



Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung
Federal Bureau of Maritime Casualty Investigation
Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums
für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung

Untersuchungsbericht 45/07

Weniger schwerer Seeunfall

**Verlust von 10 Containern
von Bord JRS CANIS
in der Elbmündung
am 12. Januar 2007 um 02:40 Uhr**

1. Oktober 2008

Die Untersuchung wurde in Übereinstimmung mit dem Gesetz zur Verbesserung der Sicherheit der Seefahrt durch die Untersuchung von Seeunfällen und anderen Vorkommnissen (Seesicherheits-Untersuchungs-Gesetz-SUG) vom 16. Juni 2002 durchgeführt.

Danach ist das alleinige Ziel der Untersuchung die Verhütung künftiger Unfälle und Störungen. Die Untersuchung dient nicht der Feststellung des Verschuldens, der Haftung oder von Ansprüchen.

Der vorliegende Bericht soll nicht in Gerichtsverfahren oder Verfahren der seeamtlichen Untersuchung verwendet werden. Auf § 19 Absatz 4 SUG wird hingewiesen.

Bei der Auslegung des Untersuchungsberichtes ist die deutsche Fassung maßgebend.

Herausgeber:
Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung
Bernhard-Nocht-Str. 78
20359 Hamburg

Leiter: Jörg Kaufmann
Tel.: +49 40 31908300
posteingang-bsu@bsh.de

Fax.: +49 40 31908340
www.bsu-bund.de

Inhaltsverzeichnis

1	ZUSAMMENFASSUNG DES SEEUNFALLS.....	7
2	UNFALLORT.....	8
3	SCHIFFSDATEN.....	9
3.1	Foto.....	9
3.2	Daten.....	9
4	UNFALLHERGANG	10
5	UNTERSUCHUNG.....	11
5.1	Umweltbedingungen.....	11
5.1.1	Wetterlage.....	11
5.1.2	Seegangsverhältnisse	12
5.2	Beladungszustand.....	17
5.3	Hydrodynamische Untersuchungen	18
5.3.1	Gutachten der TU Hamburg Harburg	18
5.3.1.1	Einige Grundlagen zu großen Rollwinkeln in schwerem Wetter	22
5.3.1.2	Kurze Beschreibung des verwendeten Seegangs- Simulationsprogramms E4ROLLS.....	28
5.3.1.3	Einige Ergebnisse der linearen Streifenmethode	29
5.3.1.4	Zur Frage der anzusetzenden Umweltbedingungen.....	30
5.3.1.5	Ergebnisse der nichtlinearen Seegangsberechnungen: Rollwinkel	31
5.3.1.6	Auf Containerstapel wirkende Beschleunigungen	35
5.3.1.7	Ursachen für den aufgetretenen Ladungsverlust.....	42
5.3.1.8	Möglichkeiten zur Vorhersage kritischer Seegangssituationen im Bordbetrieb.....	43
5.3.2	Gutachten des FB Seefahrt Warnemünde	49
5.3.2.1	Berechnungen zur Gefährdung durch Seegang in Bezug auf Resonanz und andere Effekte	51
5.3.2.2	Begegnungsperiode und Resonanzgefahr	53
5.3.2.3	Darstellung potentieller Gefahrensituation im Polardiagramm.....	54
5.3.2.4	Erweiterte Gefährdungseinschätzung mit Programm ARROW	57
5.3.2.5	Möglichkeit der Erkennung der Gefahr und Gefahrenvermeidung	63
5.3.2.6	Möglichkeiten der Berechnung zur Erkennung der Gefahr bzw. Entscheidungsvorbereitung für ihre Vermeidung.....	67
5.3.2.7	Zusammenfassende Einschätzung	71
5.4	Untersuchung des Laschmaterials	72
5.4.1	Laschstange	72
5.4.2	Spannschraube mit gebrochenem Auge	74
5.4.3	Gebrochenes Auge	76
5.4.4	Riegel.....	78
5.4.5	Twistlock.....	79
6	ANALYSE	81

6.1	Auswertung der TU Hamburg-Harburg.....	81
6.2	Auswertung des FB Seefahrt in Warnemünde der FH Wismar	82
6.3	Zusammenfassung der BSU zu hydrodynamischen Erkenntnissen	83
6.4	Containerstauung und Laschung.....	84
7	SICHERHEITSEMPFEHLUNGEN	86
7.1	Betreiber von Seeschiffen, Schiffsführungen und Betreiber von Hafenumschlagsbetrieben.....	86
7.2	Wissenschaftliche Einrichtungen und schiffahrtsbezogene Firmen, See-Berufsgenossenschaft und Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung	86
8	QUELLENANGABEN.....	87
9	ANHANG.....	89

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Seekarte	8
Abbildung 2: Schiffsfoto	9
Abbildung 3: Wetterdaten von der Station Elbe	13
Abbildung 4: Wetterdaten von der Station Helgoland	13
Abbildung 5: Wetterdaten von der Station FINO.....	14
Abbildung 6: Simulationen DWD Local Wave Model	14
Abbildung 7: Seegangsvorhersage 01:00 Uhr	15
Abbildung 8: Seegangsvorhersage 04:00 Uhr	16
Abbildung 9: Zusammenstellung der Situation JRS CANIS zum Unfallzeitpunkt....	17
Abbildung 10: Beladungszustand zum Unfallzeitpunkt	18
Abbildung 11: Berechnungsmodell für JRS CANIS	19
Abbildung 12: Kurven der aufrichtenden Hebel für Glattwasser.	21
Abbildung 13: Veranschaulichung der wesentlichen Seegangseffekte.....	25
Abbildung 14: Seegangseffekte für starkes Rollen	26
Abbildung 15: Berechnungsmodell der linearen Übertragungsfunktionen.	29
Abbildung 16: Wellenhöhen für Rollwinkel 20°, kennzeichnende Periode 9,5 s	31
Abbildung 17: Wellenhöhen für Rollwinkel 20°, kennzeichnende Periode 10,5 s ..	32
Abbildung 18: Wellenhöhen für Rollwinkel 20°, kennzeichnende Periode 11,5 s ..	33
Abbildung 19: Generalplan von JRS CANIS.....	35
Abbildung 20: Statistische Verteilung der Wellenamplituden.....	36
Abbildung 21: Statistische Verteilung der Wellenamplituden bei T1 = 11 s	37
Abbildung 22: Statistische Verteilung der Wellenamplituden bei T1 = 11,5 s	38
Abbildung 23: Statistische Verteilung der Vertikalbeschleunigungen	40
Abbildung 24: Statistische Verteilung der Querschleunigungen	41
Abbildung 25: JRS CANIS– Stabilitäts-Angaben als Ladungsrechnerauszug	50
Abbildung 26: Zusammenstellung der Effekte durch Seegang	51
Abbildung 27: Ergebnisdarstellung im Polar Diagramm.	56
Abbildung 28: Zusammenstellung der Seegangs-Effekte und Formeln.....	57
Abbildung 29: ARROW Programm – Überblick der Bedienoberfläche.	58
Abbildung 30: Stability Data Window – Hebelarmkurve über dem Rollwinkel.....	59
Abbildung 31: Ergebnisse zur Gefahreinschätzung für $T_w=10$ s ohne $T_r(40^\circ)$	60

Abbildung 32: Ergebnisse zur Gefahreneinschätzung für $T_w=11$ s	62
Abbildung 33: Ergebnisse zur Gefahreneinschätzung für $T_w=12$ s	62
Abbildung 34: Beispiel für kommerzielle Wetterangaben des DWD	64
Abbildung 35: Beispiel für kommerzielle Wetterangaben des DWD aus speziellen, individuellen Routenberatungen für Fährverkehr in der Ostsee	64
Abbildung 36: Screenshots von professionellen Seegangsvorhersagen in den Seewetter-Informationssystemen des DWD	65
Abbildung 37: Screenshot von bordgestützter Routenerarbeitung mit professioneller Wetter- und Seegangsvorhersage.....	66
Abbildung 38: Screenshot von der Routungs-Software „Bon Voyage“ von AWT.....	69
Abbildung 39: Screenshot von ARROW mit den Daten der aktuellen Situation aus Routungs-Software.....	70
Abbildung 40: Screenshot 1 mit Daten der alternativen Situation bei $T_r=17,8$ s.....	70
Abbildung 41: Screenshot 2 mit Daten der alternativen Situation bei $T_r=17,8$ s.....	71
Abbildung 42: Bruchstück einer Laschstange.....	73
Abbildung 43: Korrodierte Bruchfläche der Laschstange.....	73
Abbildung 44: Spaltbruchstrukturen der Laschstange	74
Abbildung 45: Gabel einer Spannschraube	75
Abbildung 46: Bruchfläche der Spannschraube.....	75
Abbildung 47: Gefüge der Spannschraube.....	76
Abbildung 48: Bruchstück eines Auges	77
Abbildung 49: Gefüge des Auges	77
Abbildung 50: Riegel	78
Abbildung 51: Gefüge des Riegels	79
Abbildung 52: Twistlock.....	80
Abbildung 53: Verschleißspuren auf der tragenden Fläche des Twistlocks.....	80
Abbildung 54: Ausschnitt des General Arrangement Plan - Seitenansicht	85
Abbildung 55: Cargo securing manuell - stackweights	89
Abbildung 56: Cargo securing manuell - lashings.....	90

1 Zusammenfassung des Seeunfalls

Das Containerschiff JRS CANIS befand sich am 11. Januar 2007 zwischen 19:30 Uhr und 22:30 Uhr¹ in Bremerhaven. Nach dem Beenden der Lade- und Löscharbeiten überprüfte die Besatzung die Sicherung der Container. Um 23:06 Uhr legte das Schiff unter Lotsenberatung ab, um nach St. Petersburg zu fahren.

Der Wettervorhersage für die Deutsche Bucht entsprechend entwickelte sich in dieser Nacht ein Sturm aus West bis Westnordwest 8 bis 9 in Böen 11 Bft, bei einer See von bis zu 8 Metern.

Am 12. Januar 2007 um 00:45 Uhr ging der Lotse von Bord.

Die Geschwindigkeit des Schiffes wurde den Seegangsverhältnissen angepasst. Nach dem Passieren der Tonne 4a wurde German Bight Traffic darüber informiert, dass sich die JRS CANIS auf dem Weg zum NOK befinde. Das Schiff habe zu diesem Zeitpunkt heftig gestampft und gerollt.

Es sei ein rechtweisender Kurs von 330° gesteuert worden und das Schiff habe etwa 7 kn Fahrt gemacht. Nach dem Passieren eines entgegenkommenden Fahrzeugs sei der Kurs auf 060° und die Geschwindigkeit auf etwa 15,5 kn geändert worden.

Der Wind sei mit einer Stärke von 9 Bft aus 285° gekommen. Die Seestärke habe etwa 7 bis 8 betragen bei bis zu 5 m Höhe und sei aus WSW- bis WNW-licher Richtung gekommen.

Um 02:40 Uhr habe das Schiff kurzzeitig mehrmals mit bis zu 20° zu jeder Seite übergeholt. Die Brückenbesatzung habe beobachten können, dass der Containerstapel auf der Backbordseite nach innen neigte und den Containerstapel auf der Steuerbordseite nach außen schob. Dabei sind 10 Container über Bord gegangen.

Die Verkehrszentrale Deutsche Bucht wurde sofort über den Vorfall informiert.

Danach wurde eine Kontrolle an Deck durchgeführt, um die Schäden festzustellen. Es wurde beschlossen, die Reise mit reduzierter Geschwindigkeit bis zum NOK fortzusetzen.

Um 07:12 Uhr war die JRS CANIS in Brunsbüttel fest, und es begannen erste Untersuchungen an Bord.

¹ Alle im Bericht genannten Uhrzeiten sind Ortszeiten (MEZ=UTC+1h)

2 Unfallort

Art des Ereignisses: Weniger schwerer Seeunfall,
Verlust von Containern durch Überbordgehen
Datum/Uhrzeit: 12. Januar 2007 – 02:40 Uhr
Ort: Elbmündung
Breite/Länge: $\varphi 53^\circ 57,5'N \ \lambda 008^\circ 05,5'E$

Ausschnitt aus Seekarte INT 1413, BSH

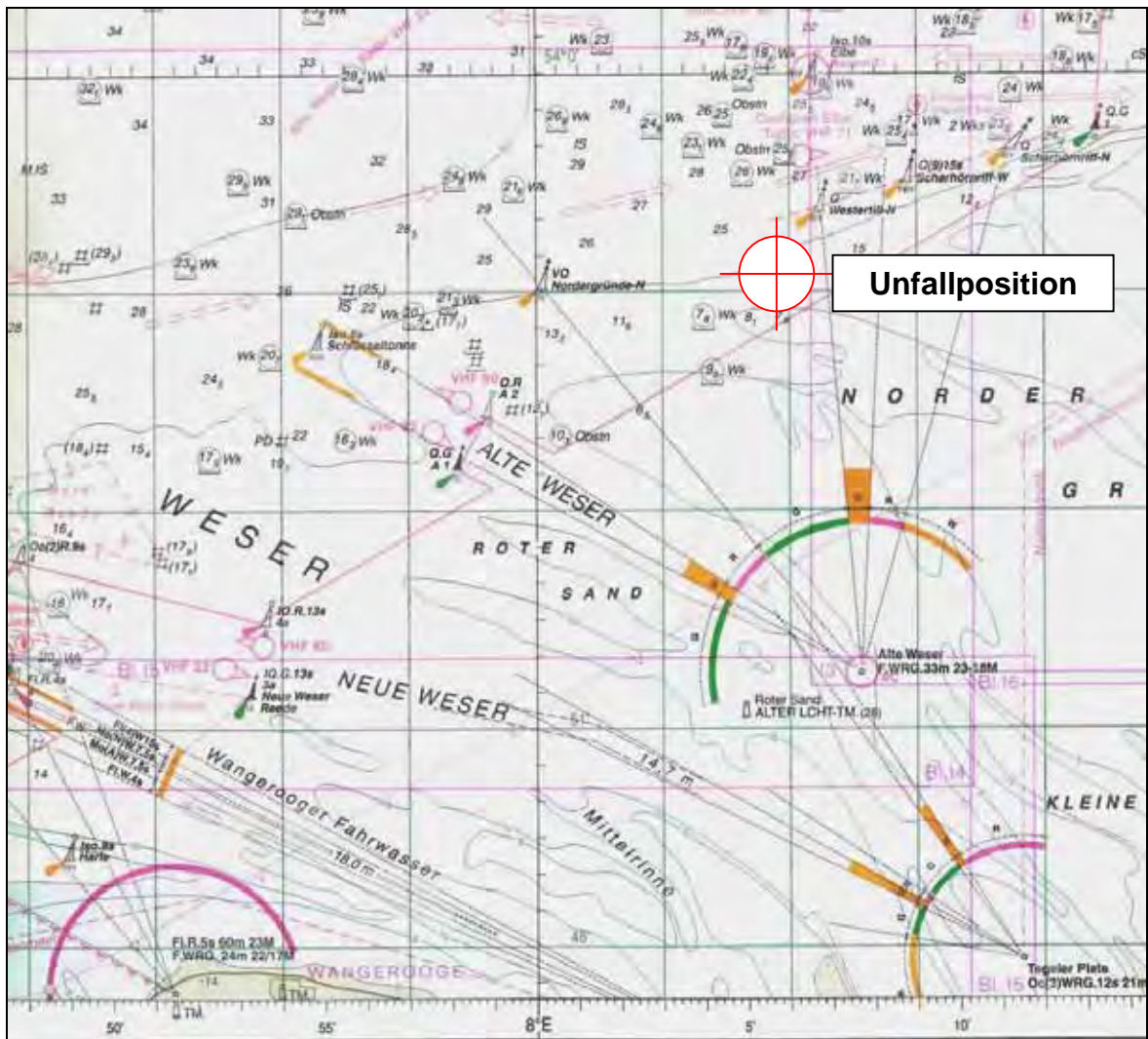


Abbildung 1: Seekarte

3 Schiffsdaten

3.1 Foto



Abbildung 2: Schiffsfoto

3.2 Daten

Schiffsname:	JRS CANIS
Schiffstyp:	Containerschiff
Nationalität/Flagge:	Zypern
Heimathafen:	Limassol
IMO-Nummer:	9339014
Unterscheidungssignal:	C4LN2
Reederei:	S&D Shipmanagement GmbH & Co. KG
Baujahr:	2006
Bauwerft/Baunummer:	MAWEI SHIPYARD
Klassifikationsgesellschaft:	GL
Länge ü.a.:	129,20 m
Breite ü.a.:	20,60 m
Bruttoraumzahl:	7.545
Tragfähigkeit:	8.262 t
Tiefgang zum Unfallzeitpunkt:	V: 7,09 m, A: 7,49 m
Maschinenleistung:	7.200 kW
Hauptmaschine:	Caterpillar MAK 9M43C
Geschwindigkeit:	17,5 kn
Werkstoff des Schiffskörpers:	Stahl
Anzahl der Besatzung:	13

4 Unfallhergang

Das Containerschiff JRS CANIS machte am 11. Januar 2007 um 19:30 Uhr in Bremerhaven fest. Die Lade- und Löscharbeiten waren um 22:30 Uhr beendet. Auf Anweisung des Kapitäns habe der Chieffmate und die Besatzung die Sicherung der Container vor dem Auslaufen geprüft und für korrekt befunden. Um 23:06 Uhr legte das Schiff unter Lotsenberatung ab, um nach St. Petersburg zu fahren.

Die Wettervorhersage für die Deutsche Bucht sei zu diesem Zeitpunkt Wind aus West bis Westnordwest 8 bis 9 in Böen 11 Bft, See bis 8 Meter gewesen.

Am 12. Januar 2007 um 00:45 Uhr ging der Lotse auf Neufeld Reede von Bord und die Reise wurde unter UKW-Beratung der Verkehrszentrale bis zur Tonne 4a begleitet.

Die Geschwindigkeit des Schiffes sei den Seegangsverhältnissen angepasst worden. Nach dem Passieren der Tonne 4a sei German Bight Traffic darüber informiert worden, dass sich die JRS CANIS im Revier befinde, auf dem Weg zum NOK. Das Schiff habe zu diesem Zeitpunkt heftig gestampft und gerollt.

Es sei ein rechtweisender Kurs von 330° gesteuert worden, und das Schiff habe etwa 7 kn Fahrt gemacht. Nach dem Passieren eines entgegenkommenden Fahrzeugs sei der Kurs auf 060° und die Geschwindigkeit auf etwa 15,5 kn geändert worden.

Der Wind sei mit einer Stärke von 9 Bft aus 285° gekommen. Die Seestärke habe etwa 7 bis 8 betragen bei bis zu 5 m Höhe und sei aus WSW- bis WNW-licher Richtung gekommen. Die Sicht sei gut gewesen.

Um 02:40 Uhr, kurz nach dem Passieren der Nordergründe habe das Schiff kurzzeitig mehrmals mit bis zu 20° zu jeder Seite übergeholt. Die Brückenbesatzung habe beobachten können, dass der Containerstapel auf der Backbordseite sich nach innen zur Seite neigte und den Containerstapel auf der Steuerbordseite nach außen schob. Dabei seien 10 Container über Bord gegangen. Die Position sei mit 053° 57,5'N 008° 03,5'E aufgezeichnet worden.

Die Verkehrszentrale Deutsche Bucht sei sofort informiert worden.

Danach sei eine Kontrolle an Deck durchgeführt worden, um die Schäden festzustellen. Es sei beschlossen worden, die Reise mit reduzierter Geschwindigkeit bis zum NOK fortzusetzen.

Um 07:12 Uhr sei die JRS CANIS in Brunsbüttel fest gewesen, und es begannen erste Untersuchungen an Bord.

5 Untersuchung

Mit zunehmendem Containertransport auf See werden auch die Containerschiffe immer zahlreicher. Dabei zeigt sich als Begleitphänomen das Überbordfallen oder Ineinanderstürzen von Containern. Neben den bisher bekannten Ursachen wie Wind, Wellen und daraus resultierender Eigenbewegung des Schiffes, beeinflusst auch parametrisches Rollen die Stabilität des Schiffes.

Der Schwerpunkt dieser Untersuchung lag dementsprechend auf den folgenden Fragestellungen:

1. Wurde der Ladungsverlust durch seegangsbedingte Resonanzerscheinungen bedingt?
2. Hatte die Besatzung die Möglichkeit, dies vorab zu erkennen? Dabei sollte geklärt werden, ob der eventuelle Einsatz von so genannter Seegangswarnsoftware den Ladungsverlust hätte verhindern können.
3. Welchen Einfluss hatte das verwendete Laschmaterial? (Twistlocks)

5.1 Umweltbedingungen

Eine wesentliche Grundlage für die weitere Bearbeitung der o.g. Fragestellungen ist die möglichst genaue Darstellung der Umweltbedingungen. Dazu wurde der DWD² beauftragt, ein Wettergutachten zu erstellen. Um das Seegangsverhalten genauer beschreiben zu können, wurde zusätzlich das BSH³ gebeten, eine Aussage über die Seegangsverhältnisse zum Unfallzeitpunkt zu erarbeiten.

5.1.1 Wetterlage

Dem DWD stehen durch internationalen Austausch stündliche Wettermeldungen von Land- und Küstenstationen für das zu beurteilende Gebiet und den gewünschten Zeitraum zur Verfügung.

Die Wetterlage in der Nordsee wurde durch mehrere Tiefdruckgebiete mit Kernen über dem Nordatlantik, dem Nordmeer und der Ostsee bestimmt. Ein ausgeprägter Druckgradient führte über der Deutschen Bucht am Vormittag des 11. Januar 2007 zunächst zu schwerem Südweststurm. Nachmittags flaute der Sturm vorübergehend ab und drehte auf West. In der ersten Nachthälfte zum 12. Januar 2007 erreichte der Wind wieder Sturmstärke und drehte in der zweiten Nachthälfte auf nordwestliche Richtung.

Es war wolzig bis stark bewölkt und gab immer wieder Schauer. Die horizontale Sichtweite lag zwischen 2 und 5 sm, es war Halbmond.

Der Wind kam aus West bis Nordwest mit einer mittleren Stärke von 9 Bft, in Böen wurden 11 bis 12 Bft gemessen. Diese Werte sind auf das 10-Minuten-Mittel der Windgeschwindigkeiten bezogen, gemessen in 10 m Höhe.

Schiffsbeobachtungen oder Bojenmessungen des Seegangs lagen für den Unfallzeitpunkt nicht vor. Dennoch kann aus den Zusammenhängen zwischen Windstärke, Windwirkdauer und Windwirkrichtung die kennzeichnende (signifikante) Wellenhöhe der Windsee abgeschätzt werden.

² DWD = Deutscher Wetterdienst

³ BSH = Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

Bei ungestörten Tiefwasserbedingungen, wie sie an der Unfallposition gegeben sind, kann ein richtungsstabiler, über 6 Stunden anhaltender Mittelwind der Stärke 8 bis 9 Bft eine Windsee mit einer kennzeichnenden Wellenhöhe von 5 bis 6 m und Perioden von 7 bis 8 s erzeugen.

Diese Werte beziehen sich auf die kennzeichnende (auch signifikant genannte) Wellenhöhe. Sie entspricht dem arithmetischen Mittel aus dem oberen Drittel der Wellenhöhen in einem Beobachtungszeitraum. Das bedeutet, dass eine Anzahl von Einzelwellen höher als die kennzeichnende Wellenhöhe ist. In seltenen Fällen können Einzelwellen die kennzeichnende Wellenhöhe um 70 bis 100 % übersteigen.

5.1.2 Seegangsverhältnisse

Die beim BSH vorliegenden Daten über die Seegangsverhältnisse vom 12. Januar 2007 wurden in folgenden Abbildungen und Tabellen zusammengestellt:

1. Grafische Zeitreihen der Messungen von den Stationen FINO⁴ (Abb. 5), Helgoland (Abb. 4) und Elbe (Abb. 3),
2. Tabelle der Seegangparameter aus dem Seegangmodell an den drei Messorten und für den Unfallort Nordergründe (Abb. 6),
3. Karten der signifikanten Wellenhöhe am 12. Januar 2007 um 01:00 Uhr und 04:00 Uhr (Abb. 7 und 8).

Unglücklicherweise war im Januar die Datenverbindung zur Empfangsanlage der Messboje Elbe gestört, sodass nur wenige Messwerte über Satelliten gesendet wurden. Für die Unfallzeit liegen so keine Messdaten vor.

Der Vergleich der beiden anderen Messbojen bei Helgoland (Abb. 4) und der FINO-Plattform (Abb. 5) mit dem numerischen Seegangmodell des DWD zeigt, dass die berechneten Wellenhöhen zu hoch waren, insbesondere am Tag vorher. Am Morgen des 12. Januar 2007 stimmten die Modellergebnisse wieder mit den Messungen FINO überein, bei Helgoland waren sie aber noch um etwa einen 3/4 m zu hoch.

Da bei der Station Elbe (Abb. 3) die Messdaten fehlen, kann man nur davon ausgehen, dass dort die berechneten Wellenhöhen etwa um denselben Betrag zu hoch waren. Der zeitliche Verlauf bei Helgoland und Station Elbe ist sehr ähnlich.

⁴ FINO = Forschungsplattformen in Nord- und Ostsee

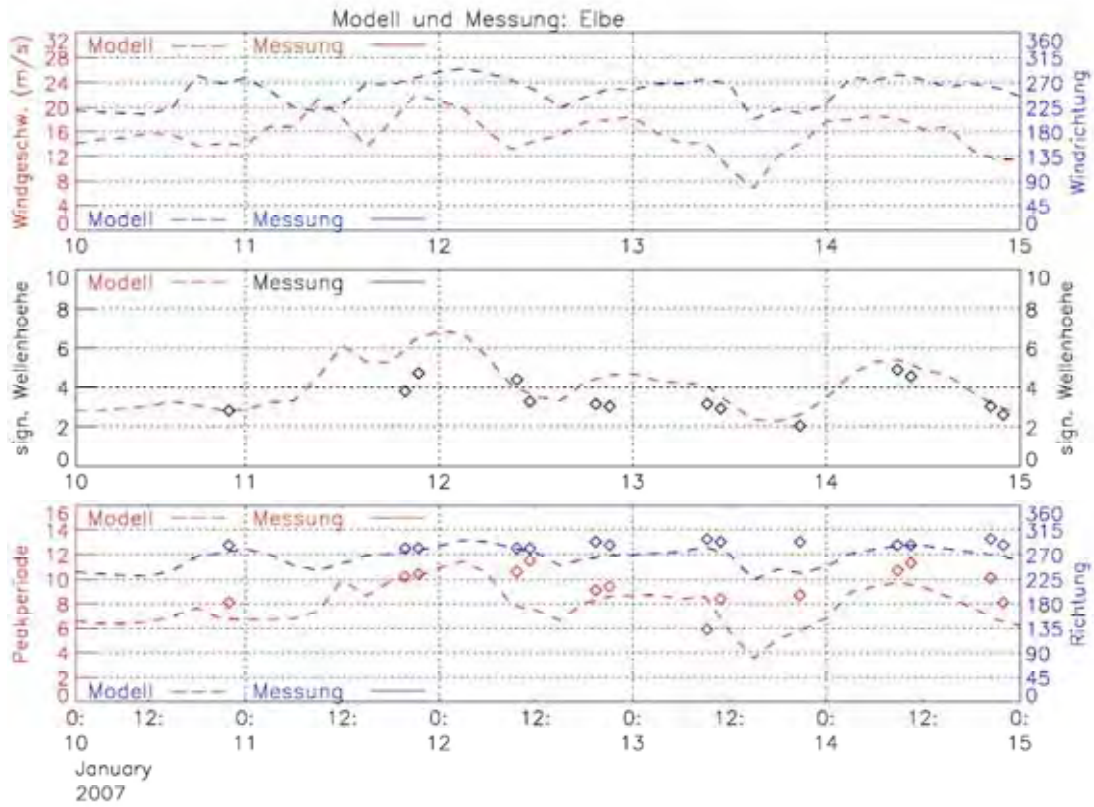


Abbildung 3: Wetterdaten von der Station Elbe

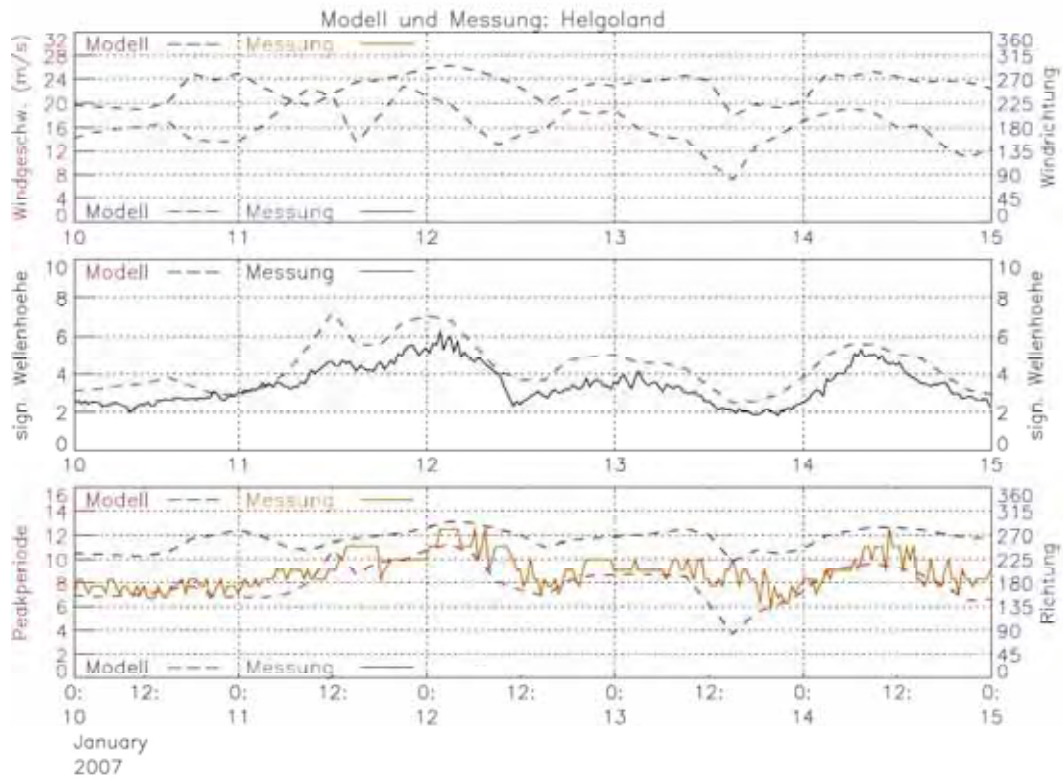


Abbildung 4: Wetterdaten von der Station Helgoland

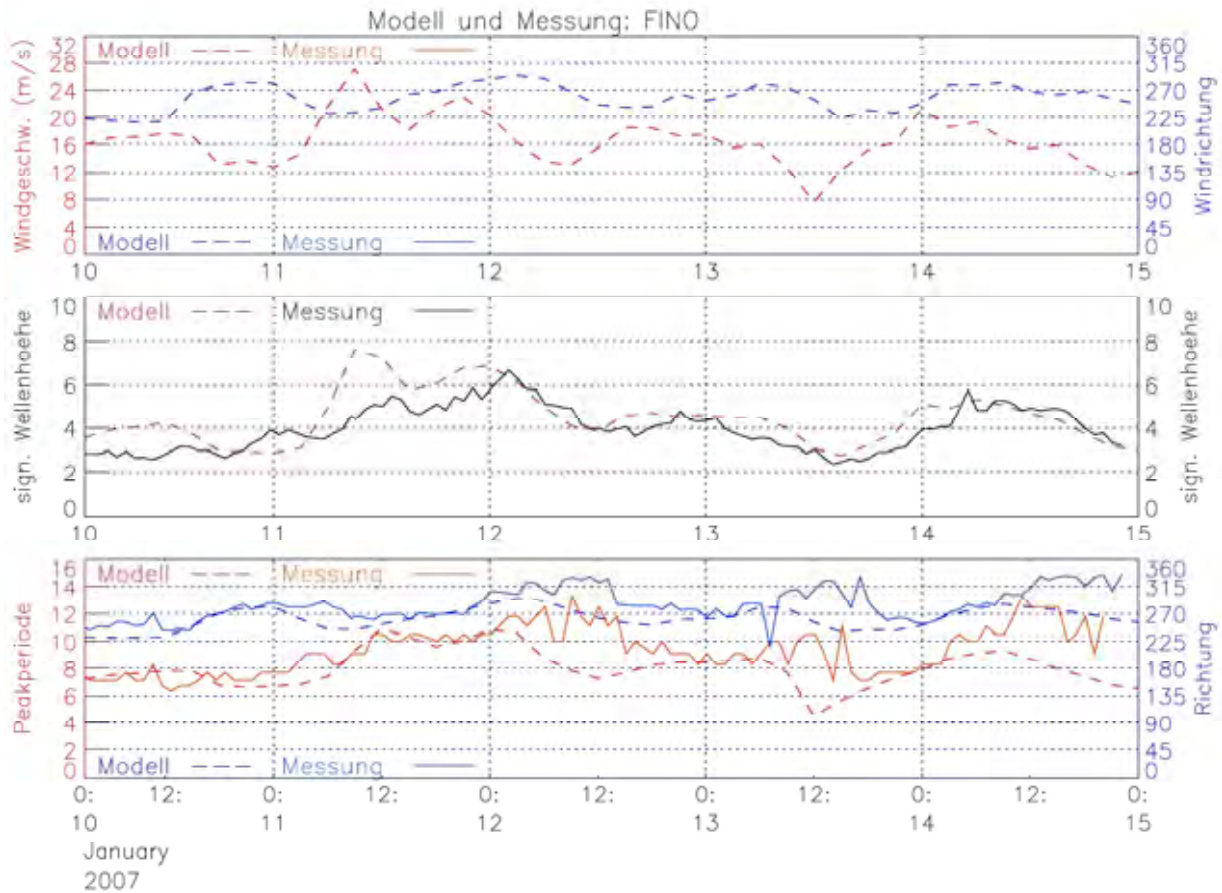


Abbildung 5: Wetterdaten von der Station FINO

Station	Date	Time	HMO	U	WD	HMO	SD	TP	HMO	SD	TP
2 NOGR			m	m/s	deg	m	deg	s	m	deg	s
2007011200	2007011200		6.65	20.78	288	6.62	287	11.05	0.6	304	13.83
2007011203	2007011203		6.69	19.86	295	6.58	298	11.64	1.21	327	15.46

Abbildung 6: Simulationen DWD Local Wave Model

An der Position Nordergründe (Abb. 6) sind die berechneten Wellenhöhen nur wenig niedriger als bei Station Elbe. Es muss jedoch die räumliche Auflösung des Seegangmodells berücksichtigt werden, die 6 nautische Meilen beträgt. Die Auflösung wird aus der Rasterung in den beiden Karten deutlich. Lokale Unterschiede innerhalb der Rasterzellen (z. B. unterschiedliche Wassertiefen) können durch das Modell nicht wiedergegeben werden.

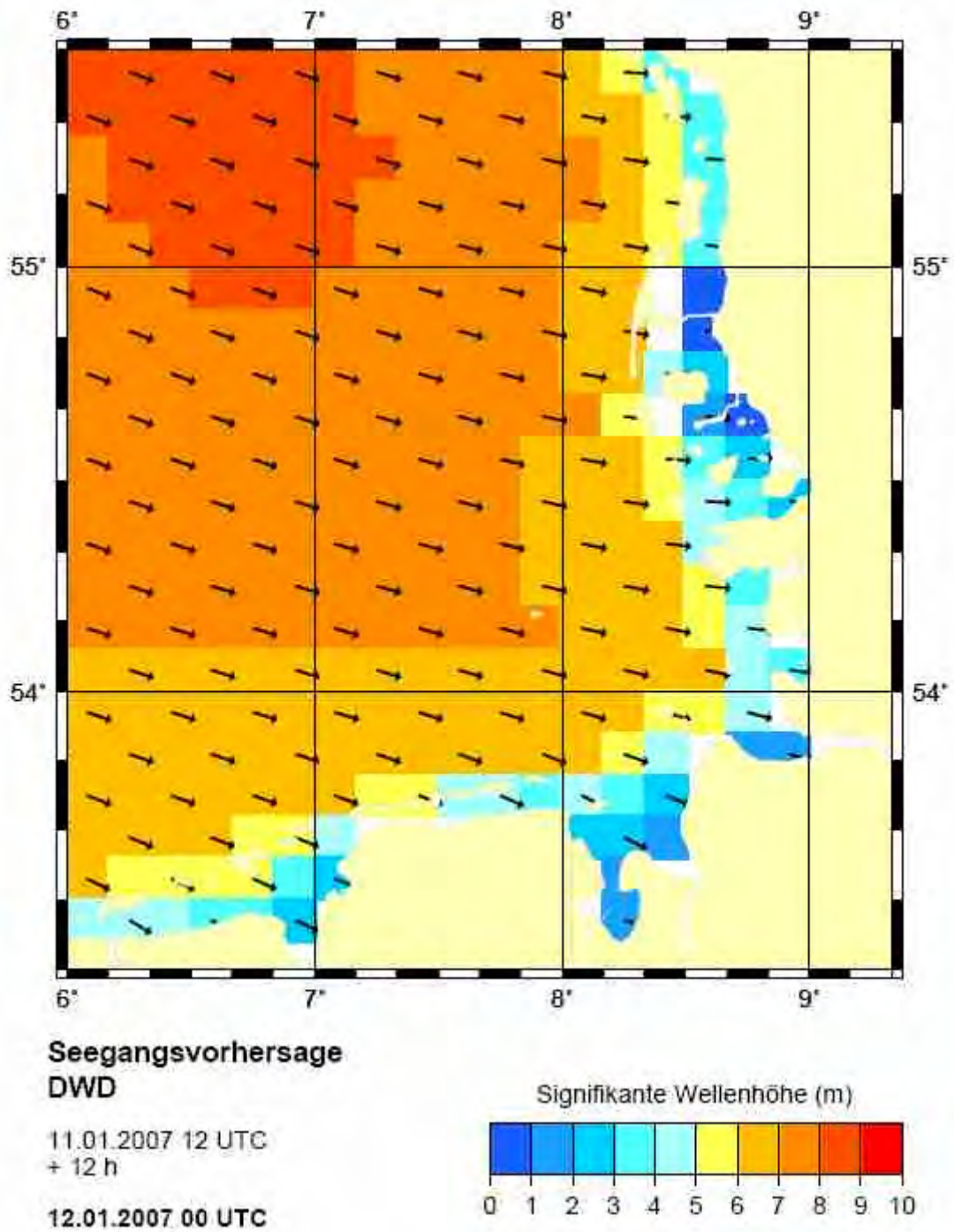


Abbildung 7: Seegangsvorhersage 01:00 Uhr

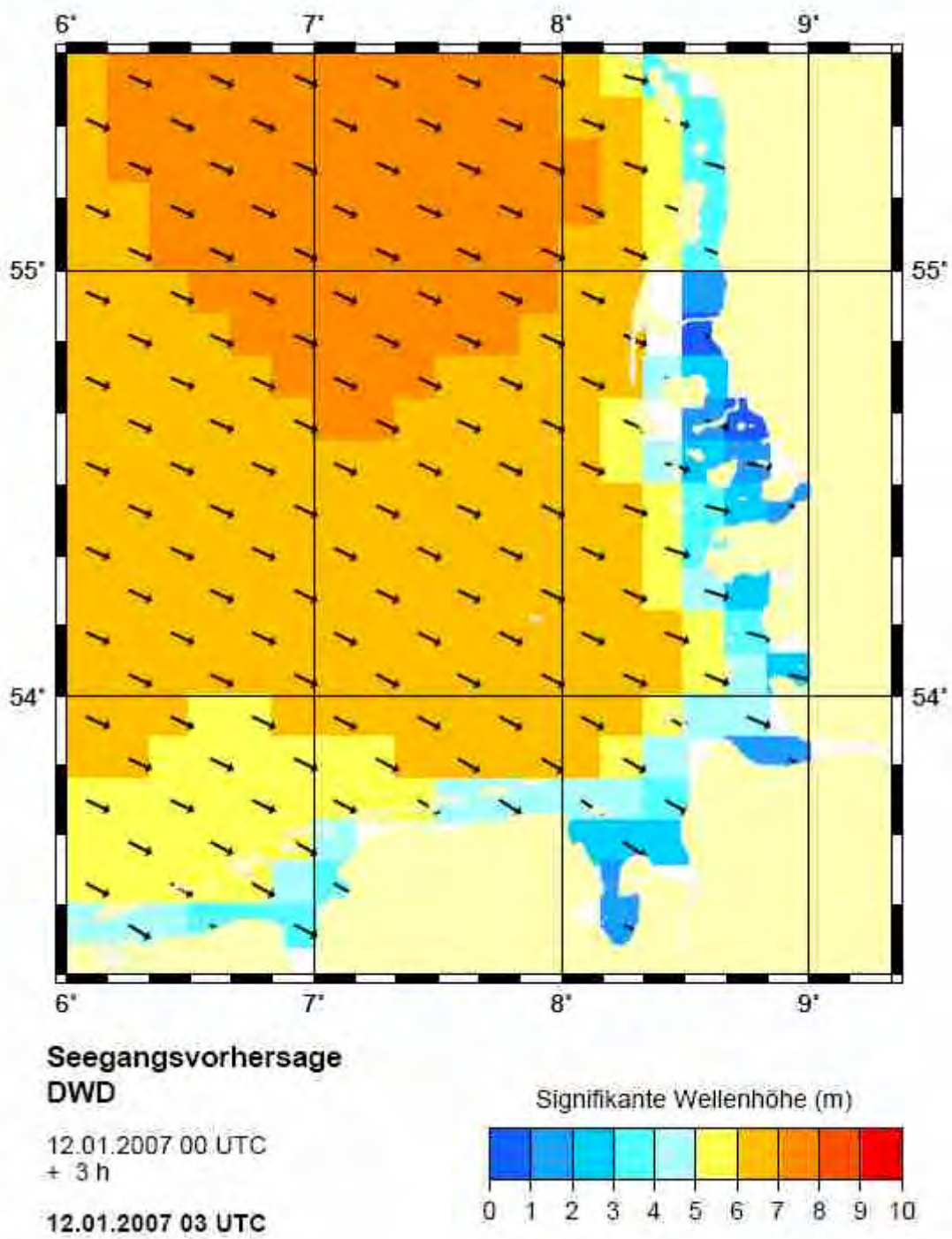


Abbildung 8: Seegangsvorhersage 04:00 Uhr

Unter Berücksichtigung der Unsicherheiten kann für die Wellenhöhe im Bereich Nordergründe ein Wert von etwa 6 m angenommen werden. Alle Wellenhöhen, Messwerte und Modellberechnungen, sind signifikante Wellenhöhen. Die Richtung, aus welcher der Seegang kam, war WNW bis NW. Auch hier gab es Abweichungen zwischen Messung und Vorhersage bei FINO. Die Wellenperioden betragen etwa 11 bis 12 s an allen Stationen, entsprechend Wellenlängen von 150 m auf 20 m Wassertiefe.

Die folgende Abbildung veranschaulicht die Umweltbedingungen.

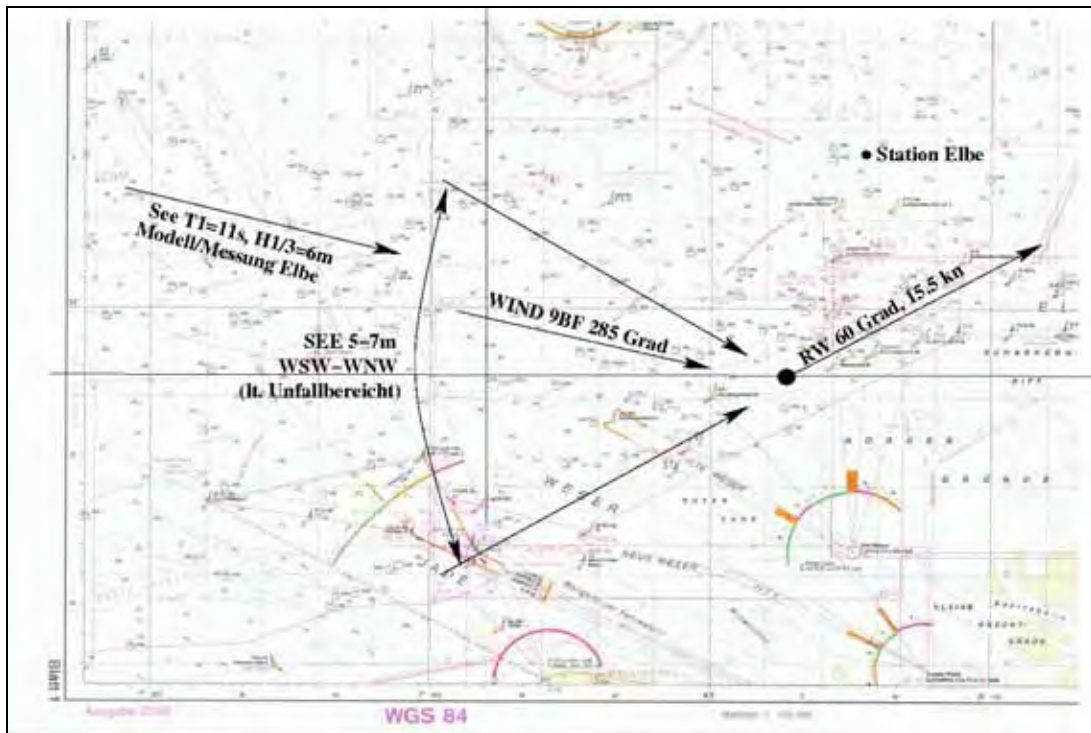


Abbildung 9: Zusammenstellung der Situation von JRS CANIS zum Unfallzeitpunkt.

5.2 Beladungszustand

Während der Untersuchung fiel auf, dass die betroffene Bay 28 nicht homogen beladen war. Die Rows 4213/4214 bis 8213/8214 waren frei geblieben (siehe Abb. 10).

Des Weiteren waren alle Container in Bay 28 relativ schwer beladen, mindestens 9 t. Insbesondere die 3., 4. und 5. Lage waren mit schwer beladenen Containern gestaut. Die im Anhang aufgeführte Abbildung 55 zeigt die zugelassenen stackweights⁵.

⁵ stackweights = max. Gewicht der Containerlage

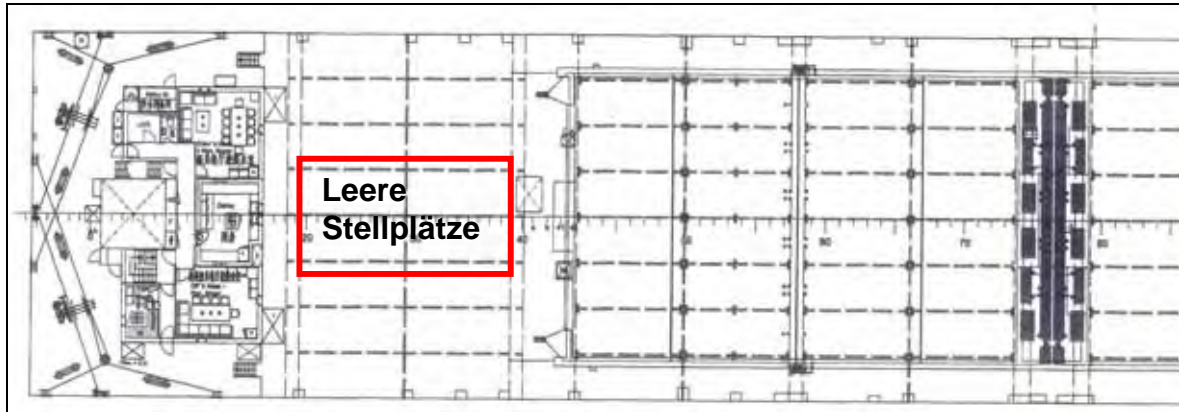


Abbildung 10: Beladungszustand zum Unfallzeitpunkt

5.3 Hydrodynamische Untersuchungen

Die eingangs aufgeführten Fragestellungen

1. Wurde der Ladungsverlust durch seegangsbedingte Resonanzerscheinungen bedingt?
2. Hatte die Besatzung die Möglichkeit, dies vorab zu erkennen? Dabei sollte geklärt werden, ob der eventuelle Einsatz von so genannter Seegangwarnsoftware den Ladungsverlust hätte verhindern können.
3. Welchen Einfluss hatte das verwendete Laschmaterial? (Twistlocks)

wurden durch die Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung an zwei Institute vergeben, um so ein umfassenderes Bild dieser Thematik zu erhalten. Sie beauftragte zum einen das Institut für Entwerfen von Schiffen und Schiffstheorie⁶ sowie zum anderen den Fachbereich Seefahrt Warnemünde der Hochschule Wismar, Fachhochschule für Technik, Wirtschaft und Gestaltung, mit der Erstellung von Gutachten. Beide Gutachter verfügten über die gleichen Ausgangsdaten, wie sie im vorliegenden Bericht aufgeführt sind.

Diese Gutachten werden im Folgenden auszugsweise, teilweise wörtlich, in jedem Falle sinnwährend wiedergegeben.

5.3.1 Gutachten der TU Hamburg-Harburg

Seitens der BSU wurden u.a. Liniendriss und Generalplan des Schiffes vorgelegt, dieser wurde in die an unserem Institut vorhandene Berechnungssoftware **E4** übernommen. Daraus wurde ein Berechnungsmodell für alle schiffstheoretischen Fragestellungen generiert. Die folgende Abbildung zeigt das aus den vorgelegten Unterlagen generierte Rechenmodell von JRS CANIS.

⁶ an der TUHH – Technische Universität Hamburg-Harburg

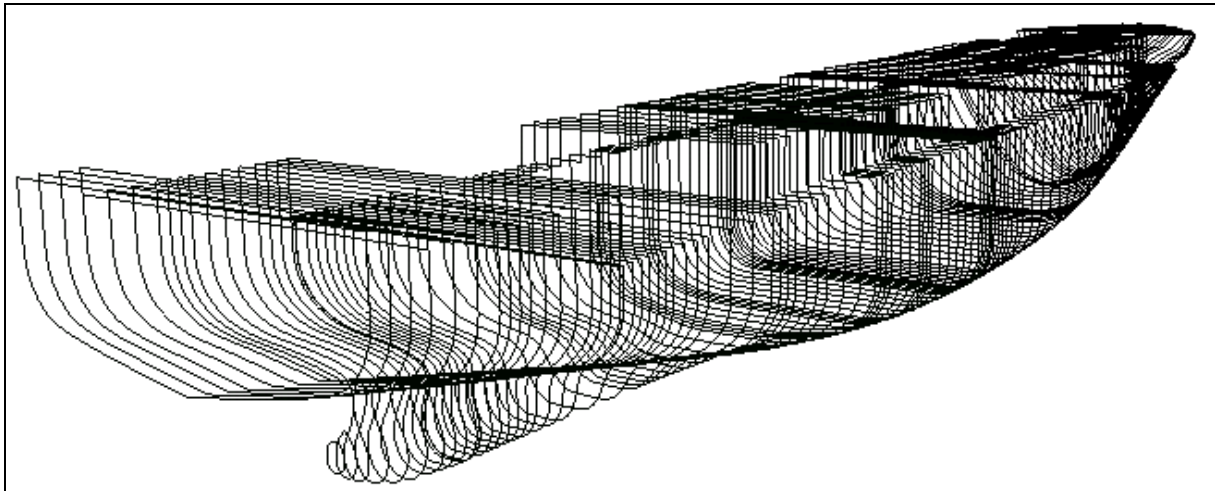


Abbildung 11: Berechnungsmodell für JRS CANIS

Der Beladungszustand des Schiffes wurde durch die BSU in Form des Bordrechnerausdrucks des MACS 3 (SEACOS) vorgelegt. Die entsprechenden Werte für Schiffsgewicht sowie Zuladung wurden ebenfalls in unsere Berechnungssoftware übernommen. Danach ergab sich der Zustand des Schiffes zum Unfallzeitpunkt (nach unseren Berechnungen) wie folgt:

```

-----
                          Loadcase: UNFALLREISE
-----
Light Ship's Weight:                4276.800 t
long. centre of gravity of light ship:  50.720 m fr. AP
transv. centre of gravity of light ship: -0.170 m fr. CL
vertic. centre of gravity of light ship:  8.710 m fr. BL
-----
Deadweight:                          7653.700 t
long. centre of gravity of loadcase:    62.379 m fr. AP
transv. centre of gravity of loadcase:   0.056 m fr. CL
vertic. centre of gravity of loadcase:   8.285 m fr. BL
-----
Total Weight:                          11930.500 t
result. long. centre of gravity:        58.200 m fr. AP
result. transv. centre of gravity:      -0.025 m fr. CL
result. vertic. centre of gravity:      8.437 m fr. BL
-----
    
```

Components of Deadweight:

Payload Piecewise Items:

Item Designation	Mass t	XCG m f. AP	YCG m f. CL	ZCG m a. BL
Total Container	5642.0	57.520	0.010	9.890
Total Payload Pces	5642.0	57.520	0.010	9.890

Az.: 45/07

Bunker and Store Items:

Item Designation	Mass t	XCG m f. AP	YCG m f. CL	ZCG m a. BL
Total Diesel Oil	32.3	30.420	-2.840	7.290
Total Fresh Water	93.2	31.200	0.480	6.020
Total HFO	316.5	41.000	0.920	2.500
Total Lube Oil	37.2	23.280	-4.910	4.990
Total Miscellaneous Constanta	40.8 100.0	10.620 35.000	-1.300 0.000	2.220 10.000
Total Stores	620.0	34.946	0.014	4.619

Ballast Items:

Tank Designation	Fill %	Rho t/m3	Mass t	XCG m f. AP	YCG m f. CL	ZCG m a. BL	FrS MOM mt
Total Ballast	0.00	0.563	1391.7	94.300	0.260	3.410	595.
Total Ballast			1391.7	94.300	0.260	3.410	595.

Equilibrium Floating Condition of Case:

UNFALLREISE

Shell Plating Factor: 1.006 | Density of Sea Water: 1.000 t/m3

For the determination of the floating condition, the VCG is corrected for all partly filled tanks according to the initial free surface moment as stated in the loadcase item tables below.

Equilibrium Floating Condition :

Ships Weight	: 11930.501 t
Longit. Centre of Gravity	: 58.200 m.b.AP
Transv. Centre of Gravity	: -0.025 m.f.CL
Vertic. Centre of Gravity (Solid)	: 8.437 m.a.BL
Free Surface Correction of V.C.G.	: 0.075 m
Vertic. Centre of Gravity (Corrected)	: 8.512 m.a.BL
Draft at A.P (moulded)	: 7.499 m
Draft at LBP/2 (moulded)	: 7.289 m
Draft at F.P (moulded)	: 7.080 m
Trim (pos. fwd)	: -0.419 m
Heel (pos. stbd)	: 1.081 Deg.
Volume (incl. Shell Plating)	: 11930.501 m3
Longit. Centre of Buoyancy	: 58.184 m.b.AP
Transv. Centre of Buoyancy	: -0.108 m.f.CL
Vertic. Centre of Buoyancy	: 4.113 m.a.BL
Area of Waterline	: 2184.080 m2
Longit. Centre of Waterline	: 53.931 m.b.AP
Transv. Centre of Waterline	: -0.188 m.f.CL
Metacentric Height	: 1.336 m

Unsere Berechnungen ergeben gegenüber den Werten des Bordrechners folgende Tiefgänge:

	TUHH	MACS 3
T Hinten	7,499 m	7,49 m
T Mitte	7,289 m	7,29 m
T Vorne	7,080 m	7,08 m
GM	1,336 m	1,32 m

Die Abweichungen sind praktisch vernachlässigbar, so dass davon ausgegangen werden muss, dass Schiffsform und Beladungszustand ausreichend richtig durch unser Modell erfasst worden sind. Zusätzliche freie Oberflächen, die gegenüber dem Bordrechnerausdruck durch Verbrauch von Brennstoff oder dergleichen vom Zustand der Ausreise bis zum Unfallzustand entstanden sein können, sind auf jeden Fall so gering, dass die auf das Ergebnis keinen messbaren Einfluss haben. Daher werden sie im folgenden vernachlässigt.

Ferner ist festzustellen, dass der mittlere Tiefgang geringer ist als der Tiefgang auf Sommerfreibord, d.h. das Schiff war definitiv nicht überladen. Gleichfalls ist das GM mit 1,32 m deutlich oberhalb des Mindest-GM-Wertes von 0,80 m, d.h. die Stabilität des Schiffes war auf jeden Fall nach den geltenden Vorschriften ausreichend.

Die Aufrichthebel des Schiffes sind in der folgenden Abbildung wiedergegeben, und zwar für glattes Wasser (links) als auch für eine angenommene Welle von 170 m Länge (etwa 11 s) und 7 m Höhe, rechts.

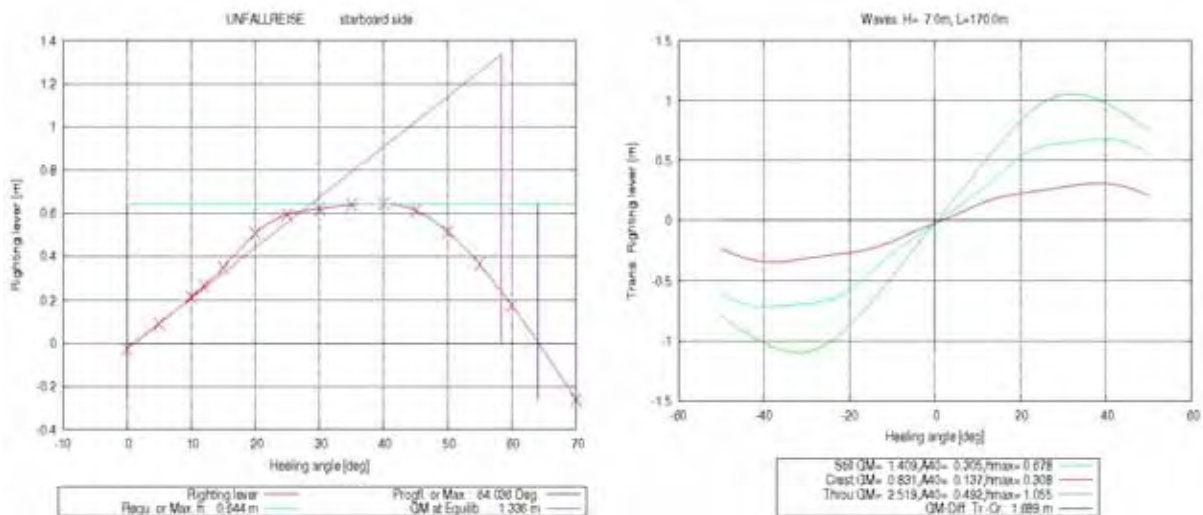


Abbildung 12: Kurven der aufrichtenden Hebel für Glattwasser sowie für Wellenberg und Wellental für JRS CANIS.

Die Glattwasserhebel zeigen eine sehr gute Stabilität an, der Maximalhebel liegt bei etwa 0,64 m, der Stabilitätsumfang beträgt mehr als 60°. Für die angenommene Welle von 170 m Länge und 7 m Höhe ergeben sich noch deutlich positive Hebelarme bei einem sehr großen Umfang. Nach vorangegangenen Untersuchungen unseres Institutes kann ein Schiff als ausreichend sicher gegen Stabilitätsverlust im Seegang betrachtet werden, wenn die Fläche unter der

Glattwasserhebelarmkurve bis 40° ca. 70 % der Differenzfläche zwischen Wellenberg und Wellental ausmacht. Dies ist für den vorliegenden Fall erfüllt.

Daher kann man unserer Einschätzung nach davon ausgehen, dass die vorhandene Stabilität nicht nur die geltenden Richtlinien erfüllt, sondern auch ausreichend ist gegen Stabilitätsversagen in schwerem Wetter. Wegen der sehr guten Stabilität des Schiffes ergibt sich auch aus Stabilitätssicht keine unmittelbare Gefährdung des Schiffes im achterlichen Seegang, zumindest solange nicht, wie nicht unmittelbar kritische Resonanzen getroffen werden. Der Besatzung musste jedenfalls die Stabilität auch vor der See als ausreichend vorkommen.

5.3.1.1 Einige Grundlagen zu großen Rollwinkeln in schwerem Wetter

Schiffe sind in schwerem Seegang im wesentlichen gefährdet, wenn die See von vorne oder achtern kommt. Dies liegt an den sich periodisch im Seegang ändernden Hebelarmen. Weil das Schiff dabei nicht direkt zu Rollschwingungen angeregt wird (wie z. B. in Quersee), sondern indirekt über die sich periodisch ändernden Hebelarme, nennt man diese Art der Rollschwingungen parametrische Erregung **oder parametrisches Rollen**. Grundsätzlich ist das Schiff in diesen Zuständen durch zwei Phänomene gefährdet, welche meist in Kombination auftreten: Grundsätzlich ist bei praktischen Schiffsformen die Stabilität auf dem Wellenberg immer geringer als im glatten Wasser, und im Wellental ist sie immer größer als im glatten Wasser. Dabei hängt die Änderung der Stabilität nur von der Schiffsform ab, nicht aber von der Stabilität selbst. Das Verhalten des Schiffes im Seegang wird nun ganz wesentlich vom Verhältnis der aktuell vorhandenen Stabilität zu deren Schwankungen im Seegang bestimmt.

Wenn bei insgesamt geringer Stabilität des Schiffes oder bei großen Schwankungen die Wellenbergstabilität zu gering oder sogar negativ ist, kommt es genau dann zu großen Rollwinkeln, wenn das Schiff ausreichend lange auf dem Wellenberg verharren kann. Dieses Phänomen nennt man **Stabilitätsverlust auf dem Wellenberg** (pure loss of stability). Weil es zum Auftreten dieses Stabilitätsverlustes nötig ist, dass das Schiff ausreichend lange auf dem Wellenberg verharrt, kommt es zum reinen Stabilitätsverlust fast immer bei achterlichem Seegang, weil nur dann die Relativgeschwindigkeiten zwischen Schiff und Wellenberg ausreichend klein sind. Der so genannte Stabilitätsverlust tritt aber selten in reiner Form auf, sondern wird meist von anderen Effekten überlagert. Wenn z. B. durch den Stabilitätsverlust im achterlichen Seegang erhebliche Krängungen entstehen, dann kann das Schiff im Extremfall **quer zur See schlagen**, ein Phänomen, das früher oft bei Kenterunfällen von kleineren Kümos beobachtet wurde. Besonders gefährlich sind in vorlichem oder achterlichen Seegang die so genannten Resonanzerscheinungen. Dabei fällt die Begegnungsperiode entweder mit der einfachen (1:1) oder der doppelten Rollperiode (2:1) des Schiffes zusammen. Besonders gefährlich ist die so genannte **2:1 Resonanz**, die dadurch zu erkennen ist, dass eine Rollperiode mit zwei Stampfperioden zusammenfällt. Diese Resonanz ist deshalb so gefährlich, weil immer der Wellenberg (etwa) am Hauptspant ist, wenn das Schiff (etwa) aufrecht schwimmt, und dadurch wegen des Stabilitätsverlustes zu einer Seite krängt. Hat das Schiff den maximalen Krängungswinkel erreicht, dann ist der Wellenberg etwa an den ausfallenden Schiffsenden, und das Schiff wird heftig aufgerichtet. Durch dieses Wechselspiel können im **unregelmäßigen Seegang** in kurzer Zeit extrem heftige

Rollbewegungen aufgebaut werden, wobei als wesentliche Einflussgröße die seegangsbedingten Hebelarmschwankungen zwischen Wellenberg- und Wellentalfall wirken. Diese Hebelarmschwankungen müssen generell kritische Werte annehmen, was für allgemein verwendete Schiffsformen immer dann der Fall ist, wenn die Wellenlänge etwa das 0,7 - 1,3-fache der Schiffslänge beträgt, wobei die kürzeren Wellen, also etwa $0,7L$, meist die gefährlichsten sind. Damit nun die Begegnungsperiode des Seeganges etwa mit der doppelten Rollperiode zusammenfällt, müssen bei gegebenem Seegang (der signifikanten Wellenlänge $0,7-1,3L$) bestimmte Verhältnisse zwischen der anfangsmetazentrischen Höhe des Schiffes (wobei vorausgesetzt wird, dass der Aufrichthebel für kleine Neigungen ausreichend genau durch die Gerade des Anfangsmetazentrums ausgedrückt werden kann, was bei dem vorliegenden Fall etwa bis 15° der Fall ist, vgl. dazu Abb. 12 links), des Begegnungswinkels und der Schiffsgeschwindigkeit vorhanden sein. Dazu sind grundsätzlich zwei Fälle zu unterscheiden:

Wenn das Schiff **im achterlichen Seegang** fährt, dann ist eine 2:1 Resonanz generell nur bei relativ kleinen bis mäßigen Schiffsgeschwindigkeiten möglich, und auch nur dann, wenn die anfangsmetazentrische Höhe sehr klein ist. Dies äußert sich dann praktisch in sehr großen Rollwinkeln, die bis zum Kentern führen können, aber wegen der geringen Stabilität kommt es dabei dann nicht zu sehr großen Beschleunigungen. Weiterhin sehr wesentlich für das Verständnis der Vorgänge im achterlichen Seegang ist die Tatsache, dass die Rolleigenperiode des Schiffes selbst starken Schwankungen unterworfen sein kann, weil ja im Seegang nicht die anfangsmetazentrische Höhe des Glattwasserzustandes relevant ist, sondern die jeweiligen Berg- und Tal-Zustände. Das bedeutet, dass sich die Rolleigenperiode des Schiffes an die jeweilige Erregung anpasst, und zwar um so mehr, wie sich die Stabilität im Seegang zwischen Berg und Tal ändert. Für die Praxis ergibt sich daraus, dass man im unregelmäßigen achterlichen Seegang keine scharfe Resonanz hat (wie bei regelmäßigem Seegang), sondern man findet immer eine gewisse Bandbreite von Kursen oder Geschwindigkeiten, bei denen es zu großen Rollwinkeln kommen kann. Hat das Schiff gleichzeitig sehr große Stabilitätsschwankungen zwischen Berg und Tal, die nur von der Schiffsform, nicht aber von der absoluten Stabilität selbst abhängen, bei gleichzeitig sehr geringer Stabilität, dann kann es im achterlichen Seegang für sehr viele Situationen zu großen Rollwinkeln kommen, weil sich das ungefähre Treffen der doppelten Rolleigenperiode mit dem Stabilitätsverlust auf dem Wellenberg überlagert. **Dass heißt für die Schiffsführung, dass man bei Fahrt im achterlichen Seegang mit geringer Stabilität nicht zu langsam fahren darf**, weil man sonst Gefahr läuft, in die 2:1 Resonanz hereinzufahren und dabei das Schiff erheblich gefährdet (dabei wird vorausgesetzt, dass das Schiff nicht querschlägt).

Wenn das Schiff **gegen die See** fährt, dann tritt der 2:1 Fall nur bei relativ hoher Anfangsstabilität auf, ebenfalls bei relativ geringen Geschwindigkeiten. Wegen der hohen Anfangsstabilität kommt es dabei meist nicht zu sehr großen Rollwinkeln (groß meint hier immer Rollwinkel, welche zum Kentern führen können), dafür aber oft zu extrem großen Beschleunigungen. In der Tat wurden die meisten Fälle von Ladungsverlusten in Zuständen beobachtet, wenn die Schiffe mit sehr großem GM langsam gegen die See fuhren, was international zu der Auffassung geführt hat, dass so genannte parametrische Rollen trete nur in See von vorne auf. Anders als im

achterlichen Seegang ist die Verweildauer des Schiffes bei Fahrt gegen die See auf dem Berg relativ kurz, und wenn die absolute Stabilität ausreichend ist, passt sich das Schiff nicht so gut an die Erregung an wie im achterlichen Seegang. Das hat praktisch zur Folge, dass man die 2:1 Resonanz bei vorlichem Seegang schon recht genau treffen muss, um wirklich große Rollwinkel zu erzeugen.

In diesem Zusammenhang ist eine wichtige Situation im vorlichen Seegang, bei der es auch zu großen Rollwinkeln kommen kann, erwähnenswert, obwohl sie nicht primär als parametrisches Rollen bezeichnet werden sollte: Wenn das Schiff heftig gegen die See läuft und von einer großen Welle gegen extrem ausfallende Vorschiffsspanten getroffen wird, dann verliert es erheblich an Fahrt und steht im Extremfall. Dadurch kann die nächste(n) Welle(n), die das Schiff trifft, erhebliche Rollwinkel hervorrufen, weil wegen der geringen Fahrtgeschwindigkeit kaum noch Roldämpfung vorhanden ist. Dies ist aber ein anderes Phänomen.

Der so genannte **1:1-Resonanzfall**, bei dem eine Rollperiode mit einer Stampfperiode zusammenfällt, kommt bei üblichen Schiffen nur im achterlichen Seegang vor, und zwar bei relativ hohen Geschwindigkeiten und ebenfalls bei geringer Stabilität. Weil wegen der relativ hohen Geschwindigkeiten oftmals die Roldämpfung sehr hoch ist, kommt es bei der 1:1-Resonanz meist nicht zu so gefährlichen Rollwinkeln wie bei der 2:1-Resonanz. Diese generellen Effekte werden an folgenden Polardiagrammen veranschaulicht:

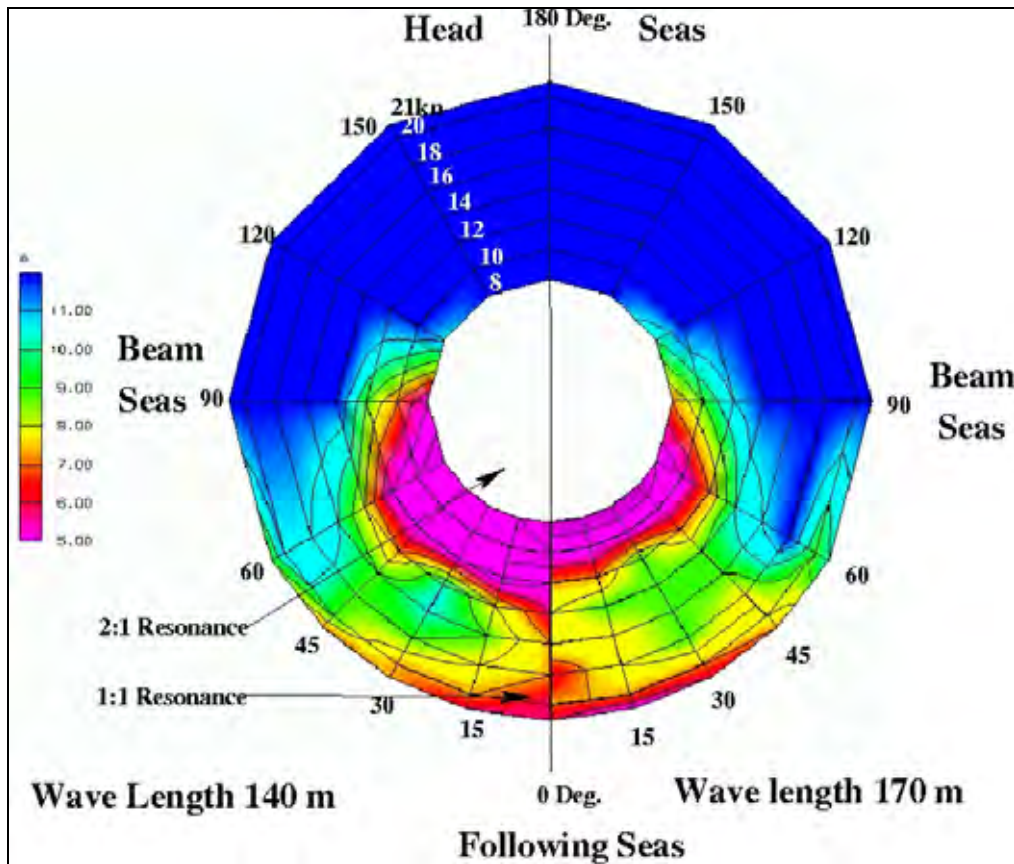


Abbildung 13: Veranschaulichung der wesentlichen Seegangseffekte

für starkes Rollen im natürlichen Seegang für ein 5000 TEU Containerschiff bei zwei verschiedenen signifikanten Wellenlängen. Die Färbung gibt an, bei welchen (signifikanten) Wellenhöhen ein bestimmter Rollwinkel überschritten wird.

In Abb. 13 erkennt man ein Polardiagramm für ein typisches 5000 TEU-Containerschiff, das mit etwa 1,0 m GM fährt. Der Schiffsbug zeigt immer nach oben, und in Umfangsrichtung ist der Begegnungswinkel zwischen Schiff und Seegang abgetragen. Auf der radialen Achse ist die Schiffsgeschwindigkeit aufgetragen. Jedes Diagramm ist nach der signifikanten Wellenhöhe eingefärbt, die zum Überschreiten eines bestimmten Rollwinkels führt. Ganz links wird das Verhalten des Schiffes in einem Seegang mit 140 m signifikanter Wellenlänge wiedergegeben, im rechten Teil für eine signifikante Wellenlänge von 170 m. (Weil die Diagramme aus einer Simulation stammen, können die Wellen auch höher sein, als sie für die gegebene Länge tatsächlich maximal sein würden.) Man erkennt zunächst einen rosafarbenen Streifen sehr geringer Wellenhöhen, die zum Überschreiten des Rollwinkels führen, und zwar für Begegnungswinkel zwischen etwa 0-45° (0 Grad bedeutet See direkt von achtern, 180 Grad genau gegen an). Dieses Gebiet lässt sich unmittelbar der 2:1-Resonanz zuordnen, die etwa zwischen 4 und 6 kn je nach Begegnungswinkel liegen würde. Man sieht hier sehr schön, wie sich das Schiff der Erregung anpasst, weil eine ganze Bandbreite von Kursen und Geschwindigkeiten zu großen Rollwinkeln führt. Etwas schwächer kommt die 1:1-Resonanz im achterlichen Seegang durch, die für das GM von 1,0 m etwa bei 20-21 kn liegt. Weil dann die Rolldämpfung schon erheblich ist, braucht man erheblich höhere Wellen, um einen der 2:1-Situation entsprechenden Rollwinkel zu produzieren. Im rechten Teil des

Bildes findet sich das gleiche Schiff, jetzt allerdings in längeren Wellen mit 170 m signifikanter Länge. Man erkennt deutlich, dass die kritischen Resonanzen insgesamt zu geringeren Geschwindigkeiten hin verschoben sind, ansonsten ist das Bild aber recht ähnlich dem vorigen. Noch längere Wellen würden die kritischen Resonanzen insgesamt weiter zu geringeren Geschwindigkeiten hin verschieben.

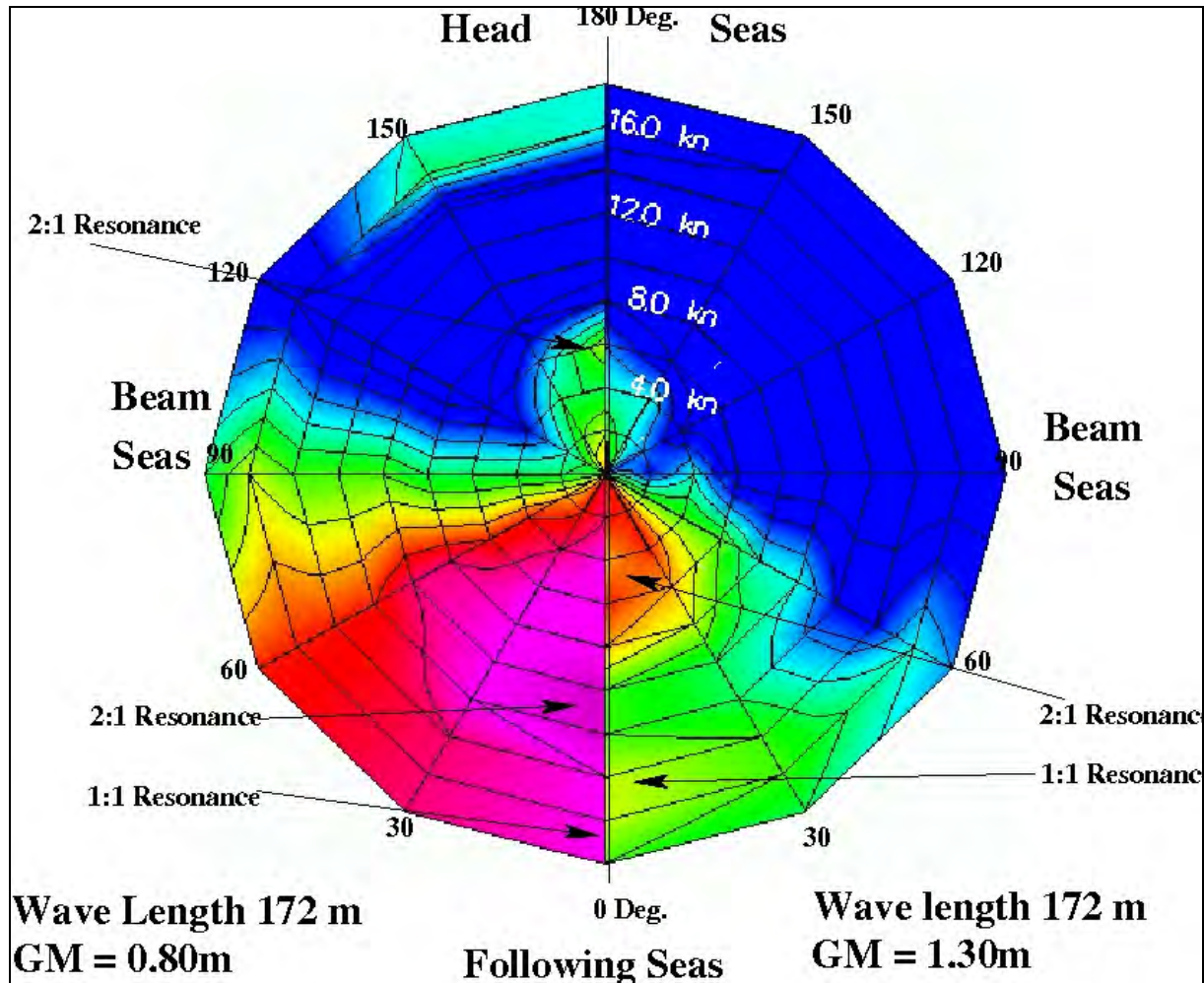


Abbildung 14: Seegangseffekte für starkes Rollen

Veranschaulichung der wesentlichen Seegangseffekte für starkes Rollen im natürlichen Seegang für ein RoRo-Schiff bei zwei verschiedenen Stabilitätszuständen. Die Färbung gibt an, bei welchen (signifikanten) Wellenhöhen ein bestimmter Rollwinkel überschritten wird.

In Abb. 14 ist ein Polardiagramm für ein RoRo-Schiff angegeben, welches insgesamt unter zu geringer Stabilität bei gleichzeitigen extremen Hebelarmschwankungen leidet. Daher dominiert bei dem GM-Wert von 0,80 m das Problem Stabilitätsverlust auf dem Wellenberg, aus fast allen Kursen im achterlichen Seegang kommt es zu großen Rollwinkeln. Wiederum ist die 2:1-Resonanz recht gut zu erkennen, die 1:1-Resonanz im achterlichen Seegang kommt auch noch durch. Wegen des recht großen Anfangs-GMs bei gleichzeitig großen Schwankungen wird jetzt auch die 2:1-Resonanz gegen die See erkennbar, die etwa bei 6 kn gegen an liegt. Weil bei geringeren Geschwindigkeiten das Schiff länger auf dem Berg ist und die Rolldämpfung gleichzeitig abnimmt, kommt es auch bei kleineren Geschwindigkeiten

als 6 kn bei See von vorne noch zu großen Rollwinkeln. Komplet anders wird das Bild, wenn die Stabilität erhöht wird (ganz rechts). Nun verschoben sich die kritischen Resonanzen wiederum zu geringeren Geschwindigkeiten, aber gleichzeitig verliert der Effekt des Stabilitätsverlustes auf dem Wellenberg an Bedeutung, eben weil das Schiff wegen der generell höheren Stabilität jetzt auf dem Berg durchweg positive Hebelarme hat. Die 2:1-Resonanzen sind noch zu erkennen, und zwar bei geringeren Geschwindigkeiten, aber Ihre Wirkung bezüglich großer Rollwinkel ist deutlich abgeschwächt. Ein qualitativ vergleichbarer Effekt wäre auch aufgetreten, wenn die GM-Erhöhung nicht durch Reduktion der Höhe des Gewichtsschwerpunktes, sondern z. B. durch einen stark achterlastigen Trimm erzeugt worden wäre. Auf jeden Fall zeigen die Beispiele, dass es neben den eigentlichen Resonanzen (1:1 und 2:1) noch viele weitere Situationen geben kann, in denen das Schiff bezüglich großer Rollwinkel gefährdet sein kann, und das gleichzeitig nicht jede Resonanz automatisch zu einer Gefährdung des Schiffs führen muss. Im Rahmen der in diesem Gutachten zu klärenden Fragestellungen sind daher folgende Zusammenhänge wesentlich:

Generell sind Schiffe bei geringen GM-Werten im achterlichen Seegang gefährdet, und zwar treten vor allem große Rollwinkel auf. Ist die Stabilität gering, kommt es im vorlichen Seegang meist nicht zu kritischen Situationen, es sei denn, die Stabilität ist extrem gering. Bei großer Stabilität ist das Schiff im achterlichen Seegang meist nicht gefährdet, aber es kann zu großen Rollbeschleunigungen bei See von vorne kommen, wobei die auftretenden Rollwinkel wegen der großen Stabilität nicht so groß sind.

Diese Überlegungen gelten im Prinzip für jedes Schiff.

Es kann aber in erheblichem Maße zu einer Gefährdung des Schiffes auch in Situationen kommen, die außerhalb von kritischen Resonanzen liegen. Hierfür können aber keinesfalls allgemeine Empfehlungen angegeben werden, weil das Bewegungsverhalten des Schiffes sehr individuell von der jeweiligen Reaktion des Schiffes im gerade betrachteten Seegang abhängt. Dies wiederum hängt für einen gegebenen Seegang, Kurs und Geschwindigkeit entscheidend von der individuellen Schiffsform, deren Hebelarmschwankungen, sowie von der Massenträgheit des Schiffes und seiner Rolldämpfung ab.

Der Vollständigkeit halber sei hier erwähnt, dass es gelegentlich auch zu großen Rollwinkeln oder Rollbeschleunigungen kommen kann, wenn sich das Schiff quer zur See befindet. Das ist meist dann der Fall, wenn die Geschwindigkeit klein oder gar null ist (sog. **Dead Ship Condition**). Es kommt dann zu großen Rollwinkeln, wenn der Seegang das Schiff quer in der Rolleigenfrequenz des Schiffes trifft. Wegen der geringen Geschwindigkeit ist dann die Rolldämpfung sehr klein. Andererseits wird in diesen Situationen ein erheblicher Teil der in das Schiff eingetragenen Seegangsenergie aber in eine Driftbewegung des Schiffes umgesetzt, so dass im allgemeinen in dieser Situation keine wirkliche Gefährdung des Schiffes bezüglich Kentern vorliegt.

Die Gefährdung in Quersee ist meist nur bei kleinen Schiffen mit recht hohen GM-Werten möglich, vor allem dann, wenn sie hohe Massenträgheitsmomente haben.

5.3.1.2 Kurze Beschreibung des verwendeten Seegangs-Simulationsprogramms E4ROLLS

Der unserer Seegangmethode zugrunde liegende Seegangscode ROLLS wurde am ehemaligen Institut für Schiffbau der Universität Hamburg im Rahmen der Untersuchung des Kenternfalls der E.L.M.A. TRES 1987 von Söding und Kröger entwickelt. Weil ROLLS speziell für die Berechnung großer Rollwinkel in (etwa) vorlichem oder achterlichem Seegang entwickelt wurde, wo es besonders auf das Erfassen der Nichtlinearitäten der Rollbewegung ankommt (würde man, wie z. B. in linearen Streifenmethoden üblich, die Rollbewegung linear erfassen, dann würde man die Hebelarmkurve des Schiffes durch eine Gerade der Gleichung $h=GM*\varphi$ ersetzen, d. h. ein Kentern des Schiffes wäre schon vom Ansatz her ausgeschlossen), besteht das Konzept des Programms darin, die Bewegung des Schiffes zwar in allen sechs Freiheitsgraden zu beschreiben, dabei aber nur die Rollbewegung und die Längsbewegung nichtlinear anzusetzen. Die anderen Bewegungen, also Stampfen, Tauchen, Gier- und Querbewegung werden durch lineare Übertragungsfunktionen berechnet, die Kopplung mit den nichtlinearen Bewegungen wird aber beachtet. Die linearen Übertragungsfunktionen werden dabei mit einem Programm berechnet, das die hydrodynamischen Massen mit Hilfe von Rankine-Quellen nach Yeung berechnet. Dies hat gegenüber der alten Methode der Lewis-Spanten den Vorteil, dass die Schiffsform insgesamt besser berücksichtigt wird, und dass vor allem für große B/T-Verhältnisse, wie sie bei RoRo-Schiffen oder Fähren üblich sind, bessere Ergebnisse geliefert werden. Der Aufrichthebel des Schiffes im Seegang wird dabei mit dem bewährten Konzept der äquivalenten Welle nach Grim berechnet. Dadurch ist das Programm extrem schnell, so dass eine Vielzahl von Situationen dadurch überhaupt erst berechenbar geworden ist. Weil die Quer- und Gierbewegung des Schiffes nur linear erfasst werden, kann ROLLS das Querschlagen des Schiffes nicht beschreiben. Aus dem gleichen Grund wird die Gefährdung des Schiffes quer zur See bei geringen Geschwindigkeiten durch ROLLS überschätzt, weil die durch den Seegang in das Schiff eingetragene Energie nicht ausreichend in eine Driftbewegung umgesetzt wird.

Im Rahmen der vom BMBF⁷ geförderten Verbundvorhaben ROLLS, SinSee⁸ und LaSse⁹ wurde die Methode durch das Konsortium FSG¹⁰/TUHH konsequent zu der in der jetzigen Form vorliegenden Methode E4ROLLS weiterentwickelt und durch umfangreiche Modellversuche in der HSVA¹¹ validiert. Im Rahmen des BMBF-Vorhabens LaSse werden derzeit numerische Untersuchungen von Grossausführungskenternfällen durchgeführt, wobei zusätzlich Effekte von Ladungsverschiebung oder eingedrungenem Wasser modelliert werden. In der HSVA wird der Code seit einiger Zeit erfolgreich für Kenternprobleme von RoRo-Fahrgastschiffen, bei denen in großen Mengen Wasser auf das Autodeck eindringen kann, validiert und angewendet. Weitere Einzelheiten zum verwendeten Seegangscode E4ROLLS können bei Bedarf von der Homepage www.ssi.tu-harburg.de entnommen werden.

⁷ Bundesministerium für Bildung und Forschung

⁸ Simulations- und Versuchsmethodik, mit der das Kenterverhalten in extremem Seegang untersucht werden kann

⁹ Lasten auf Schiffe im Seegang

¹⁰ Flensburger Schiffbau-Gesellschaft mbH & Co KG

¹¹ Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt

5.3.1.3 Einige Ergebnisse der linearen Streifenmethode

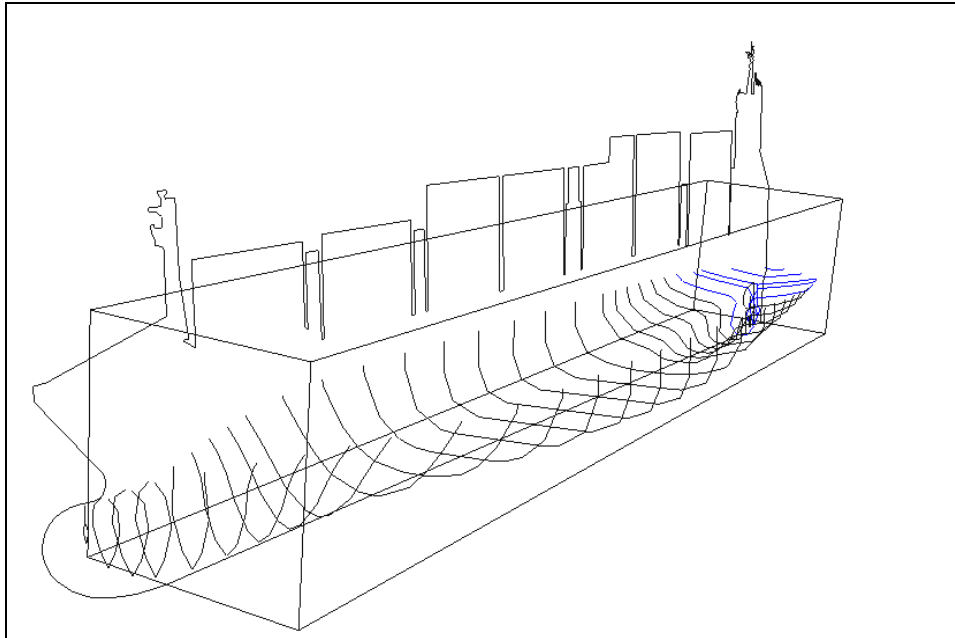


Abbildung 15: Berechnungsmodell zur Ermittlung der linearen Übertragungsfunktionen. Der Quader entspricht einem Äquivalent, das gleiche Massenträgheitsmomente hat.

Auf Grundlage der Rumpfform sowie der vorgelegten Ladungsverteilung des Schiffes wurden die linearen Übertragungsfunktionen berechnet. Für die Berechnung der Massenträgheitsmomente des Light Ship wurde eine für diesen Schiffstyp übliche Massenerstreckung aus unserer Datenbasis verwendet. Der Einfluss der diesbezüglichen Abweichungen auf das Gesamtergebnis ist unseren Erfahrungen nach vernachlässigbar. Danach ergeben sich für JRS CANIS ein Rollträgheitsradius von $0,37 B$ trocken (d. h., ohne den Anteil der hydrodynamischen Massen) und $0,39 B$ einschließlich des Hydromassenanteils. Daraus ergibt sich eine Rollzeit im glatten Wasser von etwa $13,7$ s, welche aufgrund der Hebelarmcharakteristik des Schiffes etwa bis 15° gültig ist. Oberhalb von 15° nimmt die Rollzeit dann etwas ab, weil die Hebelarmkurve oberhalb der Geraden $h=GM*\varphi$ liegt. Diese Betrachtungen sind aber nur für glattes Wasser gültig und können im Seegang anders sein (s.o.). Generell wurden bei der Berechnung der Übertragungsfunktionen keine unüblichen Effekte, wie verstärkte Neigung zum Stampfen oder Tauchen, festgestellt. Von daher ist vorab nicht zu erwarten, dass die nichtlinearen Simulationen im Zeitbereich diesbezüglich besonders ungewöhnliche Ergebnisse liefern werden.

5.3.1.4 Zur Frage der anzusetzenden Umweltbedingungen

Die Frage der tatsächlich anzusetzenden Umweltbedingungen ist für Untersuchungen wie der vorliegenden immer der Punkt mit der größten Unsicherheit. Dies liegt daran, dass selbst bei guter Sicht der Seegang an Bord extrem schwer einzuschätzen ist. Dies gilt sowohl für die signifikante Höhe als in noch größerem Maße für die kennzeichnende Periode. Im vorliegenden Fall kommt dazu, dass der Unfall in noch relativ flachem Wasser mit einer Tiefe von 20-25 m passiert ist, wo die Neigung zum Auftreten von Grundseen gegeben sein kann. Unser Simulationscode erzeugt den unregelmäßigen Seegang mit Hilfe eine JONSWAP-Spektrums, wobei die Energieverteilung mit einer \cos^2 -Verteilung angesetzt wird. Von daher wird sicherlich die Steilheit der Wellen im Fall des Auftretens von Grundseen unterschätzt. Durch die BSU wurden uns aber Messungen von nahe gelegenen Seegangsmessstationen vorgelegt. Für unsere Untersuchungen schienen die Daten der Station ELBE (siehe Abb. 3) am Besten geeignet.

Nach den Messungen ELBE bzw. den durch die BSU vorgelegten Berechnungen ergibt sich zum Unfallzeitpunkt etwa eine Seegangsrichtung von 280-290° (also ein Begegnungswinkel von etwa 45° von achtern) bei einer kennzeichnenden Periode von 10-11 s und einer signifikanten Wellenhöhe von 8 m. Der Wind betrug etwa 18 m/s. Diese Werte decken sich recht gut mit den Angaben der Besatzung, lediglich für die Periode wurde keinerlei Angaben gemacht.

Weil aber auch die Messungen (bzw. die Modellrechnungen) mit gewissen Unsicherheiten behaftet sind, werden alle Berechnungen für mehrere signifikante Perioden durchgeführt.

Eine gewisse Unsicherheit besteht zusätzlich durch den Einfluss des Stromes, er kann zu einer Verfälschung der tatsächlichen Periode führen.

Auch aus diesem Grunde wird für alle Berechnungen eine gewisse Bandbreite an Zufallsseegängen zugrunde gelegt.

5.3.1.5 Ergebnisse der nichtlinearen Seegangsberechnungen: Rollwinkel

Die Besatzung hatte angegeben, dass das Schiff vor dem Ladungsverlust mehrfach etwa 15-20° gerollt hat. Anders als der Zustand des Seegangs werden Winkel, speziell Rollwinkel, von der Besatzung meist recht realistisch eingeschätzt. Daher ist es sinnvoll, zunächst zu überprüfen, in welchen Situationen die genannten Rollwinkel erreicht werden. Dies ist nicht nur wichtig, um eine Einschätzung darüber abgeben zu können, ob das Schiff durch kritische Resonanzen gefährdet gewesen ist (obwohl eine Resonanz, wie oben ausgeführt, nicht immer wirklich etwas über eine tatsächliche Gefährdung des Schiffes aussagt). Vor allem lässt sich damit auch klären, ob alle bekannten Fakten im Rahmen der Simulation auch zusammenpassen. Daher wurden zunächst für verschiedene signifikante Perioden, nämlich 9,5 s, 10,5 s und 11,5 s (entsprechend signifikanter Wellenlängen im tiefen Wasser von 141, 172 und 206 m) Berechnungen durchgeführt. Die Periode von 9,5 s wurde dazu genommen, weil die zugehörige signifikante Wellenlänge (im tiefen Wasser) etwa der Schiffslänge entspricht.

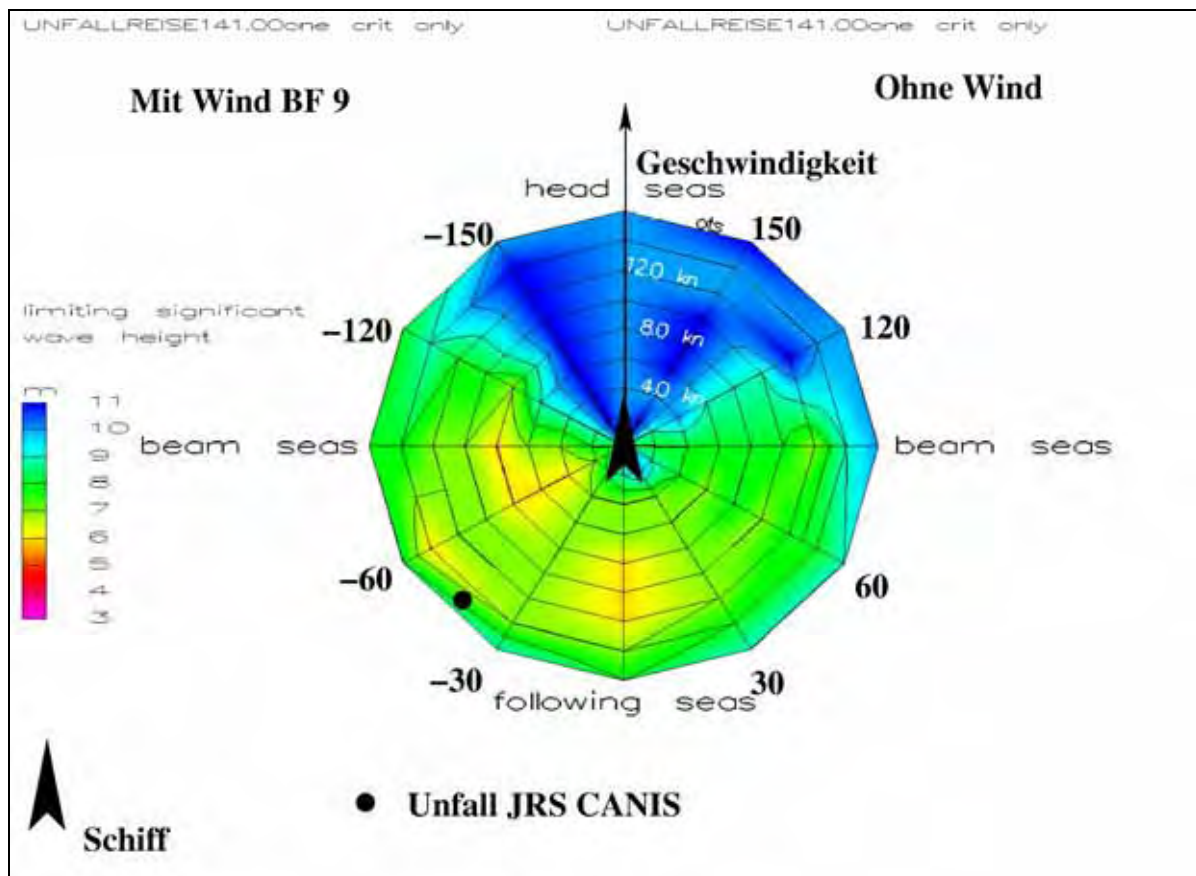


Abbildung 16: Berechnete signifikante Wellenhöhen für das Auftreten eines Rollwinkels von 20°, kennzeichnende Periode 9,5 s

Berechnete signifikante Wellenhöhen für das Auftreten eines Rollwinkels von 20°, 99 % Quantil (d.h., 99 % der berechneten Rollwinkel liegen unter 20°), kennzeichnende Periode 9,5 s. Linke Seite des Polardiagramms: Einschließlich Windeinfluss von 9 Bft, rechte Seite: Ohne Windeinfluss.

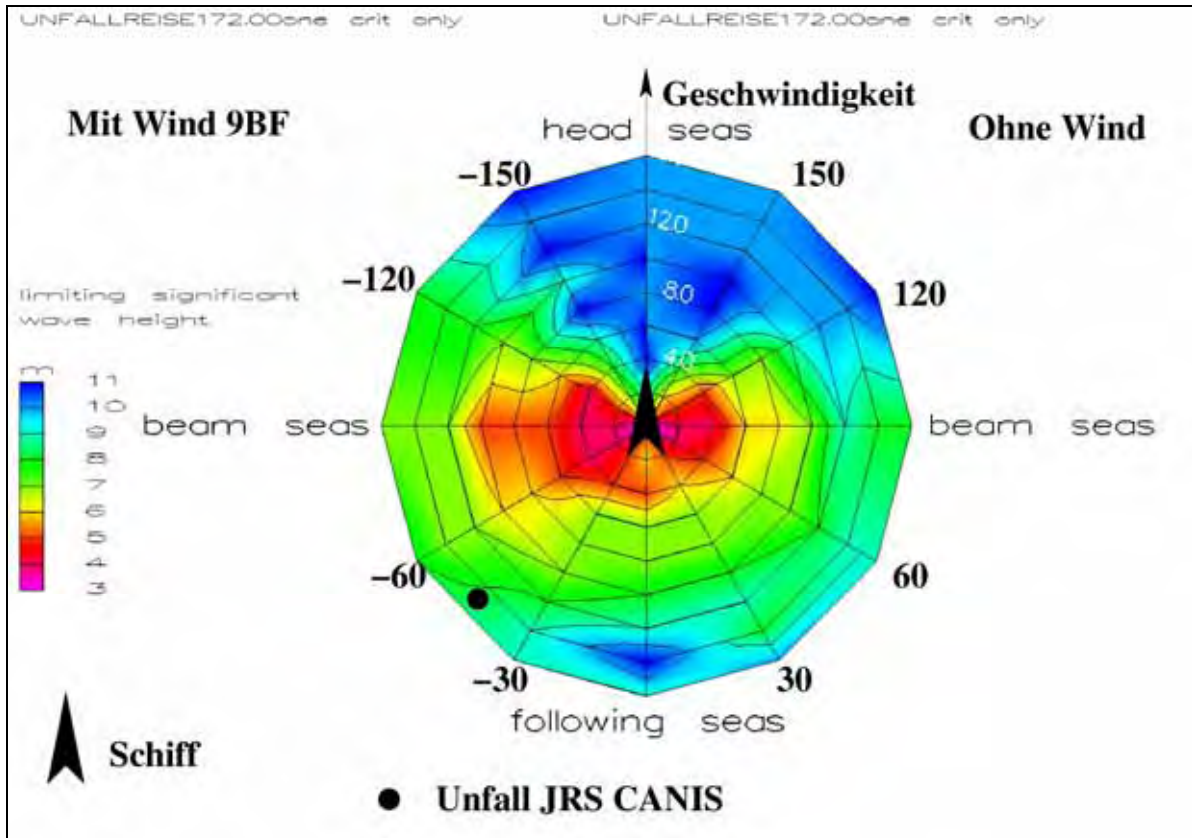


Abbildung 17: Berechnete signifikante Wellenhöhen für das Auftreten eines Rollwinkels von 20°, kennzeichnende Periode 10,5 s

Berechnete signifikante Wellenhöhen für das Auftreten eines Rollwinkels von 20°, 99 % Quantil, kennzeichnende Periode 10,5 s. Links: Einschließlich Windeinfluss von 9 Bft, rechts: Ohne Windeinfluss.

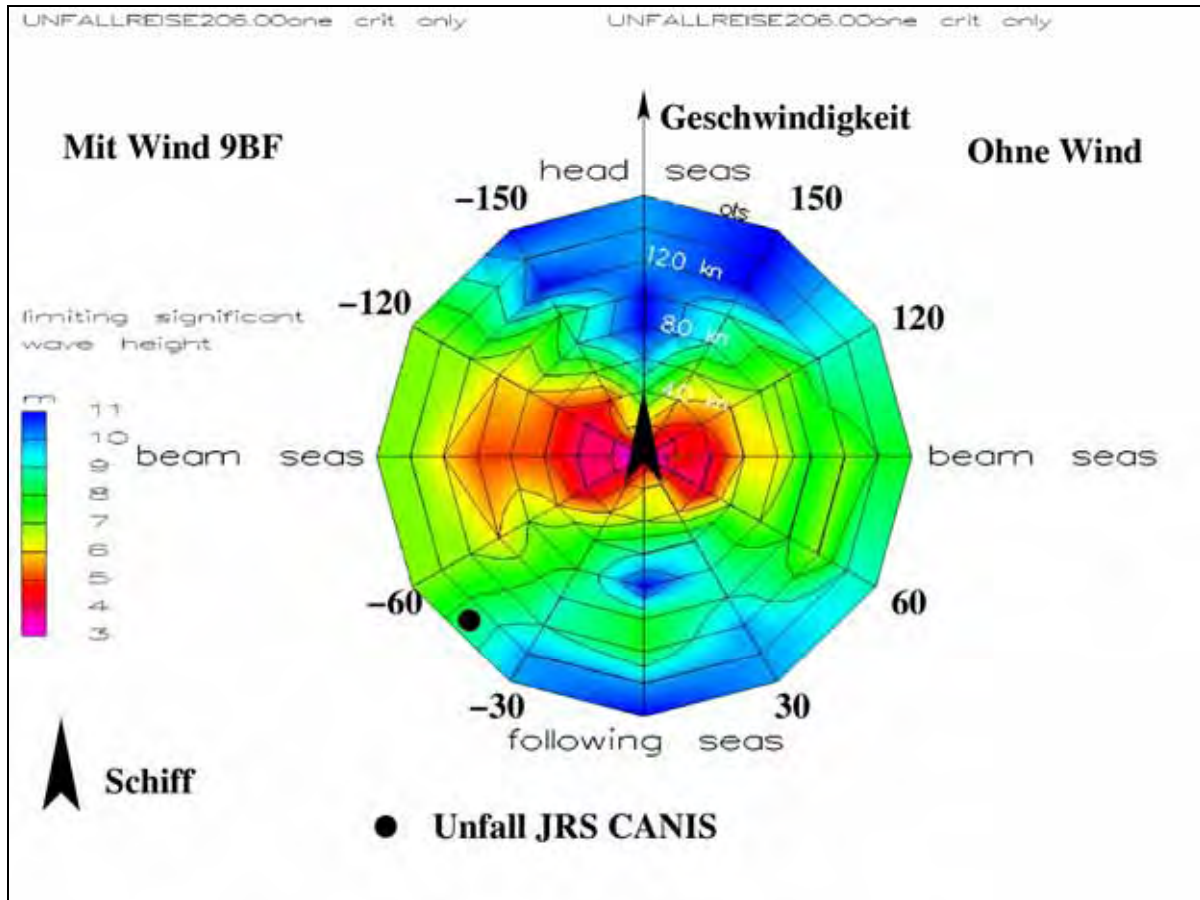


Abbildung 18: Berechnete signifikante Wellenhöhen für das Auftreten eines Rollwinkels von 20°, kennzeichnende Periode 11,5 s

Berechnete signifikante Wellenhöhen für das Auftreten eines Rollwinkels von 20°, 99 % Quantil, kennzeichnende Periode 11,5 s. Links: Einschließlich Windeinfluss von 9 Bft, rechts: Ohne Windeinfluss.

Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen zunächst generell, dass ein Rollwinkel von etwa 15-20°, wie durch die Besatzung beobachtet, unter Zugrundelegung aller drei Situationen mit ziemlicher Wahrscheinlichkeit erreicht wird. Von daher sind die Angaben der Besatzung realistisch. Weil die kennzeichnende Periode vermutlich zwischen 10,5 und 11,5 s lag, mit der Tendenz, dass die Wellen wegen Grundseebildung eher steiler gewesen sein müssten als nach unserer Modellierung, kann das Auftreten des genannten Rollwinkels von mehrfach 15-20° als sehr wahrscheinlich angesehen werden. Wegen der recht großen Stabilität des Schiffes schlägt die 2:1-Resonanz praktisch nicht durch, desgleichen nicht die 1:1-Resonanz. Das entspricht den vorher geäußerten Erwartungen, dass wegen der mehr als ausreichenden Stabilität nicht a priori von einer Gefährdung im achterlichen Seegang auszugehen ist. Die Berechnungen zeigen ferner einen gewissen Windeinfluss, d.h., dass durch den Wind der auftretende Krängungswinkel etwas verstärkt wird. Der Einfluss ist aber nicht so groß, dass er als ursächlich für den Ladungsverlust anzusehen ist. Interessant ist die Tatsache, dass bei den größeren Wellenlängen eine Gefährdung quer zur See bei kleinen Geschwindigkeiten angezeigt wird. Daraufhin wurden die Übertragungsfunktionen der Rollbewegung noch einmal durchgesehen, und es zeigte sich, dass im Geschwindigkeitsbereich zwischen 0 und

8 kn die linearen Übertagungsfunktionen ihre Maxima etwa im Bereich einer Periode von 11-15 s haben (zur Erinnerung: Die Rolleigenperiode des Schiffes betrug zum Unfallzeitpunkt etwa 13,7 s). Wegen der Linearisierung der Querbewegung wird aber die Rollbewegung des Schiffes durch unsere Simulationen überschätzt. Fakt ist in jedem Fall, und da sind sich alle Berechnungen einig, **dass die Situation, bei der es zum Unfall kam, keinesfalls durch eine Resonanzerscheinung ausgelöst worden ist.** Das Schiff rollt unter Ansatz der wahrscheinlichsten signifikanten Periode auf fast allen Kursen und Geschwindigkeiten mit etwa 20°. Wenn überhaupt eine Gefährdung durch Resonanz vorlag, dann nur im Fall quer zur See, und das bei geringen Geschwindigkeiten.

Vor dem eigentlichen Unfall wurde nach Aussage der Besatzung ein Kurs von 330° mit ca. 7 kn gesteuert. Auch in dieser Situation hätte man laut den Berechnungen größere Rollwinkel antreffen können, wobei das Schiff aber heftiger stampft als im achterlichen Seegang. Dazu passt auch die Aussage der Besatzung:

„Das Schiff stampfte und rollte zu diesem Zeitpunkt heftig“.

Über die Größe der Rollwinkel wird dabei keine Aussage gemacht. Daher werden im folgenden Abschnitt die auf die in Frage kommenden Containerstapel wirkenden Beschleunigungen in beiden Situationen ermittelt.

Zusammenfassend lässt sich aus der Analyse von Zuständen, welche zum Auftreten von etwa 20° Rollwinkel führen, Folgendes feststellen: Die von der Besatzung beobachteten Rollwinkel von etwa 15 bis 20° stimmen etwa mit den Rollwinkeln der Simulation überein, die man in natürlichem Seegang der signifikanten Periode um 11 s erwarten würde, erst recht dann, wenn die See zusätzlich zur Bildung von Grundseen neigen würde.

Es kann aufgrund der Berechnungen mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden, dass die beobachteten Rollwinkel eine Folge davon sind, dass sich das Schiff in einer kritischen Resonanz befunden hat. Die Berechnungen zeigen eindeutig, dass vergleichbare Rollwinkel auch in einer Vielzahl anderer Situationen aufgetreten wären. Aufgrund der berechneten Rollwinkel wäre es theoretisch auch möglich gewesen, dass die Container während der Fahrt mit verminderter Geschwindigkeit gegen die See hätten beschädigt werden können.

5.3.1.6 Auf Containerstapel wirkende Beschleunigungen

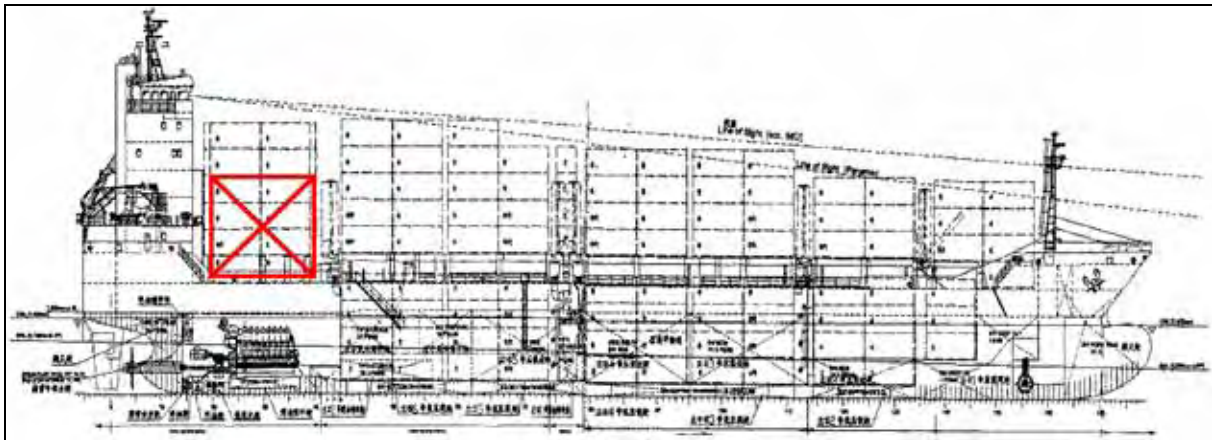


Abbildung 19: Generalplan von JRS CANIS. Die für die Beschleunigungsrechnungen in Frage kommende Bay ist rot markiert.

Für die Zustände, bei denen im vorigen Abschnitt das Auftreten eines Rollwinkels von 20° ermittelt wurde, werden im Folgenden die auftretenden Beschleunigungen ermittelt.

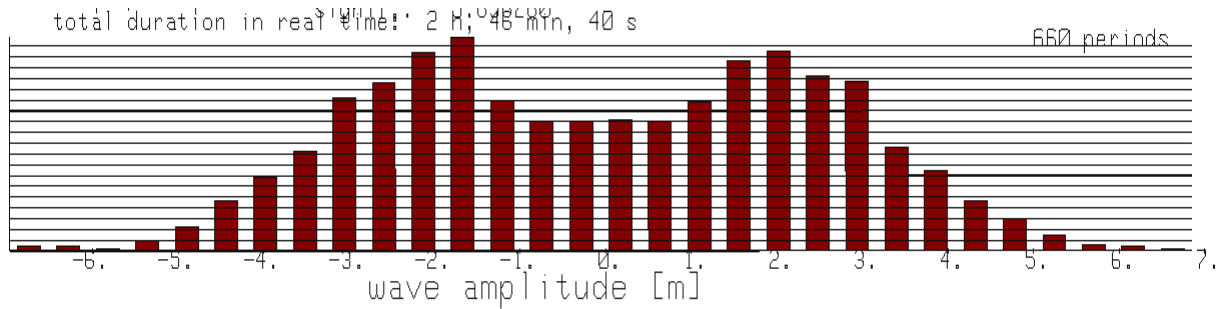
Dabei werden die Beschleunigungen auf den Backbord-Außenstapel ermittelt, weil dieser lt. Aussage zunächst versagt hat und dann mit hoher Fallgeschwindigkeit auf den Steuerbord-Stapel aufgeschlagen ist.

Die auftretenden Beschleunigungen werden für den geometrischen Mittelpunkt jedes Containers der Bay bestimmt, sie ergeben sich aus dem Generalplan etwa wie folgt:

	XCG v. H.L. [m]	YCG a. MS [m]	ZCG ü. BL [m]
1. Lage:	17,400	9,100	12,200
2. Lage:	17,400	9,100	14,800
3. Lage:	17,400	9,100	17,400
4. Lage:	17,400	9,100	20,000

Zur Ermittlung der Beschleunigungen wurden Simulationen von je 10000 s durchgeführt, und es wurde für jeden Zustand die statistische Verteilung der Vertikal- und Querschleunigungen für die 1. und 4. Lage ermittelt. Zwischenwerte können daraus linear interpoliert werden. Die Ergebnisse sind in den folgenden Abbildungen zusammengefasst:

5.3.1.6.1 Beschleunigungen für den Zustand des Unfalles



$T=10.5s$, $H \frac{1}{3} = 7.0m$
 Heading: $45.0deg$, Speed: $16.0knots$
 Statistics over time: mean: 0.177536 , st.dev.: 0.913131
 of amplit.> mean(time): mean: 1.386689 , st.dev.: 0.514982
 of |amplit.|: mean: 1.189011 , st.dev.: 0.581392
 signif.: 1.867739
 total duration in real time: 2 h, 46 min, 40 s

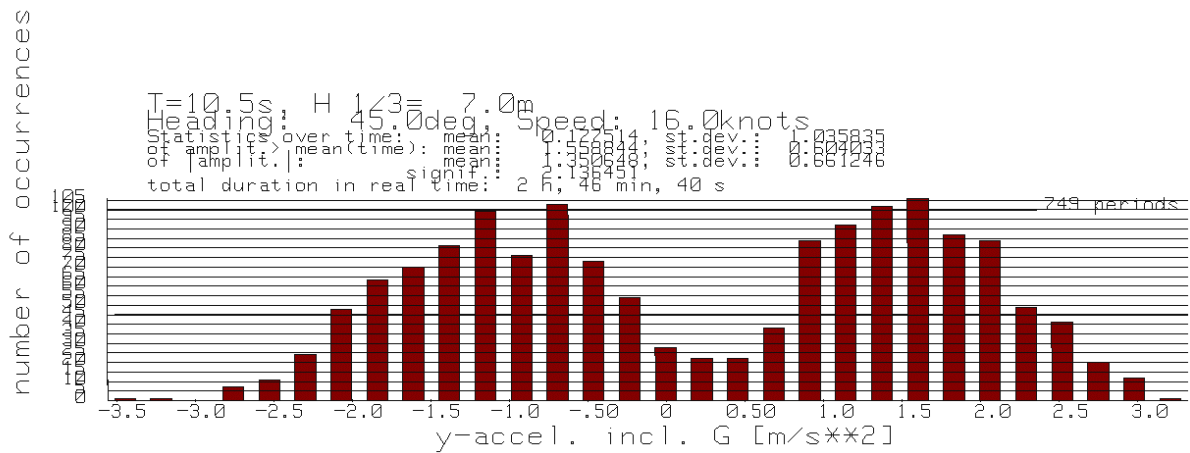
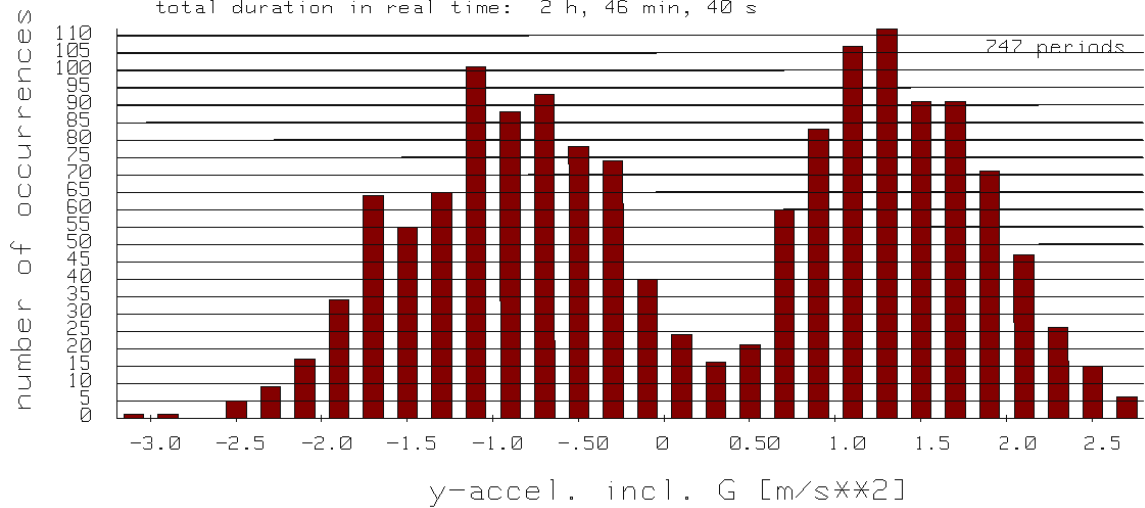
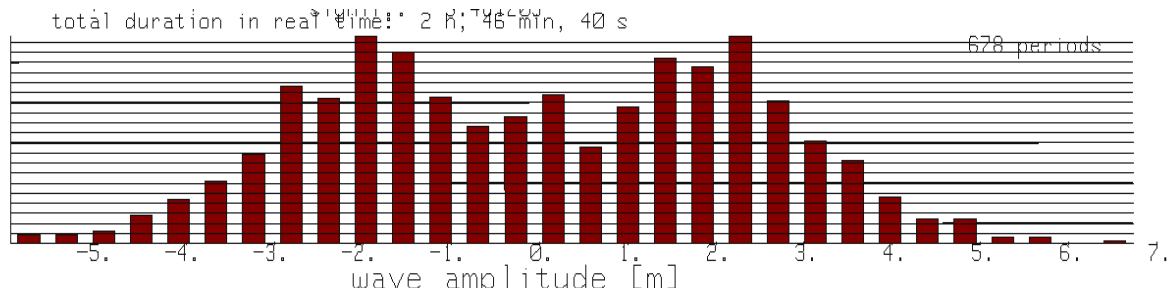


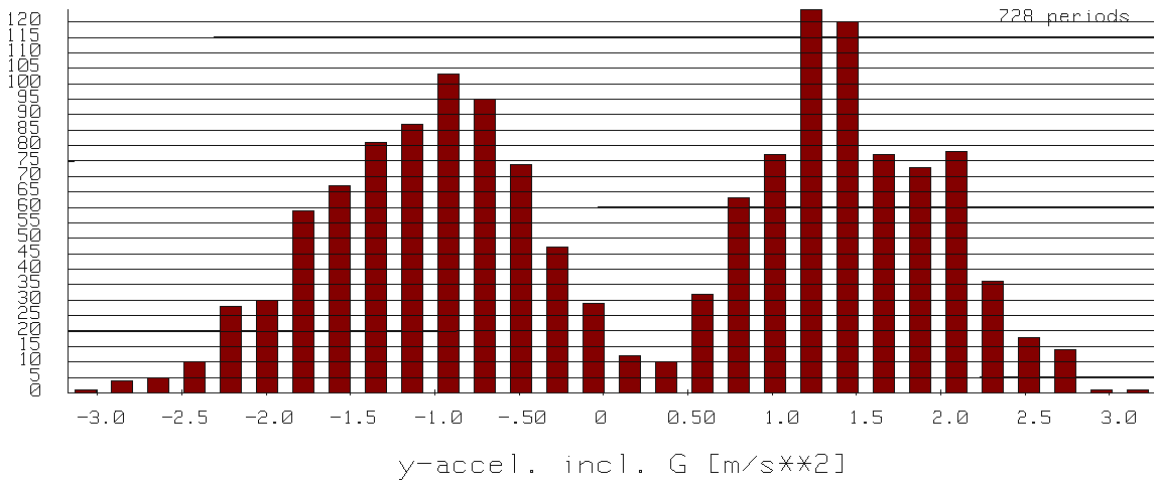
Abbildung 20: Statistische Verteilung der Wellenamplituden

(oben) sowie der Querbeschleunigungen der in Frage kommenden Bay. Mitte: 1. Lage (z=12,200 m ü- BL), unten: 4. Lage (z=20,000 m ü. BL.) $T1 = 10,5 s$, Begegnungswinkel 45° .

Az.: 45 / 07



T=11.0s, H 1/3= 7.0m
 Heading: 45.0deg, Speed: 16.0knots
 Statistics over time: mean: 0.174905, st.dev.: 0.979920
 of amplit.> mean(time): mean: 1.483219, st.dev.: 0.540259
 of |amplit.|: mean: 1.292501, st.dev.: 0.603765
 signif.: 2.014983
 total duration in real time: 2 h, 46 min, 40 s



T=11.0s, H 1/3= 7.0m
 Heading: 45.0deg, Speed: 16.0knots
 Statistics over time: mean: 0.174901, st.dev.: 1.117138
 of amplit.> mean(time): mean: 1.676676, st.dev.: 0.638510
 of |amplit.|: mean: 1.475505, st.dev.: 0.694696
 signif.: 2.347696
 total duration in real time: 2 h, 46 min, 40 s

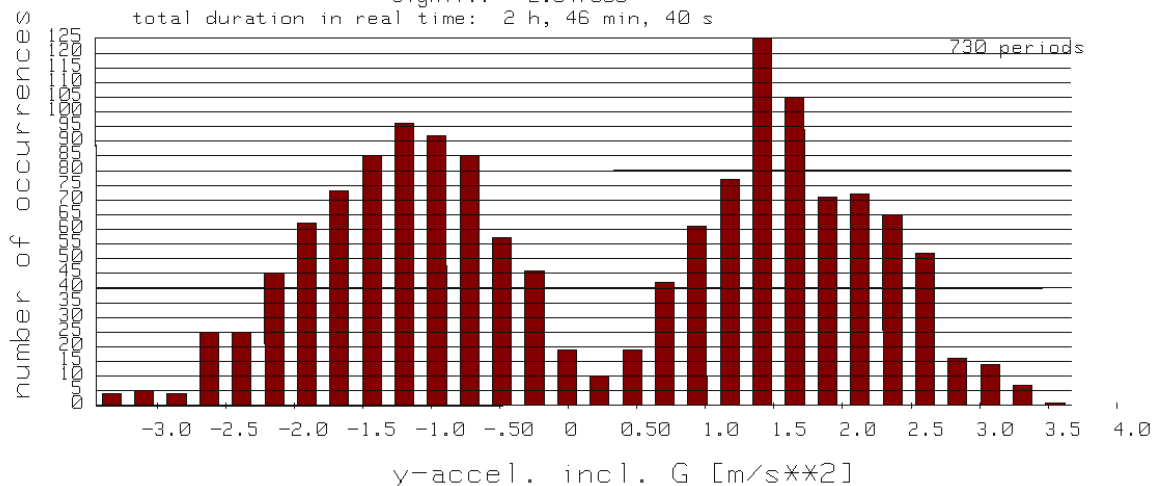


Abbildung 21: Statistische Verteilung der Wellenamplituden bei T1 = 11 s

(oben) sowie der Querbeschleunigungen der in Frage kommenden Bay. Mitte: 1. Lage (z=12,200 m ü. BL), unten: 4. Lage (z=20,000 m ü. BL.) T1 = 11 s (wahrscheinlichster Fall), Begegnungswinkel 45°.

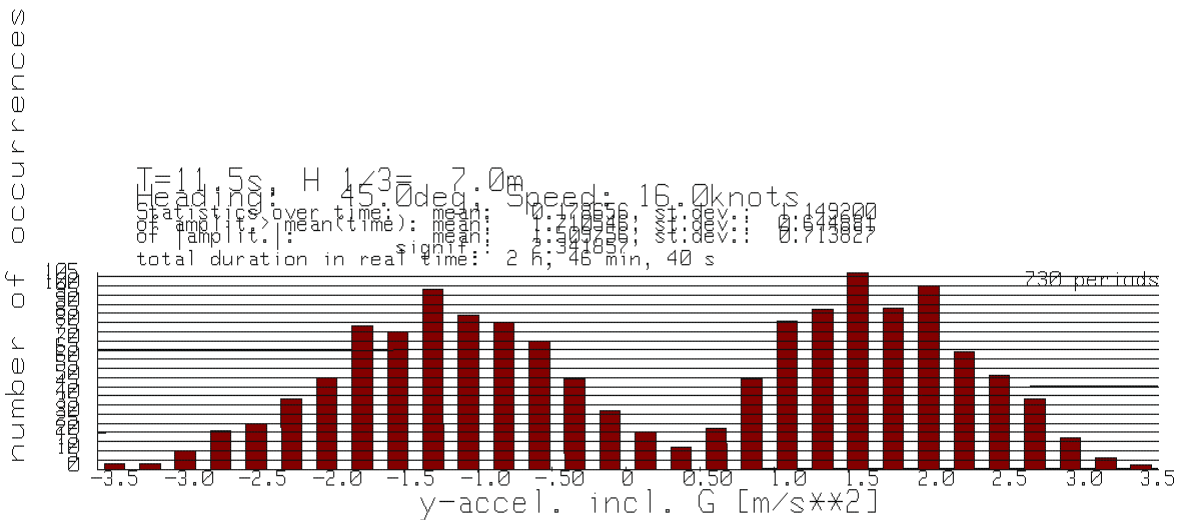
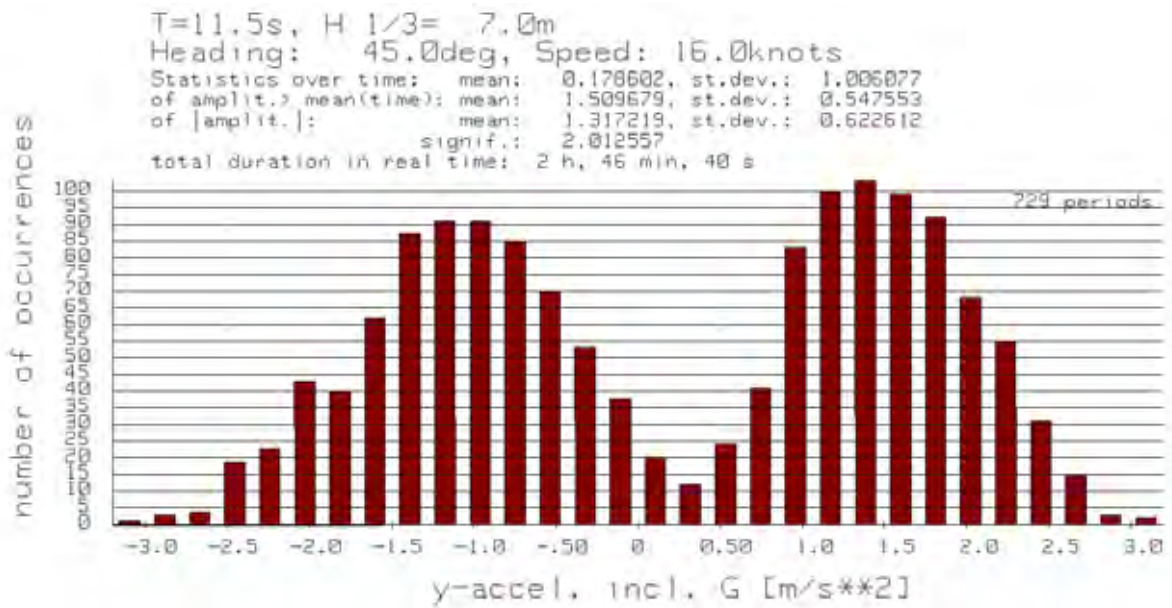
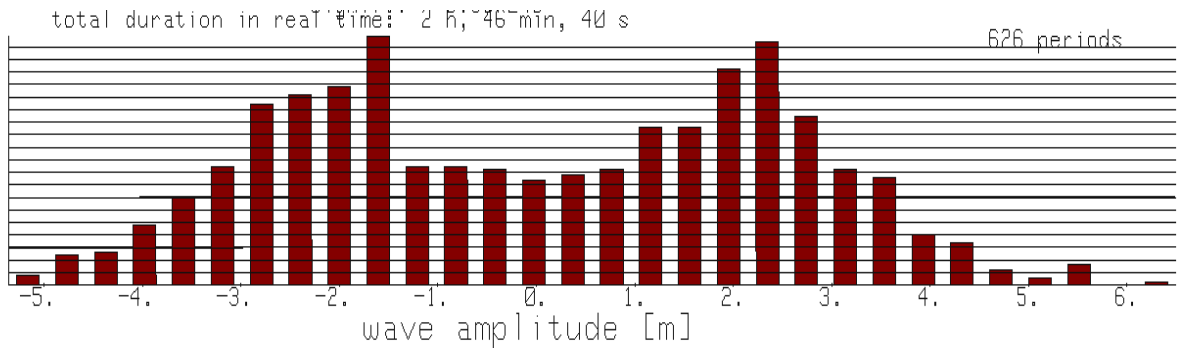


Abbildung 22. Statistische Verteilung der Wellenamplituden bei $T_1 = 11,5 s$

(oben) sowie der Querbeschleunigungen der in Frage kommenden Bay. Mitte: 1. Lage ($z=12,200 m$ ü- BL), unten: 4. Lage ($z=20,000 m$ ü. BL.) $T_1 = 11,5 s$, Begegnungswinkel 45° .

Die Ermittlung der Querbeschleunigungen ergab für die dem Unfall zugrunde liegenden Umweltbedingungen Maximalwerte von etwa $3,5$ bis 4 m/s^2 für die vierte Lage sowie etwa 3 bis $3,5 \text{ m/s}^2$ für die erste Lage. Für die in Frage kommenden kennzeichnenden Perioden von $10,5 \text{ s}$ bis $11,5 \text{ s}$ unterscheiden sich die Maximalwerte der auftretenden Beschleunigungen nicht sonderlich, die Streuung liegt etwa in der gleichen Größenordnung wie die durch unterschiedliche Zufallszahlen bedingte Variation des Seeganges an sich.

Geht man davon aus, dass das Auslegungskriterium für Beladung/Laschung etwa $0,5g$ beträgt ($4,9 \text{ m/s}^2$), dann wäre dieser Grenzwert zum wahrscheinlichen Zeitpunkt des Unfalles noch nicht erreicht worden. Wenn allerdings - wie im vorliegenden Fall - die Containergewichte innerhalb des Stapels ungünstig verteilt sind und relativ schwere Container oben gefahren werden, oder bei nicht ausreichender Laschung, ist es möglich, dass der Bruch der Laschung auch schon bei geringeren Querbeschleunigungen als den theoretischen $0,5g$ auftritt.

Die während des Unfallzustandes aufgetretenen Vertikalbeschleunigungen (vgl. Abb. 23 oben) betragen im Maximum etwa 1 bis $1,3 \text{ m/s}^2$, liegen also deutlich unterhalb von $1,0g$.

Geht man davon aus, dass ein automatischer Twistlock nicht vor $1,0g$ Vertikalbeschleunigung versehentlich auslösen würde (das entspräche dem Fall, wenn die Auflagekraft des Containers gerade Null würde), erscheint dies angesichts der relativ geringen Vertikalbeschleunigungen, wie sie im achterlichen Seegang auch prinzipiell zu erwarten sind, eher unwahrscheinlich.

Von daher ist es aufgrund der Tatsache, dass die Vertikalbeschleunigungen deutlich unterhalb des Grenzwertes für ein versehentliches Auslösen der Twistlocks liegen, die Querbeschleunigungen aber in die Nähe des theoretischen Auslegungsgrenzwertes kommen, am Wahrscheinlichsten, dass der Ladungsverlust aufgrund eines durch die auftretenden Querbeschleunigungen entstandenen Gewaltbruches der Laschung erfolgt ist. Allerdings liegen die ermittelten Werte für die Querbeschleunigung noch unterhalb des theoretischen Auslegungsgrenzwertes von $0,5g$ für die Laschung.

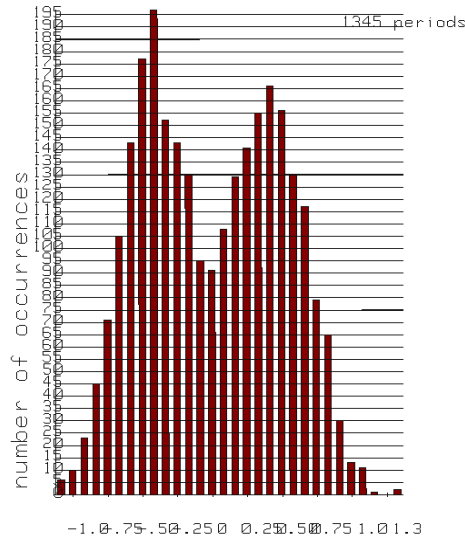
Inwieweit sich durch einen vorherigen Fahrtzustand des Schiffes, nämlich 7 kn auf Kurs 330° , also mit etwa 45° gegen die Wellen, ebenfalls Zustände ergeben haben können, die zu großen Beschleunigungen führen, wird im nächsten Abschnitt untersucht.

5.3.1.6.2 Aufgetretene Beschleunigungen während der langsamen Fahrt gegen die See

Heading: 45.0deg, Speed: 16.0knots

Statistics over time: mean: -0.004186, st.dev.: 0.365740
of amplit.> mean(time): mean: 0.429201, st.dev.: 0.246321
of |amplit.|: mean: 0.428977, st.dev.: 0.236911
signif.: 0.703302

total duration in real time: 2 h, 46 min, 40 s



$T=11.0s, H_{1/3}= 7.0m$

Heading: 135.0deg, Speed: 8.0knots

Statistics over time: mean: -0.002567, st.dev.: 0.655787
of amplit.> mean(time): mean: 0.795873, st.dev.: 0.451083
of |amplit.|: mean: 0.795964, st.dev.: 0.444709
signif.: 1.343684

total duration in real time: 2 h, 46 min, 40 s

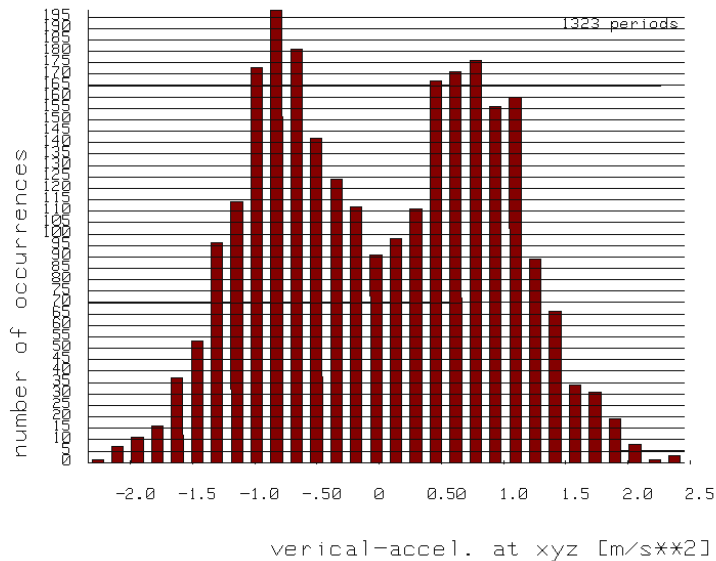
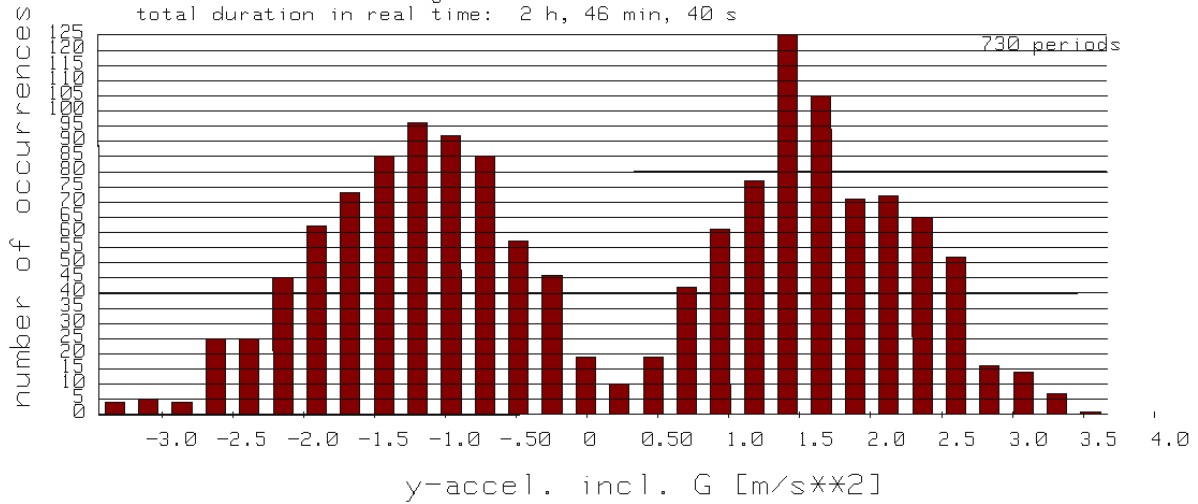


Abbildung 23: Statistische Verteilung der Vertikalbeschleunigungen

der in Frage kommenden Bay, 4. Lage: Oben: Situation des Unfalles, $v=16$ kn, Begegnungswinkel 45° , Unten: Vor dem Unfall gegen die See, $v=8$ kn., Begegnungswinkel 135° .

T=11.0s, H 1/3= 7.0m
 Heading: 45.0deg, Speed: 16.0knots
 Statistics over time: mean: 0.174901, st.dev.: 1.117138
 of amplit.> mean(time): mean: 1.676676, st.dev.: 0.638510
 of |amplit.|: mean: 1.475505, st.dev.: 0.694696
 signif.: 2.347696
 total duration in real time: 2 h, 46 min, 40 s



T=11.0s, H 1/3= 7.0m
 Heading: 135.0deg, Speed: 8.0knots
 Statistics over time: mean: 0.172486, st.dev.: 1.175716
 of amplit.> mean(time): mean: 1.634460, st.dev.: 0.719667
 of |amplit.|: mean: 1.490510, st.dev.: 0.781097
 signif.: 2.433603
 total duration in real time: 2 h, 46 min, 40 s

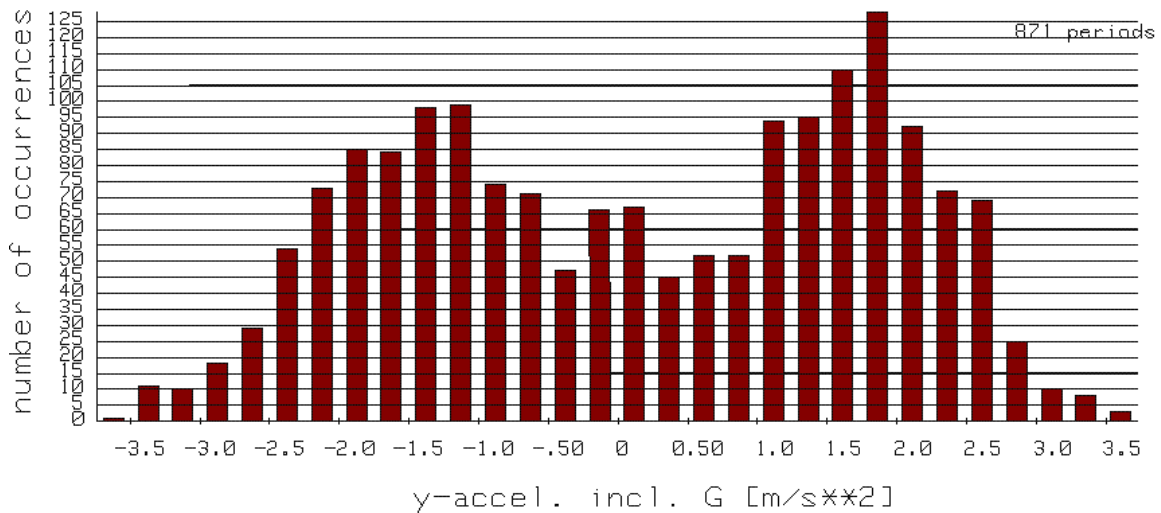


Abbildung 24: Statistische Verteilung der Querschleunigungen

der in Frage kommenden Bay, 4. Lage: Oben: Situation des Unfalles, v=16 kn, Begegnungswinkel 45°, Unten: Vor dem Unfall gegen die See, v=8 kn, Begegnungswinkel 135°.

Laut vorliegender Aussage hat das Schiff vor dem eigentlichen Unfall wegen eines Ausweichmanövers kurzzeitig einen Kurs von 330° gesteuert, die Geschwindigkeit betrug dabei etwa 7 kn. Die Auswertung der aufgetretenen Rollwinkel hat gezeigt, dass für diesen Fahrtzustand ähnliche Rollwinkel zu erwarten gewesen sein müssen, wenn man etwa den gleichen Seegangszustand zugrunde legt. Erfahrungsgemäß ist aber bei Fahrt gegen die See die Stampfbewegung größer, was zu höheren Vertikalbeschleunigungen führt. Daher wurde zum Vergleich auch der Fall 8 kn (8 kn statt 7, weil für diesen Fall ohnehin bei der Ermittlung der Rollwinkel bereits alle wesentlichen Vorabberechnungen durchgeführt worden sind), Begegnungswinkel 135° , betrachtet. Der Vergleich, der für diesen Zustand ermittelten Beschleunigungen, mit den zum Unfallzeitpunkt aufgetretenen, ist in Abb. 23 und 24 zu sehen. Für den Seegang mit $T_1=11$ s werden für den Fall gegen die See etwa maximale Vertikalbeschleunigungen um $2,5 \text{ m/s}^2$ in der 4. Lage erreicht, also mehr als doppelt so viel wie bei dem eigentlichen Unfallzustand. Die Querschleunigungen liegen dabei in der gleichen Größenordnung wie für den Unfallzustand. Gleichwohl werden in beiden Fällen die Grenzwerte für eindeutiges Versagen sowohl vertikal (deutlich) und transversal (knapp) nicht erreicht. Nimmt man an, dass zu diesem Zeitpunkt der gleiche Seegangszustand geherrscht hat wie später für den eigentlichen Unfallzustand, dann wäre aufgrund der Berechnungen für diesen Zustand ein Verlust der Container aufgrund der insgesamt höheren Vertikalbeschleunigungen eigentlich wahrscheinlicher als für den eigentlichen Unfallzustand.

Dies lässt nach Ansicht des Gutachters die im folgenden Abschnitt genannten Erklärungsmöglichkeiten für den Ladungsverlust zu.

5.3.1.7 Ursachen für den aufgetretenen Ladungsverlust

Es ist aufgrund der ermittelten Beschleunigungswerte für den Fahrtzustand mit geringer Fahrt schräg gegen die See, die theoretisch auch zum Ladungsverlust hätten führen können, möglich, dass es zu einer gewissen Vorschädigung der Laschung gekommen ist, die dann später aufgrund der aufgetretenen Transversalbeschleunigung zum Gewaltbruch der Laschung geführt haben kann.

Es ist ferner aus anderen Fällen bekannt, dass es bei Fahrt im achterlichen Seegang bei Schiffsformen mit flachem Spiegel zu Slammingstößen im Heckbereich des Schiffes kommen kann. Dabei entstehen dann stoßartige Vertikalbeschleunigungen, die in der Größenordnung von $1g$ liegen können. Von daher wäre es auch denkbar, dass der Ladungsverlust durch eine Kombination von ausreichend großer Querschleunigung mit einer solchen stoßartigen Belastung hervorgerufen worden ist. Hierzu sind aber keine Angaben gemacht worden.

Es ist aber aus Sicht des Gutachters als wahrscheinlich anzunehmen, dass der eigentliche Ladungsverlust durch eine Kombination von mindestens zwei der drei oben genannten Phänomene entstanden ist.

Die Tatsache, dass die mittleren beiden Rows der in Frage kommenden Bay leer gefahren wurden, mag in Kombination mit den recht hohen Containergewichten ebenfalls dazu beigetragen haben, dass die Laschung dann bei Fahrt im achterlichen Seegang versagt hat.

Diese Ausführungen zeigen auch, dass der Ladungsverlust aus Sicht des Gutachters nicht eindeutig einer bestimmten Ursache zuzuschreiben ist, wodurch deutlich wird, dass es im Vorfeld für die Besatzung schwer erkennbar gewesen sein dürfte, die Gefahr eines Ladungsverlustes unmittelbar herzuleiten.

Mit Sicherheit ist nach Auffassung des Gutachters die Höhe des aufgetretenen Schadens durch das Leerfahren der beiden inneren Rows größer, als wenn diese ebenfalls mit gelaschten Containern gefüllt gewesen wären. Es lässt sich allerdings nicht vorhersagen, ob der Schaden bei gefüllten inneren Rows überhaupt aufgetreten wäre.

5.3.1.8 Möglichkeiten zur Vorhersage kritischer Seegangssituationen im Bordbetrieb

Eine weitere zu klärende Fragestellung bezieht sich darauf, ob die Besatzung hätte erkennen können, dass die Gefahr eines Ladungsverlustes in der zum Unfallzeitpunkt herrschenden Situation bestanden hat. Aus obigen Ausführungen wird deutlich, dass die Besatzung dies eben nicht einschätzen konnte. Die BSU hat die vorgelegte Fragestellung daraufhin erweitert, dass der Gutachter seine Einschätzung zu den momentan verfügbaren technischen Möglichkeiten, welche an Bord die Besatzung vor seegangsbedingten Problemen warnen soll, abgeben soll. Dadurch gewinnt die Fragestellung einen allgemeinen Charakter dahingehend, ob es derzeit als Stand der Technik angesehen werden kann, an Bord Fahrtempfehlungen zum Vermeiden von seegangsbedingten Problemen zu geben, die unmittelbar mit dem Auftreten von großen Rollwinkeln verbunden sind.

Dafür wird zugrunde gelegt, dass ein, wie auch immer geartetes, Werkzeug einer **nicht speziell dafür geschulten Besatzung** ausreichend richtige Warnungen und Empfehlungen geben soll.

Aus den oben angeführten allgemeinen Grundlagen, welche das Verhalten des Schiffes in schwerem Wetter bezüglich großer Rollwinkel beeinflussen, ergeben sich klar folgende wesentliche Einflussparameter:

- Stabilität des Schiffes und generelle Charakteristik der Hebelarmkurven (degressiv oder progressiv) für die jeweiligen Berg- und Talbedingungen sowie
- generelle Änderung dieser Größen bei Änderung der Schwimmelage oder Stabilität.
- Seegangszustand des momentanen natürlichen Seeganges, vor allem kennzeichnende Periode, und signifikante Höhe (falls 1-Peak-Spektrum), sonst das gesamte Spektrum.
- Kurs und Geschwindigkeit des Schiffes, dabei insbesondere kritische Resonanzbereiche.
- Aktuelle Rolldämpfung sowie das momentane Massenträgheitsmoment um die Rollachse.

Dabei kann man die Beratung an Bord in folgende zwei Teilaufgaben unterteilen:

- Zunächst muss eine bestimmte Situation als gefährlich identifiziert werden. Dazu ist die ausreichend genaue Kenntnis des momentanen Schiffszustandes, der Umweltbedingungen sowie die genaue Reaktion des Schiffes in dieser Situation nötig.
- Dann können Empfehlungen gegeben werden, die eine andere, weniger gefährliche Situation vorschlagen. Dazu müssen dann zusätzlich zu obigem die gleichen Kenntnisse für die vorgeschlagene Situation sicher bekannt sein.

Aus der ersten Forderung, also dem Erkennen gefährlicher Zustände, lässt sich ein einfacher Anforderungskatalog wie folgt aufstellen:

Erstens muss die Schiffsführung klar und ausreichend genau wissen, in welchem Schiffszustand sie sich eigentlich gerade befindet. Dieser ergibt sich aus dem Anfangszustand der Reise sowie aus den während der Reise durchgeführten Veränderungen (z. B. verbrauchte Vorräte, zusätzliches Ballastwasser etc.). Ein im Rahmen der EU hierzu durchgeführtes Forschungsvorhaben hat eindeutig gezeigt, dass nach wie vor die größten Unsicherheiten in dem Gesamtprozess darin bestehen, dass die Stabilität des Schiffes wegen des oft nur ungenau bekannten Gewichtsschwerpunkts eben nicht ausreichend genau bekannt ist. Weil die Stabilität des Schiffes als kleine Differenz zweier sehr großer Strecken aufgefasst werden kann, von denen heute eine, nämlich KM (bei kleinen Neigungen) bzw. die Pantokarene (bei größeren Neigungen) zuverlässig bestimmt werden kann, schlagen alle Unsicherheiten im Gewichtsschwerpunkt voll auf die Stabilität durch. Ein Änderung der Stabilität (ob nun gewollt oder durch Unsicherheiten in deren Erfassung) schlägt aber voll auf das Verhalten des Schiffes im Seegang durch, und zwar sowohl auf das generelle Antwortverhalten des Schiffes an sich, als auch auf die momentane Lage von möglichen Resonanzen. Von daher ist es im Sinne einer aussichtsreichen Beratung an Bord unerlässlich, dass entweder die Stabilität des Schiffes ausreichend genau bekannt ist (das wäre eine zwingende Voraussetzung dafür, um überhaupt alternative Situationen vorschlagen zu können), oder, falls das aus praktischen Gründen nicht ausreichend genau möglich ist, zumindest einen Hebelarmstreifen zugrunde zu legen, welcher dann eine gewisse Bandbreite von Situationen bewerten müsste. Gleichfalls muss man sich darüber im Klaren sein, dass die Daten, welche bisher von Bordrechnern erfasst werden, nie exakt genug sind oder gar ausreichend sind, um daraus ausreichend genaue Eingabedaten für Seegangsrechnungen (oder deren Auswertung) zu produzieren.

Von daher ergibt sich als Ausgangssituation die Tatsache, dass wesentliche, für eine genaue Beratung an Bord bezüglich des Auftretens großer Rollwinkel nötige Eingangsdaten, nicht in der Qualität vorhanden sind, welche eine sichere Beratung in allen Fällen ermöglichen. Dies gilt ganz allgemein und unabhängig von der tatsächlichen Ausführung des Beratungswerkzeuges (ganz gleich, ob nämlich online an Bord gerechnet wird oder ob vorab gerechnete Datensätze interpretiert werden).

Zweitens muss die Schiffsführung den Umgebungszustand, vor allem den Seegang, ausreichend genau kennen. Praktische Versuche hierzu haben gezeigt, dass es auch für eine sehr erfahrene Besatzung praktisch unmöglich ist, die wesentlichen Seegangparameter durch Beobachten ausreichend genau zu ermitteln. Schon für die signifikante Wellenhöhe gelingt das nicht in einer Genauigkeit, die für eine seriöse Beratung nötig wäre, und bei der signifikanten Periode ist die Streuung noch viel größer. Daraus ergibt sich zwingend, dass es eine unabdingbare Voraussetzung ist, den momentanen Seegangszustand messtechnisch zu erfassen, z. B. mit einem Seegangsradar. Diese Technik ist heute im Prinzip verfügbar, d. h. man kennt bei Verwendung eines zuverlässigen Seegangsradars ausreichend genau den Seegangszustand in einiger Entfernung vom Schiff. Allein diese Kenntnis stellt für die Nautiker nach Auffassung des Gutachters schon einen wesentlichen Fortschritt dar, weil man z. B. nachts oder bei schlechter Sicht ohne ein derartiges Hilfsmittel allein die Situation aufgrund der momentanen Schiffsbewegungen beurteilen muss. Gleichwohl gibt es (nach Kenntnis des Gutachters) immer noch keine voll befriedigende Lösung für das Problem, aufgrund der in weiter Ferne gemessenen Seegangsdaten den Seegangszustand am Ort des fahrenden Schiffes zu extrapolieren. Dies scheint zunächst aus Sicht eines Nautikers ein akademisches Problem zu sein, es hat aber folgende wichtige praktische Konsequenz für die Konzeption eines Beratungswerkzeuges:

Weil der momentane Seegangszustand am Ort des Schiffes nicht ausreichend genau bekannt ist, ist es auch nicht ausreichend zuverlässig möglich, online durchgeführte Messungen (z. B. des Bewegungsverhaltens des Schiffes) dazu zu benutzen, um ein online-Rechenmodell entsprechend auf die gemessenen Bewegungen hin zu kalibrieren. Weil nämlich zum aktuellen Zustand zwar die Bewegung des Schiffes bekannt ist (da u. U. gemessen), aber eben die zugehörigen Umweltbedingungen am Ort des Schiffes eben nicht.

Ein weiteres, wesentliches Problem ist die genaue Erfassung und Behandlung von so genannten Zwei-Peak-Spektren, wie sie z. B. durch Überlagerung von Windsee und Schwell aus verschiedenen Richtungen entstehen können. Diese führen häufig zu extrem steilen Wellen aus mehreren Richtungen. Hier ist eine Beratung zu einem Wechsel der momentanen Schiffssituation extrem schwierig, weil es ggf. Resonanzen in mehreren Situationen geben kann. Wegen der extremen Vielzahl möglicher Spektren ist es praktisch kaum durchführbar, ausreichend viele solcher Situationen im Vorhinein zu rechnen und daraus etwas zu interpretieren. Allein das Verhalten des Schiffes in Ein-Peak-Spektren ist schon extrem kompliziert, und das Verhalten eines Schiffes in Zwei-Peak-Spektren ist nach Auffassung des Gutachters überhaupt nicht seriös vorhersagbar, ohne dass man entsprechende Berechnungen gemacht hat.

Daraus ergibt sich, dass es ein zwingend notwendiger Bestandteil eines Seegangsberatungssystems sein muss, den Seegang mittels Seegangsradar ausreichend genau zu erfassen. Dies ist nach Auffassung des Gutachters derzeit in einiger Entfernung vom Schiff ausreichend genau möglich. Es ist aber noch nicht in ausreichend zuverlässiger Weise möglich, den tatsächlich gemessenen Seegang in die theoretischen Modelle mit einzubeziehen, vor allem nicht im Falle der extrem komplizierten Spektren mit mehr als einem Peak.

Drittens muss die Schiffsführung die Reaktion des Schiffes auf eine bestimmte Seegangssituation genau kennen. Dies setzt zum einen voraus, dass an Bord eine ausreichend richtige Theorie oder Methode vorhanden ist, welche die zu erwartenden Schiffsbewegungen mit praktisch ausreichender Genauigkeit vorhersagen kann, und zum anderen, dass diese Theorie oder Methode von einem ungeschulten Benutzer ausreichend sicher bedienbar ist. Es ist nach Ansicht des Gutachters derzeit nicht möglich, beide Voraussetzungen **zugleich** zu erfüllen. Das liegt im wesentlichen daran, dass Seegangsprobleme, insbesondere was große Rollwinkel betrifft, in ihrer Gesamtheit so komplex sind, dass es bisher nicht gelungen ist (und in absehbarer Zeit vermutlich auch nicht gelingen wird), eine einzige Seegangsmethode zu haben, die alle wesentlichen Seegangseffekte ausreichend richtig vorhersagen kann. Man beschränkt sich daher in der Praxis darauf, bestimmte spezialisierte Verfahren zu entwickeln und anzuwenden, die nur bestimmte Seegangseffekte brauchbar vorhersagen können, andere aber prinzipbedingt nicht (so kann z. B. die im Rahmen dieses Gutachtens verwendete Methode E4ROLLS sehr gut große Rollwinkel im vor- oder achterlichen Seegang vorhersagen, große Rollwinkel quer zur See aber nur mit mäßiger bis schlechter Genauigkeit und das Querschlagen überhaupt nicht). Für den eigentlichen Zweck, nämlich der Unterstützung bei der Projektierung von Schiffen oder deren Bewertung durch Dritte, ist das auch vollkommen ausreichend. Denn derartige Methoden beruhen auf bestimmten Vereinfachungen bestimmter, für das jeweilige Problem nicht relevanter Seegangswirkungen, durch die in der Methode benutzte Modellbildung. Daher setzt die Benutzung derartiger Methoden eine umfangreiche **Spezialausbildung** und viel Modelliererfahrung voraus, weil der jeweilige Berechnungsingenieur genau im Individualfall entscheiden muss, ob im gerade betrachteten Fall die jeweiligen Modellannahmen noch gültig sind oder nicht. Damit setzt sowohl die Erzeugung solcher Daten als auch deren Interpretation ein hohes Maß an Spezialwissen voraus. Ist dieses in ausreichender Form vorhanden, und stehen solche Methoden zur Verfügung, dann kann man in den meisten Fällen richtige Prognosen des Seeverhaltens von Schiffen abgeben und gezielt Schiffe mit bestimmten Seegangseigenschaften entwerfen.

Im Gegensatz zu allen anderen Schiffsbewegungen (außer Querschlagen) sind große Rollwinkel deshalb so schwierig, weil das Rollverhalten des Schiffes im Seegang hochgradig nichtlinear ist und nur im kurzkämmigen natürlichen Seegang einigermaßen richtig darstellbar ist.

Es ist daher die Auffassung des Gutachters, dass die Berechnung und Analyse des Seeverhaltens von Schiffen, auch bezüglich großer Rollwinkel, bei der Projektierung von Schiffen durch entsprechend ausgebildetes Personal als gegenwärtiger Stand der Technik angesehen werden kann, oder zumindest unmittelbar davor steht.

Damit eine Methode an sich unter den genannten Voraussetzungen überhaupt geeignet ist, brauchbare Prognosen großer Rollwinkel abzugeben, müssen folgende Minimalvoraussetzungen gegeben sein:

- Die Rollbewegung muss voll nichtlinear modelliert sein (bei linearen Verfahren ersetzt man lediglich die Hebelarmkurve durch eine Gerade mit $GM \varphi$). Die Methode muss im Zeitbereich rechnen.
- Die Kopplungen mit den anderen Freiheitsgraden müssen ausreichend richtig erfasst werden.
- Die Methode muss die aufrichtenden Hebel im Seegang und deren Änderungen richtig erfassen können (entweder Druckintegration auf den Rumpf oder Ersatzwelle nach Grim. Linearisierte Verzweigungstheorie nur mit Anfangs-GM bringt nichts).
- Die Methode muss in natürlichem unregelmäßigem Seegang rechnen (Erkenntnisse in regelmäßige Wellen sind für praktische Seegangsfragen unbrauchbar) und auch Spektren mit mehreren Peaks beherrschen.
- Die Methode muss den Einfluss der Fahrtgeschwindigkeit richtig erfassen.
- Die Rolldämpfung muss nicht linear modelliert sein, das gilt besonders auch für freie Oberflächen wie Flume- oder Interring-Tanks.
- Für den Bordgebrauch einer derartigen Methode ist es zwingend erforderlich, dass der Seegang gemessen wird und in die Methode gefüllt wird, z. B. durch ein Seegangsradar.

Daraus wird deutlich, dass es seitens des Anwenders solcher Methoden an erheblichem Spezialwissen bedarf, um praktisch zuverlässige Ergebnisse zu produzieren.

Die Zuverlässigkeit der Ergebnisse hängt dabei nicht nur von der Qualität der jeweiligen Seegangsmethode ab (wenn die denn den oben angeführten Minimalstandard erfüllt), sondern vor allem von der Qualifikation des jeweiligen Anwenders der Methode.

Bei der Verwendung solcher Methoden oder der mit solchen Methoden produzierten Ergebnisse an Bord muss beachtet werden, dass die entsprechenden Qualifikationen an Bord üblicherweise nicht in ausreichendem Maße vorhanden sind. Daraus ergibt sich, dass man für die praktische Nutzung solcher Methoden an Bord gewisse Vereinfachungen sowohl in der Benutzung der Methode als auch in der Interpretation oder Generierung von Ergebnissen machen muss, damit die Besatzung überhaupt derartige Verfahren für die Bewertung gefährlicher Situationen nutzen kann.

Eine Vereinfachung bedeutet aber immer, dass bestimmte physikalische Tatsachen, die ein Problem komplizieren, fortgelassen werden, wenn denn festgestellt wird, dass diese Tatsachen auf das Ergebnis nur unbedeutenden Einfluss haben. Daraus ergibt sich, dass die vereinfachte Methode in den Fällen, bei denen die Vereinfachung unzulässig ist, falsche Ergebnisse produziert. Dies wiederum kann die Besatzung an Bord nicht beurteilen, sie merkt es erst dann, wenn die Vorhersage des Verfahrens

nicht zum aktuellen Verhalten des Schiffes passt und verliert daraufhin das Vertrauen zu einer solchen Methode. Bei allen Seegangsfällen, speziell bei Fragen zu großen Rollwinkeln, liegen nun die Verhältnisse so, dass Vereinfachungen, welche dazu führen, dass solche Methoden an Bord benutzt werden können, praktisch dazu führen, dass die Seegangsprobleme mit einer derartigen Undifferenziertheit behaftet sind, weil zu viele wichtige Phänomene weggelassen werden, sodass die Ergebnisse in der Summe meistens falsch werden. Entweder sind wegen der vielen Vereinfachungen die vorhandenen Systeme derartig konservativ, dass praktisch kaum noch ein sinnvoller Fahrtzustand zugelassen wird (dann ist es für die Besatzung nutzlos), oder es werden zu viele mögliche Gefährdungssituationen übersehen (dann ist es ernsthaft gefährlich). Stellt man als platte Minimalforderung an ein solches System die Anforderung, dass es in der Summe mehr nützliche als schädliche Hinweise für das Auftreten oder Vermeiden von großen Rollwinkeln geben soll, dann muss man, aus Sicht des Gutachters, klar feststellen, dass keines der zur Zeit angebotenen Systeme dies erfüllt (keines der Systeme ist derzeit tatsächlich für den Bordgebrauch **zugelassen**, was erstens aus Sicht der Wissenschaft damit zusammenhängt, dass eben keines der Systeme tatsächlich den oben aufgestellten Anforderungen genügt, und zweitens aus Sicht der Praxis deshalb, weil (s. o.) wegen der Komplexität des Problems noch keine Richtlinien existieren, nach denen man solche Systeme durch dafür geeignet scheinende Institutionen zertifizieren lassen kann). Im Gegenteil, wegen der zu vielen Vereinfachungen wird die Besatzung eher zu falschen als zu richtigen Entscheidungen tendieren.

Zusammenfassend ist der Gutachter der Ansicht, dass im vorliegenden Fall der Ladungsverlust auch dann nicht zu verhindern gewesen wäre, wenn denn eine der zur Zeit erwerbbarer Seegangswarnsoftware an Bord gewesen wäre. Dies liegt daran, dass, trotz der generellen Berechenbarkeit von Seegangsproblemen durch geeignete Simulationsprogramme, es bisher nachweislich noch nicht gelungen ist, die komplizierten Methoden für die zuverlässige Berechnung großer Rollwinkel soweit zu vereinfachen, dass die durch diese Vereinfachungen entstandenen Methoden noch soweit für den Bordbetrieb richtig sind, dass sie in der Summe im praktischen Bordgebrauch mehr nützen als schaden. Das wird sich nach Auffassung des Gutachters kurzfristig auch nicht ändern.

5.3.2 Gutachten des FB Seefahrt Warnemünde

Für die beauftragte Untersuchung wurden als repräsentative Seegangsdaten die Messungen der Messboje Elbe ausgewählt, die sich in der Nähe des Unfalles befand. Damit ergeben sich folgende Daten für die nachfolgenden Untersuchungen:

Wellenhöhe: 6 m; Mittlere Seegangsrichtung: 280°
Seegangsperiode: Es werden Untersuchungen für die folgende Wellenperiode durchgeführt:

$$T_w = 10, 11 \text{ und } 12 \text{ s.}$$

Für die Stabilitätssituation wurden die Angaben als Ladungsrechnerauszug übergeben, nach denen das Schiff die Stabilitätsbedingungen einhält (siehe Abb. 25).

Das Schiff JRS CANIS befand sich zum Zeitpunkt des Unfalles am 12. Januar 2007, 02:45 Uhr in dem Verkehrstrennungsgebiet „Terschelling/German Bight“ in Fahrtrichtung Elbmündung am „Grünen Tonnenstrich“.

Durch drei kurz hintereinander folgende ca. 7 m hohe Wellen geriet das Schiff in eine Steuerbordkrängung von ca. 15–20°. Die Rows 4414-8414 und 4614-8814 kippten nach Steuerbord. Durch die Tatsache, dass die Stellflächen der innersten beiden Rows leer waren - die Stellflächen der 1. Row Backbord und Steuerbord (4214 - 8214 und 4114 - 8114) in der 28. Bay (letzte Bay) waren leer geblieben - konnten die umfallenden betreffenden Rows mit entsprechend hoher Fallgeschwindigkeit im ungünstigen Winkel auf die Row 4314-8314 schlagen. Im Dominoeffekt brachen die Halterungen der drei Steuerbord-Rows der Bay 28 und die Container stürzten in die See.

Aufgrund der ECDIS-Daten gibt es die zusätzliche Information, dass bis ca. 02:35 Uhr (also kurz vor dem Vorfall) COG=056° und SOG=16 kn (+/-0,1) gefahren wurden. Diese Informationen können als gesichert angesehen werden, da sie vom GPS kommen. Auch ein LOG=16 kn (+/-0,2) wird angezeigt.

Dann beginnen die Werte abzunehmen bis COG=035° und SOG=10 kn erreicht sind. Ab 02:40 Uhr etwa dreht das Schiff zurück und nimmt wieder Fahrt auf. Ob diese Änderungen absichtlich durch die Schiffsführung herbeigerufen wurden oder durch die aufeinander folgenden harten Wellen von Backbord (laut Kapitänsaussage) und das Überbordfallen der Container verursacht wurden, ist nicht bekannt.

Zum Unfallzeitpunkt hatte das Schiff einen Kurs von COG=060° und die Geschwindigkeit betrug 15,5 kn.

Diese Angaben werden für die Erstellung der Bilder für die Auswertung benutzt und die vorstehenden anderen Kurse und Geschwindigkeiten in der weiteren Diskussion besprochen.

MACS3 by SEACOS GmbH v.3.185 ,26.Sept.05 Fri Jan 12 2007 9:23 47
 JRS CANIS (FMS437-8) Results
 Loading Condition: NTB.STB Page 3 of 5

Stability Results / Without container-- IMO			
Level Balance OK!	actual	Limit	
GM' (corrected)	1.325	0.802	m
Angle due to transverse Moment	1.091	3.000	degr.
Angle due to Wind + transverse Moment	1.091	15.064	degr.
Max. lever GZ at angle >=30 degrees	-0.641	0.200	m
Angle of max righting lever GZ	-37.730	25.000	degr.
Area up to 30 Degrees	0.181	0.055	m * rad
Area up to 40 Degrees	-0.292	0.090	m * rad
Area between 30 and 40 Degrees	0.111	0.030	m * rad
Amplitude of rolling	20.88		degr.
Period of rolling	13.69		sec
Weather Criterion	3.05	1.000	

Hydrostatic Particulars			
Displacement	11930.6 t	Transv. metacenter ab. baseline KM	9.81 m
Corresponding mean draught	7.29 m	Vertical centre of gravity KG (solid)	8.44 m
Longitudinal centre of flotation	54.14 m	Transverse metacentric height GM	1.37 m
Longitudinal centre of buoyancy	58.18 m	Free surface correction GG'	0.05 m
Longitudinal centre of gravity	58.20 m	Corr. vert. centre of gravity KG'	8.49 m
Trimming lever	-0.02 m	Corr. transv. metacentric height GM'	1.32 m
Trim coefficient	0.6668	Transverse moment	-301.10 m ³ t
Total trim over perpendiculars	0.40 m	List due to transverse moment	-1.091 degr.
Trim at forward perpendicular	-0.20 m	Area "a" for Weather Criterion	0.107 m * rad
Trim at aft perpendicular	0.20 m	Area "b" for Weather Criterion	0.326 m * rad
Draught at fore perpendicular	7.09 m	Moment to change trim MCT	178.93 (t*m)/cm
Draught at midship	7.29 m	Weight to change Draft TPC	21.79 t/cm
Draught at aft perpendicular	7.49 m	Downflooding angle	59.443 degr.

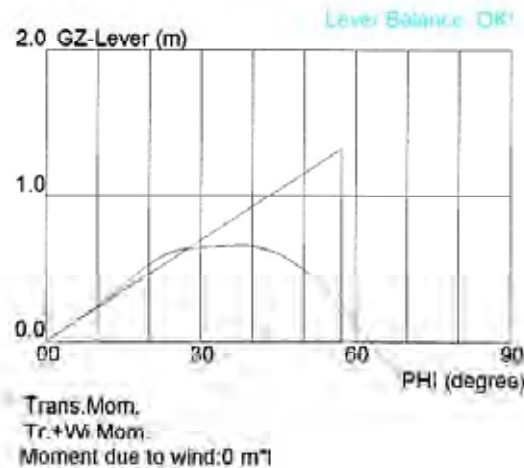


Abbildung 25: JRS CANIS– Stabilitäts-Angaben als Ladungsrechnerauszug

5.3.2.1 Berechnungen zur Gefährdung durch Seegang in Bezug auf Resonanz und andere Effekte

5.3.2.1.1 Allgemeine Erläuterung zur Gefährdung und Methoden

In der letzten Zeit sind mehrfach große Schäden durch starkes Rollen von Schiffen im Seegang aufgetreten, sodass ein Bedarf für die Abschätzung von solchen Gefahren besteht.

Einen Überblick über die potentiellen Gefahren bietet Abbildung 26:

Phenomena	Occurrence		Effect
	Direction	Periods/Encounter	
1. Synchronous rolling motion resonance	All directions possible	Wave encounter period coincides with the natural rolling period of a ship	Heavy oscillations with high amplitude
2. Parametric rolling motion resonance	Specifically for head and stern wave conditions	Wave encounter period is approximately equal to half of the natural roll period of the ship	Heavy oscillations with high amplitude
3. Reduction of stability riding on the wave crests of high wave groups	Following and quartering seas	Wave length larger than $0.8 \times L_{pp}$ and significant wave height is larger than $0.04 \times L_{pp}$	Large roll angle and capsizing
4. Surf-riding and broaching-to	Following and quartering seas	The critical wave speed is considered to be about $1.8\sqrt{L_{pp}} \sim 3.0\sqrt{L_{pp}}$ with respect to ships' length	Course deviation and capsizing

Abbildung 26: Zusammenstellung der Effekte durch Seegang, Bedingungen für ihr Auftreten und Auswirkungen

Für die Einschätzung der Gefährdung liegt eine Reihe von Verfahren vor, hier soll sich vor allem auf Verfahren gestützt werden, die durch die Schiffsführung benutzt werden können.

- a) Einerseits liegen von der See-BG Richtlinien aus den Jahren 2003 (Deutsche Fassung) bzw. 2004 (Englische Fassung [8]¹²) vor, die auf den entsprechenden Guidelines der IMO basieren [2], [4] und sogar darüber hinausgehen. Im Jahr 2007 wurde eine aktualisierte, aber leider stark gekürzte Fassung veröffentlicht [9].
- b) Andererseits wurde vom Gutachter ein Verfahren entwickelt, das grundlegend auf denselben Zusammenhängen aufbaut wie in den Richtlinien der See-BG und der IMO Guidelines, dabei aber in einfacher Weise berechenbare und übersichtlich darstellbare Ergebnisse für die Einschätzung der Gefährdungslage liefert – in [10] und [11] liegt eine detaillierte Beschreibung vor, in [12] wurde eine aktualisierte Kurzform veröffentlicht.

¹² [...] Quellennachweise - Gutachten Prof. Dr. habil. Knud Benedict, Erklärungen siehe S. 87/88

Im Folgenden wird zunächst nach den Methoden a) aus [8] bzw. [9] eine Überprüfung vorgenommen, ob in der Unfallsituation Resonanzgefahr bestand. Anschließend wird nach b) eine umfassende Auswertung vorgenommen über die gesamte Gefahrensituation.

5.3.2.1.2 Einzelne Beispielrechnung für Roll- und Begegnungsperiode, Resonanz

Für die Berechnung der Rollzeit werden die in Abb. 25 enthaltenen Angaben über GM und die Hebelarme nach den in [8] verwendeten Verfahren mit folgenden Ergebnissen genutzt:

Rollzeit $Tr(10^\circ)$ bei kleinen Rollwinkeln bis ca. 5° - 10° :

$$Tr(10^\circ) = \frac{Cr \cdot B}{\sqrt{GM}}$$

Dabei sind:

GM – Anfangsstabilität, Metazentrische Höhe [m]; hier GM[m]= 1.325

B – Breite auf Spant

Cr -Trägheitskoeffizient für Rollen: er lässt sich mit den angegebenen Schiffsabmessungen Tiefgang d und Lpp berechnen aus $Cr = 2 \cdot c$. Darin ist:

$$c = 0,373 + 0,023(B/d) - 0,043(L_{pp}/100)$$

damit ergibt sich:

$$Tr(10^\circ) = \frac{Cr \cdot B}{\sqrt{GM}} = \underline{\underline{13,7 \text{ s}}}$$

Rollzeit $Tr(40^\circ)$ bei großen Rollwinkeln bis ca. 40° ([7], s.a.[8]):

$$Tr(40^\circ) = \frac{Cr \cdot B}{9,4} \left(\frac{2,2}{\sqrt{v}} + \frac{2}{\sqrt{w}} + \frac{4}{\sqrt{x}} + \frac{4}{\sqrt{y}} + \frac{1}{\sqrt{z}} \right) \quad [s]$$

wobei:

$$v = 0,6 \cdot GZ_{40}$$

$$w = GZ_{20} + 4 \cdot GZ_{30} + 1,6 \cdot GZ_{40}$$

$$x = w + 1,5 \cdot GZ_{10} - 3 \cdot GZ_{20} - GZ_{30}$$

$$y = w + 2,5 \cdot GZ_{10} + GZ_{20}$$

$$z = y + 1,5 \cdot GZ_{10}$$

Mit den Hebelarmwerten GZ_ bei den entsprechenden Rollwinkel

$$GZ_{10}_{[m]}=0.23; GZ_{20}_{[m]}=0.5; GZ_{30}_{[m]}=0.64; GZ_{40}_{[m]}=0.64$$

erhält man das Ergebnis:

$$Tr(40^\circ) = \frac{Cr \cdot B}{9,4} \left(\frac{2,2}{\sqrt{v}} + \frac{2}{\sqrt{w}} + \frac{4}{\sqrt{x}} + \frac{4}{\sqrt{y}} + \frac{1}{\sqrt{z}} \right) = \underline{\underline{15.7 \text{ s}}}$$

Damit ergibt sich die Situation, dass bei kleinen Rollwinkeln die Rollzeit nur $Tr(10^\circ)=13,7$ s beträgt, aber sich bei großen Roll-Amplituden infolge der geringeren werdenden, aufrichtenden Momente (Hebelarmwerte liegen unter der Tangente an die Hebelarmkurve, s. grafische Darstellung in Abb. 30) vergrößert auf $Tr(40^\circ) = 15,7$ s.

5.3.2.2 Begegnungsperiode und Resonanzgefahr

5.3.2.2.1 Berechnung der Begegnungsperiode

Die Begegnungsperiode TE (encounter period) zwischen den Wellen und dem Schiff kann nach der aktuellen Richtlinie der See-BG [9] berechnet werden als:

$$TE = \frac{k \cdot Tw^2}{k \cdot Tw + 0,514 \cdot V \cdot \cos \gamma}$$

Hierin sind:

- TE: Begegnungsperiode in s.
- k: Faktor für den Seegang = 1,56 (insbesondere für Dünung/Swell)
- Tw: Wellenperiode in s.
- V: Schiffsgeschwindigkeit in Knoten.
- γ : Winkel zwischen Kielrichtung und Seegangsrichtung ($\gamma = 0^\circ$ bedeutet genau von vorn einkommende See)

Für die Situation des Schiffes bei Fahrt mit ca. 15,5 kn auf Kurs 060° bei einem Seegang aus 280° mit einer Wellenperiode von $Tw=10$ s ergibt sich eine Begegnungsperiode von **TE=16,4 s** (für $Tw=11$ s ist $TE=17,1$ s und für $Tw=12$ s ist $TE=17,8$ s).

5.3.2.2.2 Einzelne Auswertung der Resonanzgefahr

Für die einzelne Auswertung der Resonanzgefahr wird diese Begegnungsperiode TE mit der Roll-Eigenperiode Tr verglichen.

Direkte Resonanz mit besonders großen Rollamplituden ist zu erwarten, wenn die Begegnungsperiode TE gleich der Rolleigenperiode ist, d.h. das Verhältnis $Tr / TE = 1,0$ ist. Liegt das Verhältnis in der Nähe von 1, d.h., in einem Bereich $0,8 \leq Tr / TE \leq 1,1$ sind noch bis zu 50 % der maximalen Resonanz-Amplituden zu erwarten. Für diese Verhältnisse spricht man von Synchroner Resonanz.

Parametrisches Rollen bzw. Resonanz tritt besonders in Gegensee oder achterlicher See auf und zwar dann, wenn die Begegnungsperiode ungefähr doppelt so groß ist wie die Rolleigenperiode. Direkte Parametrische Rollresonanz besteht beim Verhältnis $Tr / TE = 2,0$. Liegt das Verhältnis in der Nähe von 2,0, d.h., in einem Bereich $1,8 \leq Tr / TE \leq 2,1$ sind noch bis zu 50 % der Amplituden zu erwarten.

Für den Unfallzeitpunkt herrschte folgende Situation für die beiden Eigenrollperioden:

Situation für $Tr(10^\circ)$:	$Tr / TE = Tr(10^\circ)/TE=13,7 \text{ s}/16,4 \text{ s} = \underline{\underline{0,84}}$
Situation für $Tr(40^\circ)$:	$Tr / TE = Tr(40^\circ)/TE=15,7 \text{ s}/16,4 \text{ s} = \underline{\underline{0,96}}$

Das bedeutet, dass sich das Schiff sowohl für kleine Rollwinkel knapp innerhalb des Resonanz-Bereiches für Synchrones Rollen, als auch für große Rollwinkelamplituden sich innerhalb des kritischen Kurs- und Geschwindigkeitsbereichs für Resonanz befindet. Dies wird wahrscheinlich der Grund für die Anregung zu großen Rollamplituden gewesen sein, die sich von kleinen Rollwinkel aufschaukeln können, aber auch bei einer kurzzeitigen großen Welle in die Resonanz geraten. **Gefahr für Parametrisches Rollen ist dagegen nicht erkennbar.**

Aus dieser einzelnen Berechnungsweise ist allerdings noch keine volle Übersicht möglich, um zu erkennen, welche Entscheidungen für eine Vermeidung der Resonanz hätten getroffen werden können. Deswegen soll im folgenden Kapitel eine umfassendere bzw. erweiterte geeignete Methode für eine Berechnung und Darstellung der Resonanz-Situation benutzt werden, in der darüber hinaus auch die weiteren Gefahrenpotentiale wie Begegnung mit Wellengruppen und Surfing erfasst werden.

5.3.2.3 Darstellung potentieller Gefahrensituation im Polardiagramm

Es wird im Weiteren eine einfache Methode zur Berechnung der notwendigen Informationen für die Darstellung von potentiell gefährlichen Bedingungen für synchrone und parametrische Resonanz in einem übersichtlichen Polardiagramm aus den Grunddaten des Schiffes und des Seeganges verwendet, die sogar auch manuell an Bord durchgeführt werden kann. Informationen zur Beachtung der Gefahr der Wirkung von hohen Wellengruppen bzw. Surfing und Broaching entsprechend der Berechnungs-Vorschläge der IMO können einbezogen werden.

Entscheidend ist die Kenntnis, dass für die Berechnung der Resonanzgebiete die Grenzen der Gefahrengebiete direkt auf Kursen entlang der Seegangsrichtung sehr einfach durch Umstellung der Formel nach der Geschwindigkeit V bestimmt werden können:

$$V = \frac{k \cdot Tw}{0,514 \cdot \cos \gamma} \cdot \left(\frac{Tr}{TE} - 1 \right)$$

Da für die Kurse gegen die See $\gamma=0^\circ$ und mit der See $\gamma=180^\circ$ der $\cos \gamma = \pm 1$ ist, erhält man durch Einsetzen der jeweiligen Begegnungsperiode TE für die Grenzen des Resonanzbereiches die Formeln für die entsprechenden Begegnungsgeschwindigkeiten gemäß den obigen Verhältnissen z.B. $TE = Tr / 0,8$ bzw. $TE = Tr / 1,1$ (Abbildung 28).

Die Ergebnisse werden dann in ein Polardiagramm eingetragen wie in Abbildung 27 ähnlich einer Radarspinne, allerdings mit Geschwindigkeitswerten an den Achsen anstelle der sonst verwendeten Distanzen. Die Seegangsrichtung wird als gerade Linie eingefügt und entlang dieser Linie die Geschwindigkeiten abgetragen – positiv entgegen der See und negativ mit der Seegangsrichtung. In dem Bild sind diese Punkte durch kleine Kreise und Ziffern gekennzeichnet, die entsprechend der jeweiligen Formel in Abbildung 28 nummeriert sind. Zusätzlich sind noch die Formeln zur Berechnung der Gebiete für die Gefährdung durch Surfing sowie durch Begegnung mit hohen Wellengruppen aufgeführt. In Abbildung 27 ist ein allgemeines Beispiel für ein Frachtschiff mit den angegebenen Daten verwendet worden.

Mit der Eintragung der Ergebnisse für dieses Beispiel in das Resonanzdiagramm können die folgenden Bereiche für Gefahrensituationen markiert werden:

Die synchrone Erregung wird als (roter) Streifen über den gesamten Winkelbereich des Polardiagramms dargestellt, orthogonal zur Seegangsrichtung. Dieses Gebiet repräsentiert die Bereiche $0,8 \leq Tr / TE \leq 1,1$; in der Mitte ist eine Linie dargestellt für die direkte Resonanz $TE=Tr$.

Die parametrische Erregung wird nur für einen Sektorbereich für einen Winkelbereich von ca. 30° um die Seegangsrichtung für Gegensee bzw. achterliche Seegangsrichtungen dargestellt. Dieses Gebiet repräsentiert die Bereiche $1,8 \leq Tr / TE \leq 2,1$; in der Mitte ist eine Linie dargestellt für die direkte parametrische Resonanz $TE=2 \cdot Tr$.

Gefährliche Surfriding-Bedingungen treten in Zonen von $+45$ bis -45° um die Seegangsrichtung in achterlicher See auf, deren Grenzwerte für die Geschwindigkeiten wie folgt berechnet werden können: $V_{surf} 1,8$ repräsentiert den Beginn der kritischen Geschwindigkeit, die bis $V_{surf} 3,0$ reicht. Darunter befindet sich die marginale Zone, bei der die Gefahr für Surfriding noch besteht. Sie beginnt bei $V_{surf} 1,4$.

Gefährliche Begegnung mit Wellengruppen treten auf in achterlicher See in Zonen von $+45$ bis -45° um die Seegangsrichtung, deren Grenzwerte für die Geschwindigkeitsbereich $0,8 < V/T < 2$ gezeichnet werden können aus den unteren $V_{DWGr_0,8}$ und oberen Grenzen $V_{DWGr_2,0}$

Falls Resonanznähe auf dem gegebenen Kurs besteht, kann eine Abschätzung von Maßnahmen visuell aus dem Polardiagramm leicht vorgenommen werden: als Änderung von Kurs, Geschwindigkeit bzw. Maßnahmen zur Stabilitätsveränderung, d.h., Bestimmung von alternativen GM-Werten um Resonanz zu verhindern, falls Kurs und Geschwindigkeit mit der Erregungsperiode so beibehalten werden sollen. Dadurch muss der Resonanzstreifen so weit verschoben werden, dass diese Bedingungen an seinem Rand liegen, und das Schiff nahezu ohne Resonanz fahren kann.

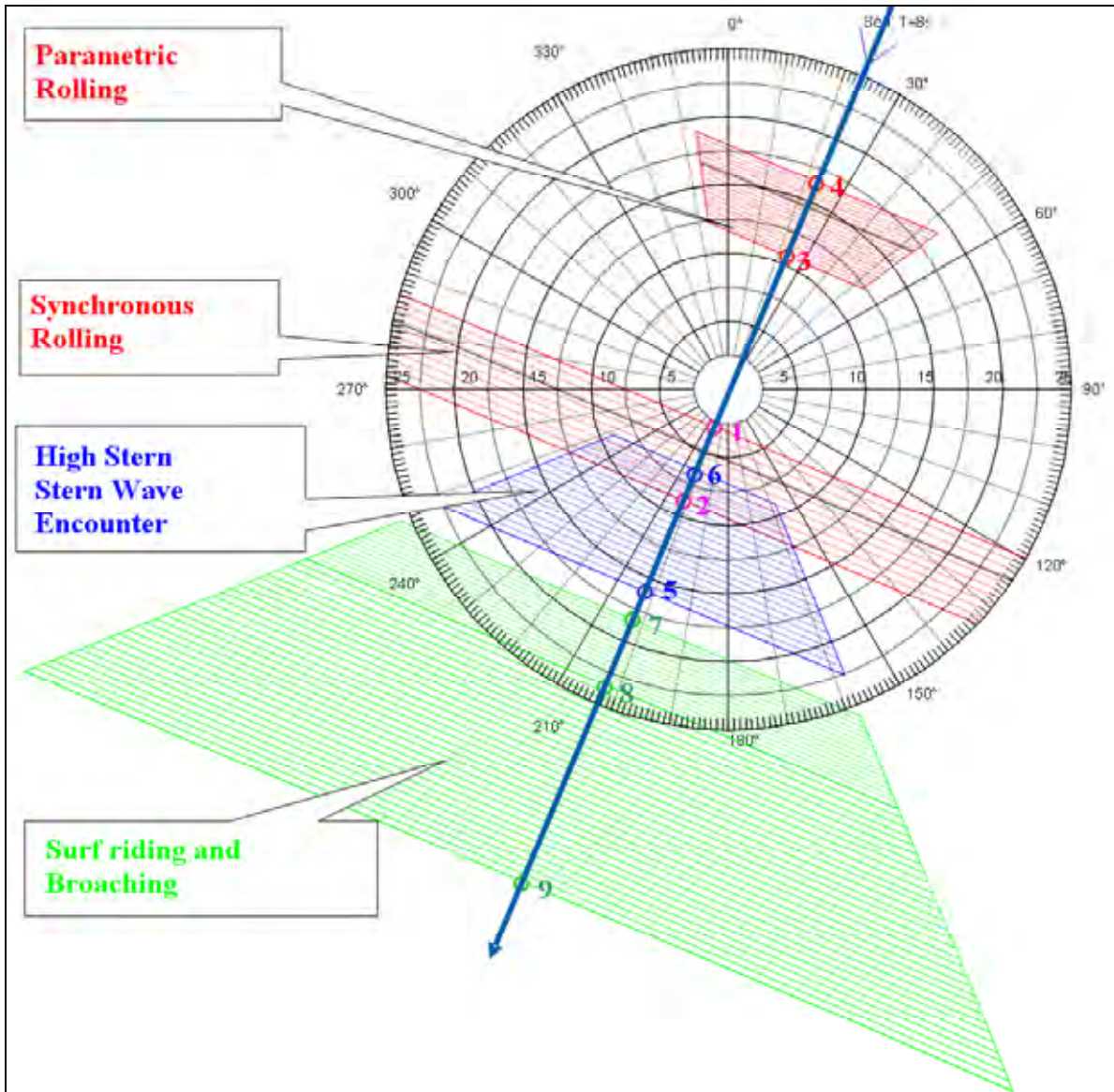


Abbildung 27: Ergebnisdarstellung im Polardiagramm mit Gefahrengebieten, berechnet mit den entsprechenden Formeln aus Abb. 28, bezeichnet mit den farbigen Kreisen.

(Beispiel-Schiff: $L_{pp}=170\text{ m}$, $B = 17,6\text{ m}$; Trägheitskoeffizient für Rollen $C_r = 0,74$; d.h., $T_r=Tr(10^\circ)=10\text{ s}$; Seegang aus 23° mit $T_w= 8\text{ s}$ in Dünung ($k=1,56$))

Phenomena	Direction / Sector/Area	Equations to Calculate the speed values as basis for the Diagram Elements (numbers acc. to circles in figure 27)	
1. Synchronous rolling motion resonance	Stripe segments over diagram; All directions possible	1. for TE=Tr/0.8: $V_{0.8} = \frac{k \cdot T_w}{0.514} \cdot \left(\frac{T_w}{Tr/0.8} - 1 \right)$	2. for TE=Tr/1.1: $V_{1.1} = \frac{k \cdot T_w}{0.514} \cdot \left(\frac{T_w}{Tr/1.1} - 1 \right)$
2. Parametric rolling motion resonance	Segment for direct head and stern wave conditions +/-30°	3. for TE=Tr/1.8: $V_{1.8} = \frac{k \cdot T_w}{0.514} \cdot \left(\frac{T_w}{Tr/1.8} - 1 \right)$	4. for TE=Tr/2.1: $V_{2.1} = \frac{k \cdot T_w}{0.514} \cdot \left(\frac{T_w}{Tr/2.1} - 1 \right)$
3. Reduction of stability riding on the crest in wave groups	Segment for direct Following and quartering seas +/-45°	5. $V_{DWaveGr_{0.8}} = -0.8 * T_w$ 6. $V_{DWaveGr_{2.0}} = -2.0 * T_w$	
4. Surfriding and broaching to	Segment for direct Following and quartering seas +/-45°	7. $V_{surf_{1.4}} = -1.4 * \sqrt{Lpp}$ (marginale Zone) 8. $V_{surf_{1.8}} = -1.8 * \sqrt{Lpp}$ 9. $V_{surf_{3.0}} = -3.0 * \sqrt{Lpp}$	

Abbildung 28: Zusammenstellung der Seegangs-Effekte und Formeln für die Berechnung der Werte zur Darstellung im Polardiagramm Abb. 27

Prinzipiell kann eine Situationseinschätzung also sogar mit Hilfe eines manuell berechneten und gezeichneten Diagramms vorgenommen werden. Für komplexere Situationen, falls zum Beispiel mehrere Wellensysteme vorhanden sind, ist es doch wesentlich günstiger, sich die Situationsauswertung durch Computerunterstützung zu erleichtern, z.B. durch die nachfolgend benutzte Software.

5.3.2.4 Erweiterte Gefährdungseinschätzung mit Programm ARROW

5.3.2.4.1 Kurzbeschreibung des Programms

Das Software Programm ARROW (Avoid Rolling Resonances Or Wave impact) wurde entwickelt, um potentiell gefährliche Situationen leichter berechnen und durch eine übersichtliche Darstellung besser erkennen zu können (Abb. 29). Es erlaubt die schnelle Variation der relevanten Parameter zur Entscheidungsfindung unter Beachtung der genannten Gefahren in der aktuellen Situation und bei der Reisplanung. Ausführliche Beschreibungen finden sich in [11], [11], [13]. Nur wenige Daten für Schiff und Seegangsbedingungen sind zur Eingabe in das Dateninterface Ship Parameter Input (links oben) sowie Wave Parameter Input (links unten) nötig, um sich eine Darstellung der Ergebnisse im Result Display (rechts) ausgeben zu lassen.

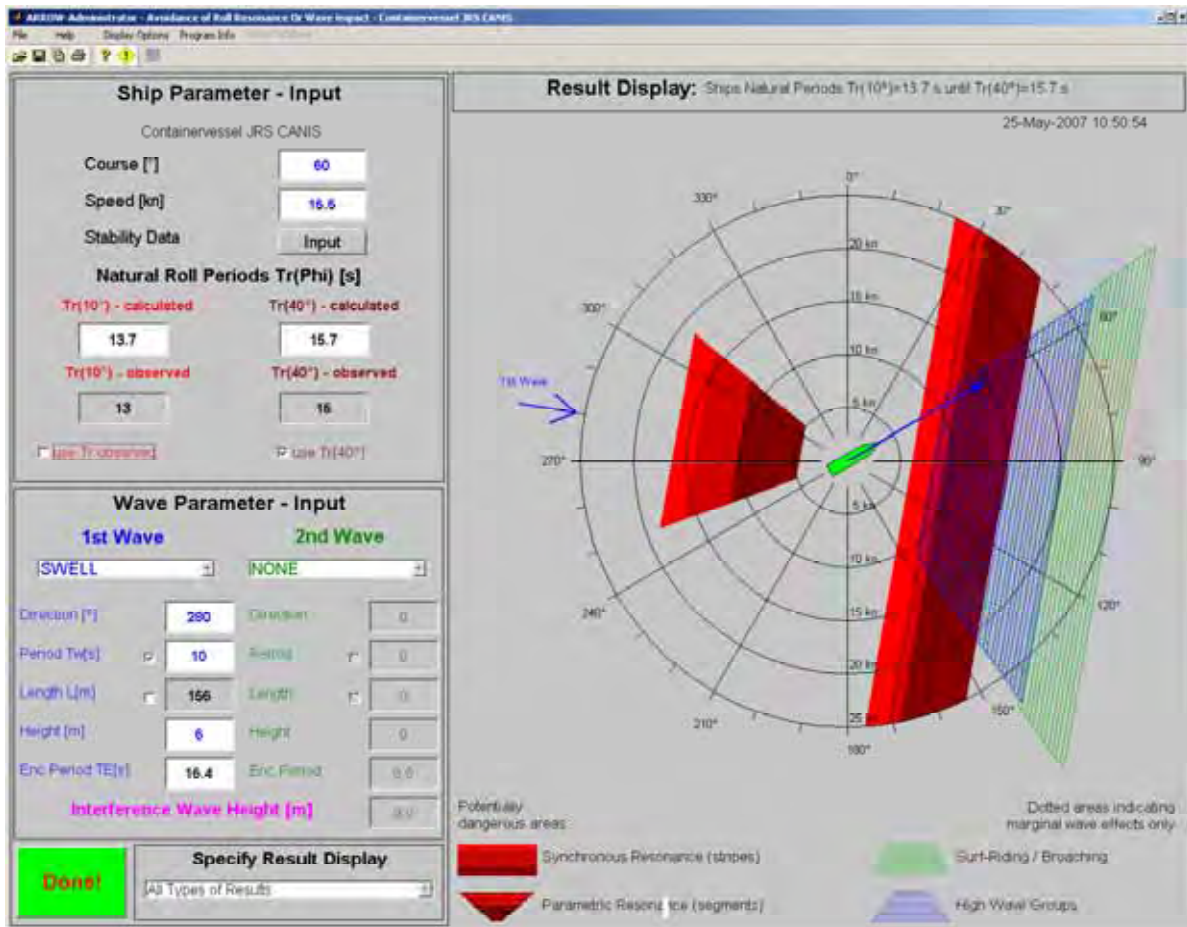


Abbildung 29: ARROW Programm – Überblick der Bedienoberfläche mit Daten der Unfallsituation CV JRS CANIS als Ergebnisse zur Gefahreinschätzung für Tw=10 s.

Der Kurs des Schiffes und die Geschwindigkeit können in die entsprechenden Datenfelder eingetragen werden, ihre graphische Anzeige erfolgt sofort im Result Display als Schiffskontur und dem Geschwindigkeitsvektor in der entsprechenden Kursrichtung.

Die Eigenrollperiode des Schiffes kann

- a) entweder aus den Stabilitätsdaten berechnet oder
- b) direkt aus beobachteten Rollzeitmessungen eingetragen werden.

a) Für die Eingabe der Stabilitätsdaten kann das Stability Data Window (Abb. 30 links) genutzt werden, in dem die eingegebenen Hebelarme in der graphischen Darstellung zusammen mit der Tangente entsprechend dem GM Wert erscheinen. Entsprechend dem eingegebenen Tiefgang wird der Trägheitskoeffizient Cr berechnet, der in dem rechten Fenster dargestellt ist.

b) Alternativ kann die Rollzeit des Schiffes auch aktuell aus Beobachtungen ermittelt und direkt eingetragen werden, in diesem Fall ist die Checkbox zu aktivieren bzgl. "calculated" oder "observed" Rollperioden.

Für die Eingabe der Wellenparameter werden bis zu zwei unterschiedliche Wellensysteme akzeptiert, falls z.B. Windsee und Dünung aus unterschiedlichen Richtungen kommen. Nur wenige Seegangparameter sind erforderlich, entweder von Beobachtungen auf dem Schiff oder von Wetterberichten bzw. Vorhersagen.

Große Vorzüge bietet die Kopplung von ARROW mit einem Wetterroutungsprogramm (hier z.B. „Bon Voyage“ von AWT), sodass diese Kombination hervorragend zur Gesamteinschätzung der Situation Reiseplanung genutzt werden kann, neben der Stand alone Anwendung von ARROW.

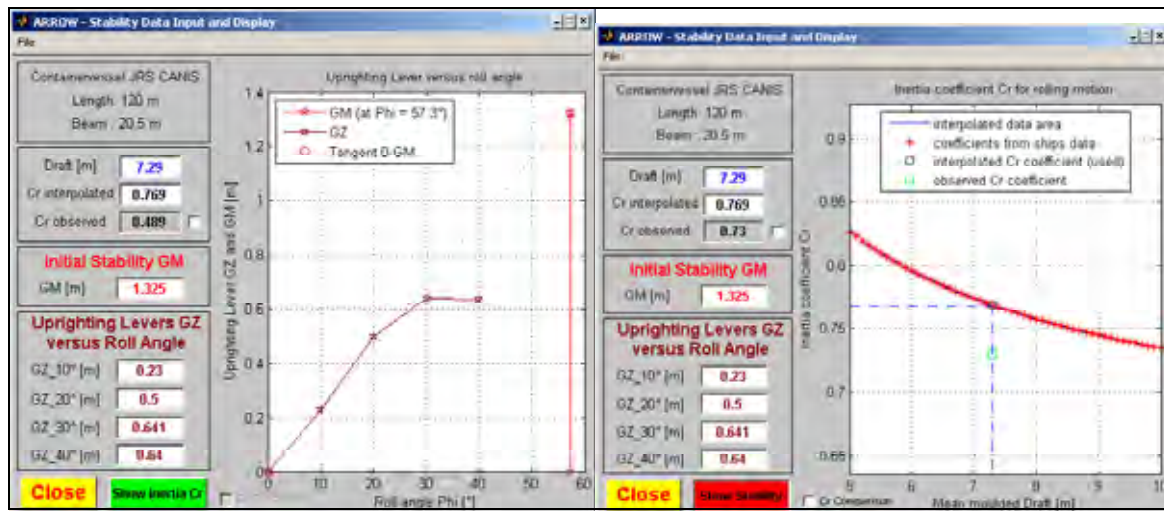


Abbildung 30: Stability Data Window – Hebelarmkurve über dem Rollwinkel mit Tangente entsprechend dem GM-Wert (links) und Kurve des Trägheitskoeffizienten Cr für Rollen über dem Tiefgang

Das Polardiagramm liefert eine Übersicht über die kritischen Kurse und Geschwindigkeitsbereiche in Form der Streifen und Sektoren für die Resonanzgefahr und für andere Gefahren bei Fahrt durch hohe achterliche Wellengruppen und durch Surfing entsprechend den IMO-Guidelines. Alle unterschiedlichen Gefahrenarten werden durch verschieden Farben und Muster kenntlich gemacht - entsprechend der Legende unten rechts.

Auch für große Rollamplituden wird die potentielle Resonanzgefahr deutlich gemacht. Die braunen Gebiete für $Tr(40^\circ)$, angrenzend an die roten Gebiete für kleine Rollwinkel $Tr(10^\circ)$ (Abb. 29).

Falls sich die Spitze des Geschwindigkeitsvektors in einem oder mehreren der Gefahrengebiete befindet, ist das Schiff potentiell in einer Gefahrensituation. In diesem Fall können entweder Schiffsgeschwindigkeit oder Kurs geändert werden, um das Schiff aus der Gefahrensituation herauszubringen. Alternativ kann die Stabilität variiert werden. Mit Hilfe der Software kann eine optimale Variante schnell durch zielgerichtete Versuche herausgefunden werden.

5.3.2.4.2 Beispielrechnungen mit ARROW für die Unfallsituation

Für die Auswertung des Unfallzeitpunktes wurden die Daten des Schiffes und der Seegangsbedingungen in das Programm ARROW eingegeben. Nachfolgend werden die Ergebnisse dargestellt und diskutiert.

Die Eingabe der Stabilitätsdaten zeigt in der graphischen Darstellung von Abb. 30, dass die Hebelarmkurve stark von der Tangente abweicht, die mit Hilfe des GM Wertes bei $57,3^\circ$ zum Ursprung gebildet wird. Als Ergebnis wird im Ship Data

Bereich (Abb. 29) angezeigt, dass sich die Rollperioden für kleine und große Rollwinkel stark unterscheiden.

Das hat zur Folge, dass die potentiellen Resonanzgebiete größer werden, weil für mehrere Perioden Resonanz möglich ist. Diesen Unterschied kann man sehen beim Vergleich der Darstellungen von Abb. 29, bei der alle Bereiche der Rollperioden $Tr(10^\circ)$ bis $Tr(40^\circ)$ dargestellt werden und Abb. 31, wo nur die Bereiche für $Tr(10^\circ)$ zu sehen sind. Hervorzuheben ist, dass für die roten Bereiche für Resonanz bei kleineren Rollwinkeln die Amplituden bei Zunahme der Wellenanregung stetig ansteigen, während im braunen Bereich für Resonanz nur bei großen Rollwinkeln die gefährliche Situation besteht, d.h., dass die Resonanz erst einsetzt, wenn erst einmal diese großen Rollwinkel durch eine auch nur kurzzeitige Anfangsstörung erreicht wurden!

Neben den Berechnungen der Gefahrengebiete für die schon erwähnte Periode $T_w = 10$ s (Abb. 29 und Abb. 31), wurden auch die Berechnungen für Periode $T_w = 11$ s (Abb. 32) und für Wellenperiode $T_w = 12$ s (Abb. 33) durchgeführt.

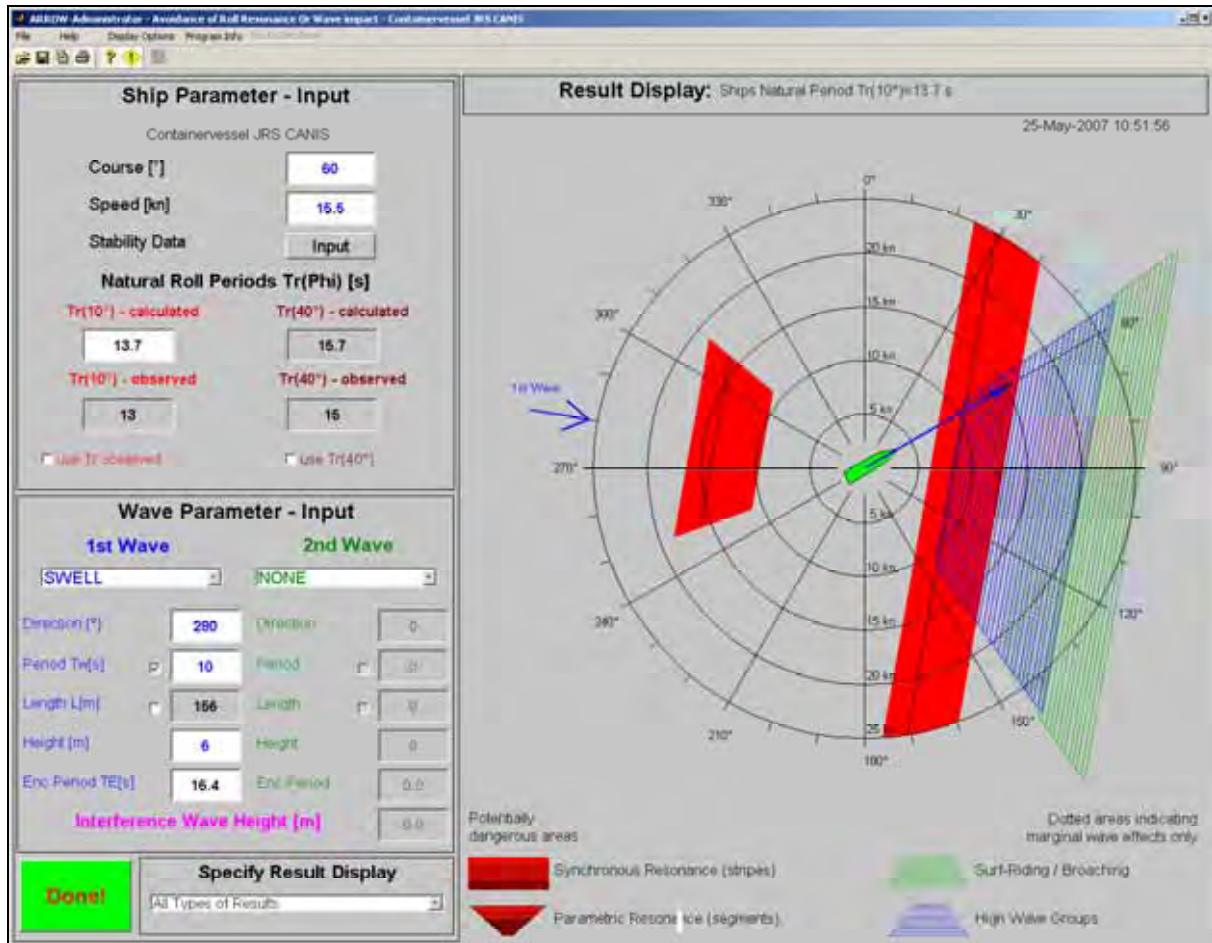


Abbildung 31: Ergebnisse zur Gefahreinschätzung für $T_w=10$ s - hier ohne $Tr(40^\circ)$.
(ARROW Anwendung für JRS CANIS)

Aus der vergleichenden Auswertung dieser Daten kann die folgende Schlussfolgerung gezogen werden:

Das Schiff befindet sich für alle drei Perioden im braunen Streifen des Resonanzbereichs für synchrone Resonanz für große Rollwinkel. Für die Periode $T_w=10$ s liegt sogar fast direkte Resonanz vor! Für die Perioden $T_w=10$ und 11 s befindet sich das Schiff wegen der Überlappung der Bereiche auch gleichzeitig im Bereich des Resonanzstreifens für kleine Rollwinkel. Unter solchen Umständen kann es schon bei anfangs kleinen Rollamplituden zur Anfachung der Rollschwingungen durch den schräg achterlichen Seegang kommen, die dann bei großen Rollwinkeln richtig in den kritischen Resonanzbereich kommen. Es ist einzuschätzen, dass dies der Grund für die starken Rollschwingungen des Schiffes zum Unfallzeitpunkt gewesen sein wird. Zusätzlich befindet sich das Schiff für diesen Kurs und Geschwindigkeit in dem Segment mit blauen Streifenlinien, d.h., in einem Zustand, wo es beim Begegnen mit Wellengruppen (High Wave Group Encounter - successive high wave attack) sehr lange auf den Wellenberg verweilt und dabei nur eine sehr geringe Stabilität mit geringen aufrichtenden Hebelarmen hat.

Es wurde beschrieben, dass zum Unfallzeitpunkt eine langsame Änderung des Kurses nach Backbord auf ca. 030° erfolgte: dies bedeutet ein potentiell gefährliches Durchfahren des direkten Resonanzbereiches, was auf jeden Fall mit großer Vorsicht und besser schnell und durchgreifend geschehen sollte.

Dazu wäre allerdings eine Entscheidungsunterstützung in Form einer Gesamtübersicht über potentielle Gefahrenbereiche, z.B. in Form eines Polardiagramms nötig. Mit solchen Informationen als Teil der Reisevorbereitung hätte der Kapitän schnell entsprechende Entscheidungen treffen können. Entsprechende Verfahren sind aus der Literatur bekannt und Gegenstand der Lehre und Fortbildung an Schiffsoffiziers-Ausbildungsstätten. Auch die Richtlinie [8] enthielt konkrete Anleitungen für die Erstellung solcher Entscheidungshilfen (in diesem Zusammenhang wird es als Rückschritt angesehen, dass in der neuen Fassung der Richtlinie [9] solche konkreten Berechnungshilfen und Darstellungen nicht mehr vorhanden, sondern nur verbale Formulierungen enthalten sind).

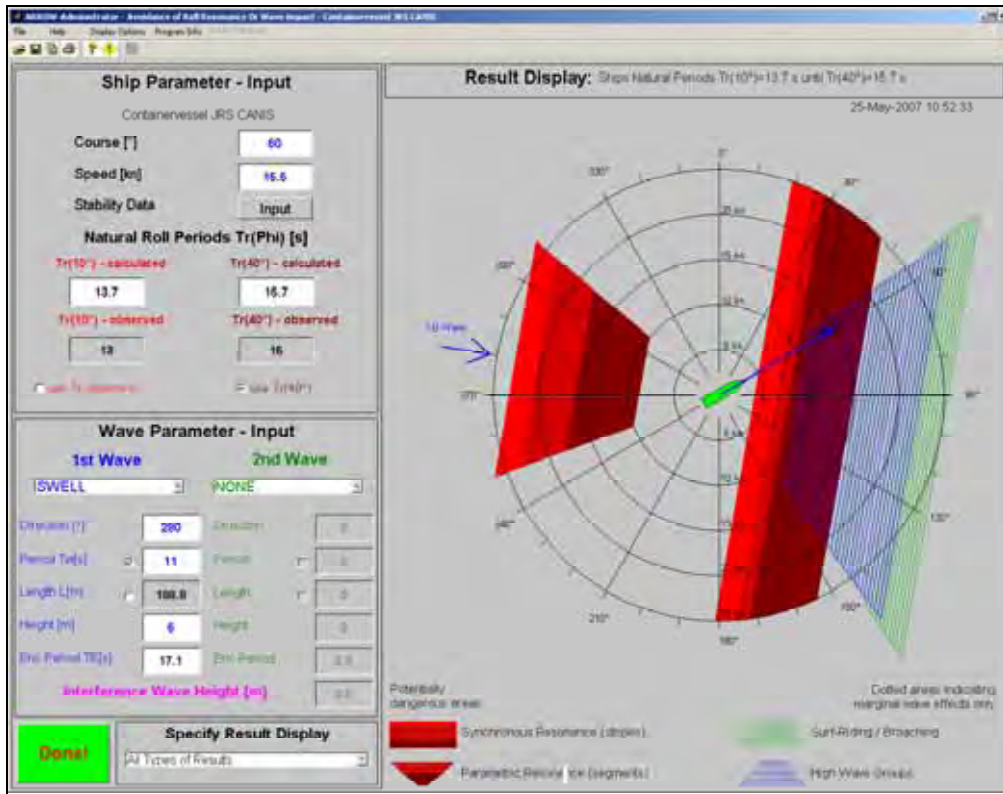


Abbildung 32: Ergebnisse zur Gefahreneinschätzung für $T_w=11$ s (ARROW für CV JRS CANIS)

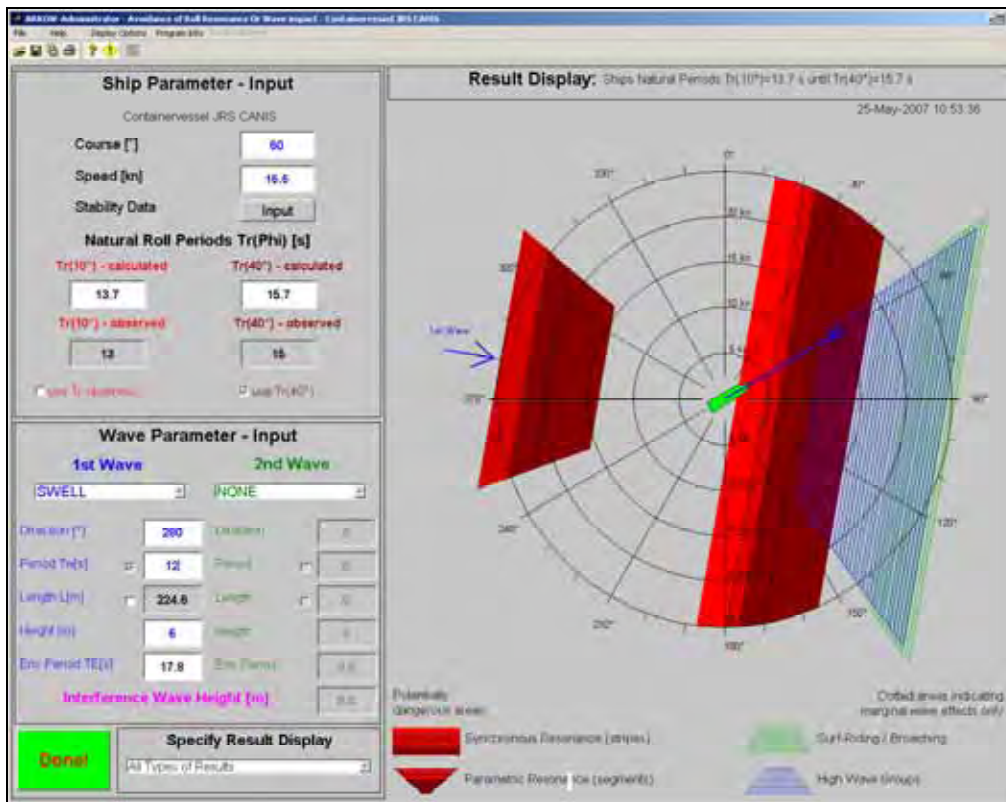


Abbildung 33: Ergebnisse zur Gefahreneinschätzung für $T_w=12$ s (ARROW für CV JRS CANIS)

5.3.2.5 Möglichkeit der Erkennung der Gefahr und Gefahrenvermeidung

5.3.2.5.1 Möglichkeiten der Datenbeschaffung für Wetter und Seegang

Es bestehen verschiedene Möglichkeit, dass sich Kapitäne vor Abfahrt ihres Schiffes oder auch aktuell während der Reise Informationen über das Wetter und die zu erwartenden Seegangsrichtungen und -perioden besorgen können, speziell für die Deutschen Reviere oder auch weltweit.

Dafür stehen sowohl Wetterdienste wie der DWD als auch andere weltweit operierende Routingfirmen, wie z.B. Applied Weather Technology (AWT) u.a. zur Verfügung. Für zwei ausgewählte Vertreter sollen hier beispielhaft einige Angaben zusammengestellt werden.

5.3.2.5.2 Vorhersagen und Service vom Deutschen Wetterdienst DWD

Beispielsweise bietet der Deutsche Wetterdienst solche Daten über die zu erwartenden Seegangsrichtungen und -perioden speziell für die Deutschen Reviere oder auch weltweit an. Dabei enthalten kostenlose Seewetterinformationen meist nur eingeschränkte Daten, selbst die kostenpflichtigen Informationen aus dem Standard „Wettershop“ enthalten beispielsweise keine Seegangperioden (Abb. 34). Speziell zugeschnittene Serviceleistungen können direkt durch vertragliche Bindungen für spezielle Routen und Gebiete erbracht werden, wie das Beispiel für den Fährverkehr Ostsee zeigt (Abb. 35). Auch weltweiter Routingsservice wird angeboten.

Anhand von Seewetterinformationssystemen als eine Art Selfbriefing-System für Skipper und Kapitäne, können sich Kapitäne individuell und selbständig vor und während der Reise über aktuelle und zukünftige Wind-, Wetter- und Seegangsverhältnisse europaweit informieren (Abb. 36). Die Seewetterinformationssysteme, z.B. metferry oder seewis, ermöglichen den Abruf von aktuellen Wetterdaten und Vorhersagen in komprimierter Form (ZIP-Archiv) über Telefon/Modem/DSL und ihre Darstellung auf einem PC oder Notebook.


Wettervorhersage für Kieler /Eckernförder Bucht

herausgegeben am Dienstag, dem 15. 1. 2002, 5 Uhr

Deutscher Wetterdienst, Geschäftsfeld Seeschifffahrt, Hamburg

K1 Damp 54.62N 10.22E													
Tag	Di,15	Di,15	Di,15	Di,15	Di,15	Mi,16	Mi,16	Mi,16	Mi,16	Mi,16	Mi,16	Mi,16	
Stunde	09	12	15	18	21	00	03	06	09	12	15	18	
Richtg	S	S	S	S	S	S	S-SW	S-SW	SW	SW-W	SW	SW	Windrose
Wind	5	4-5	4-5	4-5	5	4-5	4-5	4	3-4	3	3-4	4	Beaufort
Boeen													Beaufort
Wellen	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	Meter

Abbildung 34: Beispiel für kommerzielle Wetterangaben des DWD aus dem „Wettershop“ – allerdings ohne Wellenperioden (<http://www.dwd-shop.de/>)

DWD Marine Weather Info System		Mecklenburg-Vorpommern								
Voyage Forecast		Departure Rostock: 07 05 07 15:15 LT								
		Arrival Trelleborg: 07 05 07 20:59 LT / Mean speed:15 kt								
	No	Position	LT	Wind[kt]	Wind waves	height [m]	height [m]	Current		
				[Bft]	[m/s]	[s]	Length [m]	[s]	Length [m]	
	1	54.23N	07 05 07	✓	→	→	→	→		
		12.07E	15:34 LT	3-4	5	3s	14	4s	25	0.0
	2	54.51N	07 05 07	✓	→	→	→	→	→	
		12.04E	16:42 LT	3	4	3s	14	4s	25	0.3
	3	54.72N	07 05 07	✓	→	→	→	→	→	
	12.33E	17:46 LT	3-4	5	3s	14	4s	25	0.1	
4	54.93N	07 05 07	✓	→	→	→	→	↘		
	12.62E	18:51 LT	4	6	3s	14	4s	25	0.2	
5	55.13N	07 05 07	✓	→	→	→	→	↘		
	12.85E	19:48 LT	4	6	3s	14	4s	25	0.2	
6	55.31N	07 05 07	✓	→	→	→	→	↘		
	13.02E	20:37 LT	3-4	5	3s	14	4s	25	0.1	

Warnings	Trend On Route	Navigation
	tit [UTC] Waves Wind 06.05/02 0 m 4-5 Bft (8 m/s) 07.05/01 1 m 5 Bft (9 m/s)	NAVIGATIONAL WARNINGS of the past 72 hours GERMAN BIGHT and BALTIC SEA (west of 14E) NO MESSAGES RECEIVED

Datenbasis vom:
DWD and BSH: 06.Mai.2007 01 UTC
erstellt am: 07.Mai.2007 11:29 LT

Abbildung 35: Beispiel für kommerzielle Wetterangaben des DWD aus speziellen, individuellen Routenberatungen für Fährverkehr in der Ostsee

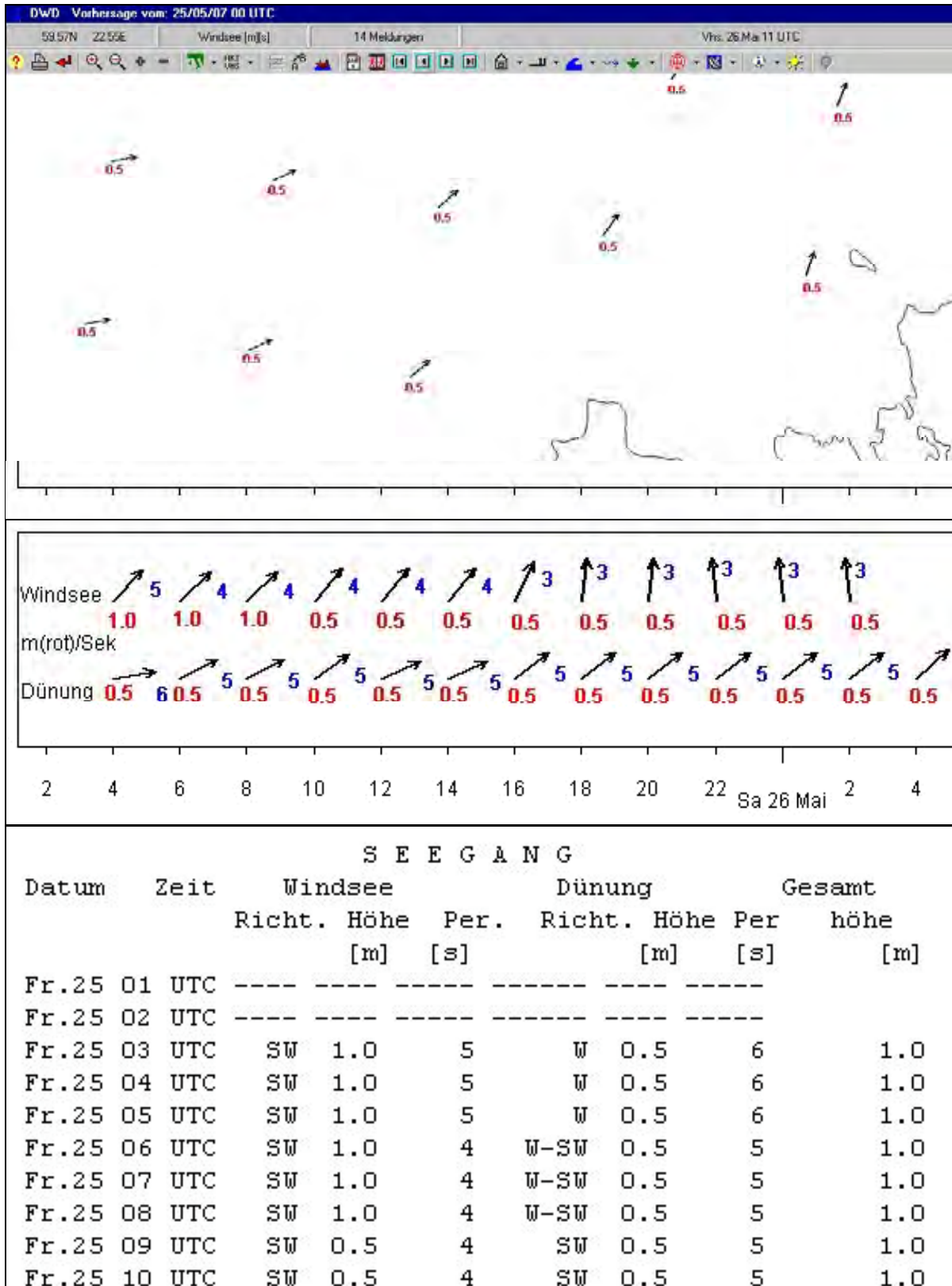


Abbildung 36: Screenshots von professionellen Seegangsvorhersagen in den Seewetterinformationssystemen des DWD

5.3.2.5.3 Routungsberatung und bordgestütztes Routungsprogramm von Applied Weather Technology (AWT)

Als weltweit agierendes Routungsunternehmen bietet AWT

- sowohl die landgestützte Beratung der Schifffahrt über seine Routungszentren an: Die Routungs-Empfehlungen werden dabei konkret an Land erstellt und an die Schiffe gesandt.
- als auch eine bordgestützte Routenerarbeitung: Aufgrund der an das Schiff übermittelten Wetterdaten ermöglichen Software-Pakete wie „Bon Voyage“ die Routenerarbeitung und Optimierung an Bord durch die Besatzung selbst.

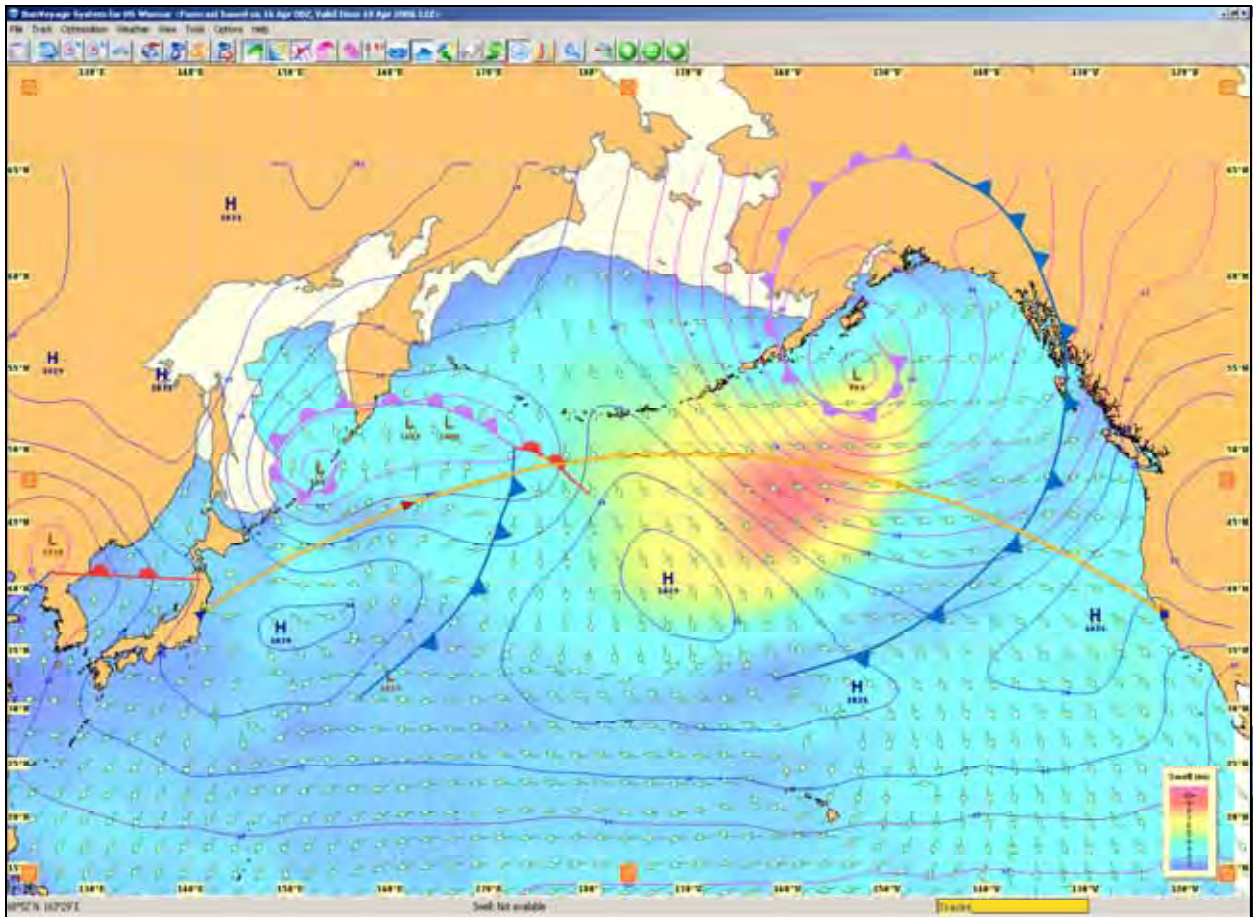


Abbildung 37: Screenshot von bordgestützter Routenerarbeitung mit professioneller Wetter- und Seegangsvorhersage in der Routungs-Software „Bon Voyage“ von AWT

5.3.2.5.4 Abschätzung von aktuellen Seegangsdaten an Bord

Hierzu gibt es einerseits die konventionelle Methode der Messung der Seegangperiode mit Stoppuhr oder über Abschätzung Wellenlänge im Vergleich zur Schiffslänge: Zum Ermitteln der Wellenperiode TW misst man z.B. mit der Stoppuhr mehrmals die Zeit, die ein von brechenden Wellen verursachter Schaumfleck für eine vollständige Abwärts- und Aufwärtsbewegung braucht, also zwischen zwei aufeinander folgenden oberen Positionen.

Andererseits sind auch aufstrebende Technologien vorhanden, bei der die Messung durch Radar mit anschließender Datenverarbeitung zur Ermittlung der Wellenparameter erfolgt (z.B. WaMoS Wave and Surface Current Monitoring System siehe http://www.sea-image.com/wamos_intro.htm).

5.3.2.6 Möglichkeiten der Berechnung zur Erkennung der Gefahr bzw. Entscheidungsvorbereitung für ihre Vermeidung

5.3.2.6.1 Grundsätzliche Berechnungsmethoden

Vorteilhaft für eine Gefahreinschätzung ist die Berechnung und Situationsdarstellung im Polardiagramm, wozu es folgende zwei Möglichkeiten gibt:

A) Berechnung potentieller Gefahrengebiete für Resonanz und andere Gefahren wie Stabilitätsgefährdung durch hohe, achterliche Wellen und Surfing in qualitativer Darstellung:

Dieses Verfahren wird als Grundlage der Einschätzung in diesem Gutachten benutzt. **Es hat den Vorteil, dass man nur wenige repräsentative Daten für eine vereinfachte Modellierung des Seeganges und der Schiffsdynamik benötigt. Es werden aber keine konkreten Zahlen für zu erwartende Amplituden vorhergesagt, sondern eben nur potentielle Gefahrengebiete**, diese aber basierend auf der gesicherten Erkenntnis, dass diese Gefahren z.B. dann auftreten, wenn die eigene Rollperiode des Schiffes und die Begegnungsperiode in bestimmten Verhältnissen zueinander auftreten und so zu Resonanzen führen. **Diese Methode macht aber eine Einschätzung von Tendenzen und eine Ableitung der Richtung von Kurs- oder Geschwindigkeitsänderungen möglich, die insbesondere zusammen mit der Erfahrung der Schiffsoffiziere für das Verhalten ihres speziellen Schiffes bei bestimmten Seegangshöhen nützlich ist.**

Großer Vorteil dieser Methode ist aufgrund ihrer Einfachheit sogar die Möglichkeit, manuell vorbereitete Diagramme zur Reisevorbereitung mit den Daten von Vorhersagen oder aus aktuellen Daten zur Situationseinschätzung selbst vorzubereiten und an Bord zu nutzen. Vorzugsweise kann man solche Polardiagramme zeichnen, nach den Verfahren wie im Kap. 5.4.3 und [10] [12] ausführlich beschrieben, oder auch alternative Methoden durch Vorbereitung von mehreren Diagrammen für verschiedene Rollzeiten des Schiffes benutzen, wie sie in den Richtlinien [8] beschreiben wurden.

Für komplexere Aufgaben, wie z. B. Voyage Planning und Wetterrouting auf längeren Reiseabschnitten und vor allem für Optimierungsaufgaben mit Berechnung mehrerer Varianten, sind Softwaretools wie z. B. ARROW nötig.

B) Berechnung von Amplituden der Rollschwingungen durch Simulation der Bewegung des Schiffes im Seegang oder auf der Basis von Übertragungsfunktionen als quantitative Darstellung:

Dieses Verfahren wird in komplexen Tools, wie z. B. dem OCTOPUS System von AMARCON mit dem „Ship Routing Assistent“ (SRA) vom Germanischen Lloyd GL oder auch dem SeaSENSE System von FORCE Technology angewendet, die sogar die Berechnung der Belastungen des Schiffes im Seegang im Rahmen ihres Leistungsspektrum angeben.

Solche Vorhersage-Ergebnisse von Amplitudenberechnungen sind allerdings noch mit Unsicherheiten behaftet und die Verlässlichkeit ist eingeschränkt. Außerdem sind diese Systeme mit hohen Kosten verbunden (insbesondere bei Kopplung mit Wellenradar) und verlangen umfangreiche Datenaufbereitung für die Seegangs- und Schiffsdaten.

5.3.2.6.2 Konkrete Möglichkeit für die Besatzung zur Erkennung der Gefahr (Ermittlung von Polardiagrammen zur Klärung der Vermeidung)

Es sollen hier zwei Betrachtungen angestellt werden, welche Möglichkeiten bei geringer Ausstattung und bei Vorhandensein professioneller Software bestanden hätten:

- 1) Prinzipiell hätte die Besatzung in einfacher Weise die Rollzeit aufgrund der gegebenen Stabilitätsdaten des Schiffes oder durch Messung des Schiffes ermitteln müssen, und auch eine Schätzung der potentiellen Seegangsdaten aus den Wetterinformationen vornehmen können. Daraus wäre bei der Reiseplanung eine einfache Auswertung der Gefahrensituation möglich gewesen:
 - Die Berechnung der Rollzeit für kleine und große Rollamplituden hätte wie in Kapitel 5.4.1.2 beschrieben durchgeführt werden können.
 - Entsprechend der Wettervorhersagen mit den Starkwindmeldungen kann man in der Nordsee von Seegangsperioden von ca. $T_w \approx 10 - 12$ s ausgehen
 - Wendet man mit diesen Daten die Verfahren zur Auswertung der Situation im Polardiagramm an, wie in Kapitel 5.4.3, kann man feststellen, dass sich das Schiff auf den betreffenden Reiseabschnitten in Resonanzgefahr befindet. Daraus sind Entscheidungen ableitbar, z.B. für die entsprechend verstärkte Ladungssicherung oder Maßnahmen zur Änderung der Rollzeit durch Stabilitätsänderung mittels GM-Änderung (sofern das möglich ist). Solche Variantenrechnungen sind manuell mit dem Taschenrechner möglich, aber aufwendig.
- 2) Bei höherer Ausstattung des Schiffes lassen sich solche Entscheidungen einfacher treffen, wie sich bei Anwendung von Reiseplanungstools wie „Bon Voyage“ von AWT und ARROW erkennen lässt:
 - Die Reise ist in Abb. 38 grob geplant von Bremerhaven bis Brunsbüttel. Die Wetter- und Seegangsdaten sind entlang der Reise für die einzelnen Wegpunkte zugewiesen entsprechend der damaligen Wettervorhersagedaten. Relevant sind für diese Betrachtung nur die seeseitigen Wegsegmente und nicht die Reiseabschnitte auf der Weser oder Elbe – sie sind hier nur der Vollständigkeit halber eingetragen.
 - Mit Hilfe von ARROW lässt sich für jeden Wegabschnitt die Situationseinschätzung machen; in Abb. 39 sind die Daten des Unfallzeitpunktes benutzt worden, entsprechend der Information aus dem

Fenster an der Unfallposition (kleines Fenster in Abb. 38). Das Schiff befindet sich in Resonanz, sowohl für das Hauptseegangssystem 1st Wave mit 5,6 m Wellenhöhe als auch für den kleineren Swell aus 263° und 2,1 m Wellenhöhe entsprechend dem 2nd Wave System.

- Falls man Stabilitätsänderungen vornehmen möchte, um aus der potentiellen Gefahrenzone herauszukommen, kann man Variantenrechnungen anstellen: Hier soll ein hypothetisches Beispiel angegeben werden, um den Vorteil der Nutzung solcher Programme zu zeigen (die genaue Beladung und die Möglichkeiten der Änderung, z.B. durch Ballast sind nicht bekannt):
 - i) Beispielsweise lässt sich für ein $GM = 0,8 \text{ m}$ ($=GM_{min}$) und damit $T_r = 17,8 \text{ s}$ in Abb. 40 erkennen, dass für das Hauptseegangssystem 1st Wave auf dem kritischen Kurs von 60° kaum noch Resonanzgefahr aus diesem Wellensystem mehr auftritt – der Pfeil des Geschwindigkeitsvektors befindet sich schon am Rand des Streifens, eine Fahrtreduzierung oder Kursänderung nach Backbord würde hilfreich sein.
 - ii) Stellt man beide Wellensystem dar, erkennt man in Abb. 41, dass für das 2nd Wave System in dieser Situation Resonanzgefahr besteht (allerdings mit den wesentlich kleineren Wellen), die Backbord-Kursänderung müsste also sehr durchgreifend vorgenommen werden, um den kritischen Sektor schnell zu durchfahren.

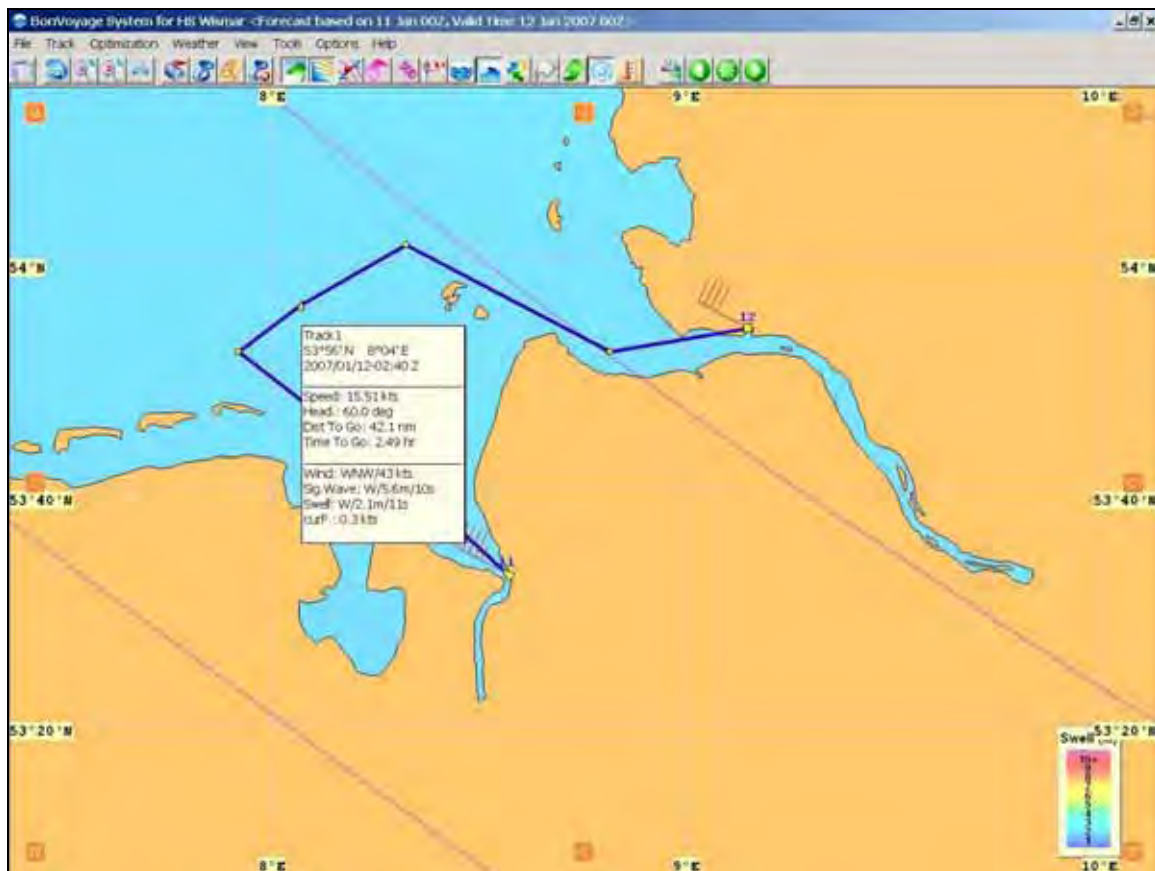


Abbildung 38: Screenshot von der Routings-Software „Bon Voyage“ von AWT für die geschätzte Route der JRS CANIS mit den damaligen Wettervorhersagedaten

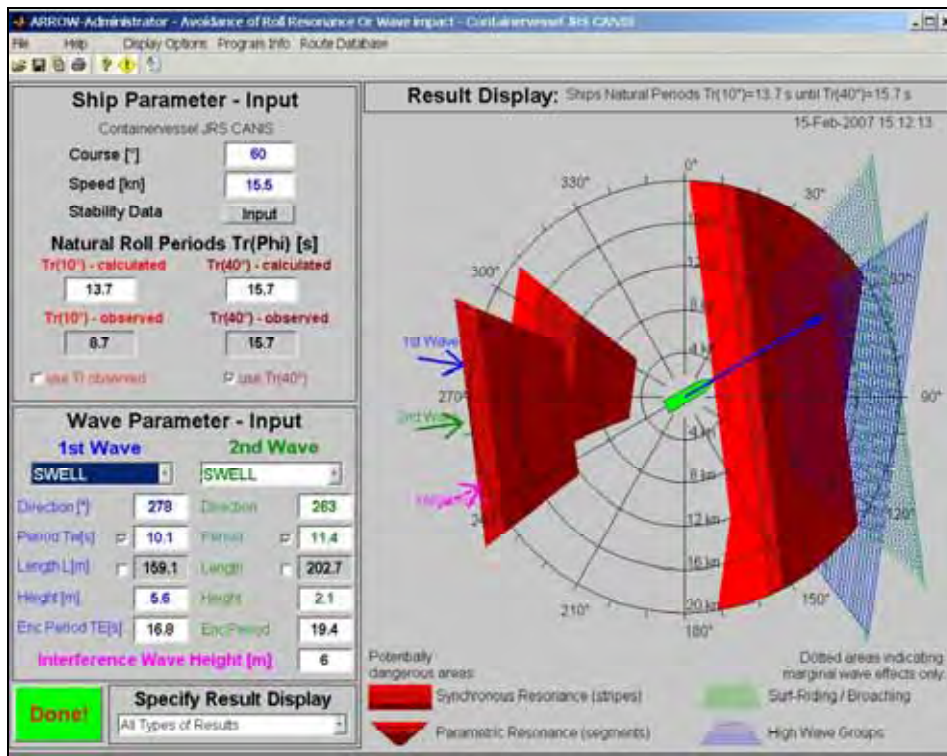


Abbildung 39: Screenshot von ARROW mit den Daten der aktuellen Situation aus Routungs-Software „Bon Voyage“ Abb. 38 entsprechend der zwei Wellensysteme

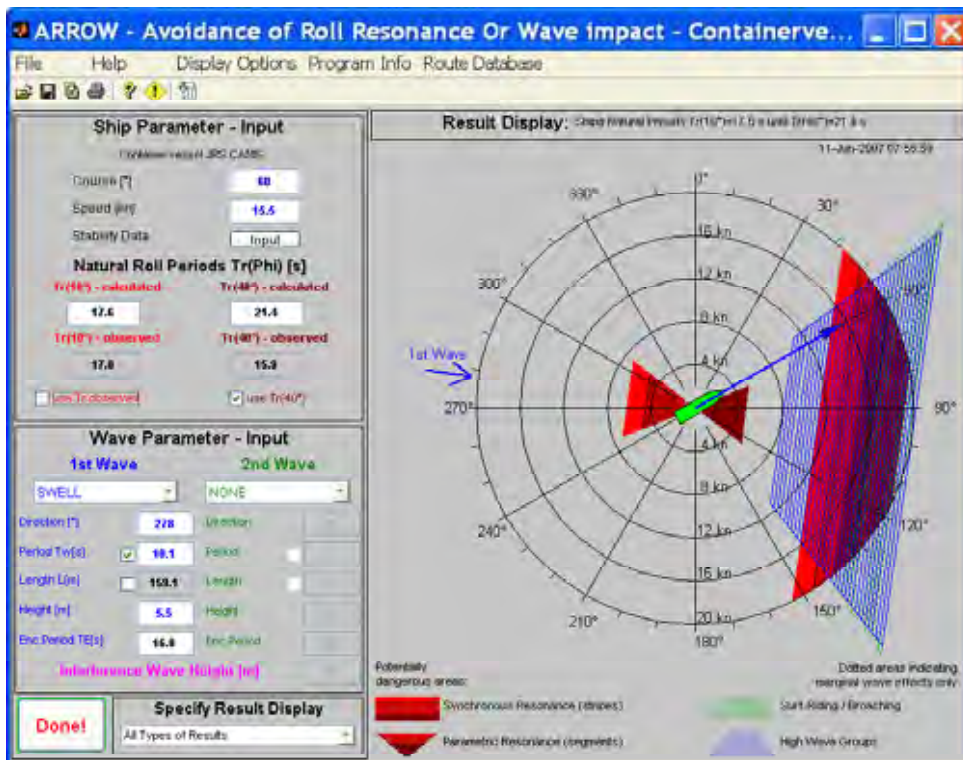


Abbildung 40: Screenshot von ARROW mit den Daten der alternativen Situation bei $Tr=17,8$ s nur für das Hauptseegangssystem 1st Wave: es besteht kaum noch Resonanzgefahr aus diesem Wellensystem – vor allem bei weiterer Kursänderung nach Backbord

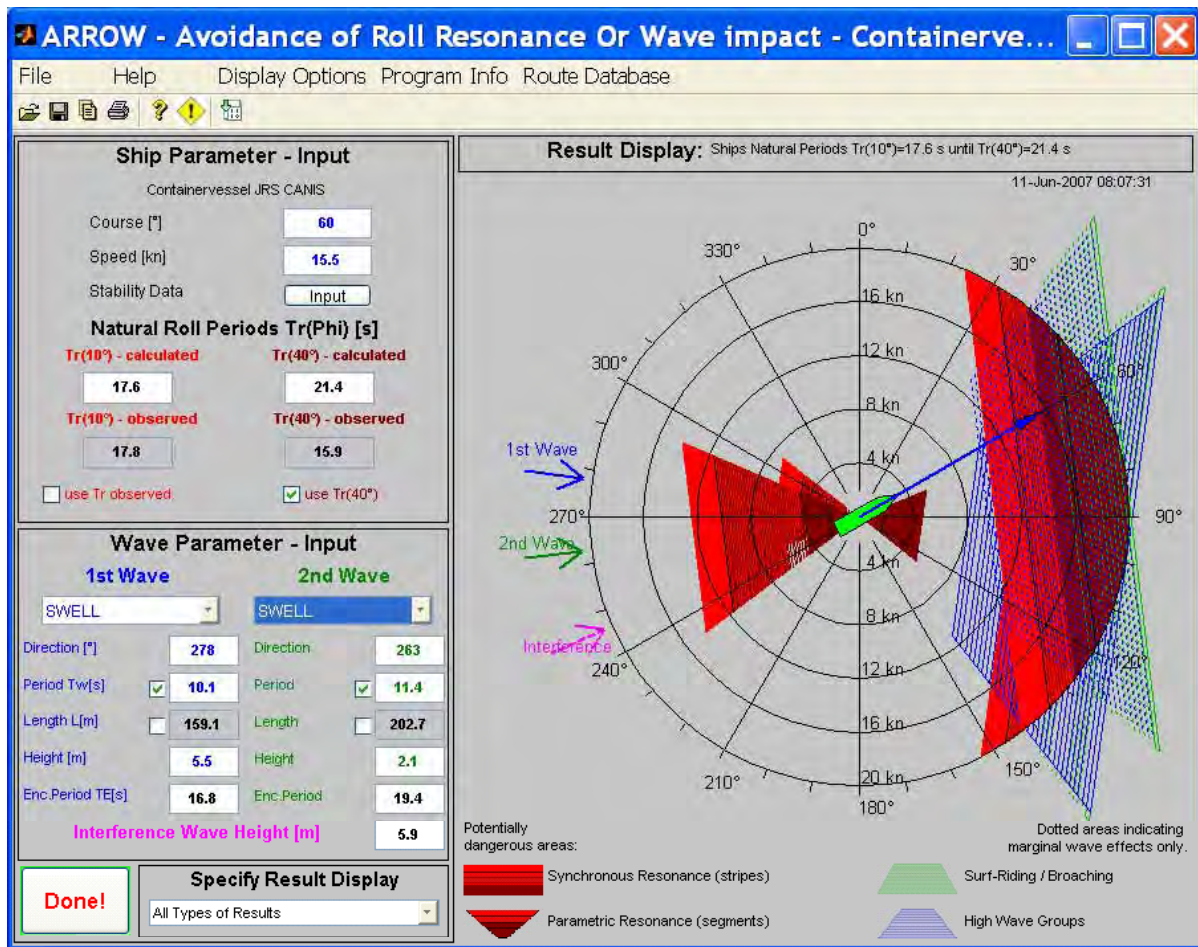


Abbildung 41: Screenshot von ARROW mit den Daten der alternativen Situation bei $Tr=17,8$ s hier für beide Wellensysteme: es besteht noch Resonanzgefahr, die durch Kursänderung nach Backbord um ca. 15° vermeidbar wäre

5.3.2.7 Zusammenfassende Einschätzung

Das Schiff befand sich zum Unfallzeitpunkt für den anzunehmenden Bereich der Seegangperioden von 10 und 11 s im **Resonanzbereich für synchrone Resonanz für große Rollwinkel**.

Für die Periode 10 s liegt sogar annähernd **direkte Resonanz** vor.

Wegen der Überlappung der Bereiche befindet sich das Schiff für die Perioden 10 und 11 s gleichzeitig auch im Bereich des Resonanzstreifens für kleine Rollwinkel.

Unter solchen Umständen kann es schon bei anfangs kleinen Rollamplituden **zur Anfachung der Rollschwingungen** durch den schräg achterlichen Seegang kommen, die dann bei großen Rollwinkeln in den **kritischen Resonanzbereich** kommen.

Hierin ist vermutlich der Grund für **die starken Rollschwingungen** des Schiffes zum Unfallzeitpunkt zu sehen.

Um in dieser Situation die richtigen Entscheidungen treffen zu können, wäre eine Entscheidungsunterstützung für die Schiffsführung in Form einer Gesamtübersicht über potentielle Gefahrenbereiche notwendig gewesen.

Sowohl bei geringer Ausstattung als auch bei Vorhandensein professioneller Software hätten der Schiffsführung derartige Entscheidungshilfen zur Verfügung stehen können.

Mit solchen Informationen bereits als Teil der Reisevorbereitung (Voyage planning) hätte der Kapitän schnell entsprechende Entscheidungen treffen können.

Abschließend ist der Gutachter der Ansicht, dass der Ladungsverlust im vorliegenden Fall eher zu verhindern gewesen wäre, wenn eine Seegangswarnsoftware, unterstützt durch eine Wetterrouting, an Bord gewesen wäre.

5.4 Untersuchung des Laschmaterials

Kurz nach dem Vorfall konnten Teile des Laschmaterials sicher gestellt werden. Diese wurden einer Werkstoffuntersuchung unterzogen, um zu klären, ob bereits vorhandene Werkstofffehler zum Verlust der Container beigetragen haben könnten. Konkret untersucht wurde ein Bruchstück einer Laschstange, eine Spannschraube mit dem Bruch eines Auges, das Bruchstück eines weiteren Auges (vermutlich einer Spannschraube), das Bruchstück eines Riegels zum Entsichern der Laschstange und ein automatischer Twistlock.

5.4.1 Laschstange

Die Laschstange wies ca. 150 mm neben dem Endbeschlag einen Bruch auf. Abbildung 42 zeigt eine Übersicht des Bruchstücks. In Abbildung 43 ist die Bruchfläche zu sehen. Diese ist mit Korrosionsprodukten überzogen. Es handelt sich um einen verformungslosen Gewaltbruch, der eine entsprechend grobe Bruchstruktur aufweist. Von dem Bruchbereich wurde eine Probe entnommen und damit ein Mikroschliff hergestellt. Dieser zeigt ein überwiegend perlitisches Gefüge mit schmalen Säumen von Ferrit an den Korngrenzen. Außerdem sind an dem Schliff die typischen Spaltbrucherscheinungen eines spröden Bruchs zu erkennen (siehe Abb. 44).

Eine Zugprobe erschien nicht sinnvoll, da sich etwa 30 mm von der Bruchstelle entfernt eine Schweißnaht befand.

Eine Härteprüfung aus dem Mikroschliff ergab eine Härte von 272 HV 10. Daraus lässt sich eine Zugfestigkeit der Laschstange von ca. 870 N/mm² abschätzen.



Abbildung 42: Bruchstück einer Laschstange



Abbildung 43: Korrodierte Bruchfläche der Laschstange

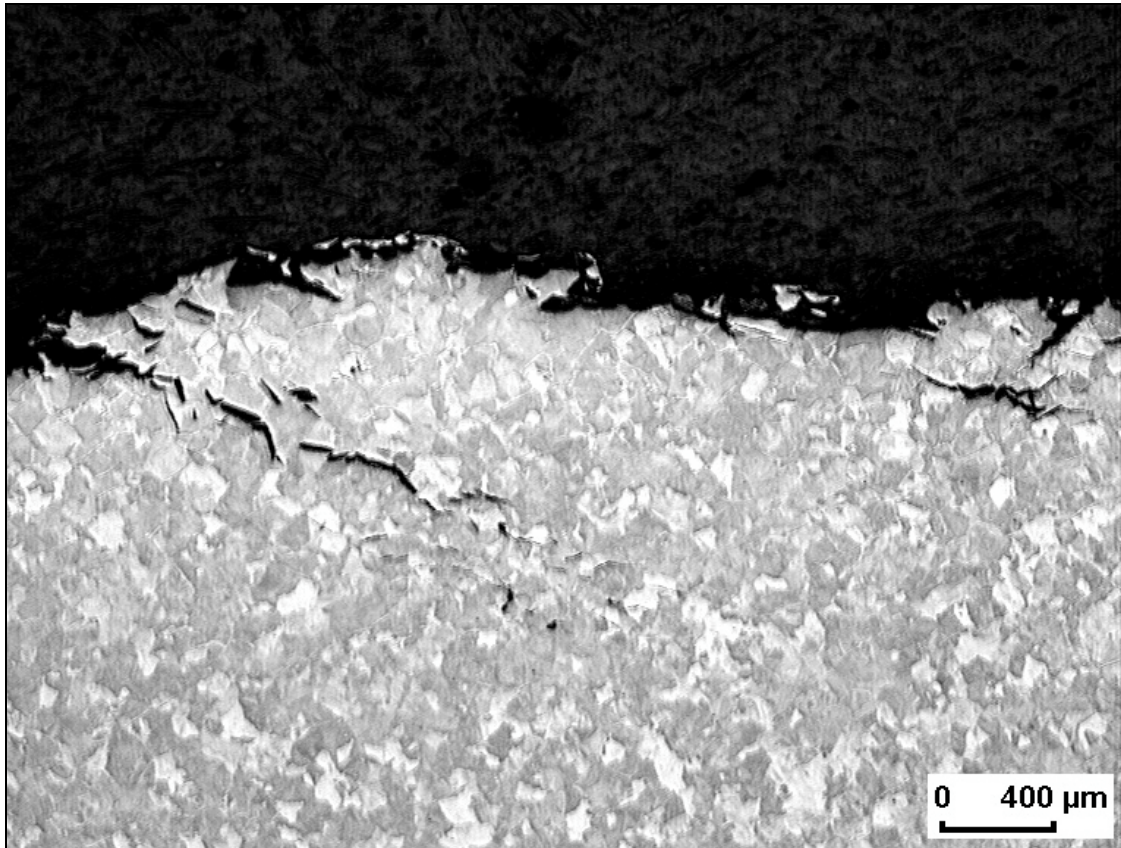


Abbildung 44: Spaltbruchstrukturen der Laschstange

5.4.2 Spannschraube mit gebrochenem Auge

Wie in Abbildung 45 dargestellt ist das Ende der Spannschraube gabelförmig mit Augen ausgebildet. Der Bruch liegt neben einem Auge im Schenkel der Gabel. Er ist verformungslos erfolgt und die Bruchstelle ist mit Korrosionsprodukten belegt, sodass dem Bruchbild keine zusätzlichen Aussagen zu entnehmen sind (Abb. 46). Der angefertigte Mikroschliff der Bruchstelle zeigt, dass der Werkstoff ein Stahlguss mit geringer Mikroporosität ist. Das Gefüge entspricht dem vergüteten Zustand (Abb. 45). Eine Härteprüfung ergab im Mittel von drei Messungen einen Wert von 309 HV 10. Die daraus ermittelte Zugfestigkeit liegt bei 995 N/mm^2 .



Abbildung 45: Gabel einer Spannschraube



Abbildung 46: Bruchfläche der Spannschraube

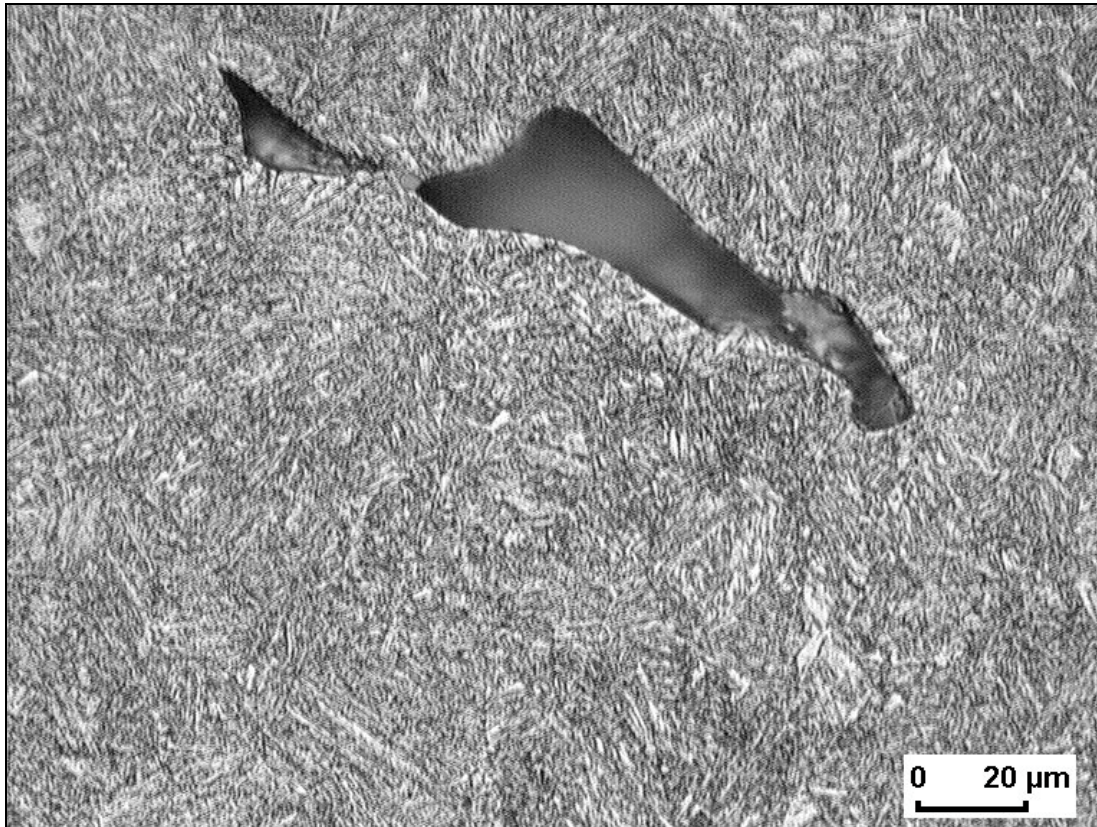


Abbildung 47: Gefüge der Spannschraube

5.4.3 Gebrochenes Auge

Die Form des Bruchstücks lässt den Schluss zu, dass es sich um einen Teil einer Spannschraube handelt (siehe Abb. 48). Die Bruchfläche weist große Ähnlichkeit mit denen der anderen Teile auf. Der angefertigte Mikroschliff zeigt ein ähnliches Bild wie bei der Spannschraube. Es handelt sich auch hier um einen Stahlguss mit einer geringen Mikroporosität und einem dem Vergüten entsprechenden Gefüge (Abb. 49). Die Härteprüfung ergab im Mittel aus drei Messungen einen Wert von 326 HV 10. Entsprechend ist die Zugfestigkeit mit 1040 N/mm^2 abzuschätzen.



Abbildung 48: Bruchstück eines Auges

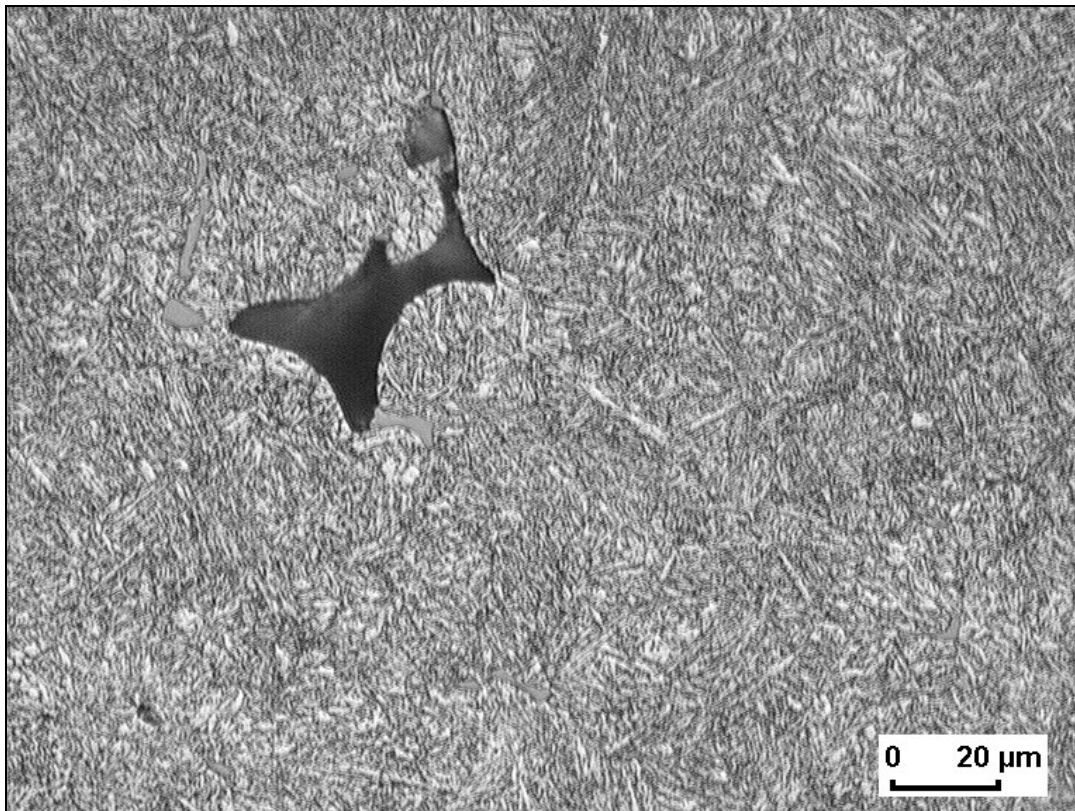


Abbildung 49: Gefüge des Auges

5.4.4 Riegel

Bei dem Riegel handelt es sich um einen schmalen Streifen Materials, der mit einem Scherbruch gebrochen ist (siehe Abb. 50). Der Mikroschliff ergab, dass der Riegel aus einem Blech durch eine Kaltverformung hergestellt worden ist. Der Werkstoff ist ein kohlenstoffarmer Stahl mit einem überwiegend aus Ferrit bestehenden Gefüge (Abb. 51).



Abbildung 50: Riegel

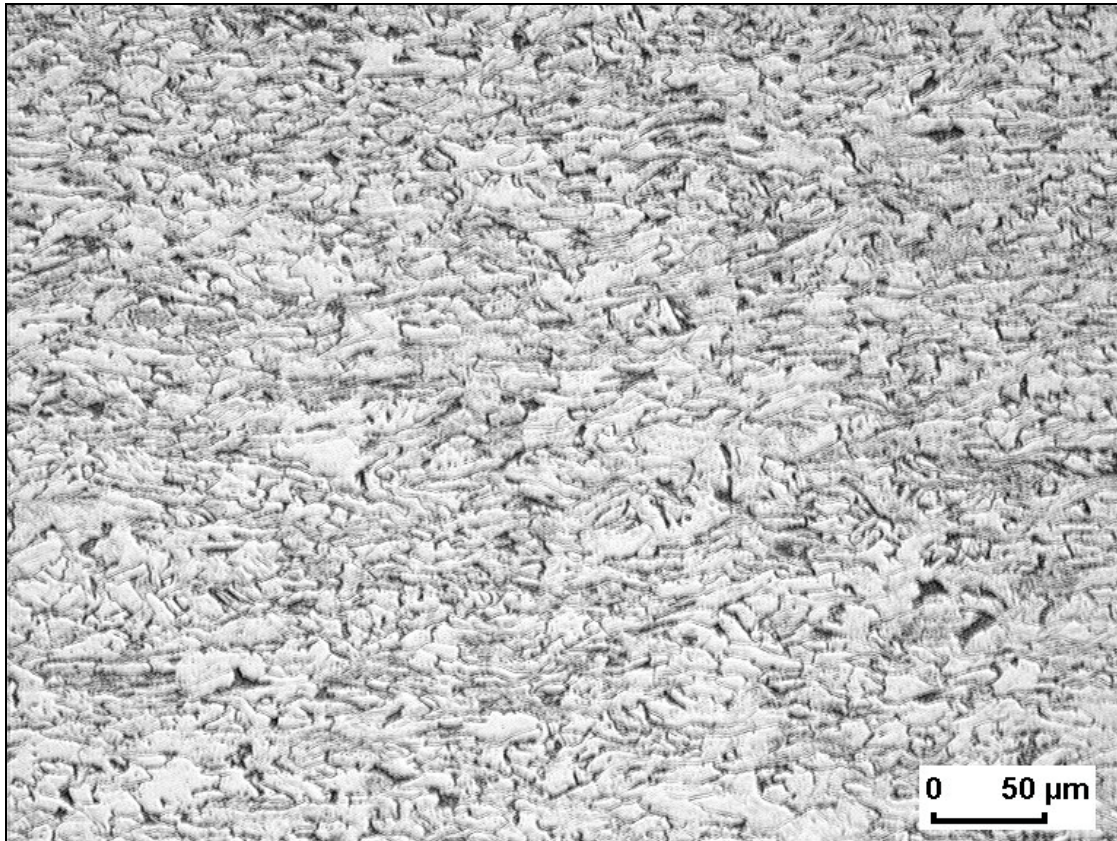


Abbildung 51: Gefüge des Riegels

5.4.5 Twistlock

Im Gegensatz zu den bisher untersuchten Teilen ist der Twistlock nicht gebrochen (siehe Abb. 52). Es handelt sich dabei um einen automatischen Twistlock des Herstellers SEC. Derartige Twistlocks werden zum Verbinden von Containern genutzt. Dies geschieht, indem sie zuerst in die unteren Ecken des zu ladenden oberen Containers eingesetzt werden. Beim Absetzen dieses Containers auf einem bereits gestauten Container, schieben sich die Twistlocks in die sog. Cornercastings (Eckenhalterungen) des unteren Containers und verriegeln sich automatisch. Diese Verriegelung erfolgt über Schrägen an der unteren Seite der Twistlocks.

Eine Funktionskontrolle ergab keinen Hinweis auf ein Fehlverhalten. In Abbildung 53 ist deutlich die Schräge zu erkennen, die in dem Cornercasting des unteren Containers gesessen hat. Diese Schräge weist erhebliche Verschleißspuren auf, die zeigen, dass der Twistlock mit Gewalt aus dem unteren Container gezogen worden ist.

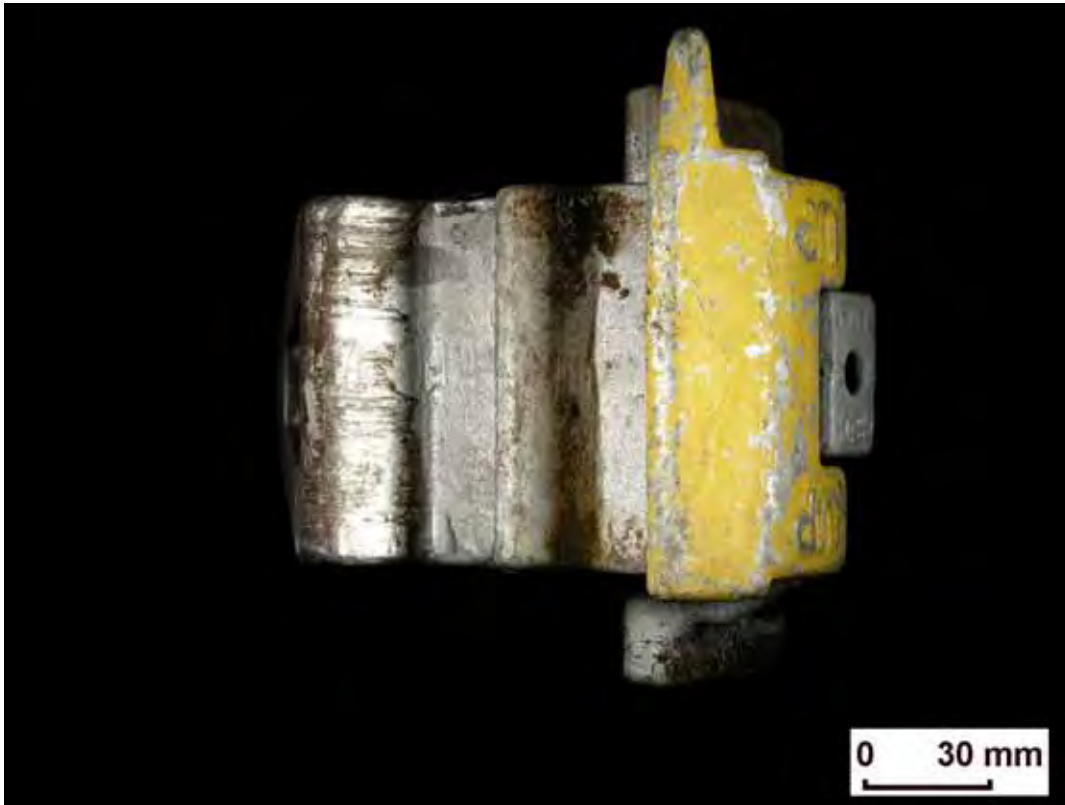


Abbildung 52: Twistlock

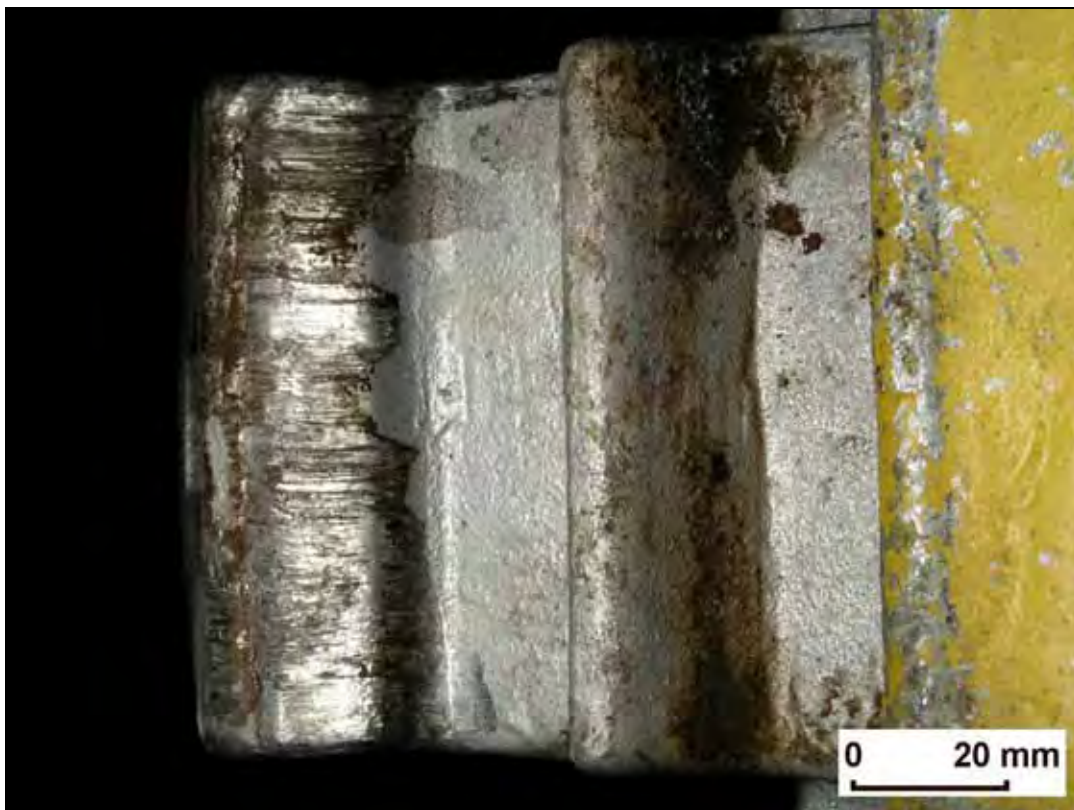


Abbildung 53: Verschleißspuren auf der tragenden Fläche des Twistlocks

6 Analyse

Mit der Untersuchung dieses Seeunfalls wollte die BSU den aktuellen Stand der Wissenschaften bzw. der Technik aufzeigen. Wie erwartet, kam es zu unterschiedlichen Aussagen. Die eingangs aufgeführten Fragestellungen

1. Wurde der Ladungsverlust durch seegangsbedingte Resonanzerscheinungen bedingt?
2. Hatte die Besatzung die Möglichkeit, dies vorab zu erkennen? Dabei sollte geklärt werden, ob der eventuelle Einsatz von so genannter Seegangswarnsoftware den Ladungsverlust hätte verhindern können.

wurden durch das Institut für Entwerfen von Schiffen und Schiffstheorie¹³ sowie dem Fachbereich Seefahrt Warnemünde der Hochschule Wismar, Fachhochschule für Technik, Wirtschaft und Gestaltung, bearbeitet.

Die Frage

3. Welchen Einfluss hatte das verwendete Laschmaterial? (Twistlocks)

wurde durch das Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik Service GmbH in Hamburg beantwortet.

6.1 Auswertung der TU Hamburg-Harburg

Die Berechnungen des Seegangsverhaltens von JRS CANIS in der zum Unfallzeitpunkt herrschenden Situation haben nach Meinung des Gutachters der TU Hamburg-Harburg klar ergeben, dass die von der Besatzung angegebenen Rollwinkel von etwa 20° mit hoher Wahrscheinlichkeit tatsächlich erreicht worden sind. Die Berechnungen haben ferner ergeben, dass diese Rollwinkel von etwa 20° nicht nur in dieser Situation erreicht worden sind, sondern auch in vielen anderen, auch benachbarten, Situationen erreicht worden wären. Ein durch eine Resonanz bedingter Ladungsverlust ist daher praktisch ausgeschlossen, weil sich keine Hinweise darauf ergeben haben, dass der Zustand zum Unfallzeitpunkt gefährlicher gewesen ist als benachbarte Situationen. **Eine mäßige Änderung von Kurs oder Geschwindigkeit hätten daher vermutlich auch zum Ladungsverlust geführt.**

Die Stabilität des Schiffes war auf jeden Fall ausreichend, und es war nicht überladen.

Die Ermittlung der auf den Containerstapel wirkenden Beschleunigungen haben für die Unfallsituation vertikale Beschleunigungswerte ergeben, die so gering sind, dass ein versehentliches Auslösen der automatischen Twistlocks aufgrund der Vertikalbeschleunigungen praktisch ausgeschlossen ist. Die berechneten Transversalbeschleunigungen für den Containerstapel liegen auch noch etwas unter dem theoretisch ertragbaren Grenzwert, allerdings wird es durch den Gutachter bei hohen Containergewichten oder nicht bestmöglicher Laschung als möglich

¹³ an der TUHH – Technische Universität Hamburg-Harburg

angesehen, dass es in der Unfallsituation zum Gewaltbruch der unteren Laschung gekommen sein kann.

Die Berechnung der Beschleunigungen auf den Containerstapel zu einem, dem eigentlichen Unfall vorausgegangenem Zustand bei kleiner Fahrt gegen die See, haben deutlich höhere Vertikalbeschleunigungen bei gleichen Transversalbeschleunigungen ergeben, sodass es für diesen Zustand zu einer Vorschädigung der Laschung gekommen sein kann und diese dann später durch Gewaltbruch versagt hat. Der Gutachter ist weiterhin der Auffassung, dass sich das Leerfahren der beiden inneren Rows negativ auf die Ladungssicherheit und damit auf den entstandenen Schaden ausgewirkt hat. Dies kann aber nicht quantitativ belegt werden.

Der Gutachter kommt weiterhin zu dem Ergebnis, dass der Ladungsverlust als solches durch die Besatzung nicht vorhersehbar gewesen sein kann. Es konnte durch die Berechnungen weder eine Resonanz festgestellt werden, noch konnten Überschreitungen von Beschleunigungsgrenzwerten festgestellt werden.

Schließlich belegt der Gutachter die von ihm vertretene Auffassung, dass der Ladungsverlust auch nicht durch den etwaigen Einsatz der zur Zeit verfügbaren Seegangswarnsysteme zu verhindern gewesen wäre. Dies liegt daran, dass diese Systeme die komplexe Physik eines Schiffes bei großen Rollbewegungen im Seegang für den praktischen Bordgebrauch derartig weit vereinfachen, dass die mit Hilfe solcher Systeme getroffenen Entscheidungen in der Vielzahl der Fälle falsch sein müssen. Selbst wenn ein derartiges System an Bord gewesen wäre, dann hätte die Besatzung dem System, nach Auffassung des Gutachters, mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht vertraut, weil die Zuverlässigkeit derartiger Systeme zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht ausreichend ist. Dies ergibt sich formal auch daraus, dass noch kein derartiges System für den Bordgebrauch tatsächlich zugelassen ist.

6.2 Auswertung des FB Seefahrt in Warnemünde der FH Wismar

Aus der vergleichenden Analyse der Daten zum Unfall kann nach Meinung des Gutachters des Fachbereiches Seefahrt die folgende Schlussfolgerung gezogen werden.

Das Schiff befindet sich für den anzunehmenden Bereich der Seegangsperioden von $T_w=10-11$ s im Resonanzbereich für synchrone Resonanz für große Rollwinkel, für die Periode $T_w=10$ s liegt sogar fast direkte Resonanz vor! Für die Perioden $T_w=10$ und 11 s befindet sich das Schiff wegen der Überlappung der Bereiche auch gleichzeitig in Bereich des Resonanzstreifens für kleine Rollwinkel. Unter solchen Umständen kann es schon bei anfangs kleinen Rollamplituden zur Anfachung der Roll-Schwingungen durch den schräg achterlichen Seegang kommen, die dann bei großen Rollwinkeln richtig in den kritischen Resonanzbereich kommen. Es ist einzuschätzen, dass dies der Grund für die starken Rollschwingen des Schiffes zum Unfallzeitpunkt gewesen sein wird. Zusätzlich befindet sich das Schiff für diesen Kurs und Geschwindigkeit in einem Zustand, wo es beim Begegnen mit Wellengruppen (High Wave Group Encounter - successive high wave attack) sehr lange auf den Wellenbergern verweilt und dabei nur eine sehr geringe Stabilität mit geringen aufrichtenden Hebelarmen hat.

Es wurde beschrieben, dass zum Unfallzeitpunkt eine langsame Änderung des Kurses nach Backbord auf ca. 030° erfolgte. Dies bedeutet ein potentiell gefährliches Durchfahren des direkten, synchronen Resonanzbereiches ($Tr/TE=1$), was auf jeden Fall mit großer Vorsicht und besser schnell und durchgreifend geschehen sollte.

Dazu wäre allerdings eine Entscheidungsunterstützung in Form einer Gesamtübersicht über potentielle Gefahrenbereiche, z.B. in Form eines Polardiagramms nötig. Mit solchen Informationen als Teil der Reisevorbereitung (Voyage planning) hätte der Kapitän schnell entsprechende Entscheidungen treffen können. Entsprechende Verfahren sind aus der Literatur bekannt und Gegenstand der Lehre und Fortbildung an Schiffsoffiziers-Ausbildungsstätten. Auch die Richtlinie [8] enthielt konkrete Anleitungen für die Erstellung solcher Entscheidungshilfen (in diesem Zusammenhang wird es als Rückschritt angesehen, dass in der neuen Fassung der Richtlinie[9] solche konkreten Berechnungshilfen und Darstellungen nicht mehr vorhanden, sondern nur verbale Formulierungen enthalten sind).

Zur Einschätzung der Erkennbarkeit der Gefährdung durch die Besatzung wurden zwei Betrachtungen angestellt, welche Möglichkeiten bei geringer Ausstattung und bei Vorhandensein professioneller Software bestanden hätten.

Prinzipiell hätte die Besatzung in einfacher Weise die Rollzeit aufgrund der gegebenen Stabilitätsdaten des Schiffes oder durch Messung des Schiffes ermitteln und auch eine Schätzung der potentiellen Seegangsdaten aus den Wetterinformationen vornehmen können. Daraus wäre bei der Reiseplanung eine einfache Analyse der Gefahrensituation möglich gewesen. Daraus sind wiederum Entscheidungen ableitbar, z.B. für die entsprechend verstärkte Ladungssicherung oder Maßnahmen zur Änderung der Rollzeit durch Stabilitätsänderung durch GM Variation (sofern das ladungstechnisch machbar wäre).

Solche Variantenrechnungen sind manuell mit dem Taschenrechner zwar möglich, allerdings aufwendig. Bei höherer Ausstattung lassen sich solche Entscheidungen einfacher treffen, wie sich am Beispiel der Anwendung von Reiseplanungstools und Resonanzprogramm(en) erkennen lässt.

6.3 Zusammenfassung der BSU zu den hydrodynamischen Erkenntnissen

Beide Gutachten sind gut nachvollziehbar. Auf der einen Seite vertritt die TU Hamburg-Harburg den Standpunkt, die Seegangs- und Stabilitätsverhältnisse des Schiffes müssen quantitativ so genau wie möglich bekannt sein, um dann rechnerisch einwandfreie Ergebnisse erhalten zu können. Dabei wird aber erkannt, dass es bis heute noch keine technischen Möglichkeiten gibt, weder den Seegang am Schiff genau zu erfassen, noch die Stabilitätsverhältnisse des Schiffes ständig zu aktualisieren. Darunter verstehen sich zum einen die wirkliche Beladung (insbesondere eines Containerschiffes) als auch die Erfassung der Verbrauchsstoffe des Schiffes.

Diese Schwierigkeiten sind auch die gemeinsame Schnittmenge der beiden wissenschaftlichen Einrichtungen. Im FB Seefahrt Warnemünde werden diese Schwierigkeiten ebenso verstanden, bilden aber gleichzeitig die Grundlage für den Ansatz, die Seegangsverhältnisse so stark zu vereinfachen, dass durch einen simplen Vergleich von Rolleigenperiode und Seegangsperiode ein Ergebnis zur Verfügung steht, welches nur als Tendenz zu verstehen ist. Absolute Zahlen werden durch die Warnemünder nicht angegeben, da alle Grunddaten zu ungenau sind. Aber

es wird ein Bereich dargestellt, der eine Schiffsführung zumindest tendenziell unterstützen könnte.

An dieser Stelle sei erwähnt, dass auch andere Institutionen und Firmen sich mit dieser Fragestellung beschäftigen. So arbeitet der Germanische Lloyd in Hamburg an einem eigenen Wellenradar, welches kombiniert mit einer Datenbank, bestehend aus vorherberechneten Seegangs- und Stabilitätsverhältnissen, die für das Schiff gefährliche Resonanzen darstellen soll.

Die Firma SAM Electronics stellte am 2. November 2007 auf dem VDR-Symposium in Hamburg ihr System zur Resonanzvermeidung vor. Grundidee hierfür ist, das eigene Schiff als „Messboje“ zu nutzen, um aus der gemessenen Eigenbewegung des Schiffes auf den Seegang am Schiff zurück zu schließen und daraus wiederum Gefahrenbereiche für das Schiff darzustellen.¹⁴

Die Firma OceanWaveS GmbH¹⁵ vertreibt bereits seit längerem Wellenradars, insbesondere an im Meeresboden verankerte Plattformen. Aber auch Schiffe werden mit diesem System ausgerüstet, wobei die Unzulänglichkeit bekannt ist, dass zwischen dem gemessenen Bereich und dem Schiff eine räumliche Differenz besteht, die nur schwer zu interpolieren ist.

Das Institut für maritime Studien der FH OOW¹⁶ in Elsfleth entwickelte gemeinsam mit der Firma Interschalt in Hamburg ein stochastisches Verfahren als Entscheidungshilfe für Schiffsführungen. Auch hier wird versucht, die o.g. Nachteile zu umgehen, indem die Rollbewegungen an Bord gemessen und statistisch ausgewertet werden, um so die Grundlage für die Darstellung des Seegangsspektrums zu erhalten.¹⁷

Abschließend kann gesagt werden, dass in der Praxis, insbesondere an Bord von großen Containerschiffen, der Bedarf besteht, ein Werkzeug an der Hand zu haben, welches einfach und unmissverständlich zu nutzen ist, um gefährliche Seegangsverhältnisse zu vermeiden.

Dieser Bedarf ist erkannt und wird von zahlreichen Institutionen bearbeitet. Die Forschung und Entwicklung sollte intensiv vorangetrieben werden, um Schiffsführungen so bald wie möglich ein zuverlässiges Werkzeug zur Verfügung stellen zu können.

6.4 Containerstauung und Laschung

Nach dem vom Germanischen Lloyd anerkannten „Cargo Securing Manual“ der JRS CANIS durften in Bay 28 maximal 6 Container an Deck übereinander gestapelt werden (siehe dazu Abb. 54). Dabei sind zur Sicherung der untersten Lage an Deck manuelle Twistlocks zwischen Deck und Container zu verwenden. Außerdem ist die untere Containerlage mit Laschstangen und Spannschrauben zu sichern. Weitere Laschstangen sind zwischen der zweiten Containerlage und dem Deck anzuordnen. Die weitere Sicherung der Container erfolgt ausschließlich über automatische Twistlocks. Bei dem Unfall gingen 10 Container verloren, die in der dritten, vierten und fünften Lage direkt vor den Aufbauten gestaut waren. Diese Container waren wie vorgesehen nur mit Twistlocks gesichert.

Die untersuchten Spannschraubenteile und die Laschstange waren nicht zum Sichern der verloren gegangenen Container eingesetzt. Trotzdem haben sie

¹⁴ siehe dazu <http://www.sam-electronics.de/dateien/automation/seasense.html>

¹⁵ siehe auch <http://www.oceanwaves.de/>

¹⁶ FH OOW – Fachhochschule Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven

¹⁷ Veröffentlicht in Schiff & Hafen - April 2008 Seite 88 ff.

während dieser Fahrt Beanspruchungen erlitten, die zum Bruch führten. Ein direkter Zusammenhang zwischen dem Versagen dieser Teile und dem Verlust der Container ist nicht gegeben. Ein indirekter Einfluss ist aber auch nicht auszuschließen.

Der untersuchte automatische Twistlock hat sich offenbar unter erheblicher Belastung geöffnet. Es wird davon ausgegangen, dass der Verlust der 10 Container auf das Nachgeben von automatischen Twistlocks zurück zu führen ist. Dieses wurde sehr wahrscheinlich noch begünstigt durch das Brechen verschiedener Laschstangen und Spannschrauben (indirekter Einfluss), die den außergewöhnlichen Belastungen der Schiffsbewegungen nicht mehr standhielten.

Die außergewöhnlichen Belastungen wiederum lassen sich damit erklären, dass alle Containergewichte weit über den zugelassenen Werten lagen. Hier wird der Mangel an Kommunikation zwischen Belader und Schiffsführung deutlich. Wie schon in anderen Untersuchungen festgestellt, wird der Be- und Entladeprozess in Containerhäfen so schnell durchgeführt, dass der Besatzung kaum noch Zeit bleibt, die Beladung zu prüfen, bevor das Schiff wieder den Hafen verlässt.¹⁸ Dabei wird auch immer häufiger ersichtlich, dass Container anders beladen sind, als angegeben wird.

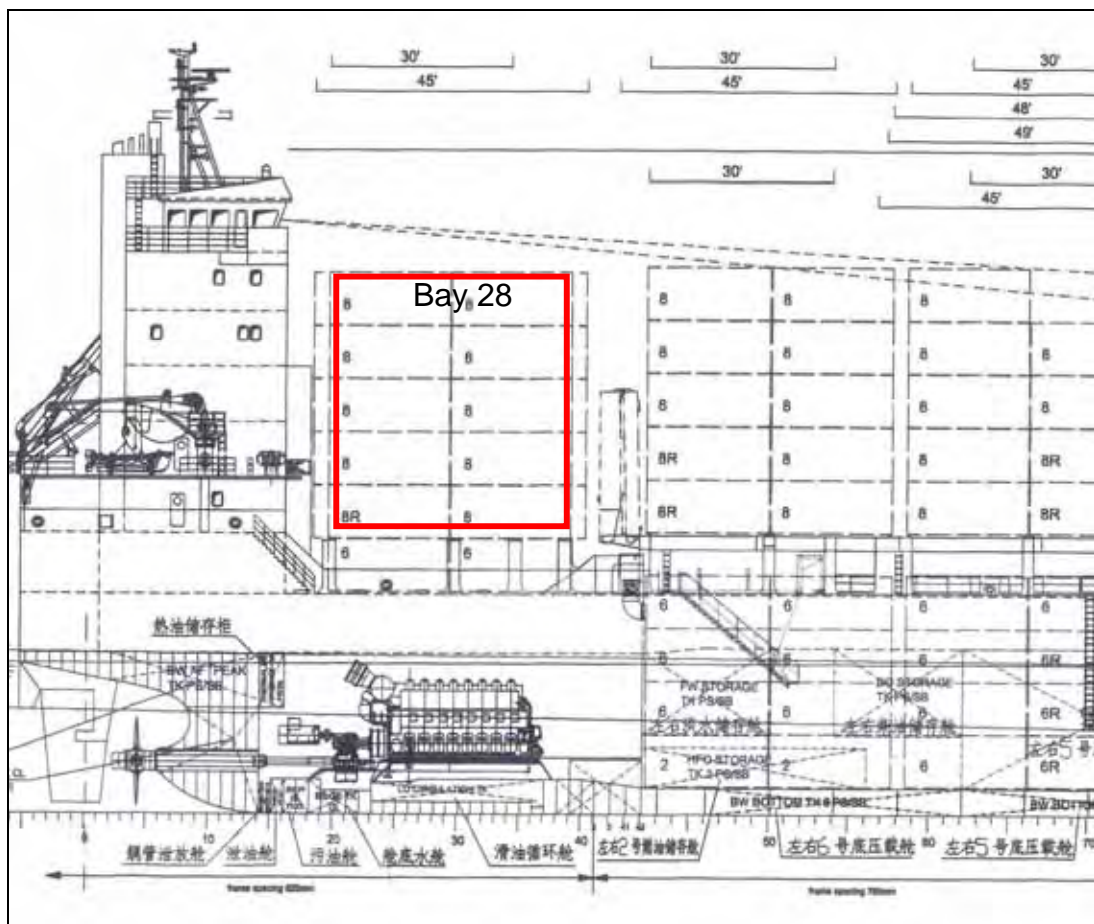


Abbildung 54: Ausschnitt des General Arrangement Plan - Seitenansicht

¹⁸ Siehe dazu auch BSU-Bericht 537-06 – Seite 28; BSU-Bericht 187-05 Seite 40; MAIB-Bericht über MSC NAPOLI unter http://www.maib.dft.gov.uk/cms_resources/MS%20Napoli.pdf und BEAmer-Bericht über CMA CGM OTELLO unter <http://www.beamer-france.org/english/inquiries/inquiries.htm>

7 Sicherheitsempfehlungen

Die folgenden Sicherheitsempfehlungen stellen weder nach Art, Anzahl noch Reihenfolge eine Vermutung hinsichtlich Schuld oder Haftung dar.

7.1 Betreiber von Seeschiffen, Schiffsführungen und Betreiber von Hafenumschlagsbetrieben

Die Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung empfiehlt den **Betreibern von Containerschiffen** in Zusammenarbeit mit den Hafenumschlagsbetrieben Vorkehrungen zu treffen, die es den **Schiffsführungen** ermöglichen, die Beladung des Schiffes effektiv zu überwachen. Dies bezieht sich insbesondere auf die Positionen der Container und ihre Gewichte.

Die Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung empfiehlt hierzu insbesondere, Möglichkeiten zu schaffen, Container vor der Verladung auf ein Schiff zu verwiegen, um so die Sicherheit der Besatzungen und Schiffe weiter zu steigern.

In diesem Zusammenhang verweist die Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung ebenfalls auf den Untersuchungsbericht der britischen Marine Accident Investigation Branch (MAIB) zum strukturellen Versagen des Schiffskörpers der MSC Napoli¹⁹. In Abschnitt 4.2 des Berichtes zu bereits durchgeführten Maßnahmen verweist MAIB auf eine Sicherheitsempfehlung aus einem früheren Bericht. Hierin war dem International Chamber of Shipping (ICS) empfohlen worden, gemeinsam mit der Containerschiffsindustrie einen „Code of best Practise“ zu erarbeiten. Die Fertigstellung dieses Codes wird für Ende 2008 erwartet, wonach er dann der Internationalen Schifffahrtsorganisation (IMO) zur Annahme vorgelegt werden soll. In Abschnitt 5 des MSC Napoli Berichtes greift MAIB diese ältere Sicherheitsempfehlung auf und empfiehlt weitergehend, dass der Code behandeln soll:

- die Notwendigkeit, aktuelle Gewichte von Containern zu ermitteln, bevor sie auf ein Schiff verladen werden sowie
- die Bedeutung sicherer Geschwindigkeit und guter Seemannschaft beim Fahren in schwerem Wetter.

7.2 Wissenschaftliche Einrichtungen und schifffahrtsbezogene Firmen, See-Berufsgenossenschaft und Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung

Die Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung empfiehlt **maritimen wissenschaftlichen Einrichtungen und schifffahrtsbezogenen Firmen**, die Forschung an und Entwicklung von Systemen weiter voran zu treiben, die es der Schiffsführung ermöglichen, die seegangsbedingten Schiffsbewegungen zu überwachen und richtig einschätzen zu können, um ggf. Maßnahmen zur Vermeidung von sicherheitskritischen Schiffsbewegungen und -manövern rechtzeitig durchführen zu können.

Die Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung empfiehlt der **See-Berufsgenossenschaft**, die Entwicklung dieser Systeme weiterhin kritisch zu begleiten und ggf. Richtlinien zu deren Einsatz zu aktualisieren.

Die Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung empfiehlt dem **Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung**, die Forschung und Entwicklung dieser Systeme zu unterstützen.

¹⁹ Siehe hierzu http://www.maib.gov.uk/cms_resources/MSC%20Napoli.pdf

8 Quellenangaben

- Ermittlungen Wasserschutzpolizei (WSP)
- Schriftliche Erklärungen/Stellungnahmen
 - Schiffsführung
 - Reederei
 - Klassifikationsgesellschaft
- Zeugenaussagen
- Ausschnitt aus Seekarte INT 1413 des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) sowie Schiffsdaten
- Amtliches Wettergutachten Deutscher Wetterdienst (DWD)
- Radaraufzeichnungen Schiffssicherungsdienste/Verkehrszentralen (VTS)
- Schiffsfoto auf Seite 9 von Fa. Hasenpusch
- Gutachten zur Werkstoffuntersuchung an Laschmaterial der JRS CANIS erstellt Prof. Dr. Happ des Instituts für Werkstoffkunde und Schweißtechnik (IWS) an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg
- Gutachten zum Ladungsverlust der JRS CANIS erstellt von Prof. Dr.-Ing. S. Krüger, Leiter des Instituts für Entwerfen von Schiffen und Schiffssicherheit an der TU Hamburg-Harburg
- Gutachten zum Ladungsverlust der JRS CANIS erstellt von Prof. Dr.-Ing. habil. Knud Benedict von der Hochschule Wismar, Fachhochschule für Technik, Wirtschaft und Gestaltung Fachbereich Seefahrt Warnemünde

Dieses bezieht sich auf:

- [1] France & William a.o. 2001. An Investigation of Head-Sea Parametric Rolling and its Influence on Container Lashing Systems. SNAME, Annual Meeting 2001.
- [2] IMO 1993. Code on Intact stability for all types of ships, Resolution. A.749 (18) Nov 1993
- [3] Code über Intaktstabilität aller in IMO-Regelwerken behandelten Schiffstypen (Code über Intaktstabilität); Inkraft getreten 1.1.2000, CD-ROM 06-2004 See-BG
- [4] IMO 1995. Guidance to the master for avoiding dangerous situations in following and quartering seas, MSC circular 707, adopted on 19. October 1995.
- [5] IMO 2007: REVISED GUIDANCE TO THE MASTER FOR AVOIDING DANGEROUS SITUATIONS IN ADVERSE WEATHER AND SEA CONDITIONS. MSC.1/Circ.1228, Jan 2007
- [6] IMO 2005. Paper: REVISION OF THE CODE ON INTACT STABILITY, Proposed revision of MSC/Circ.707: SLF 48/4/8, 10 June 2005 (Submitted by Germany)

- [7] Amersdorffer, R. 1998. Parametric excited Rolling Motion in bow and head seas (in German: Parametrisch erregte Rollbewegungen in längslaufendem Seegang). Schiff & Hafen Vol. 10-12, 1998.
- [8] BMVBS /See-BG 2004 - German Ministry of Transport: Guidelines for the onboard management of stability. Verkehrsblatt-Document Nr. B 8011; Release 2004
- [9] BMVBS /See-BG 2004 - German Ministry of Transport: Guidelines for the onboard management of stability. Verkehrsblatt-Document Nr. B 8011; Release 2006 – Vers. 01/07
- [10] Benedict, K., Baldauf, M, Kirchhoff, M. 2004. Estimating Potential Danger of Roll Resonance for Ship Operation. Schiffahrtskolleg 2004, Proceedings Vol. 5, p. 67-93, Rostock 2004
- [11] Benedict, K., Baldauf, M, Kirchhoff, M. 2006. Estimating Potential Danger and Avoidance of Roll Resonance and Wave Impact On board Ships and for Education in MET Institutes. 3rd International Conference on Maritime Transport – Barcelona 16-19th May 2006, Proceedings.
- [12] Benedict K., Baldauf, M, Kirchhoff, M.: Decision support for avoiding roll resonance and wave impact for ship operation in heavy seas. Schiff & Hafen Vol. 8 Aug 2006. p.20-24
- [13] Internet: www.marsig.com

9 Anhang

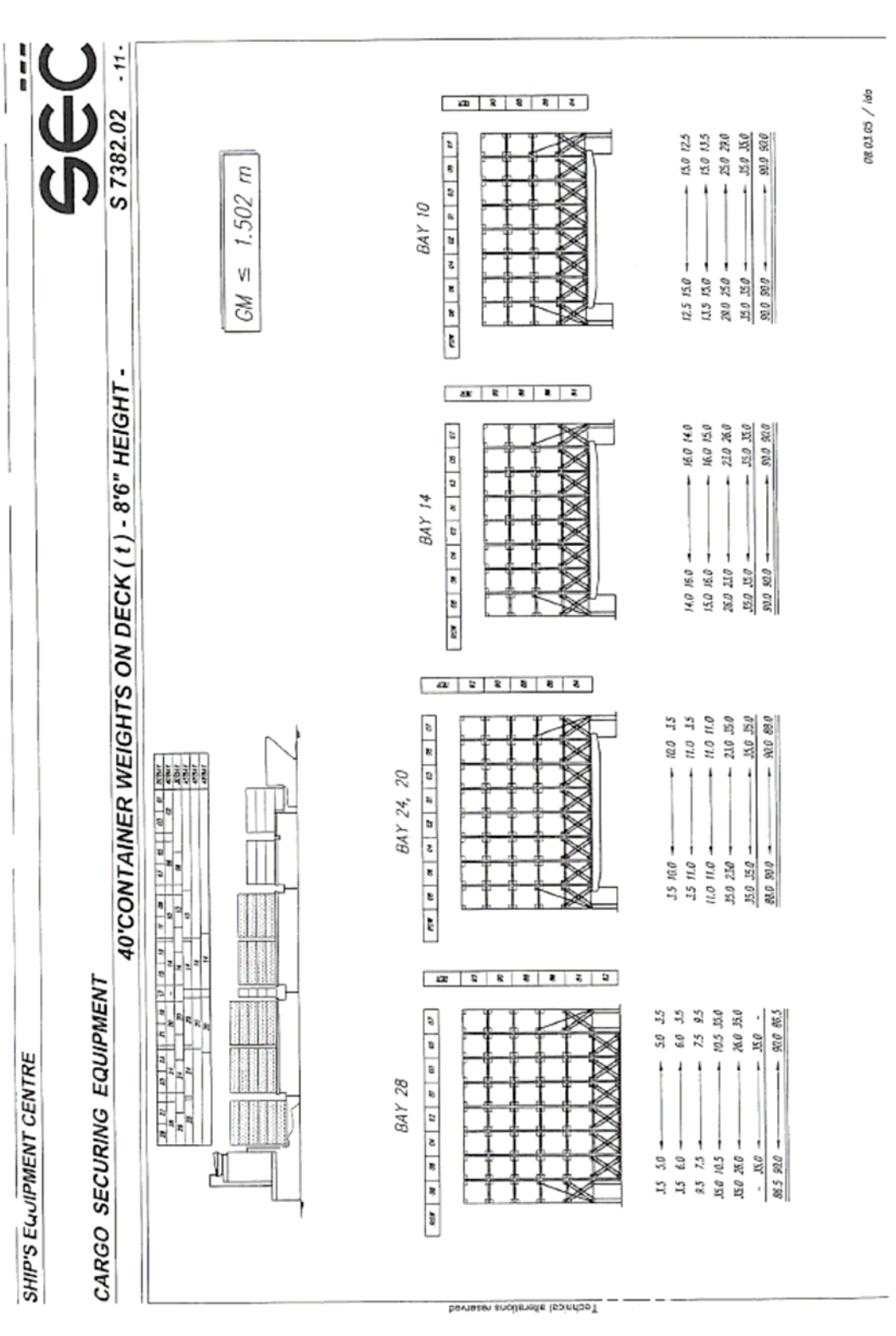


Abbildung 55: Cargo securing manuell - stackweights

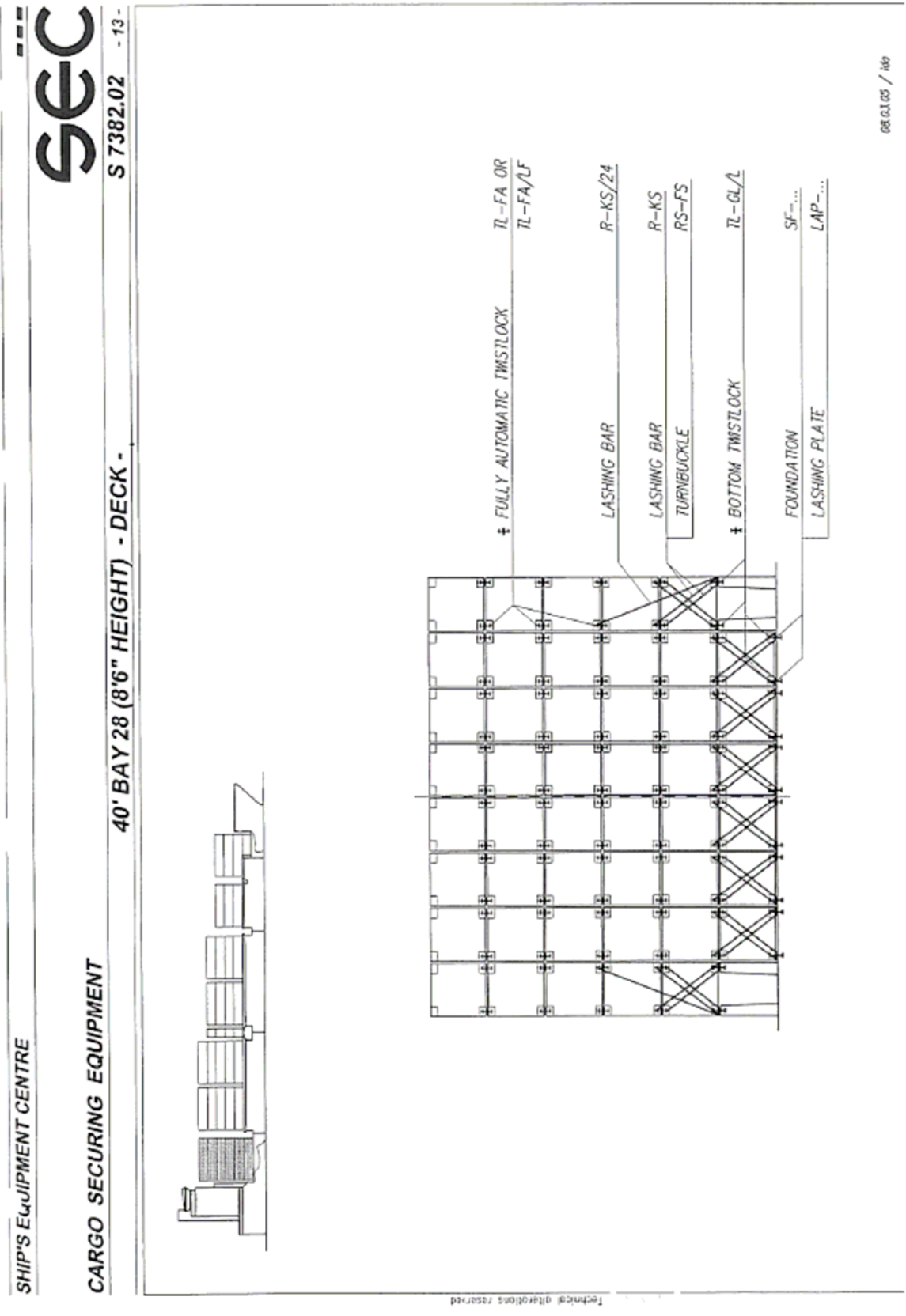


Abbildung 56: Cargo securing manuell - lashings