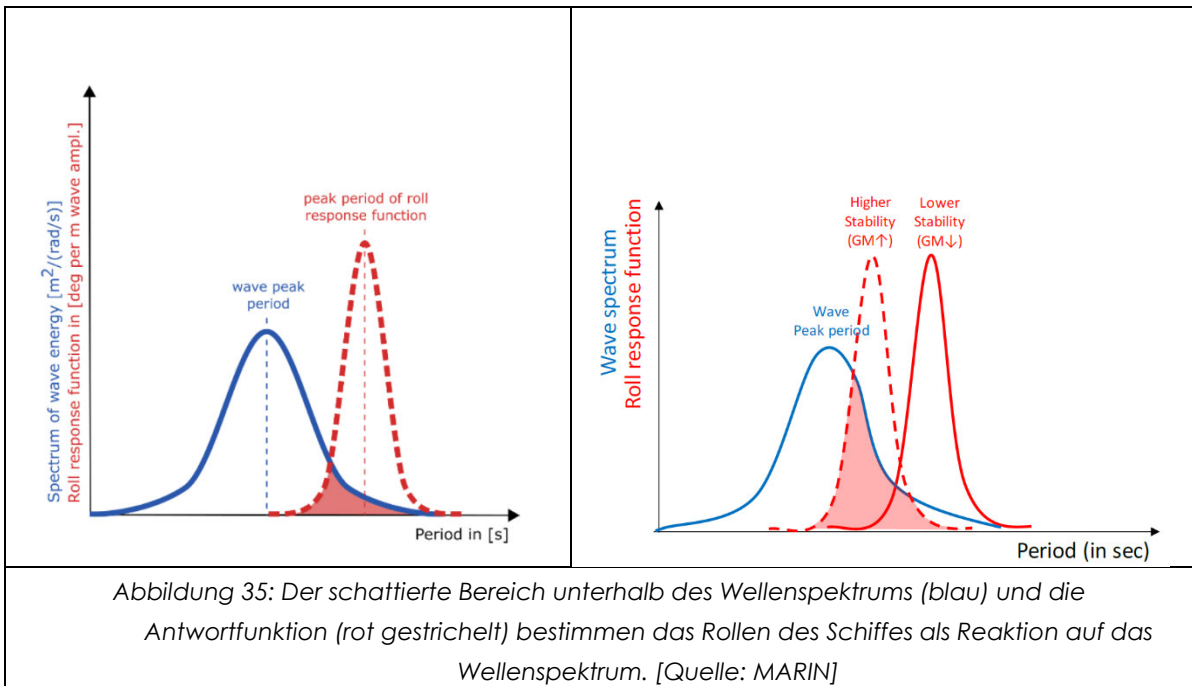
Die Rollbewegung eines Schiffes kann durch Wellen beeinflusst werden, die auf das Schiff einwirken. Bei der Betrachtung der Rollbewegung eines Schiffes sind zwei Parameter wichtig für die Zeitspanne, die das Schiff nach der Anregung durch eine Welle schwingt:

- die Wellenperiode,
- die Eigenperiode des Schiffes.

Wie bei allen mechanischen Systemen kommt es zu einer Resonanzsituation, wenn sich die Erregungsperiode der Eigenperiode des Schiffes nähert. Abbildung 35 zeigt ein Beispiel für das Wellenspektrum und die resultierende Rollbewegung eines Schiffes. Die Rollbewegung des Schiffes nimmt zu, wenn die Spitze der Rollantwortfunktion des Schiffes näher an der aufgetretenen Spitzenwellenperiode liegt.

Das GM eines Schiffes wirkt sich auf diese Rollantwortfunktion aus. MARIN stellt in seinem Bericht (Anhang D) fest, dass die heutigen ULCS wegen ihrer großen Breite und einem verhältnismäßig tief liegenden Schwerpunkt durch die angewendeten Staupläne eine relativ hohe Rollstabilität aufweisen. Infolgedessen ist es wahrscheinlicher, dass diese Schiffstypen eine stärkere Rollreaktion hinsichtlich der Wellenperioden in der Nordsee nördlich der Watteninseln aufweisen.

³⁸ Die Verdrängung eines Schiffes ist eine gewichtsbasierte Größe auf der Grundlage der Wassermenge, die der Schiffsrumpf bei unterschiedlicher Belastung verdrängt.



Starke Schiffsbewegungen führen aufgrund des stärkeren Rollens dazu, dass große Beschleunigungen auf die Container und die Laschaurüstung an Deck des Schiffes wirken. Die auf ULCS vorhandenen Laschmaterialien unterscheiden sich nicht von den auf allen anderen Containerschiffstypen eingesetzten. Sie berücksichtigen demzufolge nicht die höheren Beschleunigungswerte, die aufgrund des stärkeren Rollens auftreten können.

Die Rollbewegung eines Schiffes wird durch die Rolldämpfung beeinflusst. Folgende Faktoren sind für die Rolldämpfung von Bedeutung: Fahrgeschwindigkeit, Form des Schiffsrumpfes, Bilgenkiele, Schlingertanks. Der Bericht der TUHH (Anhang E) zeigt den Einfluss der Schiffsgeschwindigkeit auf den Rollwinkel und stellt die Ergebnisse der numerischen Berechnungen dar, die für verschiedene Schiffsgeschwindigkeiten durchgeführt wurden. Eine Erhöhung der Schiffsgeschwindigkeit erhöht die Dämpfungskräfte, was zu einer Verringerung der Beschleunigungen führt.

Die BSU hat die TUHH ebenfalls gebeten, den Einfluss der Bilgenkielgröße auf die Rolldämpfung und die daraus resultierenden Querbeschleunigungen zu untersuchen. Die Ergebnisse sind ebenfalls in Anhang E dargestellt. Es zeigt sich, dass größere Bilgenkiele einen Einfluss auf die Beschleunigungen haben – die Beschleunigungen nehmen ab. Die TUHH kommt zu dem Schluss, dass größere Containerschiffe wie die MSC ZOE in Situationen mit hoher Stabilität möglicherweise eine unzureichende Rolldämpfung aufweisen. Diese Erkenntnisse hinsichtlich des Einflusses von Geschwindigkeit und Größe der Bilgenkiele tragen weiter zu dem Problem der Rollbewegungen von Schiffen mit hoher Stabilität in Wellenperioden bei, wie sie im Falle der Fahrtrouten nördlich der Watteninseln auftreten.

Einige hier erwähnte Punkte sind bereits seit längerer Zeit bekannt und wurden im Rahmen von Unfalluntersuchungen behandelt, so zum Beispiel von der BSU im Falle der CHICAGO

EXPRESS im Jahre 2008 und der CCNI GUAYAS im darauffolgenden Jahr³⁹. Jedoch wurden die entsprechenden Sicherheitsempfehlungen nicht umgesetzt.

Forschung und Entwicklung im Bereich Sicherheit

Frühere Forschungsprojekte haben sich auch mit dem Laschen von Ladungen auf Containerschiffen befasst. Das Lashing@Sea-Projekt, das 2006 startete und drei Jahre dauerte, untersuchte, wie man innovativ sein und gleichzeitig die Sicherheitsstandards beibehalten und/oder verbessern kann. Es handelte sich um ein Gemeinschaftsprojekt der Industrie, das sich mit der Sicherheit und Effizienz von Containerschiffen, Ro-Ro-Schiffen und Schwerguttransportschiffen befasste. Ergebnisse aus dem Lashing@Sea-Projekt bezüglich Containerschiffe waren:

- Eine Reihe von unerklärlichen Vorfällen in Verbindung mit Ladungsverlusten deutete darauf hin, dass „neuartige“ Phänomene das Sicherheitsniveau verringert haben könnten.
- Der Containertransport nahm dramatisch zu, von 4.000 auf 15.000 TEU und von 4–5 Lagen auf 7–8 Lagen. Die Regeln für das Stauen von Containern blieben unverändert.
- Die Dynamik aufgrund der Flexibilität des Schiffes und die Interaktion von benachbarten Reihen sind Faktoren, die die geladenen Container gefährden können. Das Projekt ergab, dass die Beschleunigungen, die auf einem Schiff wirken, aufgrund der Biegung des Schiffsrumpfes im Vergleich zu einem starren Körper um 50 % verstärkt sein können.
- Dynamiken bei Containerstapeln: Bei ordnungsgemäß gesicherten Reihen war die Wirkung von einer oder zwei Reihen, die durch zusätzliches Gewicht und Lockerung der Laschings destabilisiert wurden, dramatisch, wobei die Belastung um bis zu 200 % zunahm.
- Die Zuverlässigkeit der Belastbarkeit kann demzufolge abweichen, was bedeutet, dass kritische Grenzen überschritten werden könnten.
- Rückmeldungen aus der Befragung der Besatzungen ergaben, dass etwa 50 % der Befragten angaben, es sei schwierig, das Ausmaß der sich entwickelnden Wellen- und Ladungsbelastungen auf sehr großen Containerschiffen von der Brücke aus zu beurteilen. Dies macht es unmöglich zu beurteilen, ob die Lasten sich in sicheren Grenzen bewegen und wann vorbeugende Maßnahmen zur Vermeidung von Schäden ergriffen werden müssen.

Auf Basis dieser Ergebnisse wurden (unter anderem) Maßnahmenvorschläge zur Verhinderung des Verlusts von Containern von Australien, den Niederlanden und Dänemark 2011 bei der IMO eingereicht (MSC 89/22/11).

Die folgenden Maßnahmen waren vorgesehen:

- Änderungen der SOLAS-Regelungen VI/2 und VI/5.5, durch die die Anforderung verschärft wird, dass Verloader überprüfen müssen, ob die Bruttomasse der Güter mit der in den Versandpapieren angegebenen Bruttomasse übereinstimmt, und dass Container nicht mit mehr als dem auf dem (vom DSC-Unterausschuss auszuarbeitenden) Sicherheitszulassungsschild angegebenen maximalen Bruttogewicht beladen werden dürfen,

³⁹ Untersuchungsberichte der BSU 510/08 und 391/09, beide veröffentlicht unter www.bsu-bund.de.

- Richtlinien zur korrekten Stauung und vertikalen Gewichtsverteilung von Containerstapeln (vom DSC-Unterausschuss auszuarbeiten),
- einheitliche Auslegung der Ladungssicherung, die Umweltbedingungen wie Wind, Seegang und Beschleunigungswerte berücksichtigt (von IACS auf Antrag des Ausschusses und zur Prüfung durch den Unterausschuss DE auszuarbeiten), und
- ein Feedback-Instrument und Richtlinien für die Besatzung zum Umgang mit extremen GM-Situationen (vom SLF-Unterausschuss in Zusammenarbeit mit dem STW-Unterausschuss zu entwickeln, sofern zutreffend).

Dies hat zu den folgenden Entwicklungen im Bereich Sicherheit geführt:

- SOLAS-Vorschrift (2016); das Gewicht eines Containers für den Export muss vor dem Laden auf ein Schiff überprüft werden (MSC.1/Circ.1475)
- Änderungen der ISO-Norm 3874 (2017); Frachtcontainer – Umschlag und Sicherung
- Änderungen CTU-Code (2014); Code of Practice for Packing of Cargo Transport Units (MSC.1/Circ.1497)
- Änderungen CSS-Code (2014); Cargo Stowage and Securing Code (MSC.1/Circ.1352/Rev.1)
- Änderungen Ladungssicherungshandbuch (2014); Cargo Securing Manual Revised guidelines for the preparation of the Cargo Securing Manual, (MSC.1/Circ.1353/Rev.1)
- Überarbeitete Anleitung für den Kapitän zur Vermeidung gefährlicher Situationen bei ungünstigen Wetter- und Seeverhältnissen (MSC.1/Circ.1228)

Im November 2009 veröffentlichte das World Shipping Council (WSC) und die International Chamber of Shipping (ICS) die Publikation „Safe Transport of Containers by Sea: Guidelines on Best Practices“.

Weitere Erkenntnisse aus dem Lashing@Sea-Projekt:

- Die Zuverlässigkeit kann je nach Ladesituation abweichen, was bedeutet, dass kritische Grenzen überschritten werden können.
- Zulässige Grenzwerte könnten überschritten werden: Von der Besatzung wird erwartet, dass sie extreme Beschleunigungen durch parametrische Oszillation, dynamischen Stabilitätsverlust, Resonanzschwingungen und stoßartige Belastungen durch Slamming oder Stampfen verhindert. Diese Faktoren sind daher nicht in den Grundsätzen enthalten. Aufgrund der Größe der Schiffe hat die Besatzung aber immer weniger Gefühl für das Schiff. Es gibt weniger Kontrollmöglichkeiten aufgrund begrenzter Ballastoptionen und extremer GM-Werte.
- Beschleunigung durch Verformung des Rumpfes. Moderne Containerschiffe sind so groß und flexibel, dass ihre Eigenschwingungen den Wellenperioden gleichen. Infolgedessen kann der Rumpf über die normale Bemessungslast hinaus schwingen.
- Benachbarte Stapel von Containern werden getrennt voneinander berechnet. In der Praxis lehnen diese Stapel aneinander und bei schwerem Wetter bewegen sie sich

hin und her und kollidieren. Modellversuche haben gezeigt, dass mehrere Stapel in Resonanz treten und kollabieren können, wenn die Eigenschwingungen des Schiffes die gleiche Frequenz wie die Eigenfrequenz der Containerstapel aufweisen.

Die MSC ZOE fuhr mit korrigiertem GM von 9,01 m, d. h., die MSC ZOE fuhr mit hoher Stabilität. Infolgedessen ist es wahrscheinlich, dass die MSC ZOE in Bezug auf die Wellenperioden in der Nordsee nördlich der Watteninseln stärker rollte. Starke Schiffsbewegungen führen aufgrund des stärkeren Rollens dazu, dass große Beschleunigungen auf die Container und die Laschausrüstung an Deck des Schiffes wirken.

Große Bilgenkiele reduzieren die Beschleunigungswerte. Die TUHH kommt zu dem Schluss, dass Containerschiffe wie die MSC ZOE in Situationen mit hoher Stabilität möglicherweise eine unzureichende Rolldämpfung aufweisen. Diese Erkenntnisse hinsichtlich des Einflusses von Geschwindigkeit und Größe der Bilgenkiele tragen weiter zu dem Problem der Rollbewegungen von Schiffen mit hoher Stabilität in Wellenperioden bei, wie sie im Falle der Fahrtrouten nördlich der Watteninseln auftreten.

Die auf ULCS genutzten Laschmaterialien unterscheiden sich nicht von den auf allen anderen Containerschiffstypen eingesetzten. Sie berücksichtigen demzufolge nicht die höheren Beschleunigungswerte, die aufgrund des stärkeren Rollens auftreten können.

Nicht alle Ergebnisse aus dem Lashing@sea-Projekt, die auf große Risiken hinsichtlich der Überschreitung von Grenzen, die Resonanz des Schiffes mit den Wellen und die Resonanz der Stapel mit den Schiffen hinweisen, führten zu einer Änderung von Regularien oder einer anderen Praxis.

6 BEDINGUNGEN AUF SEE UND SCHIFFSBEWEGUNGEN

Die MSC ZOE verlor 342 Container auf der Fahrtroute nördlich der Watteninseln. In den vorangegangenen Kapiteln wurden der Ablauf der Ereignisse und die Beladungssituation des Schiffes beschrieben. Das Verständnis der Umweltbedingungen, die auf die MSC ZOE einwirkten, und der Schiffsbewegungen ist für das Verständnis der Ereignisse von wesentlicher Bedeutung.

Die Bedingungen, die auf die MSC ZOE einwirkten, wurden daher weiter untersucht. In diesem Kapitel werden zunächst die Umweltbedingungen in der Nacht vom 1. auf den 2. Januar beschrieben. Anschließend wurden auf Basis dieser Bedingungen das Verhalten eines großen Containerschiffes und die Risiken eines Überbordgehens von Containern analysiert. Die durchgeführten Untersuchungen haben neue Erkenntnisse über die Bedingungen, Schiffsbewegungen und hydrodynamischen Phänomene ergeben, die in diesem Teil der Nordsee auftreten können. Die wichtigsten Ergebnisse werden in diesem Kapitel vorgestellt. Die vollständigen Untersuchungsberichte sind in den Anhängen C, D und E enthalten.

6.1 Umweltbedingungen

Dieser Abschnitt enthält zunächst Informationen über die Wetter- und Seebedingungen in dem betreffenden Gebiet zum Zeitpunkt des Unfalls, gefolgt von den Wetterinformationen, die der Brückenbesatzung in Form von über NAVTEX übermittelten Vorhersagemeldungen zur Verfügung standen.

6.1.1 Wetter

Der Deutsche Wetterdienst (DWD) nahm eine allgemeine Einschätzung des Wetters im südlichen Teil der Deutschen Bucht zum Zeitpunkt des Unfalls vor (Anhang B). Der DWD verfügt über Messungen und Beobachtungen von verschiedenen umliegenden Stationen sowie über Berichte von Schiffen und verwendet verschiedene Wetter- und Seegangsmodelle zur Auswertung.

Das Wetter in der Nacht vom 1. auf den 2. Januar 2019 wurde durch ein Orkantief mit 985 hPa über dem Finnischen Meerbusen beeinflusst, das sich langsam in südöstlicher Richtung bewegte (siehe Wetterkarte in Abbildung 36). Dem stand ein ausgedehntes Hoch mit 1045 hPa über Großbritannien gegenüber, das mit einem Keil mit 1030 hPa auf Marokko übergriff. Dies löste das Entstehen einer strammen nordwestlichen Luftströmung über der Nordsee aus.

Der DWD führte für den 1. Januar um 22:00 Uhr Ortszeit (21:00 Uhr UTC) und den 2. Januar um 01:00 Uhr Ortszeit (00:00 Uhr UTC) eine Analyse der Windverhältnisse für das Unfallgebiet im südlichen Teil der Deutschen Bucht durch (siehe auch Grafiken in Anhang B). Gemäß dieser Analyse wehte der Wind von etwa 340° (Nord-Nordwest) und erreichte im Durchschnitt 35 Knoten (18,0 m/s, 8 Bft⁴⁰) und um 01:00 Uhr Ortszeit bis zu 40 Knoten (20,6 m/s, 8 Bft). Gleichzeitig traten aufgrund der instabilen Luftschichtung mit hoher Wahrscheinlichkeit Böen mit Windstärken von 2 über der mittleren Windstärke auf.

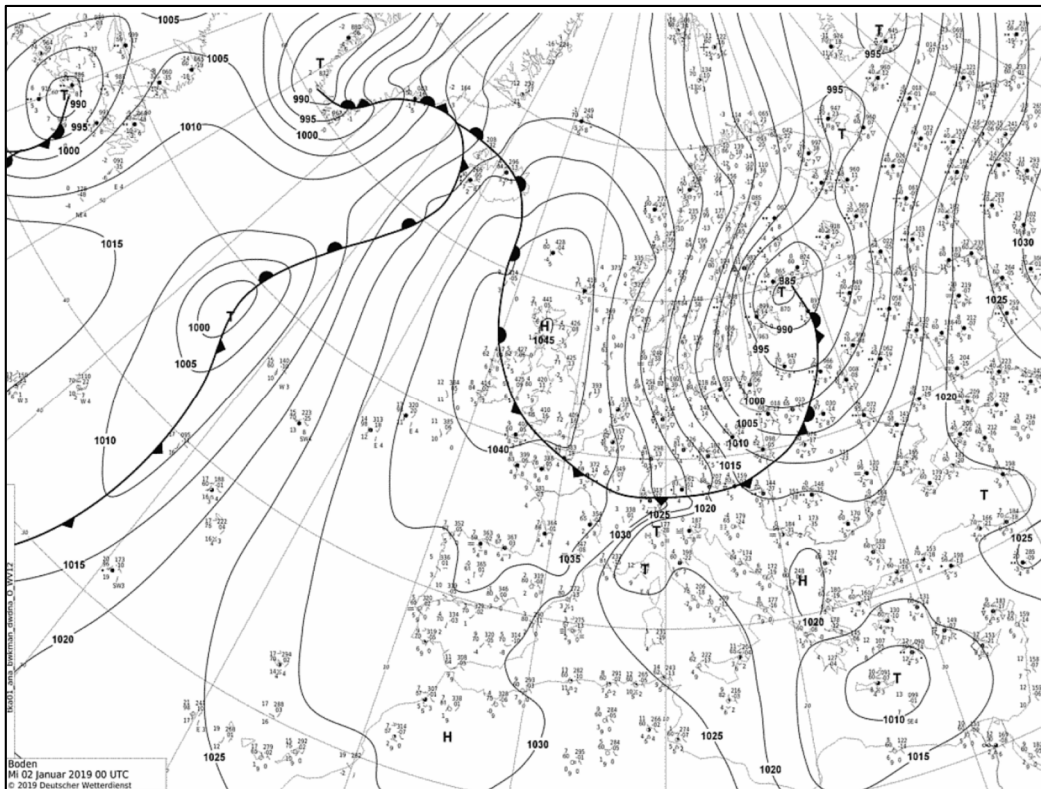


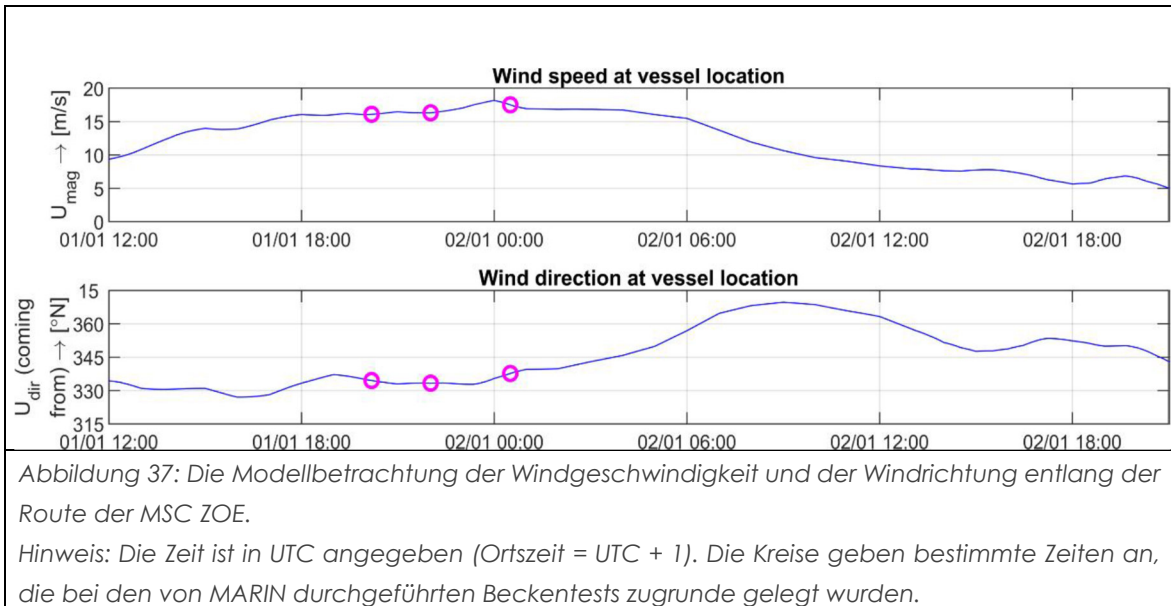
Abbildung 36: Wetterkarte: Bodenluftdruck- und Frontenanalyse des DWD für den 2. Januar 2019, 00:00 UTC (Quelle: DWD)

Das Forschungsinstitut Deltares führte für den 1. und 2. Januar 2019 eine Untersuchung der meteorologischen Bedingungen in der Nordsee entlang der Fahrtroute der MSC ZOE durch. Die vollständige Studie ist in Anhang C zu finden. Deltares verwendete reale Messdaten zur Bestimmung der MetOcean-Bedingungen entlang der Fahrtroute und numerische Modelle für diejenigen Stellen im Gebiet, für die keine Messungen verfügbar waren. Die Fahrtroute des Schiffes (Ort und Zeitpunkt) wurde mit den Deltares-Modell-Ergebnissen der Umweltparameter in Beziehung gesetzt. Dadurch konnten die Bedingungen ermittelt werden, auf die die MSC ZOE nördlich der Watteninseln auf ihrer Route traf.

Die Modellbetrachtung der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung entlang der Route der MSC ZOE ist in Abbildung 37 dargestellt. Am 1. Januar änderte sich die Windrichtung allmählich von West nach Nord-Nordwest. Die Windgeschwindigkeit nahm im Laufe des

⁴⁰ Windstärke 8 Bft entspricht Windgeschwindigkeiten zwischen 34 und 40 Knoten bzw. 12,2 und 20,7 m/s.

Tages zu. Zu der Zeit, als der Sturm seinen Höhepunkt erreichte (am 2. Januar um ca. 01:00 Uhr Ortszeit), fuhr die MSC ZOE nördlich von Schiermonnikoog.



Diese Daten deuten darauf hin, dass der Wind nahezu genau querab auf das Schiff traf. Die Windgeschwindigkeiten, denen die MSC ZOE ausgesetzt war, lagen zwischen 16 und 18 m/s (bis zu 8 Bft) mit Böen der Windstärke 10.

Deltares hat eine statistische Analyse dazu durchgeführt, wie oft diese Werte in der Nordsee überschritten werden. Diese Analyse zeigt, dass dieser Zustand im Durchschnitt ein bis zwei Mal pro Jahr eintritt bzw. überschritten wird. Daher können diese schweren Bedingungen nicht als besonders extrem oder außergewöhnlich angesehen werden.⁴¹

Die Windgeschwindigkeiten, denen die MSC ZOE im VTG Terschelling–German Bight ausgesetzt war, lagen zwischen 16 und 18 m/s (bis zu 8 Bft) mit Böen der Windstärke 2 über dem Mittelwert. Der Sturm erreichte seinen Höhepunkt am 2. Januar gegen 01:00 Uhr Ortszeit. Der Wind traf querab auf das Schiff. Die Bedingungen, denen das Schiff ausgesetzt war, sind für diesen Bereich der Nordsee nicht besonders extrem oder außergewöhnlich.

6.1.2 Bedingungen auf See

Während der Passage in östlicher Richtung durch das VTG Terschelling–German Bight traf die MSC ZOE auf starken Wind aus nordnordwestlicher Richtung. Das Auftreten dieser Windrichtung auf der Nordsee hat zur Folge, dass sich Wellen bilden, da die Windstreichlänge ausreichend groß ist.

⁴¹ Zum Zeitpunkt des Höhepunkts des Sturms (2. Januar, 00:00 Uhr) wurde die Windgeschwindigkeit in einigen Fällen unterschätzt. Dies betrifft jedoch nicht die Schlussfolgerungen hinsichtlich der Außergewöhnlichkeit der Bedingungen.

Eine Welle kann durch die Wellenhöhe (vertikaler Abstand zwischen Wellenberg und Wellental), die Wellenlänge (Abstand zwischen zwei Wellenbergen), die Wellenperiode (Zeit zwischen zwei Wellenbergen) und die Ausbreitungsrichtung charakterisiert werden. Eine in tiefen Gewässern entstehende Welle ist typischerweise sinusförmig (siehe Abbildung 38).

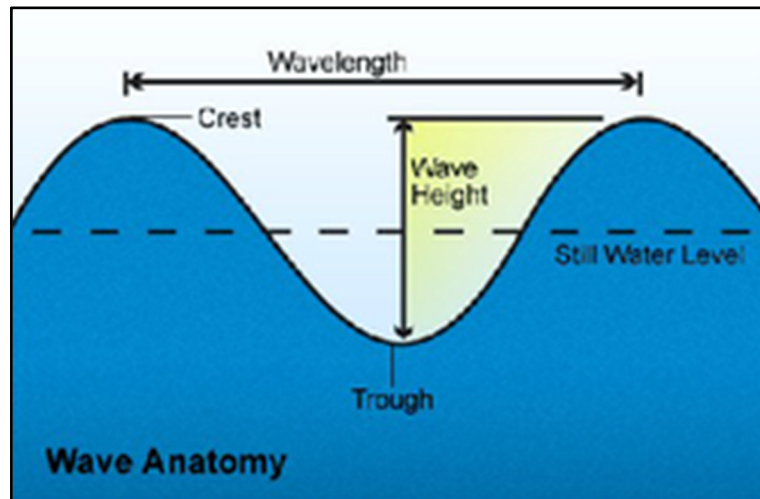


Abbildung 38: Schematische Darstellung der Wellen mit Wellenhöhe und Wellenlänge

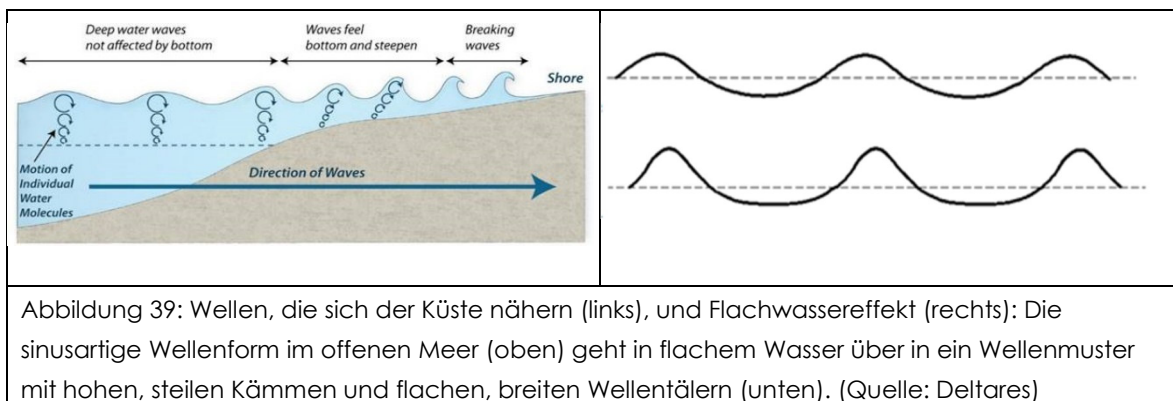
Ein Wellenfeld besteht aus vielen Wellenkomponenten mit unterschiedlichen Höhen und Wellenperioden. Die folgenden Parameter werden zur Beschreibung eines Wellenfeldes verwendet:

- Die signifikante Wellenhöhe H_s ist ein Maß zur Beschreibung der mittleren Höhe des oberen Drittels der in einem Wellenfeld auftretenden Wellen. Sie dient quasi als Maß zur Beschreibung der Höhe der Wellenbedingungen eines Wellenfeldes.
- Die maximale Wellenhöhe H_{max} ist die größte vorkommende einzelne Wellenhöhe von 1.000 Wellen.
- Die Spitzenwellenperiode T_p ist die Wellenperiode, die der höchsten Spitze im Frequenzspektrum des Wellenfelds entspricht und die die Verteilung der Wellenenergie über die verschiedenen Wellenfrequenzen (Wellenperioden) beschreibt.
- Wellenausbreitung: langkämmige und kurzkämmige Wellen. Anders als langkämmige Wellen haben kurzkämmige Wellen in einem Wellenfeld eine stärker gerichtete Ausbreitung. Kurzkämmige Wellen sind typischer für die Situation auf See. In der Regel werden von der maritimen Industrie die langkämmigen Wellen⁴² betrachtet, da sie Vorhersagen liefern, von denen allgemein angenommen wird, dass sie konservativer sind und ihre numerische Modellierung weniger kompliziert⁴³ ist.

⁴² Das Fazit dieses Berichtes beruht auf Tests in realistischen kurzkämmigen Wellen.

⁴³ MARIN, Behaviour of an Ultra Large Container Ship in shallow water, 2020.

In flachen Gewässern werden die Wellen vom Meeresboden beeinflusst. Wenn sich eine Welle den Bereichen mit geringerer Wassertiefe in Küstennähe nähert, beeinflussen nichtlineare Flachwassereffekte die Form der Wellen. Dies führt zu einem Steilerwerden des Kammes und zu einer Verringerung (und Dehnung) der Täler (siehe Abbildung 39).⁴⁴ Es ist wahrscheinlicher, dass die steile Wellen in flachem Wasser brechen oder sich Schaum auf ihren Kämmen bildet, als dies bei weniger steilen Wellen in tiefem Wasser der Fall ist. In diesen Flachwasserbedingungen können steile Wellen auftreten, die mit hoher Geschwindigkeit vorne am Wellenkamm brechen.



Der DWD nahm eine Einschätzung der allgemeinen Seebedingungen im südlichen Teil der Deutschen Bucht vor. In der gesamten Nordsee betrug die signifikante Wellenhöhe (H_s) etwa 5,5 m mit einer Wellenperiode (T_p) von 13 Sekunden (siehe Abbildungen in Anhang B). Die statistisch zu erwartende maximale (H_{max})-Wellenhöhe lag bei etwa 10 m.

Der DWD ermittelte auch, dass die Strömung im betrachteten Zeitraum zunächst bei 1 Knoten von Ost nach West (270°) lag und am 2. Januar bis 03:00 Uhr Ortszeit (02:00 Uhr UTC) auf 250° drehte. Später fiel sie auf 0,7–0,8 kn. Dementsprechend wirkte sich die Strömung kaum auf das Wellenverhalten aus, sondern verlief fast rechtwinklig zum Seegang.

Deltares modellierte die Wellenbedingungen, denen die MSC ZOE während ihrer Fahrt im VTG Terschelling–German Bight begegnete, basierend u. a. auf Informationen von drei Messbojen und fünf Offshore-Stationen (siehe Abbildung 40). Die Wellenhöhe, auf die die MSC ZOE traf, entwickelte sich mit zunehmender Windgeschwindigkeit. Am 1. Januar um etwa 15:00 Uhr Ortszeit – zu der Zeit, zu der das Schiff an der niederländischen Westküste entlangfuhr – betrug die signifikante Wellenhöhe (H_s) 2,5 m. Fünf Stunden später, um 20:00 Uhr, betrug die signifikante Wellenhöhe (H_s) etwa 5,2 m. Das Schiff traf um etwa 01:00 Uhr am 2. Januar, nachdem es die Insel Schiermonnikoog passiert hatte, auf die größten Wellen mit einer signifikanten Wellenhöhe von 6,5 m. Die Spitzenwellenperiode (T_p), die zu den Zeitpunkten der Containerverluste (zwischen 20:00 Uhr und 01:30 Uhr Ortszeit) auftrat, lag zwischen 11,8 und 12,5 Sekunden.

Die maximale Wellenhöhe in dieser Zeit erreichte bis zu 11 m. Deltares hält es für wahrscheinlich, dass das Schiff entlang seiner Fahrtroute auf höhere Einzelwellen stieß,

⁴⁴ Deltares, North Sea conditions on 1 and 2 January 2019, 2019.

als der Wert der signifikanten Wellenhöhe (H_s) angibt. Ob das Schiff dieser maximalen Wellenhöhe tatsächlich ausgesetzt war, kann nicht bestätigt werden, da solche individuellen höheren Wellen überall im Wellenfeld aufgetreten sein können.

Deltares kommt auch zu dem Schluss, dass die lokalen Wellenbedingungen durch geringere Wassertiefen beeinflusst wurden. Vor allem die höchsten und längsten Wellen werden steilere und höhere Wellenberge und flachere Wellentäler gezeigt haben. Nicht-lineares Wellenverhalten wie z. B. White-Capping aufgrund steilerer Wellenberge trat entlang der Fahrtroute auf, was zu komplexeren Wellenbedingungen im Vergleich zu Situationen mit linearen Wasserwellen in tiefen Gewässern führte.

Auch der Wasserstand und die entsprechenden Wassertiefen, die die MSC ZOE auf ihrer Fahrtroute durchfuhr, wurden bestimmt. Die Ergebnisse zeigen, dass während der kritischen Phase der Fahrt, zwischen 20:00 Uhr Ortszeit am 1. Januar und 00:30 Uhr am 2. Januar, der Wasserstand fiel (Ebbe-Flut-Phase). Der niedrigste Tidewasserstand im Januar wurde um 00:30 Uhr erreicht. Insgesamt lässt sich feststellen, dass der Wasserstand MSL⁴⁵+0 m bis MSL+1 m betrug. Aufgrund des positiven Ausgleicheffekts, der durch die während des Sturms auftretenden windinduzierten Wellen verursacht wurde, sank der Niedrigwasserstand nicht unter den MSL.

Das Vorhandensein von sturmbedingten Wellen, die den gesamten Gezeitenzyklus nach oben ausgleichen, führte dazu, dass die Wasserstände um den Zeitpunkt der Ebbe nicht unter den MSL absanken. Die zeitliche Abfolge der Wasserstände in Verbindung mit dem Meeresbodenniveau entlang der Route führte dazu, dass das Schiff an diesen Tagen an zwei Stellen entlang der befahrenen Strecke auf relativ geringe Wassertiefen stieß (etwa 20–22 m). Die betreffenden Wassertiefen hätten sogar noch geringer sein können, wenn die niedrigsten Tidewasserstände aufgetreten wären, während sich das Schiff an der flachsten Stelle befand.

Deltares hat eine statistische Analyse dazu durchgeführt, wie oft diese Werte in der Nordsee überschritten werden. Die Wellenbedingungen als Folge eines Sturms werden im Durchschnitt ein bis zwei Mal im Jahr überschritten. Daher können diese Bedingungen nicht als sehr extrem oder außergewöhnlich angesehen werden.⁴⁶

⁴⁵ Mean Sea Level.

⁴⁶ Zum Zeitpunkt des Höhepunkts des Sturms (2. Januar, 00:00 Uhr) wurde die Windgeschwindigkeit in einigen Fällen unterschätzt. Dies betrifft jedoch nicht die Schlussfolgerungen hinsichtlich der Außergewöhnlichkeit der Bedingungen.

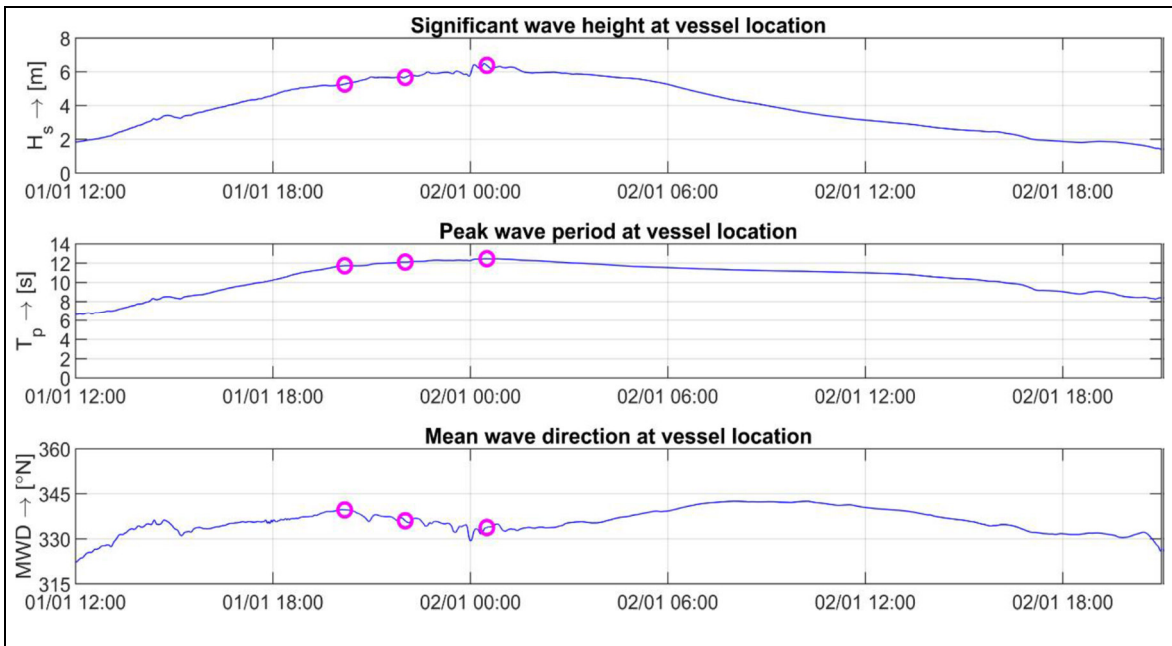


Abbildung 40: Die Wellenbedingungen entlang der Fahrtroute der MSC ZOE.

Hinweis: Die Zeit ist in UTC angegeben (Ortszeit = UTC + 1). Die Kreise geben bestimmte Zeiten an, die bei den von MARIN durchgeführten Beckentests zugrunde gelegt wurden.

Die Wellen trafen querab auf die MSC ZOE. Diese Wellenrichtung ermöglicht es den Wellen, sich entsprechend aufzubauen, da auf der Nordsee eine große Wirklänge besteht. Die signifikante Wellenhöhe stieg zur Hochzeit des Sturms von 5 m auf 6,5 m. Die maximale Wellenhöhe betrug in dieser Zeit bis zu 11 m. Die Zeitspanne, in der die Wellen die maximale Höhe erreichten, betrug etwa 11,8–12,5 Sekunden. Die Wellenbedingungen sind für diesen Teil der Nordsee nicht besonders extrem oder außergewöhnlich.

Das Schiff stieß an diesen Tagen zumindest an zwei Stellen entlang der Fahrtroute auf relativ geringe Wassertiefen (etwa 20–22 m).

6.1.3 Wettervorhersage-Informationen, die der Besatzung zur Verfügung standen

Auf internationaler Ebene ist die Zuständigkeit für Wetterdienste und meteorologische Warnungen für Schiffe in Kapitel 5 des SOLAS-Übereinkommens, Sicherheit der Schifffahrt, festgelegt, das von der Internationalen Seeschifffahrtsorganisation (IMO) veröffentlicht wurde. Die Staaten sind verpflichtet, Schiffe vor starken Winden, Stürmen und Tropenstürmen zu warnen und mindestens zweimal täglich Wettervorhersagen, die für die Schifffahrt nutzbar sind, über Funkdienste zu übermitteln.

Wettervorhersagen und Sicherheitswarnungen einschließlich Wetterwarnungen werden der Schifffahrt über Funk und NAVTEX-Berichte mitgeteilt. Auf diese Weise wird die internationale Schifffahrt mittels Vorhersagen und Warnungen auf dem Laufenden gehalten. Verschiedenen Staaten wie Deutschland, die Niederlande und das Vereinigte Königreich geben Berichte und Warnungen für das Nordseegebiet heraus, was zu einem gewissen Grad zu Überschneidungen führt. Es liegt in der Verantwortung der Besatzung, alle Sicherheitswarnungen zur Kenntnis zu nehmen, die für die vom Schiff zu befahrende Route gelten.

An Bord der MSC ZOE wurden die ausgedruckten NAVTEX-Berichte, die der Besatzung für den 1. und 2. Januar 2019 zur Verfügung standen, von den Untersuchern dokumentiert. Für das Gebiet der Deutschen Bucht nördlich der Watteninseln waren dies vor allem Berichte aus den Niederlanden und Deutschland. Eine Liste der Berichte ist in der nachfolgenden Tabelle 6 aufgeführt.

Die auf dem Schiff verfügbaren Vorhersagen entsprachen den von DWD und Deltares ermittelten Wetter- und Seebedingungen, denen die MSC ZOE ausgesetzt war. Es ist zu beachten, dass in den NAVTEX-Meldungen keine Informationen zu Wellenperioden enthalten sind.

Empfangen (UTC)	Übermittelt	Nachricht
07:01	NAVTEX-Hamburg	Deutsche Bucht: Nordwest etwa 7, vorübergehend etwas zunehmend, norddrehend. Orkanartige Böen. Schauern, See 7 Meter.
07:44	Niederländische Küstenwache	German Bight Fisher Nordwest 10
09:08	Niederländische Küstenwache	German Bight Fisher Nordwest 10
11:00	NAVTEX-Hamburg	Für die Deutsche Bucht: Stürmischer Wind Nordwest 8 bis 9 Bft
13:50	NAVTEX-Hamburg	Deutsche Bucht: Sturm Nordwest bis Nord 8 bis * Bft.
14:35	Niederländische Küstenwache	Prognose niederländische AWZ: German Bight Nordwest 10 Vorhersage gültig von Dienstag 15:00 bis Mittwoch 03:00 UTC: Deutsche Bucht, Nordwest 8-9, dreht von Nord nach Nordwest und abnehmend 8. Risiko von Schauern. Gut. Möglicherweise mäßiger Niederschlag. Wellenhöhe 5,5-7,5, abnehmend 5,0-6,5 Meter.
15:02	NAVTEX-Hamburg	Wettervorhersage für die Deutsche Bucht bis 02.01.2019 12 UTC: Deutsche Bucht, Nordwest 7 bis 8, vorübergehend etwas zunehmend, in einigen Gebieten 9. Nordverlagernd. Orkanartige Schauerböen, See 7 Meter.
16:52	Niederländische Küstenwache	German Bight Viking Nordwest 9
17:53	NAVTEX-Hamburg	DEUTSCHE BUCHT: NW 8-9, N-DREHEND, ABNEHMEND UM 5, ANFANGSORKANARTIGE SCHAUERBOEEN, SEE 7 m

19:00	NAVTEX-Hamburg	FÜR DEUTSCHE BUCHT: STÜRMISCHER WIND*NORDWEST BIS NORD 8 BIS 9 *?/5.
19:01	NAVTEX-Hamburg	?? nicht lesbar
?	Niederländische Küstenwache	GERMAN BIGHT FISHER NORD BIS NORDWEST 9
21:50	NAVTEX-Hamburg	DEUTSCHE BUCHT: STURM NORDWEST BIS NORD 8 BIS 9 BFT.
22:01	NAVTEX-Hamburg	DEUTSCHE BUCHT: STURM NORDWEST BIS NORD 7 BIS 8 BFT.
23:01	NAVTEX-Hamburg	FÜR DEUTSCHE BUCHT: STÜRMISCHER WIND NORDWEST BIS NORD 7 BIS 8 BF*.
23:03	NAVTEX-Hamburg	WETTERVORHERSAGE FÜR DIE DEUTSCHE BUCHT BIS 02.01.201* *8 UTC: NO*DWEST BIS NORD*7 BIS 8, ABNEHMEND UM 5, ERSTER STURM HEFTIGE BÖEN, SEE ERSTMALIG 6 METER.

Tabelle 6: Ausschnitte aus den NAVTEX-Berichten vom 1. Januar 2019 für die Deutsche Bucht, übermittelt von den Niederlanden und Deutschland, wie an Bord des MSC ZOE dokumentiert.

NAVTEX-Berichte zur Vorhersage der Windgeschwindigkeit und Wellenhöhe waren auf dem Schiff verfügbar. Die Vorhersagen entsprachen dem tatsächlichen Wetter. Die NAVTEX-Berichte enthielten keine Informationen über die Wellenperioden im betreffenden Gebiet.

6.2 Schiffsbewegungen

Wind und Wellen stellen äußere Kräfte dar, die auf ein Schiff einwirken. Als Reaktion auf diese Kräfte wird ein Schiff in Bewegung versetzt. Die Wirkung auf das Schiff hängt von der Richtung und den Parametern (wie Ausmaß und Häufigkeit des Auftreffens) der äußeren Kräfte, der Form des Rumpfes und der Stabilität des Schiffes ab. Ein Schiff hat sechs Freiheitsgrade, sich zu bewegen (siehe Abbildung 41):

- Tauchen (heave), Bewegung entlang der Hochachse,
- Schwoien (sway), Bewegung entlang der Querachse,
- Wogen (surge), Bewegung entlang der Längsachse,
- Rollen (roll), Bewegung um die Längsachse,
- Stampfen (pitch), Bewegung um die Querachse,
- Gieren (yaw), Bewegung um die Hochachse.

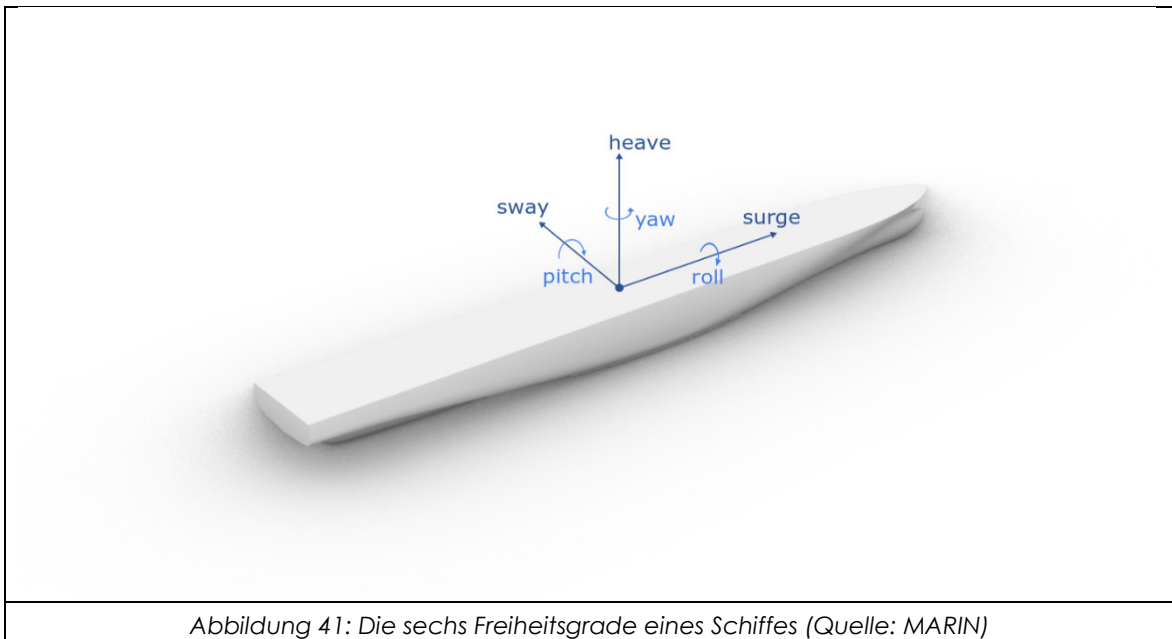


Abbildung 41: Die sechs Freiheitsgrade eines Schiffes (Quelle: MARIN)

Schiffsbewegungen erzeugen Beschleunigungen und daraus resultierende Kräfte in Längs-, Quer- und Vertikalrichtung, die auf die Besatzung, das Schiff und die Ladung wirken. Für die während des Unfalls auf der MSC ZOE herrschenden Bedingungen – Wind und Wellen, die querab auf das Schiff einwirkten – sind drei Freiheitsgrade vorherrschend: Rollen, Tauchen und Schwoien. Wird ein Schiff durch Wellen in Bewegung versetzt, setzt sich die Kraft der Wellen in Trägheitskräfte (Masse), Dämpfungskräfte und Rückstellkräfte (Stabilität) um.

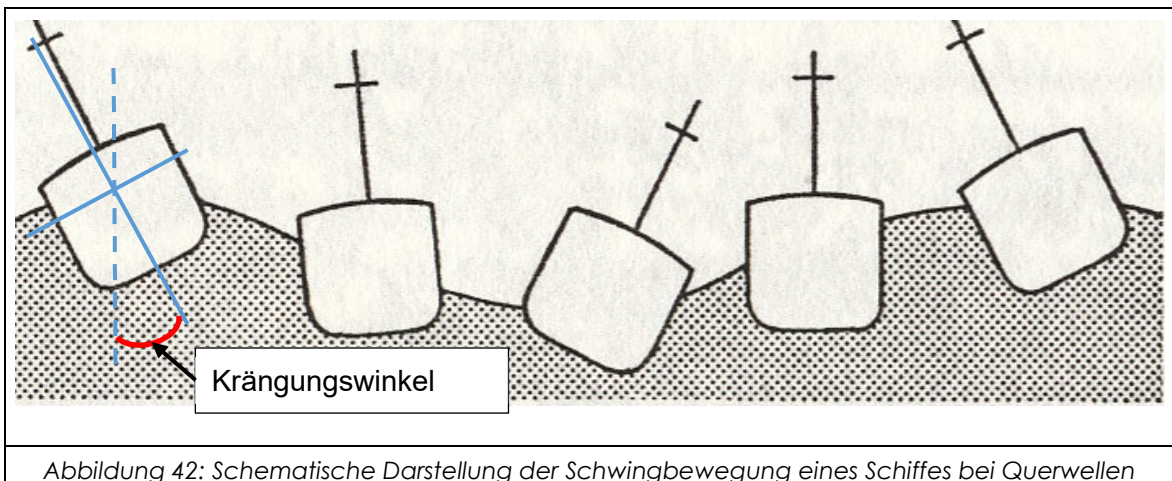


Abbildung 42: Schematische Darstellung der Schwingbewegung eines Schiffes bei Querwellen

Containerschiffe wie die MSC ZOE haben typischerweise Container an Deck gelagert. Die Schiffsbewegungen führen daher zu Beschleunigungen und Kräften, die auf die Ladung und die Sicherungseinrichtungen wie Twistlocks, Laschstangen und Laschbrücken wirken. Diese Kräfte können zu einer Überlastung der Container und/oder der Sicherungseinrichtungen und in Folge zu einem möglichen Überbordgehen von Containern führen.

Im vorigen Abschnitt wurden die Umweltbedingungen beschrieben, denen die MSC ZOE am 1. und 2. Januar ausgesetzt war. Das Schiff fuhr unter schweren, aber nicht außergewöhnlichen oder extremen Wetterbedingungen, Windstärke 8 Bft und einer signifikanten Wellenhöhe von 5 bis 6,5 m und einer maximalen Wellenhöhe von etwa 11 m, wobei sowohl Wind als auch Wellen aus nordnordwestlicher Richtung kamen. Die Situation im VTG Terschelling–German Bight war derart, dass sowohl Wind als auch Wellen querab auf das Schiff einwirkten. Das Schiff fuhr in flachem Wasser, was die Form der Wellen beeinflusste.

Als die MSC ZOE in das VTG Terschelling–German Bight einlief, trafen Wind und Wellen querab auf das Schiff. Dies führte dazu, dass das Schiff kontinuierlich rollte.

Von den Untersuchern wurde eine weitere Analyse anhand der VDR-Audioaufnahme durchgeführt. Auf den Aufzeichnungen der Mikrofone auf der Brücke wurde in bestimmten Abständen eine Amplitudenspitze festgestellt, die durch sich hin- und herbewegende Ausrüstungsgegenstände verursacht wurde. Man ging davon aus, dass die Bewegung der Ausrüstungsgegenstände auf das Rollen des Schiffes zurückzuführen war, und zwar in einem solchen Ausmaß, dass Objekte auf der Brücke anfangen, sich zu verschieben. Eine automatisierte Analyse wurde durchgeführt, um die Rollperiode und die Perioden zu bestimmen, in denen das Rollen am intensivsten war (für das menschliche Ohr hörbar).

Der Mittelwert, der Median und der Modus weisen darauf hin, dass eine volle Rollperiode des Schiffes etwa 14,7 Sekunden dauerte. Basierend auf der Audioanalyse wurde Abbildung 43 erstellt. Ausgeprägtere Rollphasen, in denen die Spitzen für das menschliche Ohr hörbar sind, sind rot gekennzeichnet.

Bei genauerer Betrachtung der GPS-Daten wurden beim Befahren des VTG Terschelling–German Bight Schwoibewegungen in der Spur des Schiffes festgestellt. Die Zeitspanne eines vollen Schwoiens entspricht der durch die Audioanalyse festgestellten Zeitspanne (ca. 14,7 Sekunden). Diese Schwoibewegung ist nicht erkennbar, als das Schiff vor dem Einlaufen in das VTG Terschelling–German Bight auf einem Kurs von etwa 26 Grad fuhr.



Abbildung 43: Perioden, in denen das Rollen intensiv genug war, um für das menschliche Ohr durch sich verschiebende Objekte auf der Brücke wahrnehmbar zu sein, sind rot gekennzeichnet.
Quelle: (Google Earth)

6.3 Simulationen und Modellversuche

Die Daten des VDR und die Aussagen der Besatzung zeigten, dass das Schiff kontinuierlich rollte. Das Verständnis der Schiffsbewegungen ist für die Rekonstruktion der Ereignisse von wesentlicher Bedeutung. Sowohl die BSU als auch das DSB konsultierten Experten auf dem Gebiet des Schiffsverhaltens auf See. Es wurden Berechnungen zum Seeverhalten und Modellversuche in einem Becken durchgeführt, da der VDR der MSC ZOE keine Daten über die tatsächlichen Rollbewegungen und Beschleunigungen, denen das Schiff ausgesetzt⁴⁷ war, registrierte.

Für die während des Unfalls herrschenden Bedingungen – Wind und Wellen, die querab auf das Schiff einwirkten – sind drei Freiheitsgrade vorherrschend: Rollen, Tauchen und Schwoien. Die folgenden Punkte wurden daher von den Experten weiter untersucht: Rollbewegungen, Beschleunigungen und Kielfreiheit. Unter Berücksichtigung der Querab-Situation, in der sich die MSC ZOE befand, kann parametrisches Rollen⁴⁸ für die MSC ZOE ausgeschlossen werden, da dieses Szenario bei Gegen- oder Folgesee auftritt.

⁴⁷ Es gibt VDR, die solche Bewegungen aufzeichnen, aber diese sind nicht verpflichtend.

⁴⁸ Das parametrische Rollen ist ein relativ seltenes Phänomen, das bei Gegen- oder Folgesee auftritt und durch ein sich schnell entwickelndes, erhebliches instabiles Schiffsrollen gekennzeichnet ist.

Die BSU beauftragte die Technische Universität Hamburg (TUHH) mit einer Simulation der Schiffsbewegungen und der daraus resultierenden Beschleunigungen. Die TUHH führte Berechnungen zum Seeverhalten unter Verwendung des Codes E4ROLLS durch. Es wurde ein Schiffsmodell entsprechend den Abmessungen und Merkmalen der MSC ZOE angefertigt. Die Simulationen wurden mit festem $GM=10,74$ m, einer Schiffsgeschwindigkeit von 10 kn, einer Wellenperiode von 13 Sekunden und $H_s = 5$ m durchgeführt.

Darüber hinaus schloss das DSB eine Partnerschaft mit dem Forschungsinstitut MARIN (Maritime Research Institute Netherlands) zur Durchführung von Modellversuchen in einem Becken (Abb. 44). Ziel war es, den Einfluss der Umweltbedingungen und der Eigenschaften von ultragroßen Containerschiffen (UCLS) im Allgemeinen auf das Risiko für das Schiff, Container zu verlieren, zu untersuchen. Da die verfügbaren Vorhersagemethoden das Verhalten von Schiffen in flachem Wasser und bei Wellengang, wie es zum Zeitpunkt des Unfalls gegeben war, nicht genau vorhersagen können, wurden diese Beckenversuche als unerlässlich erachtet. Für die Tests wurde ein Holzmodell eines Containerschiffes, in Größe und Form vergleichbar mit der MSC ZOE, nach internationalen Standards hergestellt.⁴⁹ Der Aufbau und die Stauung der Container wurden am Modell nachgebildet, basierend auf dem Stauplan der MSC ZOE vor dem Unfall.

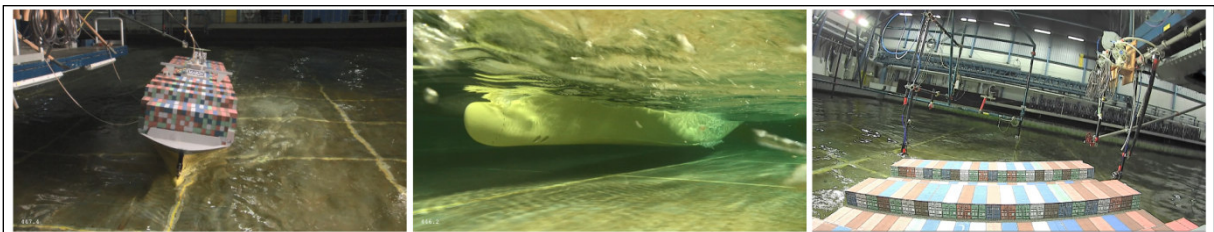


Abbildung 44: Maßstabsgetreues Modell im Testbecken von Marin mit Kameraperspektiven über und unter der Wasserlinie sowie von der Brücke (Quelle: MARIN)

Die in Abschnitt 6.1 vorgestellten Ergebnisse der Deltares-Studie wurden von MARIN als Grundlage für die Studie verwendet. Verschiedene Szenarien wurden in einem Becken mit Variation von GM ⁵⁰ (9,08 und 6,0 m), Schiffsgeschwindigkeit (0 Knoten und 10 Knoten⁵¹), Wassertiefe (21,3 m, 26,6 m, 37,5 m, 635 m) und verschiedenen Kombinationen von signifikanter Wellenhöhe H_s (5,2 m, 6,5 m, 7,5 m) und Wellenperiode (11,8 s, 12,4 s, 14,5 s) getestet. Deltares kam in ihrem Bericht zu dem Schluss, dass ihre Modelle die Windgeschwindigkeitsbedingungen leicht unterschätzt hatten. Dies beeinflusste auch die Wellengangbedingungen. Als Lösung für die daraus resultierende Unterschätzung des Wellengangs empfahl Deltares MARIN, dies als Teil der Tests durch die Berücksichtigung einer Reihe von Wellenbedingungen abzudecken, die auch leicht erhöhte Werte von H_s (signifikante Wellenhöhe) und T_p (Spitzenwellenperiode) beinhalten. Die Szenarien für die verschiedenen Wassertiefen repräsentieren die Bedingungen auf der Fahrtroute der MSC

⁴⁹ International Towing Tank Conference (ITTC).

⁵⁰ Korrigiertes GM .

⁵¹ Die tatsächliche Geschwindigkeit der MSC ZOE lag zu diesem Zeitpunkt zwischen 8 und 10 Knoten.

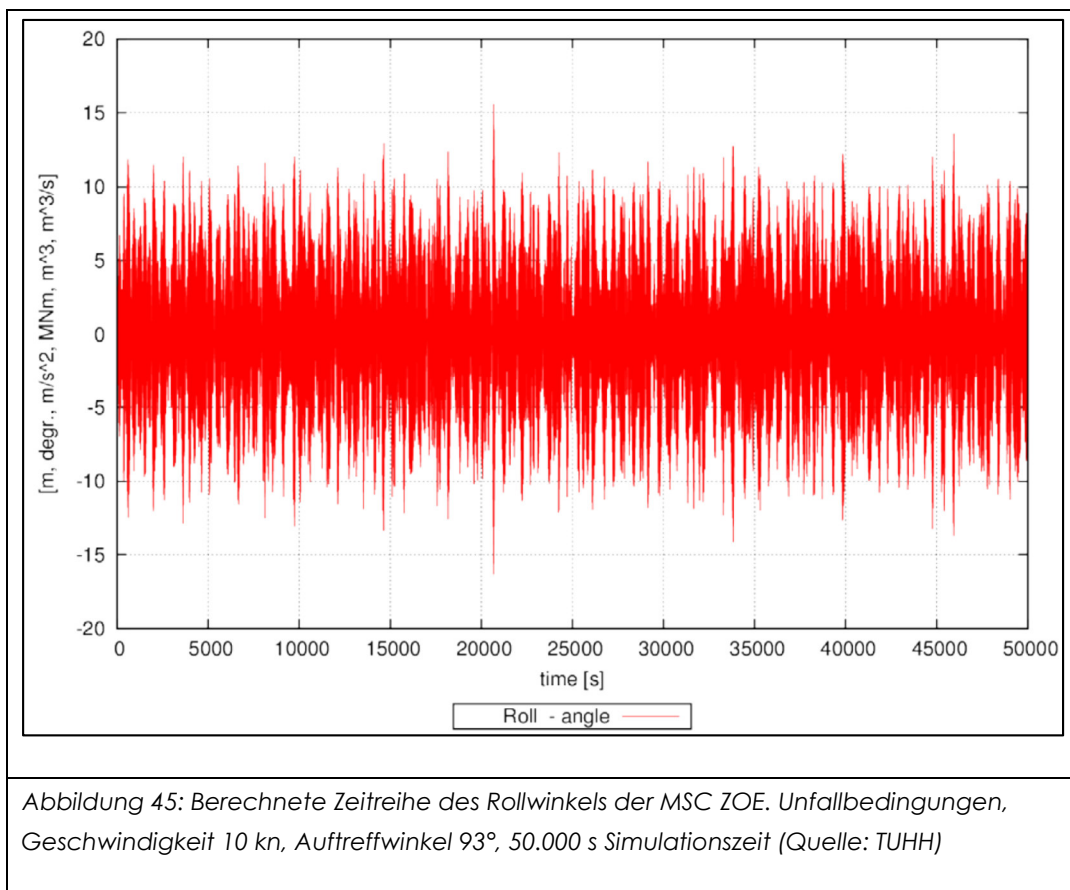
ZOE (21,3 m und 26,6 m), die Bedingungen im VTG German Bight Western Approach⁵² (37,5 m) und in tiefem Wasser (635 m). Die Berichte der beauftragten Experten sind in den Anhängen D, E und zu finden. Eine kurze Zusammenfassung der Hauptergebnisse wird in den folgenden Abschnitten vorgenommen.

6.4 Rollbewegungen

Bei querkommender See üben die Wellen eine direkte Erregungskraft auf das Schiff aus, die eine Rollbewegung verursacht. Das Rollverhalten des Schiffes hängt von der Rolleigenperiode des Schiffes, den Erregungskräften der Wellen und der Rolldämpfung des Schiffes ab.⁵³

6.4.1 Maximale Rollwinkel

Die TUHH führte numerische Simulationen zur Berechnung der Rollbewegungen für die MSC ZOE zum Zeitpunkt des Unfalls durch. Die Ergebnisse der Simulationen zeigen, dass das Schiff fortwährend mit Rollamplituden zwischen 5° und 10° rollte (siehe Abbildung 45). Es zeigte sich auch, dass zu einem Zeitpunkt ein Rollwinkel von etwa 16° auftrat. Nach Meinung der TUHH kann dieser Rollwinkel durch eine Gruppe größerer Wellen ausgelöst sein, die auf das Schiff treffen.

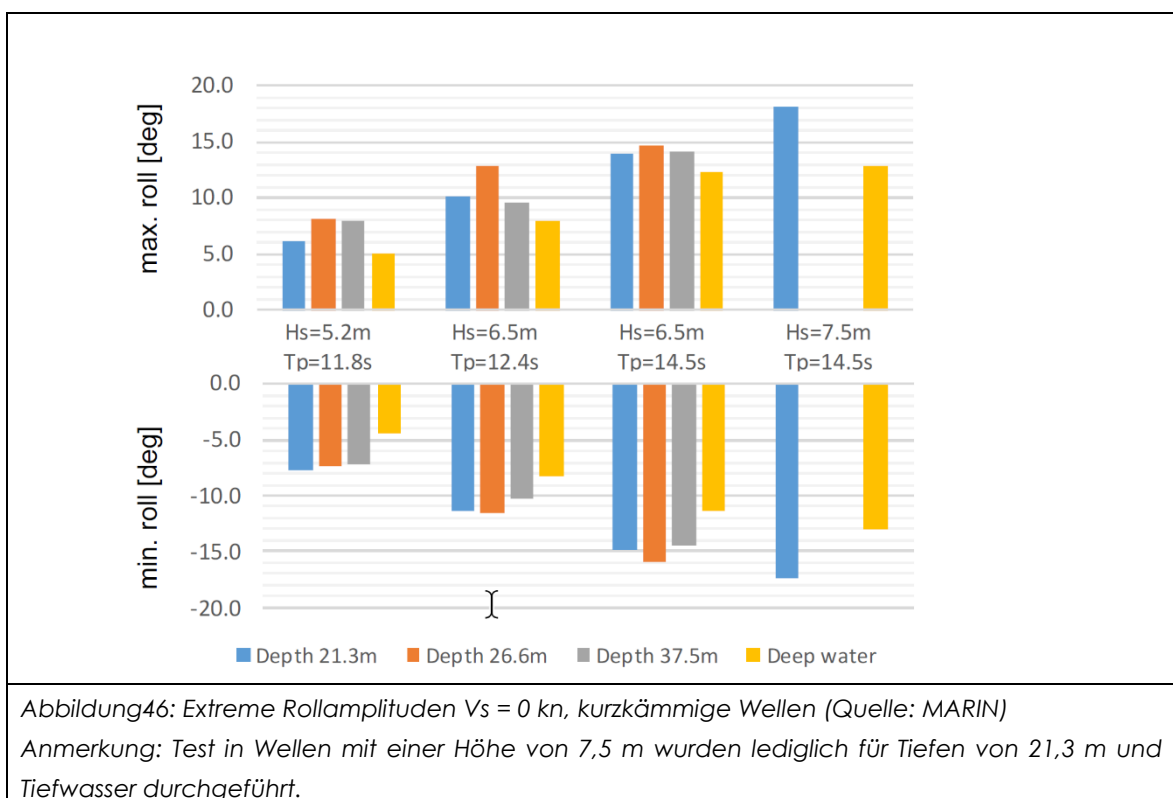


⁵² Das VTG German Bight Western Approach liegt nördlich des VTG Terschelling–German Bight (siehe auch Kapitel 7 zur Wegführung).

⁵³ MARIN, Seegangverhalten von ULCS in shallow water, 2020.

Berechnungen der TUHH zur Auswirkung des querab einkommenden Windes auf die Rollbewegung zeigen, dass die Wirkung begrenzt ist. Da die Stabilität des Schiffes sehr hoch ist, dürfte die Windstärke nicht zu einer signifikanten Erhöhung des Rollwinkels führen. Die Berechnung, die auch den Wind-Krängungsmoment berücksichtigte, ergab eine Zunahme der maximalen Rollneigung von $16,3^\circ$ auf $16,9^\circ$.

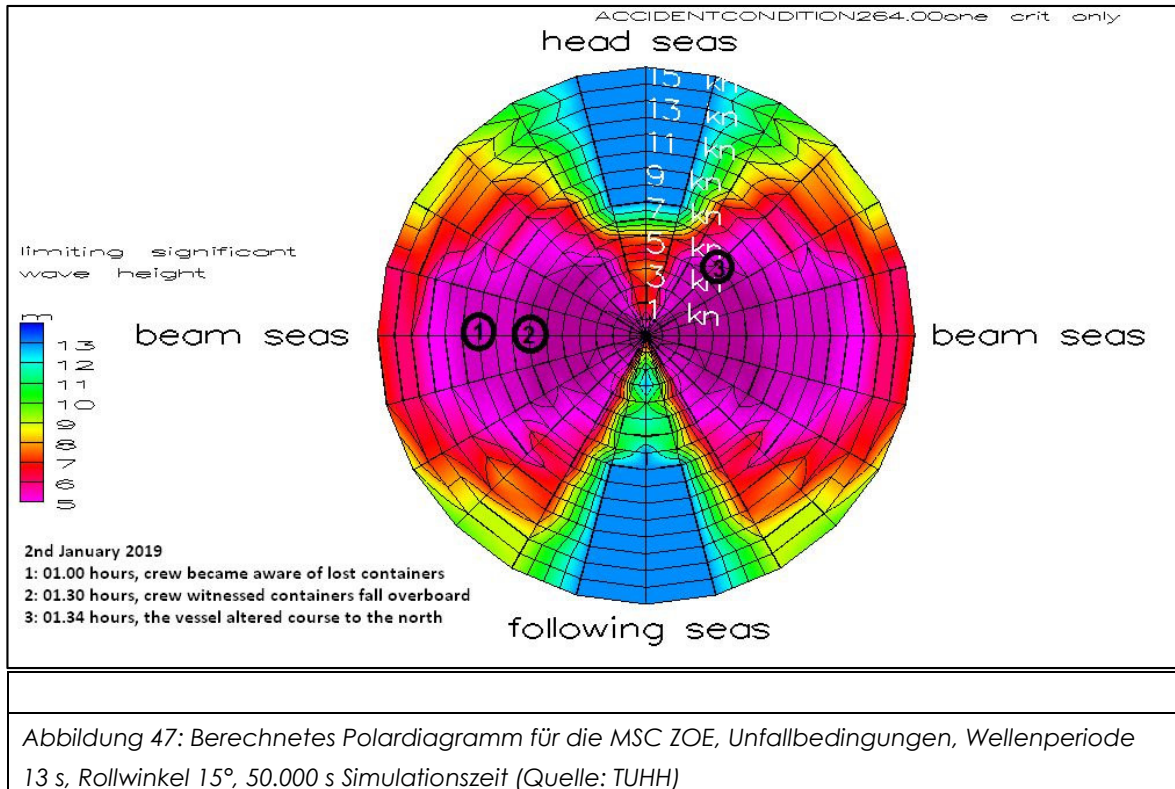
Ähnliche Ergebnisse für ULCS im Allgemeinen wurden auch aus den von MARIN durchgeführten Beckenversuchen gewonnen. Die Beckenversuche wurden mit Variationen der signifikanten Wellenhöhe H_s und der Wellenperiode T_p durchgeführt. Die gemessenen extremen Rollamplituden nehmen mit Anstieg von H_s und T_p zu (siehe Abbildung 46). Bei einer signifikanten Wellenhöhe von 6,5 m und einer Wassertiefe von 26,6 m lag die größte gemessene Rollamplitude in der Größenordnung von 16° .



Die Wirkung von Geschwindigkeit und Wellenrichtung

Die TUHH berechnete die limitierende (minimale) signifikante Wellenhöhe für eine Rollamplitude von 15° bei Wellen mit einer Spitzenperiode von 13 s für verschiedene Kurse (siehe Abbildung 47). Die Ergebnisse zeigen, dass für die MSC ZOE die Querab-Situation unter den gegebenen Bedingungen für das Rollverhalten ungünstig war. Es wird angenommen, dass sich das Schiff in der Mitte des Polardiagramms einordnet. Die radialen Ringe stellen die Schiffsgeschwindigkeit dar, die Sektoren geben den Auftreffwinkel der Wellen an. Daraus kann geschlossen werden, dass bereits bei signifikanten Wellenhöhen von ca. 5 m bei allen Geschwindigkeiten bei Fahrt in querkommender See eine Rollamplitude von 15° auftritt. Für alle anderen Kurse sind wesentlich größere Wellenhöhen erforderlich, um die 15° -Rollamplitude zu erreichen. Als Beispiel sind in der Abbildung zwei Zeitpunkte des Containerverlustes auf der MSC ZOE dargestellt (Situation 1 und 2 in

Abbildung 47). Sie zeigt ferner, dass auch bei bugseitig einfallender See vergleichbare Rollwinkel bei Welleneinfallswinkeln von etwas über 30° und niedriger Geschwindigkeit möglich sind (Beispielsituation 3 in Abbildung 47).



6.4.2 Ablesen des Inklinometers

An Bord der MSC ZOE ist ein mechanisches Inklinometer installiert, um der Besatzung Informationen über den tatsächlichen Krängungswinkel des Schiffes zu liefern. Das Inklinometer besteht aus einem frei beweglichen Pendel und zwei Schleppzeigern, die die maximale Auslenkung des Pendels anzeigen. Die Schleppzeiger können zurückgesetzt werden.

Das Inklinometer der MSC ZOE zeigte nach dem Unfall eine Auslenkung von 30° an (siehe Abbildung 48). Die Besatzung interpretierte diese Auslenkung als den tatsächlichen Krängungswinkel des Schiffes und bezog sich in ihren Aussagen nach dem Unfall auf einen Krängungswinkel von 30°.



Abbildung 48: Foto des Inklinometers auf der Brücke der MSC ZOE nach dem Containerverlust

Frühere Untersuchungen von Inklinometern haben gezeigt, dass die Art der Konstruktion des Inklinometers dieses im Allgemeinen nicht dazu geeignet ist, Rückschlüsse auf den dynamischen Rollwinkel eines Schiffes zu ziehen.⁵⁴ Man kam zu dem Schluss, dass, wenn das Schiff dynamisch rollt, das Inklinometer in Wirklichkeit die Beschleunigungen aufgrund der Masse des Pendels misst. Auch die Untersuchung von MARIN⁵⁵ bestätigt, dass das Inklinometer auf der Brücke ein beschleunigungsempfindliches Gerät ist und bei starken Bewegungen eine Anzeige des kombinierten Schwerkraftwinkels aufgrund der Quer- und Vertikalbeschleunigungen liefert.

Der vom Inklinometer abgelesene Wert wurde nicht als verlässlicher Wert für den maximalen Krängungswinkel der MSC ZOE während der Unfallfahrt angesehen⁵⁶

Das Inklinometer ist kein geeignetes Instrument zur Bestimmung der tatsächlichen Rollwinkel eines Schiffes, da das Instrument empfindlich auf Beschleunigungen reagiert. Die Untersucher lassen daher den Messwert des Inklinometers der MSC ZOE außer Acht, haben aber die Beschleunigungen berücksichtigt, denen das Schiff ausgesetzt war.

6.5 Schiffsverhalten im Zusammenhang mit Containerverlust

Als Ergebnis der durchgeführten Simulationen und Tests wurden vier hydrodynamische Phänomene festgehalten, von denen angenommen wird, dass sie beim Überbordgehen von Containern von der MSC ZOE eine Rolle gespielt haben:

⁵⁴ BSU 510/08, Tödlicher Personenunfall an Bord des CMS Chicago Express während des Taifuns „HAGUPIT“ am 24. September 2008 im Seegebiet vor Hongkong.

⁵⁵ MARIN, Behaviour of an Ultra Large Container Ship in shallow water, 2020.

⁵⁶ TUHH: Das Schiff hätte den Meeresboden berührt, wenn der Krängungswinkel größer als 19,2° gewesen wäre.

1. Extreme Schiffsbewegungen und Beschleunigungen,
2. Kontakt oder Beinahekontakt mit dem Meeresboden,
3. Hebekräfte und stoßartige Belastung von Containern durch grünes Wasser,
4. durch Slamming induzierte impulsartige Belastung des Schiffsrumpfes.

Diese Phänomene werden in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

6.5.1 Extreme Schiffsbewegungen und Beschleunigungen

Schiffsbewegungen verursachen Beschleunigungen in Längs-, Quer- und Vertikalrichtung. Diese Beschleunigungen führen dazu, dass Kräfte auf die Besatzung, das Schiff und die Ladung wirken. Bei einem Schiff, das Rollbewegungen ausführt, sind sowohl Quer- als auch vertikale Beschleunigungen vorherrschend.

Die MSC ZOE hatte Containerstapel mit bis zu 8 Lagen an Deck. Infolge der Rollbewegung des Schiffes wirkten Beschleunigungen und daraus resultierende Kräfte auf die Container an Deck. Die Container an Deck waren durch Twistlocks und Laschstangen gesichert. Die Schiffsbewegung führte zu Zug- und Druckkräften, die auf Container und Laschausrüstung wirkten. Zu hohe Beschleunigungen oder Kräfte können zu Beschädigung von Containern und/oder Versagen der Laschausrüstung führen, was zur Folge haben kann, dass Container oder deren Inhalt über Bord gehen.

Die TUHH berechnete die Querbeschleunigungen für die obersten Container (Lage 8) der MSC ZOE in Bay 58. Die Ergebnisse zeigen, dass während der Unfallphase eine maximale Querbeschleunigung von $-4,6 \text{ m/s}^2$ ⁵⁷ erreicht wurde, wenn der maximale Rollwinkel von $16,9^\circ$ auftrat. Typischerweise sind Container-Laschmittel für eine Querbeschleunigung von ca. $0,5 \text{ g}$ ⁵⁸ ausgelegt, was $4,9 \text{ m/s}^2$ entspricht. Die berechnete maximale Beschleunigung liegt nahe an diesem Wert (siehe Abbildung 49).

⁵⁷ Vorzeichenkonvention: negative Beschleunigung ist vom Schiff zur Steuerbordseite, positive vom Schiff zur Backbordseite gerichtet.

⁵⁸ Siehe Abschnitt 4.4.

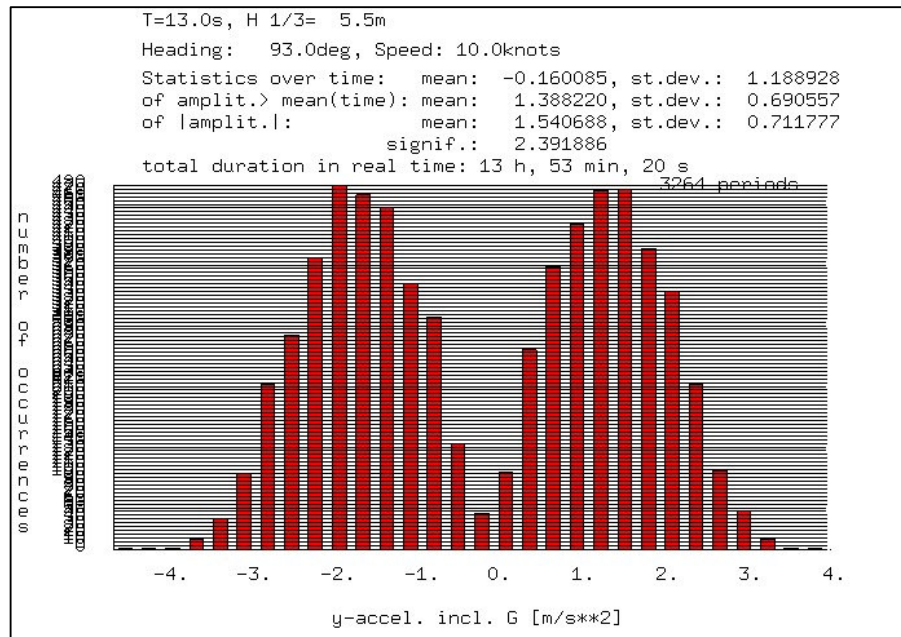


Abbildung 49: Berechnetes Streudiagramm für die Querschleunigung bei (130,0,53). MSC ZOE. Unfallbedingungen, Geschwindigkeit 10 Knoten, Auftreffwinkel 93° einschließlich querkommendem Wind mit 10 Bft. Simulationszeit 50.000 s.

Die TUHH wiederholte die Berechnung mit einer signifikanten Wellenhöhe von 6 m. Die maximale Rollamplitude ergab $-18,4^\circ$, was zu einer maximalen Querschleunigung von $-4,8 \text{ m/s}^2$ führt. Eine angenommene Wellenhöhe von 6,5 m führt zu einem maximalen Rollwinkel von $-19,6^\circ$ und einer Beschleunigung von $-5,2 \text{ m/s}^2$.

MARIN hat ebenfalls die Beschleunigungen im Rahmen der Beckenversuche gemessen. Die Beschleunigungen wurden an vier verschiedenen Stellen an dem maßstabsgetreuen Modell gemessen (Tabelle 7).

UPS2	Unterster Container an Deck, luvwärts und ungefähr mittschiffs
WH	Mitte des Brückenhauses (auf der Mittellinie)
UPS2-UP	Oben auf dem Containerstapel an Deck, luvwärts und ungefähr mittschiffs
CL-UP	Oben auf dem Containerstapel an Deck, auf der Mittellinie und ungefähr mittschiffs

Tabelle 7: Unterschiedliche Stellen, an denen die Beschleunigungen im Rahmen der Beckenversuche gemessen wurden (Quelle: MARIN)

Unter Berücksichtigung der Wassertiefen, auf die die MSC ZOE traf, werden im Folgenden die MARIN-Ergebnisse für Wassertiefen von 21,3 m und 26,6 m dargestellt. Die höchsten Querschleunigungen bei Wellenhöhen bis zu 6,5 m ($T_p=14,5 \text{ s}$, Wassertiefe 26,6 m) erreichten $4,0 \text{ m/s}^2$ an der untersten Containerlage an Deck, $4,8 \text{ m/s}^2$ an der Spitze von Lage 7 und überstiegen 5 m/s^2 am Brückenhaus (Abb. 50). Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Querschleunigungen aufgrund des Rollens mit der Höhe an Deck zunehmen. Es wird auch festgestellt, dass die Beschleunigungen in einer Wassertiefe von 26,6 m

infolge des Rollens größer sind (höherer maximaler Rollwinkel in einer Wassertiefe von 26,6 m im Vergleich zu 21,3 m).

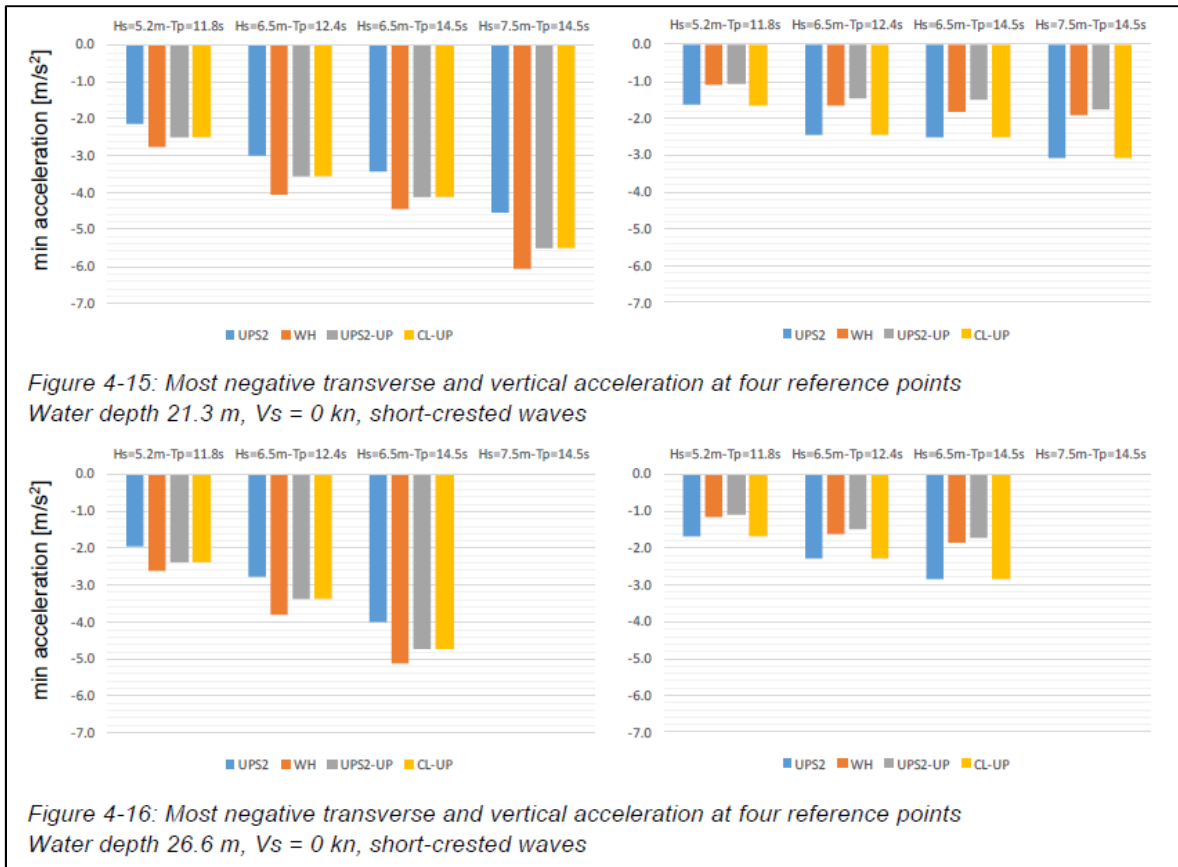


Abbildung 50: Die negativsten Quer- und Vertikalbeschleunigungen an vier Referenzpunkten (Quelle: MARIN) Anmerkung: Test in Wellen mit einer Höhe von 7,5 m wurde nicht für eine Tiefe von 26,6 m durchgeführt.

Basierend auf den Berechnungen der TUHH und dem MARIN-Modellversuch lagen die höchsten Querbeschleunigungen bei Wellenhöhen bis zu 6,5 m und den der MSC ausgesetzten Wetterbedingungen bei $4,0 \text{ m/s}^2$ an der untersten Lage der Container an Deck und $4,6$ bis $4,8 \text{ m/s}^2$ an der Spitze der 7. Lage, was in etwa der Auslegung der Laschaurüstung von ca. $4,9 \text{ m/s}^2$ entspricht.

6.5.2 Kontakt oder Beinahekontakt mit dem Meeresboden

Die südliche Schifffahrtsroute nördlich der Watteninseln weist einige spezifische und bekannte Untiefen auf, was bedeutet, dass unter besonderen Umständen wie Niedrigwasser und hohem Wellengang (und der daraus resultierenden vertikalen und Rollbewegung des Schiffes) die Kielfreiheit sehr klein werden kann. Ob ein großes Containerschiff auf der südlichen Schifffahrtsroute dem Boden nahekommt oder ihn berührt, hängt von den Umgebungsbedingungen wie Wassertiefe und Wellenbedingungen (Wellenhöhe und -periode) ab. Die Eigenschaften des Schiffes wie die Hauptabmessungen (Tiefgang, Länge und Breite) und die Stabilität spielen ebenfalls eine wichtige Rolle.

Während der Versuche im Becken wurde der Kontakt des Schiffmodells mit dem Beckenboden untersucht (siehe Abbildung 51). Die Häufigkeit variierte mit den Wellen- und Schiffsbedingungen. Bei den Versuchen mit kurzkämmigen Wellen wurde der Kontakt mit dem Beckenboden bei einer Wassertiefe von 21,3 m und einer Wellenhöhe von 6,5 m und darüber und einer Spitzenperiode von 14,5 m beobachtet. Die von MARIN durchgeführte Analyse der Schiffsbewegungen zeigt, dass das Schiffmodell den Boden berühren kann, wenn eine große vertikale Eintauchbewegung mit einer großen Rollbewegung beim gleichzeitigen Durchgang einer Gruppe relativ hoher Wellen kombiniert ist. Zu dieser Zeit übte das Schiff auch eine Querschwingung aus.

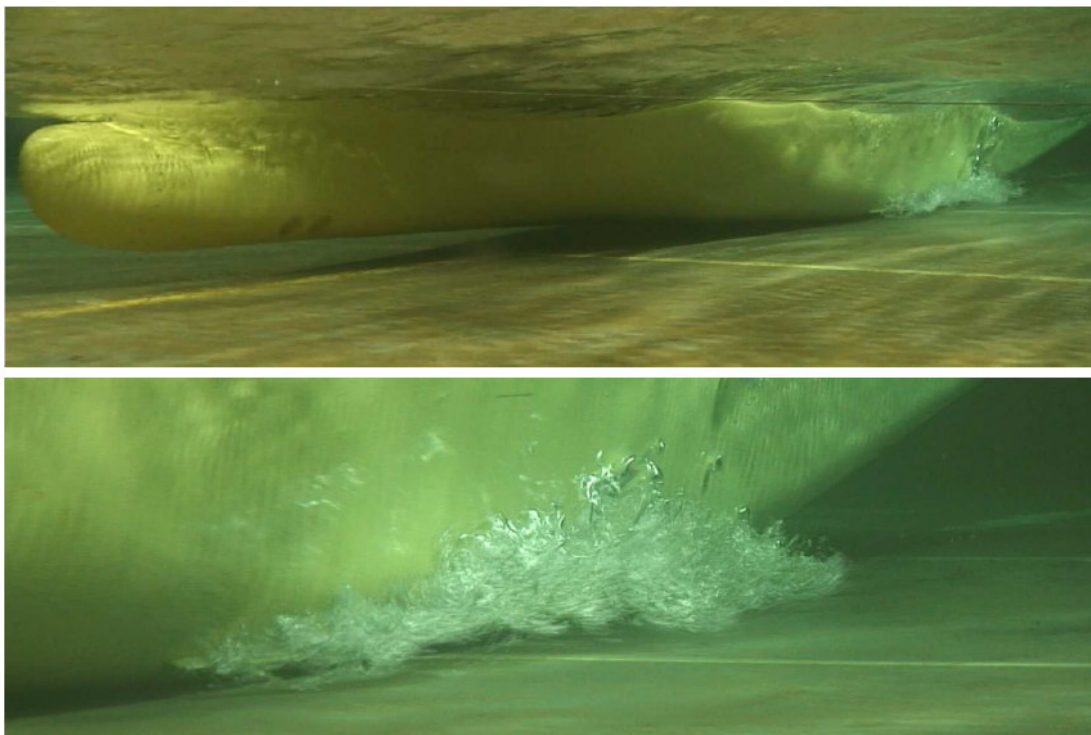


Figure 5-1: Contact with the bottom observed at $t = 6460$ s during test 101009012: $H_s = 6.5$ m, $T_p = 14.5$ s

Abbildung 51: Unterwasseraufnahmen des Schiffmodells im Moment des Bodenkontaktes (Wassertiefe: 21,3 m) (Quelle: MARIN)

Risiko eines Bodenkontaktes

Ob ein großes Containerschiff wie die MSC ZOE in Berührung mit dem Meeresboden kommt, hängt von vielen Faktoren ab. Zum Beispiel haben der Beladungszustand und damit die Stabilität des Schiffes einen starken Einfluss auf die vertikalen Bewegungen eines Schiffes. Der Unterschied liegt hauptsächlich in der Rollbewegung. MARIN führte z. B. Tests durch, die zeigten, dass ein Schiffmodell mit geringerer Stabilität eine geringere Wahrscheinlichkeit für einen Bodenkontakt aufweist.

Hinzu kommt, dass die Umweltbedingungen während der mehrstündigen Passage in flachem Wasser nicht konstant sind. Wie Deltares gezeigt hat, variiert die Wassertiefe unter dem Schiff aufgrund des Bodenprofils und der Gezeiten und die Wellenbedingungen variieren im Verlauf eines Sturms. In jedem Fall zeigen die Tests, dass eine reelle Chance besteht, dass das Schiffsmodell unter den Bedingungen mit Querwellen mit einer signifikanten Wellenhöhe von 6,5 m und einer Spitzenperiode von 14,5 Sekunden den Boden berührt.

Auswirkung der Bodenberührung

In Kapitel 2.4 wurde erwähnt, dass Taucher nach dem Unfall den Schiffsboden und die Bilgen der MSC ZOE (Den Übergang vom Schiffsboden zur Bordwand) untersuchten. Im Besichtigungsprotokoll des DNV-GL ist verzeichnet, dass die Taucher keine Beschädigung feststellen konnten, die durch eine Grundberührung verursacht worden ist.

Im Falle einer Bodenberührung eines Schiffes treten nicht unbedingt unmittelbare Strukturschäden auf, aber an der Aufprallstelle können Vibrationen und Verformungen auftreten, die sich auch auf das Deck ausbreiten. Die Containerstapel können dabei in verschiedene Richtungen gezwungen werden.

Die Versuche mit dem Schiffsmodell zeigen, dass bei Bodenkontakt Schwingungen durch das Schiff gehen. Die gemessenen Beschleunigungen am Schiffsmodell können jedoch aufgrund der unterschiedlichen Steifigkeit und Flexibilität des tatsächlichen Rumpfes (Biegung, Torsion, Vibration) nicht in tatsächliche Beschleunigungen übersetzt werden. Darüber hinaus traf das Testmodell auf einen flachen Betonboden, wo die stoßartige Belastung anders sein wird als bei einem sandigen Boden wie in der Nordsee. Weitere Forschungen sind daher erforderlich, um mehr Einblick in die Auswirkungen eines Bodenkontakts zu gewinnen.

Versuche im Becken mit dem Schiffsmodell zeigten, dass beim Durchgang einer Gruppe von relativ hohen Wellen das Schiff gleichzeitig eine transversale Eintauchbewegung ausübt und eine große Rollbewegung. Dies führte zu Beinahekontakt mit dem Boden des Beckens und in einigen Fällen zum Kontakt mit dem Beckenboden. Ein Bodenkontakt des Schiffes führt nicht notwendigerweise zu Strukturschäden. Dennoch ist das die Ursache von Vibrationen und Deformationen, die sich aufgrund der Verbiegung und Torsion des Schiffskörpers auf die ganze Struktur des Schiffes auswirkt.

Auf seiner Fahrt im VTG Terschelling – German Bight – war die MSC ZOE einer extrem kleinen Kluftfreiheit zwischen dem niedrigsten Punkt des Schiffskörpers und dem Meeresboden ausgesetzt. Eine Untersuchung durch einen Taucher, die als Teil der Besichtigung der Klassifikationsgesellschaft durchgeführt wurde, konnte keine nachweisbaren Schäden am Schiffsboden und den Bilgen feststellen, die durch eine Grundberührung verursacht wurden. Dennoch kann ein Kontakt mit dem Meeresboden nicht ausgeschlossen werden, da ein sanfter Kontakt mit dem Meeresboden nicht notwendigerweise nachweisbare Schäden am Schiff verursacht.

6.5.3 Grünes Wasser

Das Wasser der Wellen, das über das Deck oder gegen die Ladung an Deck fließt, wird als „grünes Wasser“ bezeichnet. Flache, querab einkommende Wellen schlagen stark gegen die Schiffsseite, insbesondere wenn steile Wellenberge mit hoher horizontaler Geschwindigkeit (nahezu) brechen. Diese Wellen können das Schiff nicht überwinden und sich in dem beschränkten Freiraum darunter kaum ausbreiten, deshalb laufen sie nach oben entlang der Seite des Schiffs (siehe Abbildung 52). Der Effekt von grünem Wasser ist bei hohen steilen Wellenspitzen besonders stark, insbesondere wenn die Wellen mit hoher Geschwindigkeit vorwärts brechen. Dies ist charakteristisch für flaches Wasser wie z. B. auf der südlichen Schifffahrtsroute.

Bei einem Containerschiff hat grünes Wasser den Effekt, dass eine direkte Kraft von der Welle auf einen Container ausgeübt wird. Das nach oben schlagende Wasser kann bis über das Deck des Schiffes reichen und die untersten Container oberhalb der Gangway treffen. Dies kann zu mehreren Problemen führen: Die direkt auf dem Boden befindlichen Container können selbst beschädigt werden, oder Container können angehoben werden, wodurch die Laschings beschädigt werden. Wenn ein Container beschädigt ist oder gebrochene Laschings aufweist, kann ein ganzer Containerstapel umkippen. Das grüne Wasser kann auch bei höher gelegenen Containern eine seitliche Kraft ausüben, sodass ein Container gegen einen Container der nächsten Reihe drückt. Dies kann dazu führen, dass (ein Teil) eine(r) Reihe von Containern wie ein Dominostein umfällt.



Abbildung 52: Bilder des Schiffsmodells und Grünes-Wasser-Effekte (Quelle: MARIN)

Während der Versuche im Becken wurden unter den getesteten Flachwasserbedingungen Grünes-Wasser-Effekte visuell beobachtet. Unter Berücksichtigung der kumulativen Anzahl von Ereignissen, wie sie während der drei Testsituationen beobachtet wurden, konzentrierte sich das grüne Wasser meist auf sechs Containerbays um das Brückenhaus (Abbildung 53/4-40, Bays 26 bis 46). Wie aus Abbildung 53/4-40 und Abbildung 53/4-41 hervorgeht, handelt es sich um den Bereich, in dem die meisten Container auf der MSC ZOE beschädigt wurden oder verloren gingen. Obwohl im Rahmen der vorliegenden Tests keine Messungen der Belastung durch grünes Wasser vorgenommen wurden, deutet dies

darauf hin, dass grünes Wasser unter den getesteten Bedingungen eine wichtige Rolle beim Überbordgehen von Containern spielen kann.

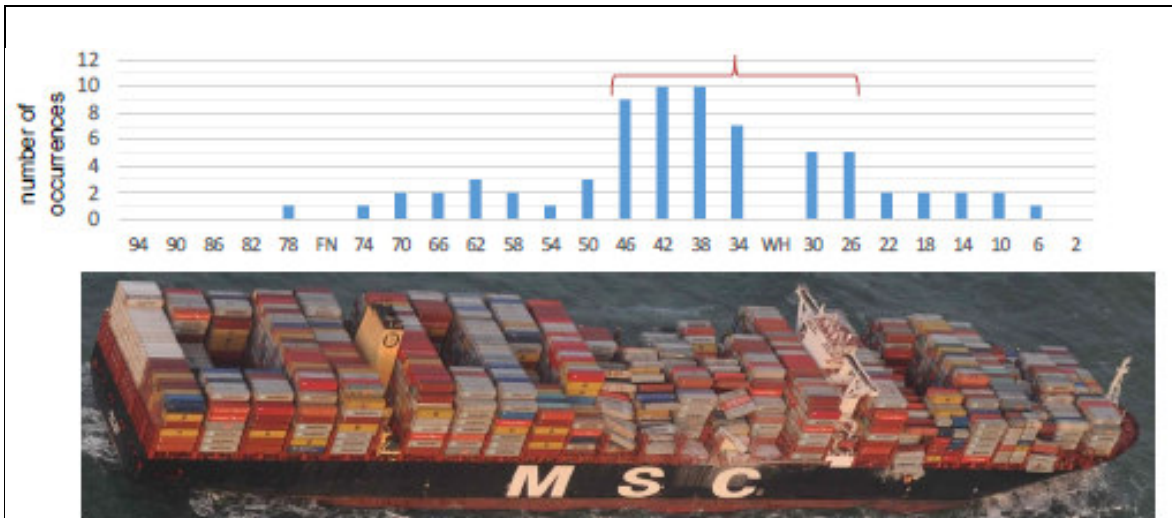


Figure 4-40: Spatial distribution of green water events as observed during three tests at zero speed, compared with the damaged container stacks of the MSC Zoe (view from starboard side)

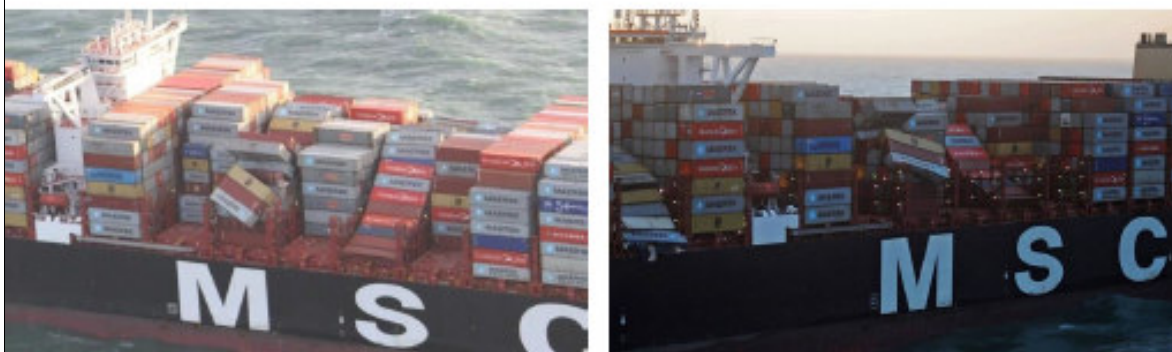


Figure 4-41: Loss of containers on the wave (port) side of the MSC Zoe, in the area where during the model tests the largest number of green water events was observed (view for port side).

Abbildung 53: Vergleich der Auswirkungen von grünem Wasser aus den Versuchen im Becken und dem Überbordgehen von Containern der MSC ZOE (Quelle: MARIN, Bilder: Niederländische Küstenwache)

Das Auftreten von grünem Wasser wurde während der Versuche im Becken beobachtet. Obwohl während der Versuche im Becken keine Messungen der Belastung durch grünes Wasser vorgenommen wurden, wurde das Auftreten des Phänomens anhand der Videoaufzeichnungen visuell ausgewertet. Der Vergleich mit der Situation an Bord der MSC ZOE nach dem Unfall lässt vermuten, dass grünes Wasser eine Rolle beim Überbordgehen der Container gespielt haben könnte.

6.5.4 Slamming, das zu Impulsbelastungen führt

Bei den Wellenbedingungen der flachen südlichen Schifffahrtsroute treten steile Wellen auf, die gelegentlich brechen. Die Wechselwirkung dieser Wellen mit hohen horizontalen

Wassergeschwindigkeiten und einem sich bewegenden Schiff erzeugt Wellenschläge gegen die Seite des Schiffes. Die visuelle Beobachtung während der MARIN-Tests deutet darauf hin, dass große Wellenschläge gegen die Schiffshülle über die gesamte Länge des Schiffes auftraten (siehe Abbildung 54), auch am Fächersteven und am Heck. Die kurzen (brechenden) Wellen führten insbesondere bei Wellenhöhen von 6,5 m und darüber zu welleninduziertem Slamming gegen die Schiffseite. Dies kann zu Schwingungen im Rumpf führen und das dynamische Verhalten der Container und ihrer Laschings beeinflussen. Das Ergebnis kann ein Versagen sein.

Das Phänomen der Wellenschläge hat eine Auswirkung, die doppelt so hoch ist wie bei grünem Wasser. Das Schiffsmodell schwingt aufgrund des Wellenstoßes. Diese Schwingungen sind zwar weniger stark als die bei Bodenkontakt auftretenden, aber sie werden von der Besatzung wahrgenommen und verursachen Vibrationen im Rumpf und in den Containerstapeln. Diese Schwingungen erzeugen Kräfteinwirkungen auf den Rahmen der Container und die Laschmittel und es besteht die Gefahr, dass die Laschmittel brechen und die Container über Bord gehen.

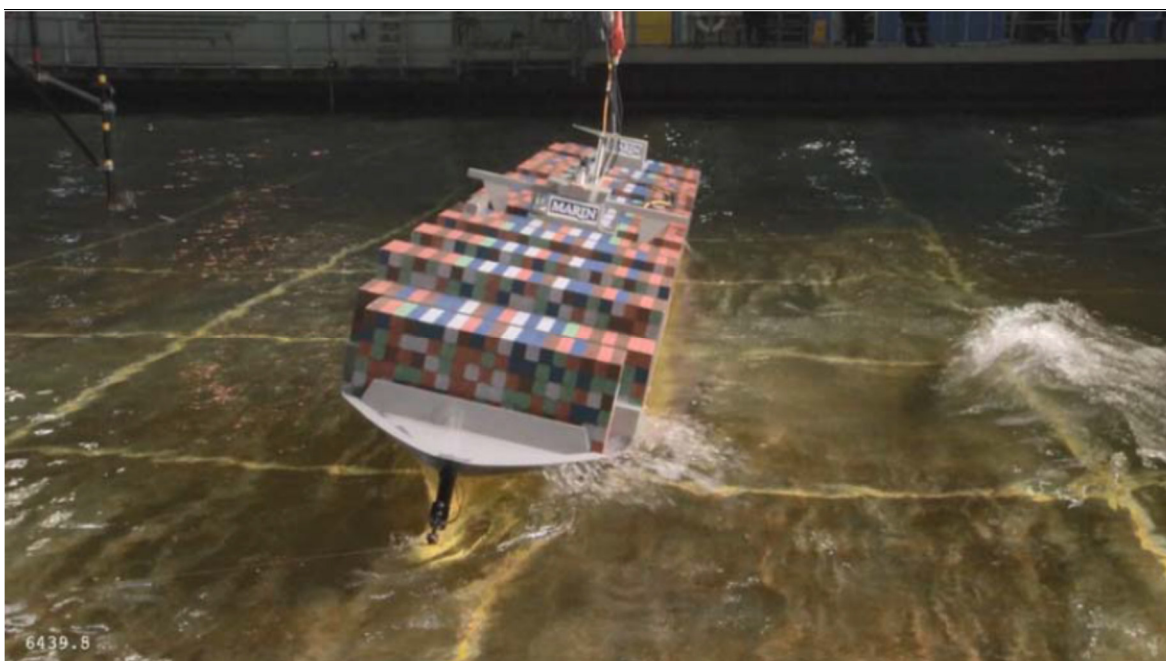


Abbildung 54: Bilder des Schiffsmodells zum Zeitpunkt des Slamming (Quelle: MARIN)

Seeschlag wurde während der Versuche, die sich mit den Bedingungen, denen die MSC ZOE ausgesetzt war, auseinandersetzen, beobachtet. Stoßartige Wellenbelastungen können zu Vibrationen im Schiffsrumpf führen und infolgedessen Belastungen in den Containern und im Laschsystem verursachen.

Aufgrund der durchgeführten Simulationen und Tests wird davon ausgegangen, dass die MSC ZOE während der Passage im VTG Terschelling–German Bight mit verschiedenen hydrodynamischen Phänomenen konfrontiert wurde: extreme Bewegungen und Beschleunigungskräfte, Kontakt oder Beinahekontakt zum Meeresboden, grünes Wasser und Slamming. Diese Phänomene können einzeln oder in Kombination auftreten und zu großen Beschleunigungskräften und Krafteinwirkungen auf Container und deren Sicherungsvorrichtungen führen. Es wird davon ausgegangen, dass die MSC ZOE einer Kombination dieser Phänomene ausgesetzt war während sie das VTG Terschelling – German Bight befuhr und dass dies bei den sechs Containerverlustzeitpunkten eine Rolle spielte. Die sechs Zeitpunkte an denen Container über Bord gingen, können als unabhängige Ereignisse betrachtet werden, die möglicherweise verschiedene Ursachen oder eine Kombination von Ursachen haben. Es ist nicht klar, welches Phänomen oder welche Kombination der vier Phänomene, zum Containerverlust führte.

7.1 Schiffswegführung

Die Nordsee ist eines der meistbefahrenen Meere der Welt. In diesem Gebiet wurden Maßnahmen zur Schiffswegführung eingeführt, um eine sichere Schiffsführung zu gewährleisten. Die IMO ist die internationale Organisation, die für die Festlegung von Maßnahmen zur Schiffswegführung zuständig ist. Die Auswahl und Entwicklung von Schiffswegführungssystemen liegt in erster Linie in der Verantwortung der Regierungen (betroffene Küstenstaaten). Die von der IMO festgelegte Wegführung ist in der IMO-Publikation „Ships' Routeing“ enthalten. Bestimmte Wegführungen können für alle Schiffe, bestimmte Kategorien von Schiffen oder Schiffe, die eine bestimmte Ladung befördern, verbindlich vorgeschrieben sein. Die Bedingung für diese zusätzlichen Maßnahmen ist, dass die Wegführung in Übereinstimmung mit den von der IMO aufgestellten Richtlinien und Kriterien angenommen und umgesetzt wird.

Die MSC ZOE befand sich im VTG Terschelling–German Bight, als der Verlust von Containern eintrat. Ein VTG ist eine Maßnahme der Wegführung, die auf die Trennung entgegengesetzter Verkehrsströme durch die Einrichtung von Fahrspuren abzielt. Das VTG Terschelling–German Bight ist eine von der IMO verabschiedete Wegführungsmaßnahme (siehe Abbildung 55).

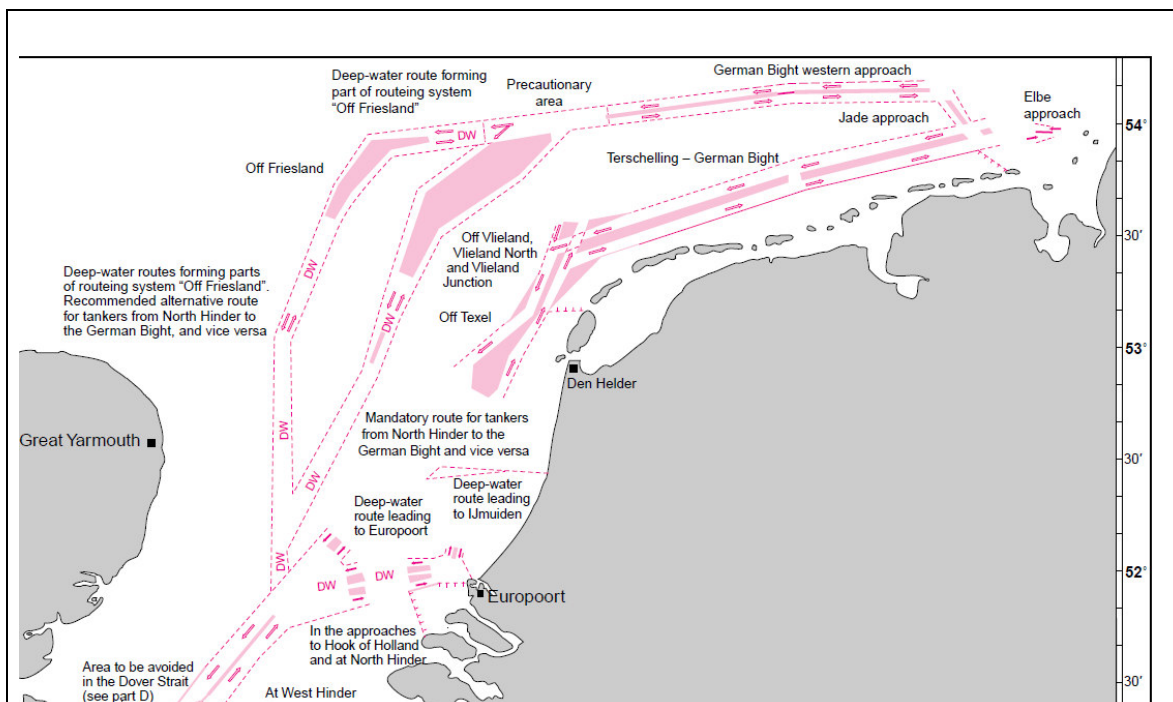


Abbildung 55: Etablierte IMO-Schiffswegführungen in der Nordsee entlang der niederländisch-deutschen Küste (Quelle: IMO Ships' routeing)

Das Wattenmeer in Dänemark, Deutschland und den Niederlanden wurde von der IMO im Rahmen von MARPOL 73/78 als besonders empfindliches Meeresgebiet (Particularly Sensitive Sea Area, PSSA) ausgewiesen. Dieser Status erlaubt es, zusätzliche Schutzmaßnahmen für die Schifffahrt umzusetzen⁵⁹. Infolgedessen wurde für einige Klassen von Tankschiffen und Schiffen, die schädliche flüssige Stoffe befördern, eine verbindliche Route festgelegt, wenn sie zwischen North Hinder und der Deutschen Bucht verkehren. Diese Schiffe dürfen das VTG Terschelling–German Bight nicht befahren, sondern müssen die nördlichere Route des VTG East Friesland und VTG German Bight Western Approach nutzen.

In Anbetracht der Risiken des Überbordgehens von Containern sind derzeit keine zusätzlichen Schutzmaßnahmen für Containerschiffe umgesetzt worden.

Das VTG Terschelling–German Bight ist eine internationale Schifffahrtsroute in der Nähe des besonders empfindlichen Meeresgebietes Wattenmeer. Dieser Status als PSSA erlaubt es, zusätzliche Schutzmaßnahmen für die Schifffahrt umzusetzen. Tanker und Schiffe, die schädliche flüssige Stoffe befördern, sind verpflichtet, die Tiefwasserroute zu nutzen, die nördlich des VTG Terschelling–German Bight verläuft. Containerschiffe fallen nicht unter diese Regelung.

7.2 Passageplanung

Die für eine Fahrt erforderliche Passageplanung erfolgt in Übereinstimmung mit den geltenden Regeln und Richtlinien, wie sie in IMO SOLAS⁶⁰ Kapitel 5, Anlagen 24 und 25 (Internationales Übereinkommen zum Schutz des menschlichen Lebens auf See) festgelegt sind. Dies umfasst Vorschriften für die sichere Schiffsführung (aktuelle Seekarten, Navigationsausrüstung, qualifizierte und ausgebildete Besatzung, Logbuch). Darüber hinaus stellt der Kapitän vor dem Ablegen sicher, dass die Fahrt unter Verwendung der erforderlichen Seekarten und Veröffentlichungen für das betreffende Gebiet und vorbehaltlich der von der Organisation festgelegten Richtlinien und Empfehlungen geplant wird. Bei der Passageplanung muss die Route so gewählt werden, dass:

- die Wegefürungen für Schiffe berücksichtigt werden,
- sichergestellt wird, dass während der gesamten Fahrt ausreichend Seeraum für die sichere Passage des Schiffes besteht,
- bekannte Gefahren und schlechte Wetterbedingungen antizipiert werden und
- die aktuellen Maßnahmen zum Schutz der Meeresumwelt berücksichtigt werden und Aktivitäten, die die Umwelt beeinträchtigen könnten, so weit wie möglich unterlassen werden.

Das IMO Maritime Safety Committee (MSC) hat das Rundschreiben 1228 erstellt, eine Richtlinie für Kapitäne zur Vermeidung gefährlicher Situationen bei schlechtem Wetter und

⁵⁹ 2005 überarbeitete die IMO die Richtlinien für die Identifikation und Benennung eines PSSA wurde verabschiedet (IMO Resolution A982(24)). Diese erfordert es, dass zu der Zeit der Benennung eine gemeinsame Schutzmaßnahme von der IMO genehmigt oder verabschiedet wurde.

⁶⁰ Internationales Übereinkommen für die Sicherheit des Lebens auf See.

schwerer See. Es wird empfohlen, dass der Kapitän bei der Schiffsführung unter schlechten Wetterbedingungen die beschriebenen Verfahren befolgt und somit gefährliche Situationen vermeidet. Besonderes Augenmerk wird auf bestimmte Kombinationen von Wellenlänge und Wellenhöhe gelegt, die zu gefährlichen Situationen für Schiffe führen können. Unbeschadet dessen muss der Kapitän auch unter weniger schweren Bedingungen angemessene Maßnahmen ergreifen, wenn dies notwendig erscheint. Die seemännischen Sorgfaltspflichten des Kapitäns umfassen auch, dass in allen Situationen die besonderen Merkmale und der Zustand von Schiff, Ladung und Besatzung berücksichtigt werden, um eine sichere Fahrt zu gewährleisten.

Die Wegeführung und der Einsatz von Containerschiffen werden von der Reederei umfassend geplant. Normalerweise arbeiten sie mit festen Fahrplänen, die im Falle von Verspätungen im Verlauf der Fahrt angepasst werden. Dabei werden fortlaufend Überlegungen angestellt, bei denen kommerzielle und betriebliche Interessen eine Rolle spielen. Zum Beispiel kann es notwendig sein, die Ladepläne in den Häfen anzupassen, die Schiffsgeschwindigkeit zu erhöhen oder zu verringern oder die Fahrt eines Schiffes aufgrund einer Verspätung neu zu planen. Die Ankunfts- und Abfahrtszeiten im Hafen werden aufgrund der Verfügbarkeit eines Liegeplatzes am Kai oder aufgrund der Gezeiten oft genau festgelegt. Die Verweildauer in einem Hafen hängt von der Anzahl der zu löschenden und zu ladenden Container ab. Dies erfordert eine sorgfältige Planung. Ein wichtiger Kostenfaktor ist der Treibstoffverbrauch des Schiffes, der hauptsächlich von der Länge einer Route und der Fahrtgeschwindigkeit beeinflusst wird.

Passageplan der MSC ZOE

Für jede Fahrt muss von der Schiffsbesatzung ein Passageplan erstellt werden. Grundlage dafür ist der von der Reederei vorgegebene Fahrplan. An Bord der MSC ZOE war der Dritte Offizier für die Erstellung des Passageplans verantwortlich. Seine Aufgabe ist es, den Plan an die aktuellen Wetterbedingungen und Warnhinweise für die Navigation anzupassen. Er muss potenzielle Probleme oder Gefahren entlang der Fahrtroute identifizieren, um die sichere Passage des Schiffes zu gewährleisten. Der endgültige Plan wird vom Kapitän abgenommen. Die Route von Asien nach Europa und umgekehrt kann als Linienstrecke angesehen werden, diese Strecke wurde häufiger befahren. Die häufigste Wahl, wenn man von Süden nach Bremerhaven fährt, ist das VTG Terschelling–German Bight, da dies die kürzeste Route für diese Art von Schiffen ist.

Um potenzielle Probleme oder Gefahren entlang der Fahrtroute zu identifizieren, verwendet die Besatzung aktuelle Karten und Unterlagen (IMO: Guidelines For Voyage Planning). Informationen über die Passage durch die Nordsee findet man im North Sea (East) Pilot (NP 55) in der Reihe British Admiralty Sailing Directions. Es umfasst den östlichen Teil der Nordsee von Scheveningen in den Niederlanden bis Skagen in Dänemark.

Kapitel 4.7 lautet: „Stürme aus nördlicher Richtung können sehr raue und steile See entlang der Küstenroute bei Texel und der deutschen Biegung verursachen. Unter diesen Umständen kann das alternative VTG Off Friesland bessere Seebedingungen und mehr Manövrierspielraum bieten.“

Das VTG Terschelling–German Bight weist einige flachere Bereiche auf, die auf den Karten eingezeichnet sind (siehe Abbildung 56 unten). Zur Berechnung der verbleibenden Kieflfreiheit (UKC) sind statischer Tiefgang, Wassertiefe, Tide, Squat und Krängungswinkel zu berücksichtigen. Aus dem Passageplan der MSC ZOE für die Fahrt von Sines nach Bremerhaven geht hervor, dass das Schiff einen statischen Tiefgang von 12,6 m vorn, 12,6 m in der Mitte und 12,7 m achtern hatte. Der Passageplan gibt auch an, dass zu jeder Zeit mindestens 4 m Kieflfreiheit (UKC) eingehalten werden sollten. Eine allgemeine Bemerkung auf dem Plan besagt, dass Geschwindigkeit und Krängungswinkel eine Zunahme des Tiefgangs verursachen können.

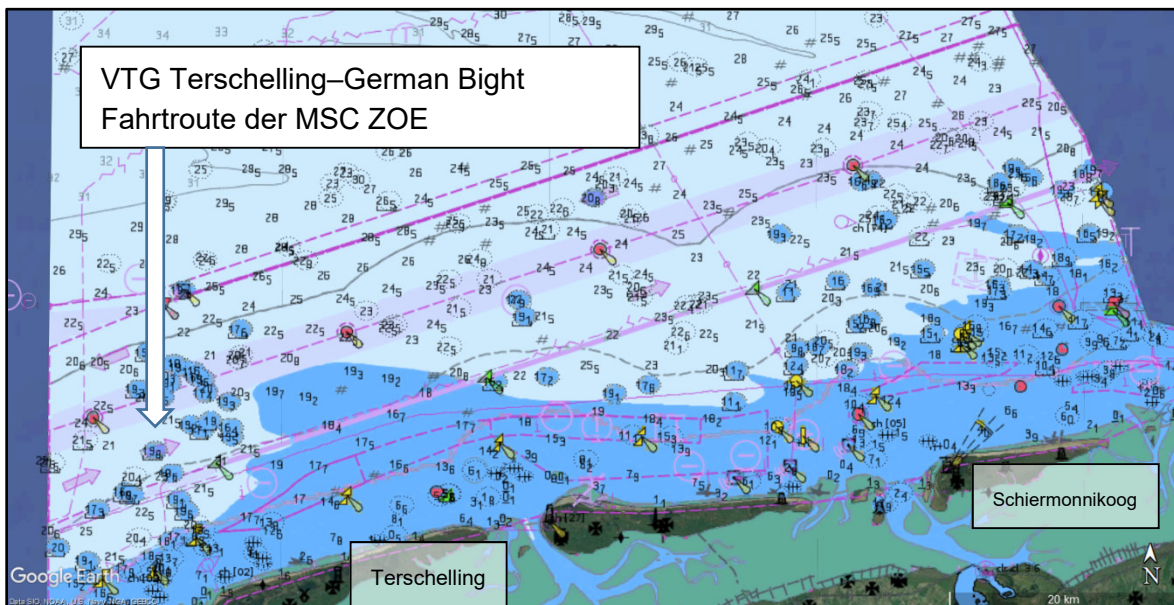


Abbildung 56 Seekarte, Tiefe in Metern, ungefähr das Niveau des niedrigstmöglichen Gezeitenwasserstands (LAT) (Quelle: iChart)

Der SKN⁶¹ gibt den Wasserstand an, ab dem die auf einer Seekarte angezeigten Tiefen gemessen werden. In der obigen Karte sind die gezeigten Tiefen die niedrigstmöglichen Gezeitenwasserstände (Lowest Astronomical Tide, LAT), die als der niedrigste Gezeitenwasserstand definiert sind, dessen Auftreten unter durchschnittlichen meteorologischen Bedingungen und unter jeder Kombination astronomischer Bedingungen vorhergesagt werden kann. Wasserstände unterhalb des LAT treten beispielsweise aufgrund von Wetterbedingungen wie hohem Luftdruck oder starken Winden auf.

Der Kapitän wählte die Fahrt durch das VTG Terschelling–German Bight aus. Dies ist der kürzeste Weg nach Bremerhaven. Ein Schiff wie die MSC ZOE ist verpflichtet, in einem VTG zu fahren. Es gibt keine Einschränkungen für Containerschiffe auf dieser spezifischen Route. Verfügbare Informationen über Gefährdungen im VTG Terschelling–German Bight im Nautical pilot 55 wurden für die Passage der MSC ZOE als nicht relevant erachtet.

⁶¹ Der SKN ist eine häufig verwendete Bezugsgröße für Schifffahrtsanwendungen wie z. B. Seekarten. Er unterscheidet sich von Gebiet zu Gebiet und ist auf den niedrigsten Wasserstand festgelegt, der typischerweise in einem Gebiet auftritt, was anzeigt, dass ein Schiff erwarten kann, dass mindestens diese Wassertiefe – oder eine größere – vorhanden ist.

In diesem Bericht werden die Ergebnisse der Untersuchung hinsichtlich des Überbordgehens von Containern von der MSC ZOE während der Fahrt durch das VTG Terschelling – German Bight – in der Nordsee beschrieben. Die Container und der Inhalt verschmutzten die Wattenmeerregion in den Niederlanden und in Deutschland stark.

Untersucht wurden die Wellen- und Wetterbedingungen entlang der Route, die die MSC ZOE am 1. und 2. Januar 2019 befuhr, sowie die Auswirkungen dieser Bedingungen auf die Schiffsbewegungen und das Laschmaterial. Darüber hinaus wurden die Auswirkungen der entlang der Route auftretenden Bereiche von flachem Wasser in Bezug auf die Größe des Schiffes und von ultragroßen Containerschiffen im Allgemeinen untersucht.

Die als Teil dieser Untersuchung durchgeführte Forschung hat neue Erkenntnisse über die Bedingungen, Schiffsbewegungen und hydrodynamischen Phänomene ergeben, die in dem Teil der Nordsee auftreten können,

Während der Passage des VTG Terschelling – German Bight – in östlicher Richtung war die MSC ZOE starkem Wind aus nord-nordwestlicher Richtung ausgesetzt. Die Wellen näherten sich der MSC ZOE querab. Die vorherrschende Windrichtung ermöglichte es den Wellen sich aufzubauen, da der Wind in der Nordsee eine lange Anlaufstrecke hat. Die signifikante Wellenhöhe erhöhte sich von 5 auf 6,5 Metern auf dem Höhepunkt des Sturmes am 2. Januar um etwa 01:00 Uhr Ortszeit, mit Wellen, die möglicherweise eine Höhe von 11 m erreichten. Diese Bedingungen führten dazu, dass das Schiff fortlaufend rollte. Die Wettervorhersage stimmte mit den angetroffenen Wetterbedingungen überein und die herrschenden schweren Bedingungen werden nicht als extrem oder außergewöhnlich für diesen Teil der Nordsee angesehen.

Aus dieser Untersuchung lassen sich die folgenden Schlussfolgerungen ziehen:

Containerverlust

Die Untersuchung hat deutlich gemacht, die MSC ZOE während der Passage durch das VTG Terschelling–German Bight vier verschiedenen hydrodynamischen Phänomenen, einzeln oder in Kombination, ausgesetzt war, die beim Überbordgehen der Container eine Rolle spielten:

- extreme Bewegungen und Beschleunigungen,
- Kontakt oder Beinahekontakt mit dem Meeresboden,
- grünes Wasser,
- Slamming.

Die Hauptursache für den Verlust von Containern der MSC ZOE war die hohe Stabilität, mit der das Schiff in einer Querab-Situation fuhr, und eine Kombination von vier hydrodynamischen Phänomenen. Die aufgetretenen Querbeschleunigungen befanden sich nahe den Auslegungsgrenzen und führten zu einem Versagen der Containerstruktur und/oder des Laschmaterials und darauffolgendem Überbordgehen von Containern.

Die MSC ZOE fuhr, mit einem korrigierten GM von 9.01, mit hoher Stabilität. Dadurch war es wahrscheinlicher, dass sie eine stärkere Rollreaktion in den Wellenperioden zeigte, die in der Nordsee nördlich der Watteninseln auftreten, was zu starken Schiffsbewegungen führte.

Es gab mindestens sechs Zeitpunkte, an denen Container der MSC ZOE über Bord gingen. Die ersten Überbordgehen von Container bemerkte die Besatzung nicht. Lediglich am 2. Januar um 01:30 Uhr bemerkte die Besatzung das Überbordgehen von Containern.

Die sechs Zeitpunkte an denen Container über Bord gingen, können als eigenständige Ereignisse betrachtet werden, die unterschiedliche Ursachen oder eine Kombination von Ursachen haben. Es ist nicht klar, welche Phänomene, oder Kombination der vier Phänomene zu dem Überbordgehen zu jedem dieser Zeitpunkte/Orte führte.

Hohe Stabilität

Das tatsächliche GM der MSC ZOE was typisch für im Betrieb befindliche Schiffe dieser Größe. Die hohe Stabilität der großen und breiten Containerschiffe führt zu kürzeren natürlichen Rollperioden als bei kleineren Schiffen mit geringerer Stabilität. Dies führt die natürliche Rollperiode näher an die Wellenperiode, die an den Watteninseln während des Unfall herrschte und zu stärkeren quer verlaufenden Rollbewegungen. Die kürzeren Perioden führen ebenfalls zu größeren Beschleunigungen. Große Bilgekiele stellen eine Möglichkeit dar, um Beschleunigungen zu reduzieren. Containerschiffe wie die MSC ZOE verfügen über eine nicht ausreichende Rolldämpfung in Situationen großer Stabilität.

Hohe Stabilität ist ein Sicherheitsrisiko, dass nicht berücksichtigt und im IMO Intact Stability Code und Dokumenten wie dem Stabilitätshandbuch nicht formalisiert wurde. Derzeitige Grenzen sind lediglich für ein minimales GM gesetzt. Die Auswirkungen eines höheren GM werden unterschätzt.

Kielfreiheit

Versuche im Becken mit dem Schiffsmodell zeigten, dass beim Durchgang einer Gruppe von relativ hohen Wellen das Schiff gleichzeitig eine transversale Eintauchbewegung ausübt und eine große Rollbewegung. Dies führte zu einem Beinahekontakt mit dem Boden des Beckens oder in manchen Fällen zum Kontakt mit dem Boden des Beckens.

Auf ihrer Fahrt durch das VTG Terschelling – German Bight – verblieb der MSC ZOE eine extrem kleine Kluftfreiheit zwischen dem niedrigsten Punkt des Schiffskörpers und dem Meeresboden ausgesetzt. Die Untersuchung ergab, dass ein Kontakt mit dem Meeresboden nicht ausgeschlossen werden kann. Eine Untersuchung durch einen Taucher, die als Teil der Besichtigung der Klassifikationsgesellschaft durchgeführt wurde, konnte keine Schäden am Schiffsboden und den Bilges feststellen, die durch eine Grundberührung verursacht wurden. Jedoch führt ein sanfter Kontakt mit dem Meeresboden nicht notwendigerweise zu nachweisbaren Schäden am Schiff. Dennoch ist das die Ursache von Vibrationen und Verformungen die sich aufgrund der Verbiegung und Torsion des Schiffskörpers auf die ganze Schiffsstruktur ausbreiten.

Beschleunigungen

Nach dem Unfall zeigte das mechanische Inklinometer eine Abweichung von 30° an. Die Besatzung interpretierte diese Abweichung als tatsächlichen Krängungswinkel des Schiffes und bezogen sich in ihren Aussagen nach dem Unfall auf einen Krängungswinkel von 30°. Die Untersuchung stellte fest, dass der maximale Rollwinkel des Schiffes 16° betrug. Das mechanische Inklinometer ist kein gutes Instrument um die Rollwinkel festzustellen, denen ein Schiff ausgesetzt war, da das Instrument anfällig für Beschleunigungen ist.

Es ist unerlässlich, dass die Besatzung Kenntnis von den tatsächlichen Kräften und Beschleunigungen erhält, die auf das Schiff, die Container und das Laschmaterial einwirken, damit sie handeln kann. Die Besatzung auf der Brücke der MSC ZOE hatte keine Kenntnis über die auftretenden Rollwinkel, Kräfte und Beschleunigungen. Die Konstruktion des mechanischen Inklinometers ist unzureichend, um daraus Schlüsse auf den dynamischen Rollwinkel zu ziehen, den ein Schiff erfährt.

Laschen und Beladen

Die Software des Ladungsrechners an Bord der MSC ZOE, der den Untersuchern gezeigt wurde, zeigte Warnungen für mehrere Bays an, was darauf hinwies, dass Toleranzgrenzen überschritten wurden. Die Überschreitung der Toleranzgrenzen wurden jedoch nicht weiter spezifiziert. MSC vermutet, dass die Daten, die den Untersuchern gezeigt wurden, nicht korrekt waren (versehentliche Änderungen, bevor sie den Untersuchern gezeigt wurden, falscher Ladecomputer, falsche Einstellungen). Es wurden jedoch keine anderen Daten zu Beladungszuständen oder Risikobewertungen zur Verfügung gestellt. Die Untersucher folgern daraus, dass der Ladungsrechner, der den Untersuchern gezeigt wurde, eine Überschreitung der Toleranzgrenze ohne weitere Spezifizierung zeigte und dass nicht mehr festgestellt werden kann, ob, und wenn dies der Fall war, wie diese Überschreitung der Toleranzgrenze bemerkt wurde und wie ihr begegnet wurde. Die Warnungen im Ladecomputer sagen nicht den Verlust voraus, aber in den Bays, aus denen Container über Bord gingen und deshalb auch Warnungen angezeigt wurden, haben möglicherweise Fehler im Beladungszustand zu dem Unfall beigetragen, da es die Bay und/oder einen bestimmten Stapel möglicherweise anfälliger für übermäßige Kräfte gemacht hat.

Abgesehen von den roten Warnfeldern, wurde keine strukturellen Abweichungen von internationalen Vorschriften in Bezug auf das Laschmaterial oder das Laschen selbst festgestellt. Abgesehen vom Zustand des Laschmaterial führte das Fahren mit hoher Stabilität quer zur See in flachem Wasser in der Nordsee zu hohen Querschleunigungen und daraus resultierenden Belastungen des Laschmaterials nahe der Toleranzgrenze, sogar bei moderaten Rollwinkeln.

Das Laschmaterial und die Konstruktion der Container auf sehr großen Containerschiffen sind dieselben wie auf allen anderen Containerschiffen. Der CSS Code⁶² kann nicht zur Berechnung der zulässigen Beschleunigungen für Schiffe wie die MSC ZOE benutzt werden. Die zulässige Belastung für das Laschmaterial auf sehr großen Containerschiffen werden mit komplexen Software-Berechnungen durchgeführt und sind nicht transparent. Deshalb kann nicht überprüft werden, ob die Container gemäß den Regeln des Ladungssicherungshandbuchs geladen und gesichert wurden, und ob die Regeln und Leitlinien für das Laschen eingehalten wurden.

Wegeführung

Gemäß allen rechtlichen Anforderungen war es der MSC ZOE erlaubt unter diesen Bedingungen zu fahren. Das VTG Terschelling – German Bight befindet sich in der Nähe des Wattenmeeres, welches als besonders empfindliches Meeresgebiet und UNESCO Weltkulturerbe ausgewiesen ist. Der Unfall der MSC ZOE führt zu einer starken Verschmutzung dieses Gebietes. Der Status als besonders empfindliches Meeresgebiet ermöglicht es der IMO zusätzliche Schutzmaßnahmen für die Schifffahrt umzusetzen. Bisher gibt es keine bestimmten Anforderungen oder Beschränkungen für (große) Containerschiffe auf den Schifffahrtswegen.

Die Verschmutzung des Wattenmeeres durch über Bord gegangene Container ist ein unerwünschtes Ereignis. Interessierte Küstenstaaten wie die Niederlande und Deutschland haben die Möglichkeit, der IMO zusätzliche inhaltsorientierte proaktive Maßnahmen für die Schifffahrt zum Schutz des besonders empfindlichen Meeresgebietes vorzuschlagen.

Entwicklung der Schiffsgröße über den regulatorischen Bereich hinaus

Die MSC ZOE ist ein sehr großes Containerschiff, das im Jahre 2014 gebaut wurde, eine Länge von fast 400 m hat, eine Breite von 59 m und eine theoretische Kapazität von 19,224 TEU. Generell hat sich die Kapazität während der letzten 15 Jahre verdoppelt. Die Zunahme führte zu Containerschiffen, die mehr Container an Deck transportierten. Die Länge und das GM von sehr großen Containerschiffen wie der MSC ZOE überschreiten die Gültigkeitsbereich der meisten internationalen technischen Vorschriften und Standards für die Berechnung von Beschleunigungen. Dazu ist anzumerken, dass in diesen Fällen ein Computer mit Laschsoftware erforderlich ist. Die Einzelheiten der Vorgänge im Ladungsrechner und in der Laschsoftware werden im Ladungssicherungshandbuch zwar

⁶² IMO Res. A714(17) (MSC/Circ. 1026)

nicht weiter ausgeführt, aber in den Regeln der Klassifikationsgesellschaften. Details zum Ladungsrechner und zum Laschsoftware-Modul, sind aufgrund der Komplexität der Berechnungen nicht vollständig transparent. Es deshalb nicht klar, welche zulässigen Beschleunigungen in die Berechnungen der Software einbezogen werden. Darum ist es für die Besatzung nicht immer zu erkennen welchen maximalen Beschleunigungen das System aus Containern und Laschmaterial standhalten muss.

Die Tatsache, dass die ersten Verluste von Containern nicht von der Besatzung bemerkt wurde, ist ein unerwünschtes Ereignis. Wenn die Besatzung die ersten Containerverluste bemerkt hätte, hätten sie Abhilfe schaffen und möglicherweise verhindern können, dass weitere Container über Bord gehen.

Containerschiffe werden immer größer und der Anteil großer Schiffe in der Flotte. Die Untersuchung offenbarte, dass das Konzept zur Laschung von Containern an Deck auf diesen großen und breiten Schiffen überarbeitet werden muss und internationale technische und betriebliche Standards verbessert oder entwickelt werden müssen, wo es notwendig ist.

9 ERGRIFFENE MASSNAHMEN

Nach dem Unfall der MSC ZOE wurden noch während der Untersuchung Maßnahmen von den nachfolgenden Behörden getroffen:

Dutch Safety Board

Das Dutch Safety Board leitete eine zusätzliche Untersuchung ein, die sich auf die routenspezifischen Risiken für das Überbordgehen von Containern auf sehr großen Containerschiffen konzentrierte, die auf den Schifffahrtsrouten entlang der Watteninseln verkehren. Der Schwerpunkt lag auf den Bedingungen, die möglicherweise zu unsicheren Situationen auf sehr großen Containerschiffen auf den Schifffahrtsrouten entlang der Watteninseln führen können. Im Laufe der Untersuchung wurden die Bedingungen die zum Zeitpunkt des Unfalls der MSC ZOE herrschten, als Ausgangspunkt genommen, da diese sich erwiesenermaßen als Hochrisikosituation für ultragroße Containerschiffe herausgestellt haben.

Am 31. Oktober gab das Dutch Safety Board eine vorläufige Warnung an das Dutch Ministry of Infrastructure and Water Management heraus, in der das Risiko eines Bodenkontaktes auf der südlichen Schifffahrtsroute bekanntgegeben wurde.

„Die Untersuchung machte die Ausprägung eines Risikos deutlich, dass das Dutch Safety Board für hinreichend ernst hielt, um die die Nutzer des Verkehrstrennungsgebietes Terschelling-German Bight nördlich der niederländischen Watteninseln darauf aufmerksam zu machen.

Entlang dieser Route, können besondere Wind- und Wellenbedingungen und Tideverhältnisse zu beträchtlichen Eintauch- und Rollbewegungen führen, die die Kielfreiheit gefährden. Für Schiffe mit einer Größe vergleich mit der der MSC ZOE, kann dies zum Risiko einem Kontakt oder einem Beinahe-Kontakt mit dem Meeresboden führen.

Das Dutch Safety Board empfiehlt deshalb, dieses Risiko innerhalb Ihrer Institution bekanntzumachen und die Nutzer des Verkehrstrennungsgebietes Terschelling-German Bight darüber zu unterrichten.“

Die Untersuchung des Dutch Safety Boards konzentriert sich auf die routenspezifischen Risiken für das Überbordgehen von Containern auf sehr großen Containerschiffen wie der MSC ZOE auf den Schifffahrtsrouten in der Nordsee nördlich der Watteninseln. Aufgrund des Schwerpunktes der Schifffahrtsrouten konzentriert sich die Untersuchung nicht auf die technischen Konstruktionskriterien und Zertifizierung von Containerschiffen, Containern

und Befestigungsmechanismen/Laschmaterialien. Wegen der Fokussierung auf ultragroße Containerschiffe wie der MSC ZOE wird die Untersuchung nützlich sein, aber keinen genauen Einblick in das Risiko des Überbordgehens von Containern von anderen Schiffstypen (Containerschiffen) geben.

Die Erkenntnisse die für die Untersuchung des Hergangs der Ereignisse des Unfalls der MSC ZOE maßgeblich sind, wurden im Einklang mit internationalen Übereinkommen in die internationale Untersuchung, eingebracht. Der vollständige Bericht, einschließlich der Empfehlungen, ist erhältlich auf www.onderzoeksraad.nl

Deutscher Bundesrat zum Transport von Gefahrgut auf Großcontainerschiffen

Nach dem Überbordgehen von Containern von dem Containerschiff MSC ZOE am 2. Januar 2019, thematisierte der deutsche Bundesrat Aspekte der Containeridentifikation und Containernachverfolgung.

Der Bundesrat fragte die Bundesregierung: "...vorbehaltlich des noch nicht fertiggestellten Untersuchungsberichts der Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung (BSU – Aktenzeichen 03/19). Bezüglich der Ursache des Unfalls, sollte die verpflichtende Nutzung von geeigneten Verkehrstrennungsgebieten – auch für Großcontainerschiffe in der Nordsee – im internationalen Zusammenhang untersucht werden."

Gemäß der Empfehlung des Bundesrats in Beschluss 68/19 hat das BMVI zusammen mit dem Verkehrsministerium der Niederlande die Schifffahrtstauglichkeit des Verkehrstrennungsgebiets Terschelling - German Bight überprüft.

Die völkerrechtlich verbindliche Verlagerung von großen, nicht tiefgehenden Containerschiffen auf das Verkehrstrennungsgebiet Germany Bight – Western Approach wird derzeit nicht für erforderlich gehalten. Zur Verfolgung von Containerladungen existieren bereits in die Praxis eingeführte, technische Lösungen, die den Versendern (Befrachtern) von Logistikunternehmen bei Nutzung ihrer Container angeboten oder vertraglich vorgeschrieben werden. Die Bundesregierung sieht hier aktuell keinen regulatorischen Handlungsbedarf.

Der vollständige Text steht hier zur Verfügung:

<https://www.bundesrat.de/SharedDocs/beratungsvorgaenge/2020/0101-0200/0185-20.html>

Ministry of Infrastructure and Water Management

Nach dem Unfall der MSC ZOE hat das Ministry of Infrastructure and Water Management einige Untersuchungen begonnen, die sich mit dem Überbordgehen von Container entlang der Watteninseln befassen. Einige Untersuchungen sind noch nicht abgeschlossen. Sie betreffen unter anderem eine durch MARIN durchgeführte Untersuchung des Verhaltens

von verschiedenen Containerschiffstypen in widrigen Wetterbedingungen entlang der Watteninseln und eine Untersuchung von TNO, der niederländischen Organisation für angewandte wissenschaftliche Forschung zur Möglichkeit der Nachverfolgung von Containern.

Unmittelbar nach der Herausgabe der Warnung hat das niederländische Ministry of Infrastructure and Water Management die niederländische Küstenwache aufgefordert, die Warnung in Form eines Hinweises auf den elektronischen Seekarten bekanntzugeben und die besonderen Wind- und Wellenbedingungen und Tideverhältnisse an die Schifffahrt auszustrahlen. Auf der Grundlage der Warnung des Dutch Safety Board im Oktober 2019 hat die niederländische Küstenwache Warnungen für Großcontainerschiffe herausgegeben, die in widrigen Wetterbedingungen auf dem Weg zu dem VTS – Terschelling – German Bight sind, um sie zu dem nördlicher liegenden Verkehrstrennungsgebiet – German Bight – Western Approach umzuleiten, zum Beispiel zur nördlichen Route entlang der Watteninseln.

10 SICHERHEITSEMPFEHLUNGEN

1. Das Merchant Marine General Directorate, Panama, das Dutch Safety Board, Niederlande, und die Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung, Deutschland richten die nachfolgende Sicherheitsempfehlung an ihre zuständigen Behörden in deren Eigenschaft als Flaggenstaatsvertreter in den verschiedenen Ausschüssen der IMO:

1.1. Überprüfen und Überarbeiten der bestehenden technischen und rechtlichen Regelungen für Containerschiffe in Bezug auf die Auslegungsgrenzen von Ladungssicherungssystemen, genehmigte Ladungs- und Stabilitätsbedingungen und die Berücksichtigung von Flachwassereffekten und der Geschwindigkeit der Schiffsbewegungen und die daraus resultierenden Beschleunigungen und Kräfte. Dabei sind insbesondere die nachfolgenden Vorschriften und Aspekte zu berücksichtigen:

- IS-Code (Stabilitätsbedingungen für ultragroße Containerschiffe in der Entwicklungsphase und die zweite Generation der Intaktstabilität beginnt im Mai 2020,
- Code für die sachgerechte Stauung und Sicherung von Ladung bei der Beförderung mit sehr großen Containerschiffen,
- Container Sicherheitsübereinkommen (CSC) und ISO 1496-1 Frachtcontainer – Anforderung bzw. Prüfung,
- IMO-Rundschreiben MSC.1/Circ. 1228 vom 11. Januar 2007, überarbeitete Richtlinie für den Kapitän zur Vermeidung von gefährlichen Situationen in widrigen Wetter- und Seegangsverhältnissen,
- Stabilitätshandbuch, alle Beladungszustände sollten auf hohe Beschleunigungen/Kräfte hin überprüft werden,
- Ladungssicherungshandbuch, einschließlich Auslegungsgrenzen der Ladungssicherungsvorrichtungen in Übereinstimmung mit den Beschleunigungen.

Dabei sollten die vorgenannten Behörden die von den bestehenden internationalen Arbeitsgruppen erzielten Ergebnisse einarbeiten.

1.2. Einführen folgender Verpflichtungen für alle Containerschiffe:

1.2.1 Installation elektronischer Inklinometer oder gleichartiger (inertia) Systeme zur Messung und Darstellung dieser Information in Echtzeit für den Kapitän/die Besatzung.

1.2.2 Installation von Sensoren an entscheidenden Stellen auf dem Schiff, um Beschleunigungen zu messen und diese Information in Echtzeit dem Kapitän/der Besatzung zur Verfügung zu stellen, um sie in die Lage zu versetzen, dies zu überwachen.

1.2.3 Für Schiffe, die obligatorisch mit einem VDR ausgerüstet sind, den tatsächlichen Rollwinkel, die Rollperiode und Beschleunigungen für den Zweck der Seesicherheitsuntersuchung aufzuzeichnen.

1.3 Auswertung und Bewertung möglicher technischer Lösungen, die dem Kapitän/der Besatzung dabei helfen können, den Verlust von über Bord gegangenen Containern festzustellen, und internationale Standards für die Umsetzung solcher Lösungen vorschlagen.

2. Das Merchant Marine General Directorate, Panama, das Dutch Safety Board, Niederlande, und die Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung, Deutschland, empfehlen den in ihrer Eigenschaft als zuständige Behörden für die Erhaltung und den Schutz des Wattenmeeres **verantwortlichen Behörden der Niederlande und Deutschlands** in Zusammenarbeit mit der trilateralen Wattenmeer Kooperation

- festzustellen, ob die bestehenden Routen der Verkehrstrennungsgebiete German Bight nördlich des Wattenmeeres angepasst oder ob insbesondere Maßnahmen ergriffen werden müssen, um die Sicherheit großer Containerschiffe während der Fahrt auf diesen Routen zu maximieren. Dabei sollten die folgenden Aspekte und hydrodynamischen Phänomene berücksichtigt werden:

- Extreme Schiffsbewegungen und Beschleunigungen,
- Schiffsgeschwindigkeit
- Grün-Wasser-Effekte,
- Wellenschlag
- möglicher Kontakt mit dem Meeresboden,
- Status des Wattenmeeres als besonders sensibles Meeresgebiet (PSSA)

- Wenn festgestellt wird, dass eine Anpassung notwendig ist oder Maßnahmen ergriffen werden müssen, sollten die verantwortlichen Behörden in ihrer Eigenschaft als Repräsentanten der Flaggenstaaten in den verschiedenen Ausschüssen der IMO eine Änderung und/oder Maßnahmen für die oben erwähnten bestehenden Schifffahrtswege vorschlagen.
3. Das Merchant Marine General Directorate, Panama, das Dutch Safety Board, Niederlande, und die Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung, Deutschland, richten die folgende Empfehlung an den **Schiffseigner MSC**:
- Bei der Konstruktion und dem Betrieb von Schiffen hohe Beschleunigungskräfte, die zu Verletzungen von Besatzungsmitgliedern und Passagieren führen und Schäden an der Ladung verursachen können zu reduzieren, beispielsweise durch Installation von Bilgekiels, Antiroll-Tanks oder Stabilisatoren oder durch das Einführen von Stabilitätsgrenzen im Schiffsbetrieb durch Limitierung des GM.
 - Den Kapitäne und nautischen Offiziere, die auf Schiffen mit einer hohen Stabilität fahren, auf die hydrodynamischen Phänomene, die beim Befahren dieser Routen nördlich des Wattenmeeres auftreten können, hinzuweisen und entsprechende Richtlinien zu entwickeln.
4. Das Merchant Marine General Directorate, Panama, das Dutch Safety Board, Niederlande, und die Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung, Deutschland, richten die folgende Empfehlung an den **World Shipping Council** und die **International Chamber of Shipping**:
- Aktiv die Lehren aus dieser Seesicherheitsuntersuchung kommunizieren.
 - Verbreitung von Industriestandards und Grundsätzen, die die Sicherheit von Containertransporten erhöhen werden.
 - Eine Initiative für Neuerungen in der Schiffskonstruktion starten, für Schiffsrümpfe und/oder Laschaurüstung die besser für die in diesem Bericht beschriebenen Bedingungen geeignet sind.

ANHANG A: SCHIFFSDATEN

SCHIFFSDATEN

Schiffsdaten	MSC ZOE
Unterscheidungssignal:	3FQA
IMO-Nummer:	9703318
Flaggenstaat:	Panama
Heimathafen:	Panama
Schiffstyp:	Ultragroßes Containerschiff
Klassifikationsgesellschaft:	DNV GL
Baujahr:	2015
Bauwerft:	Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co. Ltd. / 4279
Länge ü. a.:	395,40 m
Länge zwischen den Loten (LPP):	379,40 m
Breite:	59,00 m
Tiefgang:	14,50 m
Bruttoreaumzahl:	192237
Container-Gesamtkapazität	19224 TEU
Maschine:	MAN-B&W 11S 90ME-C10.2 TII
Antrieb:	1 Propeller, 5-Blatt-Festpropeller
Maximale Antriebsleistung:	62.500 kW
Maximale Geschwindigkeit:	22,8 kn
Schiffszertifikate	Alle gültig

ZUSAMMENSETZUNG DER BESATZUNG

Grad/Funktion	Anzahl
Kapitän	1
Erster Offizier	1
Zweiter Offizier	1
Dritter Offizier	1
Leitender Ingenieur	1
Zweiter Ingenieur	1
Vierter Ingenieur	1
Stagiaire Maschinenraum	1
Elektrotechnischer Offizier	1
Bootsmann	1
AB	4

OS	2
Deckschlosser	1
Motormann	2
Koch	1
Steward	1
Wirtschaftspersonal	1
Gesamt	22

LISTE DER VORGESCHRIEBENEN ZERTIFIKATE DER MV MSC ZOE

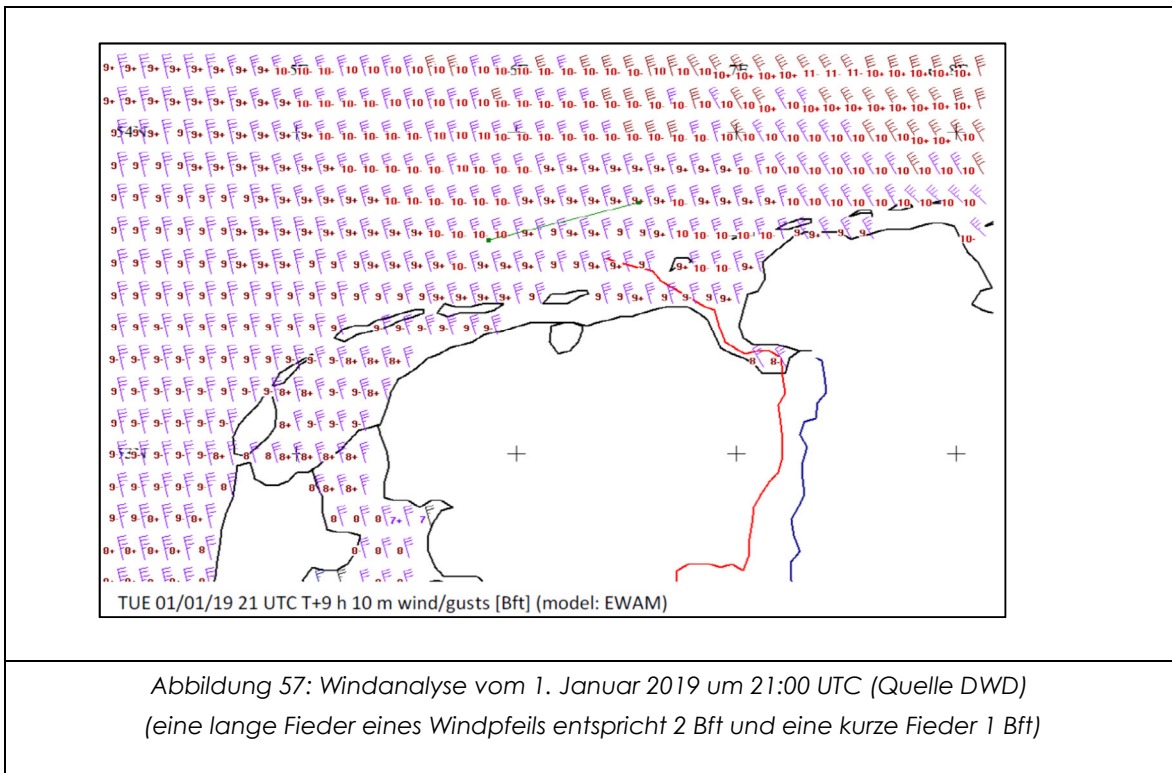
Zertifikat	Ausstellende Behörde	Datum der Ausstellung (TT.MM.JJJJ)	Ablaufdatum (TT.MM.JJJJ)
Register	PMA	02.09.2015	01.09.2020
Klasse	DNV GL	25.04.2018	23.06.2020
Bau-Sicherheitszeugnis	DNV GL	25.04.2018	23.06.2020
Ausrüstungs-Sicherheitszeugnis	DNV GL	25.04.2018	23.06.2020
Funk-Sicherheitszeugnis	DNV GL	25.04.2018	23.06.2020
Freibordzeugnis	DNV GL	25.04.2018	23.06.2020
Raumgehalt	PMA	03.06.2015	Permanent
Int. Ölpest. Verh.	DNV GL	25.04.2018	23.06.2020
Int. Luftverschm. Verh.	DNV GL	13.03.2018	23.06.2020
Int. Energieeffizienz Zert.	DNV GL	25.04.2018	-
Int. Wasserverschm. Verh.	DNV GL	25.04.2018	23.06.2020
Int. Schiffssicherheit	PMA	04.01.2016	02.12.2020
ISM	DNV GL	10.12.2015	02.12.2020
Zeugnis über die Erfüllung der einschlägigen Vorschriften (ISM)	RINA	18.09.2014	02.09.2019
Mindestbesatzung	PMA	01.02.2017	-
See-Arbeitszeugnis	DNV GL	10.12.2015	07.12.2020
Funklizenz	PMA	31.08.2015	30.08.2020
Int. Ballastw.-Man. Zert.	PMA	24.06.2015	23.06.2020
Panama jährliche Steuer	PMA	10121503A	31.12.2018
Letzter PSC-Report	PSC Singapur	14.08.2018	Keine
PSC (ref. Unfall)	PSC Deutschland	03.01.2019	7 Mängel
Jährliche Überpr. d. Flaggenstaat	PMA	15.08.2018	Keine Mängel
CLC für Bunker	PMA	20.02.2018	20.02.2019
CLC für Wrack	PMA	20.02.2018	20.02.2019

Das Schiff ist für Schäden gegenüber Dritten mit „West Of England“-Zertifikat Nr. 394935 vom 02.02.2018 versichert und besitzt eine H+M Abdeckung bei „Auscomar Srl“.

ANHANG B: SCHAUBILDER DEUTSCHER WETTERDIENST

Die Windanalysekarten in den Abbildungen 57 und 58 zeigen die ermittelten Windstärken im Unfallgebiet um 21:00 UTC bzw. 00:00 UTC, wobei die Fiedern die mittlere Windstärke und die Zahlenwerte die Böen in Bft darstellen. Die grüne Linie zeigt den Kurs der MSC ZOE im Bezugszeitraum.

Die Fiedern repräsentieren die mittlere Windstärke und die Zahlenwerte die Böen in Bft. Die grüne Linie zeigt den Kurs der MSC ZOE im Bezugszeitraum.



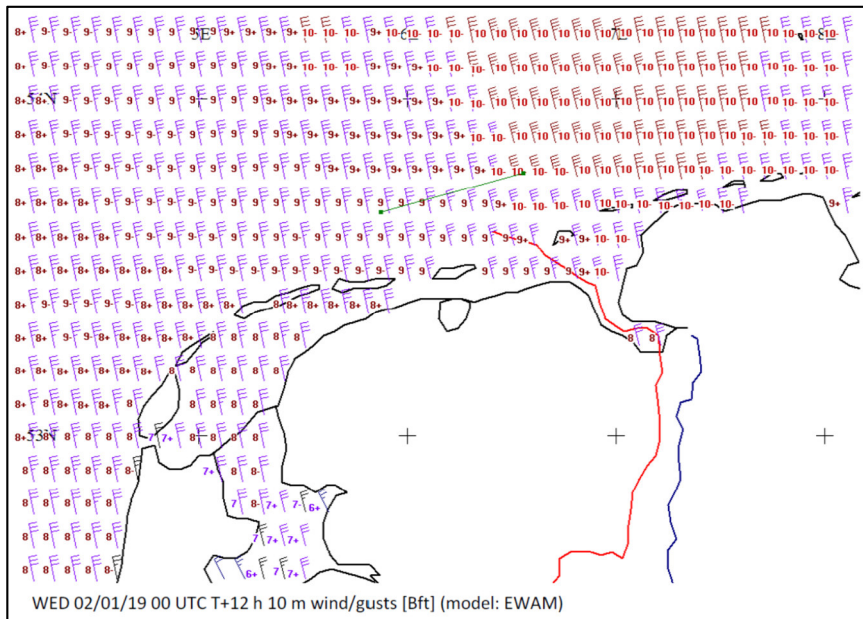


Abbildung 58: Windanalyse vom 1. Januar 2019 um 00:00 UTC (Quelle DWD)
 (eine lange Fieder eines Windpfeils entspricht 2 Bft und eine kurze Fieder 1 Bft)

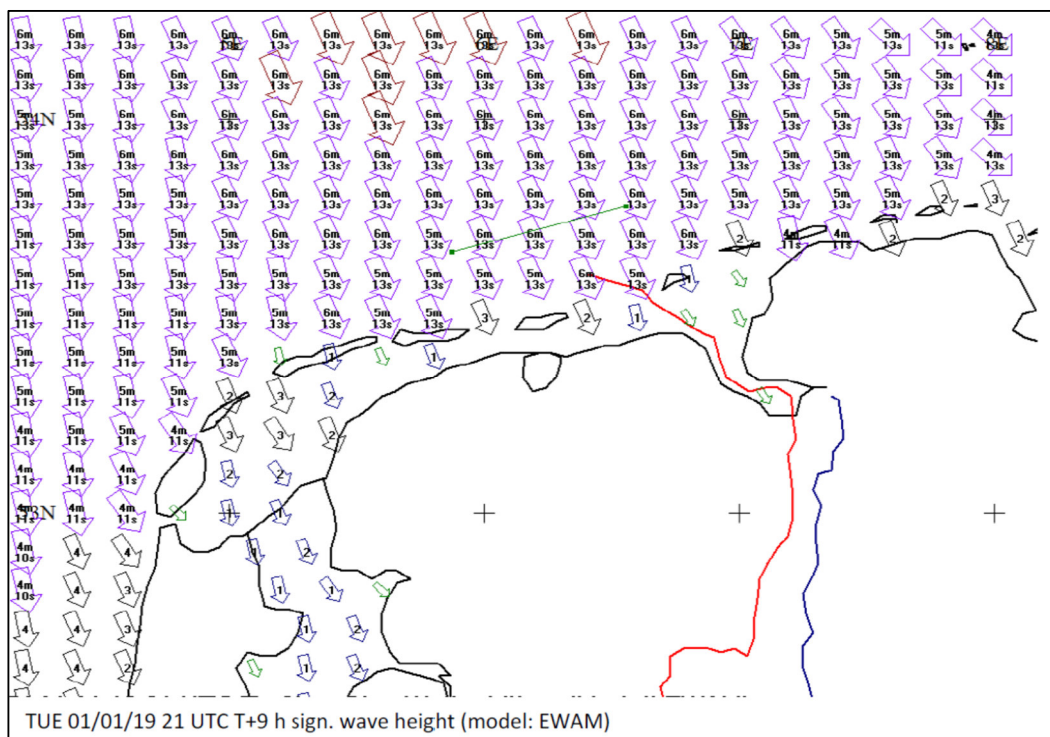


Abbildung 59: Wellenanalyse vom 1. Januar 2019 um 21:00 UTC (Quelle DWD)

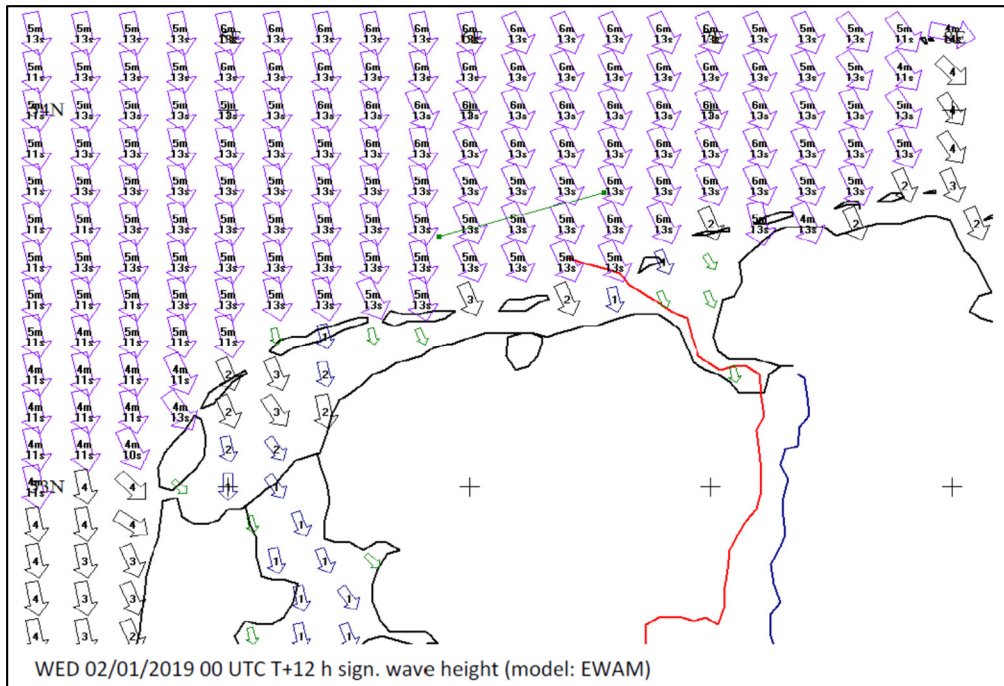


Abbildung 60: Wellenanalyse vom 1. Januar 2019 um 00:00 UTC (Quelle DWD)

ANHANG C: TECHNISCHER BERICHT DELTAIRES

Der Bericht von Deltaires steht auf den folgenden Websites zur Verfügung:

www.bsu-bund.de

www.oderzoeksraad.nl

ANHANG D: TECHNISCHER BERICHT MARIN

Der Bericht von MARIN steht auf den folgenden Websites zur Verfügung:

www.bsu-bund.de

www.oderzoeksraad.nl

ANHANG E: TECHNISCHER BERICHT TUHH

Der Bericht der TUHH steht auf den folgenden Websites zur Verfügung:

www.bsu-bund.de

www.oderzoeksraad.nl

