

TUHH

Technische Universität Hamburg-Harburg

Masterthesis

Entwicklung eines Verfahrens zur Bewertung der Festigkeit von beschädigten Schiffen

vorgelegt von
Martin Salzwedel
Matr.Nr.: 20837679

Erstprüfer: Prof. Dsc. (Tech.) Sören Ehlers
Zweitprüfer: Prof. Dr. Ing. habil. Alexander Düster
Betreuerin: MSc. Annika Wolter
Hamburg, 25. Oktober 2017



brand
MARINE CONSULTANTS

Hiermit versichere ich, Martin Salzwedel, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Martin Salzwedel

Hamburg, 25. Oktober 2017

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	X
Symbolverzeichnis	XII
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund	1
1.2 Lösungsansatz	2
1.3 Vorgehen	2
2 Stand der Technik	4
2.1 Bereits vorhandene Verfahren	4
2.1.1 Bestimmung der auftretenden Belastungen	4
2.1.1.1 Common Structural Rules der <i>IACS</i>	4
2.1.1.2 Berechnung der Kräfte bei Ruhewasser	5
2.1.1.3 Berechnung von Seegangsmodellen	6
2.1.2 Bestimmung der zulässigen Belastungen	6
2.1.2.1 Bisherige Vorgehensweise von <i>Ardent</i> und <i>brand Marine Consultants</i>	6
2.1.2.2 Finite Elemente Methoden	7
2.1.2.3 Idealized Structural Unit Method	7
2.1.2.4 Verfahren nach <i>Smith</i>	8
2.1.2.5 Theorie über Schubspannungsverteilungen in dünnwandigen Querschnitten	9
2.2 Defizite vorhandener Verfahren	10
2.3 Anforderungen an das zu entwickelnde Verfahren	12
3 Analyse von Unfallstatistiken	14
3.1 Art der Beschädigungen	14
3.2 Schiffstypen	15
4 Entwicklung eines Verfahrens zur Bewertung der Festigkeit	17
4.1 Koordinatensystem und Vorzeichenkonventionen	17
4.2 Ablaufplan bei der Bewertung eines Schadensfalles	18
4.3 Berechnung der anzunehmenden Lasten	19
4.3.1 Grundaufbau der Methode	19

4.3.2	Berechnungsschritte	20
4.3.2.1	Auftriebsverteilung	20
4.3.2.2	Aufliegekraft durch Grundberührung	26
4.3.2.3	Gewichtsverteilung	28
4.3.2.4	Berücksichtigung der Krängung	31
4.3.2.5	Scherkräfte und Biegemomente	32
4.3.2.6	Abschätzung der Seegangslasten nach <i>IACS</i>	34
4.3.3	Validierung der Ergebnisse	36
4.3.3.1	Ermittlung der Ruhewasserlasten nach <i>DNV GL</i>	36
4.3.3.2	Vergleich und Bewertung der Ergebnisse	38
4.3.4	Fehlerbetrachtung und Grenzen	39
4.4	Berechnung der maximal zulässigen globalen Belastungen	40
4.4.1	Auswahl des Programmes zur Längsfestigkeitsanalyse	41
4.4.2	Erstellung von Vorlagen für verschiedene Schiffstypen	41
4.4.3	Vorgehensweise bei Festigkeitsberechnungen mit <i>MARS2000</i>	42
4.4.3.1	Modellierung des Querschnittes	42
4.4.3.2	Berücksichtigung von Korrosion	43
4.4.3.3	Berücksichtigung von Schäden	44
4.4.3.4	Durchführung der Berechnungen	46
4.4.4	Fehlerbetrachtung und Grenzen	46
4.5	Auswertung der Berechnungen	50
4.5.1	Übersicht über lokale Belastungen	50
4.5.2	Bewertung der Ergebnisse	51
5	Entwicklung einer Methodik für geteilte Querschnitte	53
5.1	Motivation	53
5.2	Ansatz	53
5.3	Vorgehensweise	54
5.4	Sensitivitätsanalyse	55
5.4.1	Einfluss der Schadensgröße	55
5.4.2	Einfluss der Schadensposition	58
5.4.3	Folgen für die Untersuchung der Schadensstelle	61
5.5	Ausarbeitung der Methodik für die Berechnungen	61
5.6	Zusammenfassung der Methodik	65
6	Untersuchung eines realen Schadensfalles	66
6.1	Beschreibung der Ausgangssituation	66
6.2	Berechnung der auftretenden Lastverläufe	67
6.3	Berechnung der zulässigen Belastungen	71
6.4	Bewertung der Festigkeit	73

7	Auswertung	74
7.1	Zusammenfassung und Bewertung des Verfahrens	74
7.2	Fazit	76
	Literaturverzeichnis	78
8	Anhang	79

Abbildungsverzeichnis

3.1	Ursachen für Totalverluste weltweit, 2006 bis 2015, Daten aus dem <i>Safety Shipping Review 2016</i> [1]	14
3.2	Totalverluste nach Typen, 2006 bis 2015, Daten aus dem <i>Safety Shipping Review 2016</i> [1]	16
3.3	durchgeführte Projekte von <i>brand Marine Consultants</i> nach Typen, Daten von <i>brand Marine Consultants</i> [2]	16
4.1	Schiffsfestes Koordinatensystem	17
4.2	Vorzeichenkonventionen für positive Scherkräfte und Momente	17
4.3	Hilfsspannenraster, das für die folgenden Rechnungen verwendet wird	18
4.4	Logikstruktur des Berechnungsweges für Belastungen durch Massen- und Auftriebsverteilung	21
4.5	relative Spantvölligkeiten c_{mr} abhängig vom Völligkeitsgrad des Schiffes c_B für die <i>BSRA</i> -Modellserie [3]	22
4.6	Hilfsspanntverschiebung für LCB-Verschiebung um 1 % der Länge zwischen den Loten L_{pp} nach <i>BSRA</i> [3]	23
4.7	Skizze, Schiff mit Grundberührung, Seitenansicht	26
4.8	Annahme der Massenverteilung über die Schiffslänge nach <i>Misra</i> [4]	29
4.9	vertikaler Scherkraftverlauf des Containerschiffes <i>YM Witness</i>	38
4.10	vertikaler Biegemomentverlauf des Containerschiffes <i>YM Witness</i>	39
4.11	Schattenbereiche für Spannungsverläufe neben Öffnungen, <i>Ship Structure Committee</i> [5]	45
4.12	Gegenüberstellung von Beul-Fehlermodi bei Paneelen	47
4.13	Verteilung der Schubspannungen durch vertikale Scherkräfte in Schiffsquerschnitten (Berechnung mit <i>MARS2000</i>)	48
5.1	Position und Ausdehnung der angenommenen Schäden	54
5.2	zu untersuchende Schiffsquerschnitte	55
5.3	Abhängigkeit der zulässigen Scherkraft von der Größe des Schadens für den Querschnitt eines Massengutfrachters	56
5.4	Schubspannungsverlauf im unbeschädigten Querschnitt eines Massengutfrachters (Berechnungen mit <i>MARS2000</i>)	56
5.5	Schubspannungsverläufe im Querschnitt eines Massengutfrachters mit verschiedenen großen Seitenbeschädigungen (Berechnungen mit <i>MARS2000</i>)	57
5.6	Skizze von Schubspannungsverläufen in geschlossenem und unterbrochenen Querschnitt	57

5.7	Abhängigkeit der zulässigen Scherkraft eines Querschnittes von der Position des Schadens an der Außenhaut	59
5.8	Schubspannungsverläufe im Querschnitt eines Massengutfrachters im unbeschädigten Fall und mit punktueller Beschädigung im unteren Seitenbereich (Berechnungen mit <i>MARS2000</i>)	60
5.9	Schubspannungsverlauf im Querschnitt eines Massengutfrachters mit Beschädigung der Außenhaut mittschiffs (Berechnungen mit <i>MARS2000</i>) . .	62
5.10	Schubspannungsverlauf im Querschnitt eines Massengutfrachters mit Beschädigung des Doppelbodens mittschiffs (Berechnungen mit <i>MARS2000</i>)	63
5.11	Schubspannungsverlauf im Querschnitt eines Massengutfrachters mit Beschädigung der doppelten Wandstruktur (Berechnungen mit <i>MARS2000</i>)	64
6.1	angreifende Vertikalkräfte am Beispielschiff mit <i>Ladefall 2</i>	67
6.2	Verteilung der auftretenden vertikalen Scherkräfte am Beispielschiff mit <i>Ladefall 2</i> mit Seeganglasten für einen Tag	68
6.3	Verteilung der auftretenden vertikalen Biegemomente am Beispielschiff mit <i>Ladefall 2</i> mit Seeganglasten für einen Tag	68
6.4	Verteilung der auftretenden vertikalen Scherkräfte am Beispielschiff mit <i>Ladefall 2</i> mit Seeganglasten für 20 Jahre	69
6.5	Verteilung der auftretenden vertikalen Biegemomente am Beispielschiff mit <i>Ladefall 2</i> mit Seeganglasten für 20 Jahre	70
6.6	mit <i>MARS2000</i> modellierter Spant bei Längsposition 16 m	71
6.7	mit <i>MARS2000</i> modellierter Spant für die Längspositionen 38 m, 46 m und 63 m	72
8.1	vertikaler Scherkraftverlauf des Massengutfrachters <i>Clara</i>	79
8.2	vertikaler Biegemomentenverlauf des Massengutfrachters <i>Clara</i>	79
8.3	vertikaler Scherkraftverlauf der RoRo-Fähre <i>Volcan de Timanfaya</i>	80
8.4	vertikaler Biegemomentenverlauf der RoRo-Fähre <i>Volcan de Timanfaya</i> .	80
8.5	angreifende Vertikalkräfte am Beispielschiff mit <i>Ladefall 1</i>	80
8.6	Verteilung der auftretenden vertikalen Scherkräfte mit <i>Ladefall 1</i> mit Seeganglasten für einen Tag	81
8.7	Verteilung der auftretenden vertikalen Biegemomente mit <i>Ladefall 1</i> mit Seeganglasten für einen Tag	81
8.8	Verteilung der auftretenden vertikalen Scherkräfte mit <i>Ladefall 1</i> mit Seeganglasten für 20 Jahre	81
8.9	Verteilung der auftretenden vertikalen Biegemomente mit <i>Ladefall 1</i> mit Seeganglasten für 20 Jahre	82
8.10	angreifende Vertikalkräfte am Beispielschiff mit <i>Ladefall 3</i>	82

8.11	Verteilung der auftretenden vertikalen Scherkräfte mit <i>Ladefall 3</i> mit Seeganglasten für einen Tag	82
8.12	Verteilung der auftretenden vertikalen Biegemomente mit <i>Ladefall 3</i> mit Seeganglasten für einen Tag	83
8.13	Verteilung der auftretenden vertikalen Scherkräfte mit <i>Ladefall 3</i> mit Seeganglasten für 20 Jahre	83
8.14	Verteilung der auftretenden vertikalen Biegemomente mit <i>Ladefall 3</i> mit Seeganglasten für 20 Jahre	83

Tabellenverzeichnis

4.1	typische Leistungsgewichte von Hauptmaschinentypen	30
4.2	betrachtete Schiffe zur Validation der Lastverläufe	38
4.3	Vergleich der Korrosionszuschläge nach <i>Bureau Veritas</i> und <i>IACS</i>	44
5.1	zulässige Scherkraft für Schiffstypen mit Doppelbodenbeschädigungen	58
6.1	Hauptdaten des Schiffes	66
6.2	zu erwartende Belastungen des Beispielschiffes	71
6.3	zulässige Belastungen des Beispielschiffes	72

Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Bedeutung
A	m^2	Querschnittsfläche
B	m	Breite des Schiffes
c_B	–	Völligkeit des Schiffsrumpfes
c_{mr}	–	relative Spantvölligkeit
C	–	Wellenparameter
γ_W	–	Sicherheitsfaktor, anzunehmen mit 1,2
γ_R	–	Sicherheitsfaktor, anzunehmen mit 1,1
d	m	Längsverschiebung des Massenschwerpunktes aus Schiffsmitte
Δ	t	Gesamtmasse des Schiffes
Δ_{Au}	t	Masse der Aufbauten
Δ_{Be}	t	Gesamtmasse aus der Beladungstabelle
Δ_{Hm}	t	Masse der Hauptmaschine
Δ_{std}	t	Masse für die Standardverteilung
Δ_{VG}	t	Gesamtmasse bei Vergleichszustand
f_B	$\frac{kN}{m}$	Streckenlast aus Auftrieb und Grundberührung
f_G	$\frac{kN}{m}$	Streckenlast durch Massen
f_v	$\frac{kN}{m}$	resultierende Vertikalstreckenlast
f_m	–	Verteilungsfaktor über die Schiffslänge nach <i>DNV GL</i> [6] (Sec.4.3.1.1)
$f_{nl,vh}$	–	Faktor zur Berücksichtigung nichtlinearer Effekte bei Hogging
$f_{nl,vh}$	–	Faktor zur Berücksichtigung nichtlinearer Effekte bei Sagging
f_p	–	Wahrscheinlichkeitsfaktor
f_{qs}	–	Verteilungsfaktor der Scherkräfte nach <i>DNV GL</i> [6] (Sec.4.2.4.1)
f_{SW}	–	Verteilungsfaktor der Momente nach <i>DNV GL</i> [6] (Sec.4.2.2.1)
f_t	–	Faktor abhängig vom Entwurfsszenario aus <i>DNV GL</i> [6] (Sec.4.2.2.1)
F_B	kN	Auftriebskraft des Schiffsrumpfes
F_G	kN	Gewichtskraft des Schiffes
F_{Gr}	kN	eingeleitete Vertikalkraft durch Grundberührung
F_M	–	Verteilungsfaktor von $M_{WV,h}$ und $M_{WV,s}$
F_Q	–	Verteilungsfaktor von Q_{WV}
F_V	kN	Vertikalkraft im Querschnitt
g	$\frac{m}{s^2}$	Erdbeschleunigung
I	m^4	Flächenträgheitsmoment
k	–	Materialfaktor nach <i>IACS</i> [7] (Ch.3 Sec.1 2.2)

Symbol	Einheit	Bedeutung
k_{trimm}	–	Gewichtungsfaktor durch Trimm
L	m	Länge des Schiffes
L_{Gr}	m	aufliegende Länge des Rumpfes bei Grundberührung
L_{pp}	m	Länge zwischen den Loten
LCB	m	Längsposition des Auftriebsschwerpunktes
LCG	m	Längsposition des Gewichtsschwerpunktes
LCG_{Au}	m	Längsposition des Schwerpunktes der Aufbauten
LCG_{Be}	m	Längsposition des Schwerpunktes aus der Beladungstabelle
LCG_G	m	Längsposition des Schwerpunktes der Schiffsmasse
LCG_{Hm}	m	Längsposition des Schwerpunktes der Hauptmaschine
LCG_{std}	m	Längsposition des Schwerpunktes der Standardverteilung
M	kNm	vertikales Biegemoment im Schiffsrumpf
M_h	kNm	vertikales Biegemoment durch Hogging
$M_{h,zul}$	kNm	zulässiges vertikales Biegemoment durch Hogging
M_s	kNm	vertikales Biegemoment durch Sagging
$M_{s,zul}$	kNm	zulässiges vertikales Biegemoment durch Sagging
M_{SW}	kNm	vertikales Biegemoment bei Ruhewasser
$M_{SW,h}$	kNm	vertikales Biegemoment bei Ruhewasserlinie durch Hogging
$M_{SW,s}$	kNm	vertikales Biegemoment bei Ruhewasserlinie durch Sagging
M_{WV}	kNm	vertikales Biegemoment bei Seegang
$M_{WV,h}$	kNm	vertikales Biegemoment durch Seegang bei Hogging
$M_{WV,s}$	kNm	vertikales Biegemoment durch Seegang bei Sagging
N	–	Nummer des Hilfsspantes
n_M	kNm	Konstante zur Korrektur der Biegemomentenverlaufes
n_Q	kN	Konstante zur Korrektur des Scherkraftverlaufes
∇	t	Gesamtverdrängung des Schiffes
∇_{El}	t	Verdrängung eines Hilfsspantabschnittes ohne Trimm
∇_{Sp}	t	Verdrängung des Spantabschnittes
P_{MCR}	kW	maximale Dauerleistung der Hauptmaschine
Q	kN	vertikale Scherkraft im Schiffsrumpf
Q_{neg}	kN	negative vertikale Scherkraft im Schiffsrumpf
Q_{pos}	kN	positive vertikale Scherkraft im Schiffsrumpf
$Q_{SW,pos}$	kN	positive Scherkraft bei Ruhewasser
$Q_{SW,neg}$	kN	negative Scherkraft bei Ruhewasser
Q_{WV}	kN	vertikale Scherkraft durch Seegang
t	m	Trimm
t_P	mm	Plattendicke
T	m	Tiefgang des Schiffes

Symbol	Einheit	Bedeutung
T_{AP}	m	Tiefgang am hinteren Lot
T_{FP}	m	Tiefgang am vorderen Lot
T_m	m	mittlerer Tiefgang
τ	$\frac{N}{mm^2}$	Schubspannung
φ	<i>Grad</i>	Krümmungswinkel des Rumpfes um die Querachse
φ_{Kr}	<i>Grad</i>	Krängungswinkel
x	m	Koordinate in Schiffslängsrichtung
x_A	m	Längsposition der auszugebenden Werte
x_{Gr}	m	mittlere Längsposition der Grundberührung
y	m	Koordinate in Schiffsquerrichtung
\bar{y}	m	Querabstand von der neutralen Achse
z	m	Koordinate in Vertikalrichtung
z_F	m	Höhe des Freibordeckes

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

In den letzten Jahren gab es viele Entwicklungen, die die globale Schifffahrt sicherer gemacht haben. Sich ausweitende Satellitenabdeckung, detailliertere Karten und exaktere Wetterprognosen gehen einher mit einer zunehmenden Digitalisierung der nautischen Aufgabenbereiche. Durch die fortschreitende Globalisierung und den damit langfristig steigenden Seetransportraten wachsen jedoch auch die Ansprüche an die Sicherheit im Seeverkehr.

Aus einer Analyse der Entwicklung des Seeverkehrs von *J. Tournadre* [8] geht hervor, dass sich die Anzahl der international verkehrenden Schiffe zwischen 1992 und 2012 mehr als verdreifacht hat. Auch für die kommenden Jahrzehnte wird eine langfristig ansteigende Tendenz prognostiziert. Da die Seefahrt von einer Vielzahl unvorhersehbarer Faktoren, wie Seegang und Wetter, beeinflusst wird, wird es auch weiterhin unvermeidbar sein, dass Schiffe auf Grund laufen, oder in Kollisionen verwickelt werden.

Da ein Schiff im Havariefall wichtige Wasserstraßen blockieren kann und ein Gefahrenpotential für Mensch und Umwelt darstellt, ist es notwendig Lösungen zu finden, die einen sicheren Abtransport des beschädigten Schiffes gewährleisten. Die Einschätzung der Stabilität der Schiffsstruktur sollte deshalb in möglichst kurzer Zeit und mit überschaubarem Aufwand möglich sein.

Einige bisher verwendete Verfahren, wie *Finite Elemente Methoden*, liefern genaue Ergebnisse, allerdings nur mit großem Rechenaufwand, sodass eine zeitnahe Bewertung der Situation nicht möglich ist. Andere Verfahren, die zur Zeit in der Praxis Anwendung finden, sind zu unpräzise, um die erforderliche Sicherheit zu gewährleisten.

Da zur Zeit keine Methode gefunden werden kann, um die Festigkeit eines beschädigten Schiffes mit ausreichender Genauigkeit und überschaubarem Zeitaufwand zu bewerten, soll diese Arbeit dazu dienen eine solche Vorgehensweise zu entwickeln.

Dabei soll ein effizientes und anwendungstaugliches Verfahren entstehen, das insbesondere auf die Anforderungen bei Havarieszenarios ausgelegt ist. Das beinhaltet, dass zuverlässig konservative Ergebnisse für übliche Schadensfälle geliefert werden können und dabei auch die Einflüsse von weiteren Effekten berücksichtigt werden, die bei der praktischen Anwendung beachtet werden müssen. Dafür ist die Auswahl von geeigneten Sicherheitsfaktoren notwendig.

Es soll dabei besonderer Wert darauf gelegt werden, dass die Genauigkeit der getroffenen Prognosen in einem sinnvollen Verhältnis zum Rechenaufwand steht, sodass letztendlich innerhalb weniger Stunden eine Aussage über die Längsfestigkeit eines havarierten Schiffes getroffen werden kann.

1.2 Lösungsansatz

Eine der wichtigsten und kritischsten Bedingungen, deren Überprüfung von der *International Association of Classification Societies (IACS)* [7] (Ch.5, Sec.2) für jedes Schiff gefordert wird, ist die Einhaltung der zulässigen vertikalen Scherkräfte und Biegemomente im gesamten Schiffsrumpf.

Zur Bewertung dieser globalen Festigkeitsbedingungen sollen zum einen die Verteilungen der auftretenden Scherkräfte und Biegemomente über die Schiffslänge prognostiziert werden und zum anderen die maximal zulässigen Belastungen der Schiffstruktur. Die zulässigen Lasten werden mit der Methode von *Smith* [9] bestimmt. Diese ermöglicht die Berechnung der Festigkeit eines Schiffsquerschnittes auf Basis der Abmaße und Plattendicken der Strukturbauteile.

1.3 Vorgehen

Zu Beginn werden vorhandene Methoden zur Bewertung der Festigkeit beschädigter Schiffstrukturen betrachtet, um daraufhin deren Eigenschaften und Defizite zu erläutern. Daraus werden die Anforderungen für das hier zu entwickelte Verfahren abgeleitet. Im Anschluss werden Unfallstatistiken untersucht, um zu ermitteln welche Schäden mit dem zu entwickelnden Verfahren behandelt werden sollen. Des Weiteren wird hierbei ermittelt welche Schiffstypen näher betrachtet werden.

Daraufhin wird die Vorgehensweise schrittweise erläutert, wie das zu entwickelnde Verfahren bei einem realen Havariefall angewandt wird.

Dafür wird eine Methode entwickelt, mit der die vertikalen Scherkräfte und Biegemomente im Schiffskörper prognostiziert werden können, die durch Auftriebs- und Gewichtskräfte eingebracht werden. Auch Seegangslasten und Kräfte durch eventuelle Grundberührungen werden hierbei betrachtet.

Nachfolgend wird ein Programm ausgewählt mit dem die Berechnungen der zulässigen Scherkräfte und Biegemomente durchgeführt werden können. Für dieses Programm werden außerdem Vorlagen von Querschnitten verschiedener Schiffstypen erstellt und daraufhin der Ablauf der Modellerstellung und Berechnungen im Detail erläutert. Dabei wird auch darauf eingegangen wo die Grenzen der Einsetzbarkeit für das Programm liegen.

Um die praktische Anwendbarkeit zu gewährleisten, wird anschließend herausgestellt welche weiteren Aspekte einen Einfluss auf die zulässigen Biegemomente und Scherkräfte haben, wie zum Beispiel Verrostung, oder lokale Effekte. Für diese Einflüsse wird daraufhin erläutert, wie sie in den Berechnungen berücksichtigt werden können.

Im anschließenden Kapitel wird eine Methodik entwickelt, um Berechnungen für Unfallszenarios durchführen zu können, für die die standardmäßige Vorgehensweise nicht

angewendet werden kann.

Um zu überprüfen wie praxistauglich das somit erhaltene Verfahren ist und wie viel Aufwand es benötigt, wird daraufhin ein real existierender Schadensfall mit den Unterlagen durchgerechnet, die bei einer Havarie üblicherweise zeitnah zugänglich sind.

Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung und Bewertung der entwickelten Methodik.

2 Stand der Technik

2.1 Bereits vorhandene Verfahren

Es werden verschiedene Ansätze genutzt, um vorherzusagen, ob eine Schiffsstruktur den zu erwartenden Belastungen Stand hält. Dabei steigt mit den Anforderungen an die Exaktheit der Ergebnisse in der Regel auch der Aufwand das Verfahren anzuwenden. Die gesamte Problematik wird durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst. Sowohl Seegangverhalten, als auch strukturmechanische Einflussgrößen müssen prognostiziert werden. Da eine umfassende Betrachtung in einem Modell schwierig umzusetzen ist, werden in der Regel zwei getrennte Rechnungen durchgeführt. Zum einen werden die Lasten berechnet, die die Struktur während ihrer Betriebszeit voraussichtlich erfahren wird. Und zum anderen wird berechnet, wie hoch die vorliegende Struktur belastet werden darf.

Es ist dabei darauf zu achten, dass die Berechnungsmethoden in der Regel dafür entwickelt wurden im Entwurfsstadium von Schiffen angewendet zu werden und nicht für ein Schiff havariert.

Vorgehensweisen zur Bestimmung der zu erwartenden Belastungen werden in Abschnitt 2.1.1 beschrieben.

Im Anschluss werden in Abschnitt 2.1.2 Verfahren erläutert, um die Belastbarkeit von Schiffsstrukturen zu ermitteln.

Es wird dabei versucht mit möglichst einfachen Mitteln das nichtlineare Verhalten der Struktur zu simulieren und die verschiedenen Fehlermodi der Bauteile abzudecken. Wie von *Paik et al.* [10] näher erläutert, ist für Druckbelastungen Beulen die übliche Versagensform, wobei auch die Kräfte und Momente in verbeulten Elementen zur globalen Festigkeit beitragen. Gleiches gilt für das elastoplastische Verhalten bei Zugbeanspruchungen. Außerdem müssen auch die auftretenden Scherbeanspruchungen, sowie Kombinationen aus den Belastungen Berücksichtigung finden. Modelle, bei denen weniger detailliert analysiert wird, arbeiten mit Erfahrungswerten und Sicherheitsfaktoren.

2.1.1 Bestimmung der auftretenden Belastungen

2.1.1.1 Common Structural Rules der IACS

Die maximal zulässige Belastung, die die Struktur aufnehmen kann, muss nach den Vorschriften der *International Association of Classification Societies (IACS)* abgeglichen werden mit anzunehmenden Momenten und Scherkräften. Der folgende Absatz beschreibt wie anzunehmende Lasten auf die Schiffsstruktur in den *Common Structural*

Rules [7] bestimmt werden.

Die anzunehmenden vertikalen Biegemomente und Scherkräfte setzen sich aus Beladungszustandsbelastungen bei Ruhewasser und Wellenbelastungen zusammen. Während die anzunehmenden Wellenbelastungen mit einer einfachen Abschätzung auf Basis der Hauptabmessungen des Schiffes und abhängig von der Längskoordinate angenommen werden, ist die Bestimmung der Lasten durch die Beladungszustände aufwändiger. Für erste Entwürfe wird in den Vorschriften eine einfache Standardverteilungsfunktion für diese Ruhewasserlasten vorgeschlagen, ähnlich der Wellenlastannahme.

In den Vorschriften der *IACS* [7] wird zusätzlich gefordert, dass im späteren Entwurfsprozess für jeden Beladungszustand, den das Schiff in seiner Lebenszeit einnehmen kann, Längsfestigkeitsanalysen durchgeführt werden. Unter anderem auch für den Fall, dass Laderäume geflutet, beziehungsweise teilgefutet sind. Es wird dabei nicht vorgegeben mit welcher Methode diese Untersuchungen durchgeführt werden müssen, jedoch ist Untersuchung der exakten Ladezustände im Entwurf unvermeidbar.

Eine Umkehrung der Entwurfslogik, um auf Basis einer vorliegenden Stahlstruktur auf die angenommenen Belastungen zu schließen, ist nicht möglich, da zu viele Beladungs- und Flutungszustände betrachtet werden und auch zusätzliche Forderungen des Bauauftraggebers die Schiffsstruktur beeinflussen.

Da in den *Common Structural Rules* nicht näher beschrieben wird mit welchem Verfahren die Belastungen durch die Beladungszustände berechnet werden sollen, wird im folgenden Abschnitt 2.1.1.2 ein gängiges Vorgehen vorgestellt.

Von den Klassifikationsgesellschaften der *IACS* wurden Programme entwickelt, von denen die Berechnungsvorschriften umgesetzt werden. Dafür müssen Raumaufteilungen und Beladungszustände definiert werden. Dieser Prozess ist weniger aufwändig als die Erstellung eines kompletten Modelles für Seeganganalysen. Jedoch erfordert es immer noch einen nicht zu unterschätzenden Arbeitsaufwand ein Schiff inklusive Raumaufteilung einzupflegen. Außerdem kann keines dieser Programme Grundberührungen berücksichtigen. Auf Grund der Komplexität dieser Programme ist eine sichere Handhabung erforderlich, um vertrauenswürdige Ergebnisse zu erhalten. Beispiele für diese Art Software sind *MARS2000* von *Bureau Veritas*, *Poseidon* vom *DNV GL* und *SafeHull* von *American Bureau of Shipping*.

2.1.1.2 Berechnung der Kräfte bei Ruhewasser

Wie von *Fricke* [11] beschrieben, können die Ruhewasserbelastungen auf Basis von Massenverteilung des Leerschiffes, Beladungszustand und Auftriebskräften ermittelt werden. Dieses Vorgehen wird in den Ladungsrechnern an Bord von Schiffen genutzt. Dafür wird im ersten Schritt die sich aus der Rumpfform ergebende Verteilung der Auf-

triebskräfte über die Schiffslänge festgelegt. Daraufhin wird die Verteilung der Gewichtskräfte ermittelt. Die wesentlichen Einflussfaktoren dafür sind die Stahlstruktur, Ausrüstung, Beladung, Betriebsstoffe und eventuelle Flutungen.

Die Differenz dieser vertikalen Lasten ergibt den Verlauf der resultierenden Querkräfte, die am jeweiligen Querschnitt einbracht werden. Durch Integrieren über die Schiffslänge ergeben sich die Scherkräfte, die von der Schiffsstruktur am jeweiligen Querschnitt aufgenommen werden müssen. Das vertikale Biegemoment kann wiederum durch Integration der Scherkraft über die Schiffslänge ermittelt werden.

Diese Vorgehensweise ist ein Standardwerkzeug im Ingenieurwesen für die Festigkeitsbewertung von Strukturen, da sie mit überschaubarem Aufwand zuverlässige Ergebnisse liefert.

2.1.1.3 Berechnung von Seegangsmodellen

Eine weitere Möglichkeit die zu erwartenden Belastungen zu berechnen ist die Modellierung des Schiffes in Entwurfsseegängen, die für die Betriebszeit des Schiffes als Auslegungskriterium angenommen werden. Dabei wird die Reaktion des Schiffes in verschiedenen Winkeln gegenüber der Hauptwellenrichtung berechnet. Durch die Annahme verschiedener Massenverteilungen an Bord können die Reaktionen des Schiffes auf die hydrodynamischen Kräfte abhängig vom Beladungszustand ermittelt werden.

Im Unterschied zu der Vorgehensweise in den *Common Structural Rules* werden hier Ruhewasser- und Seegangbelastungen nicht getrennt berechnet. Das betrachtete Modell kann somit Interaktionen zwischen den auftretenden Effekten besser berücksichtigen und dadurch genauere Ergebnisse liefern.

Die Erstellung dieser Modelle und die Durchführung der Berechnungen ist wiederum zeitaufwändig und erfordert die Annahme bestimmter Seegänge, die in der Praxis schwer vorhergesagt werden können.

2.1.2 Bestimmung der zulässigen Belastungen

2.1.2.1 Bisherige Vorgehensweise von *Ardent* und *brand Marine Consultants*

Diese Methode wurde einem Bergungsplan entnommen, der von dem Bergungsunternehmen *Ardent* und *brand Marine Consultants* erstellt wurde, jedoch aus vertraulichen Gründen nicht näher benannt werden kann. Dabei wird das maximal zulässige Biegemoment aus dem Stabilitätshandbuch um einen Faktor reduziert. Dieser Faktor basiert auf der Annahme, dass sich das zulässige Biegemoment proportional zu der Länge der tragenden Platten im Querschnitt verhält.

Im ersten Schritt werden dafür alle Plattenlängen aufsummiert, die im unbeschädigten Spant liegen. Daraufhin wird ermittelt welche Plattenlänge durch den Schaden als nicht

mehr tragend angesehen werden kann. Das Verhältnis aus diesen Längen ergibt den Prozentwert, um den das zulässige Biegemoment reduziert wird.

2.1.2.2 Finite Elemente Methoden

Der folgenden Beschreibung liegen die Ausführungen von *Klein* [12] zu Grunde. In den Finite Elemente Methoden (FEM) wird das Schiff, oder Teile des Schiffes durch ein dreidimensionales feinmaschiges Netz nachgebildet. Lastannahmen können frei gewählt werden, sodass auch Kombinationen komplexer Lastsituationen berechenbar sind. Es ist somit möglich Nichtlinearitäten der Strukturantwort und Materialeigenschaften zu berücksichtigen. Neben global auftretenden Effekten ist es auch möglich lokale Lastsituationen zu simulieren. Das erfordert jedoch einen erhöhten Arbeitsaufwand, da die zu betrachtende Stelle noch feiner vernetzt werden muss. Dabei ist eine genaue Kenntnis der Materialeigenschaften für eine aussagekräftige Prognose unerlässlich.

Die Feinheit der Unterteilung ermöglicht es, dass Struktur- und Materialverhalten so gut nachzubilden, dass verschiedene Versagensarten der Gesamtstruktur auftreten können, ohne das Strukturverhalten vorher exakt festzulegen. Es können somit teilweise auch Effekte berücksichtigt werden, die vor den Berechnungen nicht abzusehen sind.

Durch die Festlegung verschiedener Versagenskriterien kann auch das Durchlaufen verschiedener Fehlermodi berechnet werden, sodass ein progressiver Strukturkollaps simuliert wird. Durch das Lösen des Gleichungssystems können Deformierungen und Spannungen für die einzelnen Elemente errechnet werden.

Dabei wird das Konzept des *Limit State Designs* angewendet. Wie von *Lopez* und *Al-Hazam* [13] näher ausgeführt, werden dabei Strukturen so ausgelegt, dass sie im Normalbetrieb auftretenden Lasten dauerhaft standhalten, während extreme Belastungen so weit aufgenommen werden können, dass eine festzulegende Sicherheit gegen Strukturkollaps gewährleistet wird. Dafür werden Auftretenswahrscheinlichkeiten und Belastungen von Extremsituationen betrachtet.

Diese Methode kann mit exakten Randbedingungen, einer geeigneten Diskretisierung und ausreichender Feinheit des Netzes zuverlässige Voraussagen liefern. Es sind jedoch große Rechenkapazitäten erforderlich, um die Gleichungssysteme zu lösen und die Gestaltung des Modelles ist aufwändig. Das Einbringen von Deformierungen und Vorspannungen, die durch einen Schadensfall eingebracht wurden, verkompliziert die Modellierung zusätzlich.

2.1.2.3 Idealized Structural Unit Method

Das Programm *ALPS/ISUM* von *Paik et al.* verwendet den Ansatz der *Idealized Structural Unit Method (ISUM)*. Die folgenden Ausführungen fassen die Ausarbeitungen in

Ultimate Strength of Ship Hulls Under Combined Vertical Bending, Horizontal Bending, and Shearing Forces [10] zusammen.

Der Ansatz der Methode wurde von *Ueda* (1974) und *Rashed* (1984) entwickelt. Dabei wird die Struktur in Elemente aufgeteilt, die wesentlich größer sind, als bei der *Finite Elemente Methode*. Somit können für komplette Platten, oder Steifen die Belastungen und verschiedene Fehlermodi berechnet werden. Auch nichtlineare Eigenschaften werden dabei berücksichtigt. Diese Vereinfachung ermöglicht es mit wesentlich geringerem Aufwand Berechnungen durchzuführen und die Vorteile einer dreidimensionalen Analyse nutzen zu können.

Mit *ALPS/ISUM* können die folgenden Versagensarten betrachtet werden: für Druckbelastungen Plattenbeulen, sowie lokales und globales Beulen, und für Zugbelastungen plastische Verformungen, Bruch durch Zugkräfte und Verformungsbruch.

Auch wenn dieses Verfahren weniger arbeitsintensiv ist als Finite Elemente Methoden, so ist die Modellierung eines kompletten Schiffes mit Schadensfall dennoch wesentlich aufwändiger als bei der Anwendung von zweidimensionalen Ansätzen.

2.1.2.4 Verfahren nach *Smith*

1977 wurde von *Smith* [9] eine Berechnungsmethode veröffentlicht, die in die *Common Structural Rules* der *IACS* übernommen wurde. Sie hat sich seitdem als zuverlässige und effiziente Methode etabliert, um die Festigkeit von Schiffsrümpfen während der Entwurfsphase von Schiffen zu bewerten. Im Folgenden wird das Verfahren erläutert, wie es in den *Common Structural Rules for Bulk Carriers* [7] für intakte Schiffe beschrieben wird.

Für die Berechnungen werden die zweidimensionalen Querschnitte des Schiffsrumpfes betrachtet. Die Spanten werden dabei in Platte-Steife-Elemente und Kreuzungspunkte von Platten, sogenannte harte Punkte, zerlegt, wobei die vorhandenen geometrischen Abmaße auf effektiv wirksame Breiten und Dicken reduziert werden.

Für den ersten Iterationsschritt muss vorerst die Lage der neutralen Faser für die vertikale Biegung abgeschätzt werden. Die exakte Lage wird später durch iteratives Vorgehen ermittelt. Zur Bestimmung des Biegemomentes wird daraufhin eine Krümmung des Schiffsrumpfes um die Querachse um den Winkel φ_i angenommen. Daraus ergibt sich abhängig vom vertikalen Abstand zur neutralen Faser für jedes Platte-Steife-Element eine Dehnung in Längsrichtung.

Um die resultierenden Kräfte im Bauteil zu berechnen wird eine Traglastkurve hinterlegt. Diese Kurve beschreibt den Verlauf der Spannung im Bauteil über die Dehnung und muss das Verhalten sowohl unter Zug- als auch Druckbelastungen widerspiegeln. Dabei muss auch das Verhalten bei Belastung über die Beul- und Streckgrenze beschrieben werden. Der Verlauf wird vorrangig durch Materialeigenschaften und Versagensarten

der Bauteile beeinflusst, aber auch Imperfektionen aus der Fertigung und Grundspannungen müssen berücksichtigt werden. Der Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Kurven kann aus Finite Elemente Analysen, Versuchen oder theoretischen Ansätzen gewonnen werden.

Durch Multiplikation der so ermittelten Spannung in einem Element mit der jeweiligen wirksamen Querschnittsfläche ergibt sich die aufgenommene Kraft im Element. Diese über die Schiffsbreite aufsummierten Kräfte ergeben einen Kraftverlauf über die Höhe des Rumpfes, wobei die aufgebrachte Krümmung Kräfte mit verschiedenen Vorzeichen in Deck und Schiffsboden erzeugt. Durch die Bedingung des Kräftegleichgewichtes über und unter der neutralen Faser kann die Lage der neutralen Faser iterativ bestimmt werden. Die neu errechnete Lage wird für den nächsten Iterationsschritt genutzt, bei dem der Krümmungswinkel vergrößert wird.

Aus dem damit resultierenden Kraftverlauf über die Höhe kann nun das resultierende Moment berechnet werden, welches aufgebracht werden muss um die Initialkrümmung φ zu erreichen.

Diese Berechnungen werden für verschiedene Krümmungswinkel wiederholt. Die Klassifikationsgesellschaften geben Empfehlungen zur Schrittweite.

Nachdem jedem Winkel ein Moment zugeordnet wurde kann dieser Verlauf durch einen Graphen nachgebildet werden, dessen Maximum dem Biegemoment entspricht, welches maximal von der Struktur aufgenommen werden kann.

Für beschädigte Schiffe kann die *Smith*-Methode ebenfalls angewendet werden, indem beschädigte Bereiche als nicht-tragend definiert werden. Da die Schäden in der Regel unsymmetrisch auftreten wird die neutrale Faser eine Neigung relativ zur Querachse des Schiffes einnehmen. Um die Lage zu bestimmen muss somit zusätzlich ein Kräftegleichgewicht über die Breite des Querschnittes gelöst werden.

Die Klassifikationsgesellschaften der IACS haben eigene Programme entwickelt, in denen die *Smith*-Methode angewandt wird. Diese können nach Erstellung der Schiffsgeometrie die zulässigen Kräfte und Momente berechnen und dabei auch Beschädigungen berücksichtigen.

2.1.2.5 Theorie über Schubspannungsverteilungen in dünnwandigen Querschnitten

Um die maximal zulässige Querkraft eines existierenden Schiffsquerschnittes zu erfahren, kann die Theorie über Schubspannungsverteilungen in dünnwandigen Querschnitten angewendet werden, wie sie von *Shama* [14] (P.2, Ch.7.2.3) beschrieben wird. Hierfür wird, wie in der *Smith*-Methode, ein zweidimensionaler Querschnitt eines Schif-

fes betrachtet. Durch die Anordnung und Dicken der Platten im Querschnitt ergibt sich ein Schubspannungsverlauf, dessen Amplitude von der eingepprägten Last abhängig ist. Gleichung 2.1 zeigt den Grundzusammenhang für die Schubspannungsberechnung. Mit der Festlegung einer maximal zulässigen Schubspannung, die im gesamten Querschnitt nicht überschritten werden darf, ergibt sich somit eine maximal zulässige Scherkraft für den betrachteten Querschnitt.

$$\tau = F/It_P \cdot A\bar{y} \quad (2.1)$$

- τ Schubspannung an einem Punkt im Querschnitt [$\frac{N}{mm^2}$]
- F_V Vertikalkraft im Querschnitt [kN]
- I Flächenträgheitsmoment [m^4]
- t_P Plattendicke [mm]
- A Querschnittsfläche [m^2]
- \bar{y} Abstand von der neutralen Achse [m]

2.2 Defizite vorhandener Verfahren

Die vorgestellten Verfahren haben in verschiedenen Kontexten ihre Berechtigung und werden dort angewendet. Im Folgenden wird darauf eingegangen, warum die bisher existierenden Vorgehensweisen sich jedoch nicht ideal eignen, um für die Bewertung der Längsfestigkeit bei Unfallszenarios eingesetzt zu werden.

Verfahren zur Berechnung der auftretenden Belastungen

Die Lastannahmen der *IACS* wurden entwickelt, um ein Schiff im Entwurfsstadium für mindestens 20 Jahre Betriebszeit auszulegen. Die dort anzunehmenden Belastungen und Sicherheitsfaktoren überschätzen die auftretenden Lasten für einen Transport in die Reparaturwerft somit stark.

Die überschlägige Abschätzung der Ruhewasserbelastungen dient lediglich als grober Richtwert und kann nicht als Grundlage für eine aussagekräftige Festigkeitsbewertung dienen.

Eine Modellierung der gesamten Rumpfform mit dem vorliegenden Beladungszustand und einem anzunehmenden Seegang liefert zuverlässigere Ergebnisse, ist jedoch für eine schnelle Bewertung der Situation im Havariefall zu aufwändig und langwierig. Zusätzlich ist ein umfangreiches Verständnis der Software und deren Fehlerquellen erforderlich.

Besonders bei Schiffsunfällen kann es außerdem vorkommen, dass Grundberührungen vorliegen, sodass ein zusätzlicher Kraftangriffspunkt am Rumpf definiert werden muss. Zur Zeit kann kein Programm von einer Klassifikationsgesellschaft gefunden werden, welches diesen Kräfteintrag berücksichtigen kann.

Die Anforderungen für eine Prognose der auftretenden Lasten, wie es nach einem Schiffsunfall notwendig ist, kann somit keines der Verfahren ausreichend gut erfüllen.

Verfahren zur Berechnung der zulässigen Belastungen

Die Ergebnisse der bisherigen Vorgehensweise zur Abschätzung der zulässigen Belastungen von *Ardent* und *brand Marine Consultants* können lediglich als grobe Richtwerte dienen und erfassen die Komplexität der Problematik nicht ausreichend. Zum Einen kann das maximal zulässige Biegemoment aus dem Stabilitätshandbuch durch Spezifikationen vom Eigner stark reduziert sein. Zum anderen werden Materialeigenschaften vernachlässigt und die geometrischen und physikalischen Zusammenhänge bei der Biegung eines Schiffsrumpfes nicht näher betrachtet.

Berechnungen mit *Finite Elemente Methoden* benötigen einen verhältnismäßig großen Modellierungs- und Rechenaufwand. Sie werden deshalb zur Zeit nicht als praktikables Standardwerkzeug für die Entscheidungsfindung bei Havariefällen genutzt.

Auch wenn der benötigte Aufwand stark vom Anwender und dem Detaillierungsgrad abhängt, ist es nicht möglich innerhalb weniger Stunden ein Ergebnis zu erhalten. Besonders das Modellieren der Schadensstelle ist mit enormen Aufwand verbunden, da Restspannungen und Vorverformungen einen relevanten Einfluss haben, aber der Schaden in der Regel nicht so exakt bekannt ist.

Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass selbst stark vereinfachte Rechnungen mit *FEM* wesentlich exaktere Ergebnisse liefern als das bisherige Verfahren von *Ardent* und *brand Marine Consultants*.

Für detailliertere Analysen, oder besondere Schadensfälle, für die einfachere Verfahren keine zuverlässigen Ergebnisse liefern, kann sich der Aufwand von *FEM*-Analysen lohnen.

Auch der Einsatz der *Idealized Structural Unit Method* ist für eine effiziente Entscheidungsfindung, ob ein havariertes Schiff transportfähig ist, noch zu aufwändig in der Handhabung. Auch wenn dieses Verfahren bereits eine Vereinfachung zu *FEM*-Rechnungen darstellt, ist es auch hier immer noch notwendig ein dreidimensionales Modell

zu entwerfen und umfangreiche Randbedingungen einzupflegen.

Programme von Klassifikationsgesellschaften, die die *Smith*-Methode nutzen, benötigen hingegen einen vertretbaren Aufwand und liefern zuverlässig Ergebnisse mit einer Genauigkeit die für eine praktische Anwendung angemessen ist. Ungenauigkeiten der Methode und Effekte, die in der Vorgehensweise nach *Smith* keine Berücksichtigung finden können durch die langjährige Erfahrung durch Sicherheitsfaktoren berücksichtigt werden. Da diese Faktoren jedoch für die Rahmenbedingungen eines Schiffsneubaus ausgelegt sind, kann davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse konservativer sind, als es für eine einmalige Fahrt zu einer Reparaturwerft notwendig ist.

2.3 Anforderungen an das zu entwickelnde Verfahren

Aus den zuvor beschriebenen Verfahren und deren Defiziten wird deutlich, dass es erforderlich ist eine Methode zu entwickeln, die für eine Anwendung bei Havariefällen ausgelegt ist.

Um die Festigkeit eines Schiffes nach einem Schiffsunglück zu bewerten, ist es notwendig ein Verfahren zu entwickeln, welches zuverlässige Ergebnisse liefert und einen überschaubaren Aufwand benötigt.

Da es für komplexe Schadensfälle und detaillierte Untersuchungen schon Verfahren wie *FEM*-Rechnungen gibt, die jedoch in den meisten Havariefällen einen unnötig großen Aufwand erfordern, soll die hier zu entwickelnde Methodik die Möglichkeit bieten innerhalb weniger Stunden Arbeitszeit zuverlässige Ergebnisse zu erhalten. Die bisher verwendete Vorgehensweise von *Ardent* und *brand Marine Consultants* liefert zwar in kurzer Zeit Ergebnisse, jedoch ist die Zuverlässigkeit der Berechnungen unzureichend und durch die starken Vereinfachungen kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse konservativ sind.

Mit dem Ansatz von *Smith* hingegen können Struktur- und Materialverhalten realistisch genug modelliert werden, um vertrauenswürdige Ergebnisse zu erhalten. Dabei erfordert das zweidimensionale Modell lediglich Eingaben, die einen signifikanten Einfluss auf die Längsfestigkeit haben.

Da die Rahmenbedingungen für Schiffsunfälle sehr unterschiedlich sein können, ist es nicht immer möglich zeitnah an alle Unterlagen und Daten des Schiffes zu gelangen. Deshalb soll die zu entwickelnde Methodik für eine erste Abschätzung zur Entscheidungsfindung die Möglichkeiten bieten verschiedene Werte abzuschätzen und typische Verteilungen anzunehmen. Es soll somit ermöglicht werden, eine sehr schnelle überschlägige Abschätzung zu machen, die später durch Eingabe von Daten des vorliegen-

den Schiffes exakter gemacht werden kann.

Weil Schiffe in der Regel nach einem Unfall direkt in eine Reparaturwerft gebracht werden ohne für weitere Transportaufgaben verwendet zu werden, wird für die Abschätzung der auftretenden Belastungen davon ausgegangen, dass nur ein Ladefall relevant ist. Dieser vorliegende Ladefall kann in dem zu entwickelnden Programm definiert werden können und falls notwendig durch Ballastieren, oder Leeren der Laderäume angepasst werden können.

Es soll außerdem eine Möglichkeit geben Belastungen durch Seegang abzuschätzen. Für nah am Unfallort liegende Reparaturwerften kann dieser reduziert werden. Es soll jedoch auch möglich sein eine längerfristige Sicherheit für auftretende Seegangsbelastungen zu gewährleisten, falls der Schaden klein ist und eine weiter entfernte Reparaturwerft in Betracht gezogen wird.

Zusätzlich soll die Möglichkeit geschaffen werden den Kräfteintrag durch eventuelle Grundberührungen zu berücksichtigen. Dabei soll an einer bekannten Position der Grundberührung eine vertikale Kraft zu der Auftriebsverteilung addiert werden. Die Berücksichtigung einer Grundberührungskraft ist mit dem Verfahren von *Ardent* und *brand Marine Consultants* und den Programmen der Klassifikationsgesellschaften nicht möglich.

3 Analyse von Unfallstatistiken

Um zu ermitteln welche Schadensfälle mit dem zu entwickelnden Verfahren untersucht werden sollen, werden im Folgenden Schadensstatistiken von Schiffsunfällen untersucht. Da kein Datenmaterial gefunden werden konnte, das einen globalen Überblick über die Lage und Größe von Beschädigungen von Schiffsstrukturen gibt, werden die von *Allianz Global Corporate & Specialty (AGCS)* veröffentlichten Statistiken betrachtet, bei denen die Häufigkeit der Ursachen für Unfälle mit Totalverlust gegenübergestellt werden. Die Statistiken beziehen sich auf den Zeitraum von 2006 bis 2015 und beinhalten 1223 weltweit aufgetretene Schiffsunfälle mit Totalverlust. Weniger schwere Unfälle werden darin nicht berücksichtigt.

3.1 Art der Beschädigungen

Im *Safety and Shipping Review 2016* der AGCS [1] wird eine Übersicht über die Hauptursachen für Totalverluste von Schiffen gegeben. Abbildung 3.1 veranschaulicht die Werte.

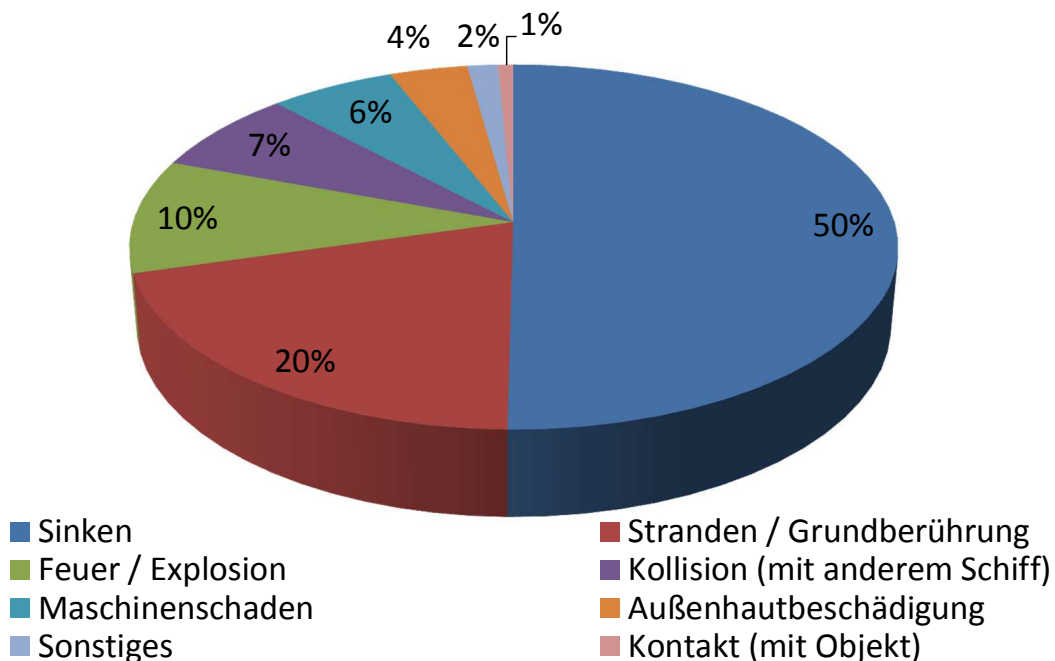


Abbildung 3.1: Ursachen für Totalverluste weltweit, 2006 bis 2015, Daten aus dem *Safety Shipping Review 2016* [1]

Bei der Hälfte der Totalverluste ist das Schiff gesunken. Zu diesem Anteil werden alle Beschädigungen gezählt, die durch extreme Seegangs- und Wettersituationen hervorgerufen wurden und zu Lecks, oder zum Zerschlagen des Schiffes geführt haben und nicht von den anderen Unglücksszenarios abgedeckt werden. Für diesen Anteil kann nicht genauer bestimmt werden wo die Beschädigungen der Struktur aufgetreten sind. Der nächst größere Anteil mit 20 % wird durch Grundberührungen verursacht. Es kann also damit gerechnet werden, dass ein signifikanter Anteil der zu erwartenden Schadensfälle aus beschädigten Bodenstrukturen besteht.

Beschädigungen der Schiffsseiten treten bei Kollisionen, Kontakt mit Objekten und Außenhautbeschädigungen auf. Dieser Anteil beträgt zusammen 12 % aller Schadensfälle und muss somit ebenfalls von dem zu entwickelnden Verfahren berechnet werden können. Dass der Anteil an Beschädigungen an den Schiffsseiten in dieser Statistik geringer ist als der Anteil mit Bodenbeschädigungen, kann darauf beruhen, dass Seitenschäden weniger oft zu einem Totalverlust von Schiffen führen. Für nähere Untersuchungen konnte kein aussagekräftiges Datenmaterial gefunden werden.

Für den Anteil mit 10 %, der durch Feuer und Explosionen hervorgerufen wird, kann wiederum nicht vorhergesagt werden in welchem Teil des Schiffskörpers Beschädigungen zu erwarten sind.

Maschinenschäden sind für strukturelle Berechnungen nicht relevant.

Das in dieser Arbeit zu entwickelnde Verfahren muss also sowohl Boden-, als auch Seitenbeschädigungen berechnen können. Die Möglichkeit zufällig verteilte Schäden zu berechnen, wie sie nach Feuer, oder Explosionen auftreten, wäre nützlich, muss jedoch mit dem Aufwand abgewägt werden, den die Entwicklung und Anwendung eines verlässlichen Prognoseverfahrens benötigt.

3.2 Schiffstypen

In Abbildung 3.2 werden die Anzahlen der Schiffstypen gegenübergestellt, die zwischen 2006 und 2015 Totalverlust erlitten haben.

Der größte Anteil der weltweit havarierten Schiffe sind demnach Stückgutfrachter. Auch Fischereifahrzeuge sind wesentlich öfter betroffen als andere Schiffstypen. Diese verfügen jedoch nicht über derart lange Rümpfe, sodass die Längsfestigkeit weniger kritisch ist und nach IACS mit unter 150 m Länge anderen Kriterien unterliegen.

Die weiteren gängigen Schiffstypen treten in der Statistik ähnlich oft auf. Dazu gehören Massengutschiffe, Passagierschiffe, Chemikalienanker, Ro-Ro-Schiffe und Containerschiffe. Tanker erleiden verhältnismäßig selten Totalverluste.

Die weiteren Schiffstypen aus Abbildung 3.2 haben in der Regel kleinere Ausmaße und

3.2 Schiffstypen

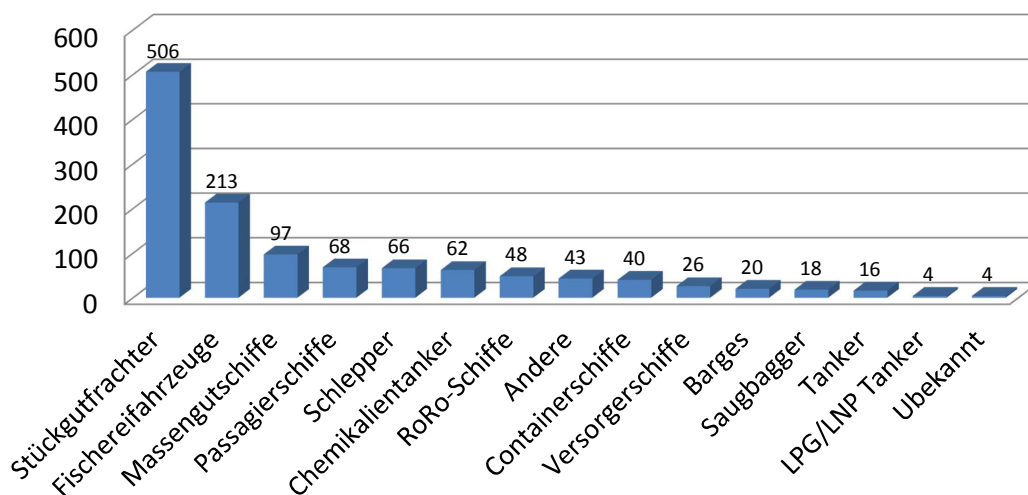


Abbildung 3.2: Totalverluste nach Typen, 2006 bis 2015, Daten aus dem *Safety Shipping Review 2016* [1]

werden für die Längsfestigkeit nicht als kritisch angesehen.

Abbildung 3.3 gibt einen Überblick über die Schiffstypen, aus den bisherigen Projekten von *brand Marine Consultants*. Es ist klar zu sehen dass auch in dieser Statistik Unfälle von Massengutschiffen überproportional oft vorgekommen sind. Die weiteren Schiffstypen treten mit geringerer Häufigkeit auf.

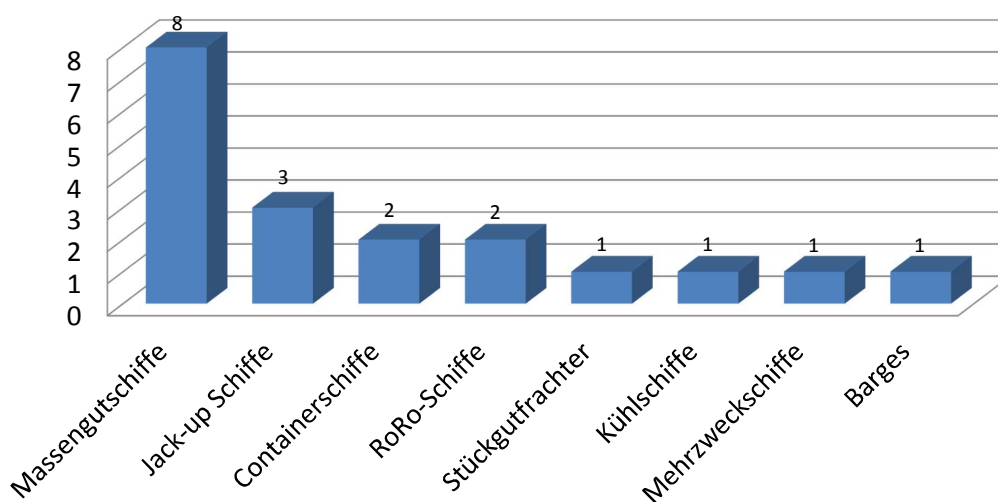


Abbildung 3.3: durchgeführte Projekte von *brand Marine Consultants* nach Typen, Daten von *brand Marine Consultants* [2]

4 Entwicklung eines Verfahrens zur Bewertung der Festigkeit

4.1 Koordinatensystem und Vorzeichenkonventionen

Den folgenden Ausführungen liegt ein schiffsfestes Koordinatensystem zu Grunde, wie es in Abbildung 4.1 dargestellt ist. Der Ursprung liegt am hinteren Lot auf der Mittellachse auf Höhe des Kiels. Die x -Achse zeigt Richtung Vorschiff, die y -Achse Richtung Backbord und z -Werte sind nach oben positiv.

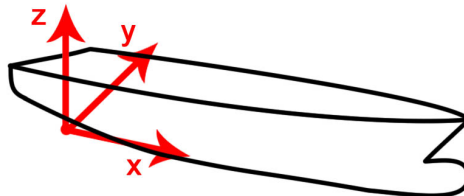


Abbildung 4.1: Schiffsfestes Koordinatensystem

Die Vorzeichen der vertikalen Scherkräfte Q , die an einem freigeschnittenen Schiffsquerschnitt angreifen, werden positiv angenommen, wenn an der hinteren Seite nach unten gerichtete Kräfte angreifen und demzufolge die Kräfte an der Vorderseite nach oben gerichtet sind.

Vertikale Momente M , also Momente um die y -Achse, werden als positiv definiert, wenn sie den Schiffsboden stauchen und obere Decks strecken.

Diese Konventionen entsprechen den Annahmen, die von der IACS [7] (Ch.4, Sec.3.1.1.1) getroffen werden. Sie sind in Abbildung 4.2 dargestellt

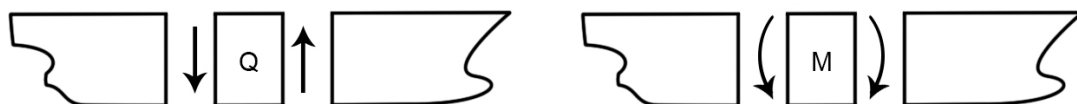


Abbildung 4.2: Vorzeichenkonventionen für positive Scherkräfte und Momente

Für die Berechnungen wird das Schiff in ein Raster aus Hilfsspannten unterteilt. Diese sind nicht an den gleichen Positionen wie die Konstruktionsspannten des Schiffes, sondern sind in gleichmäßigen Abständen zwischen hinterem und vorderem Lot verteilt. Dabei werden Hilfsspannten von null bis zehn betrachtet, die wiederum in zehn Unterabschnitte unterteilt sind, sodass sich 101 Hilfsspannten ergeben. In Abbildung 4.3 ist diese Unterteilung dargestellt.

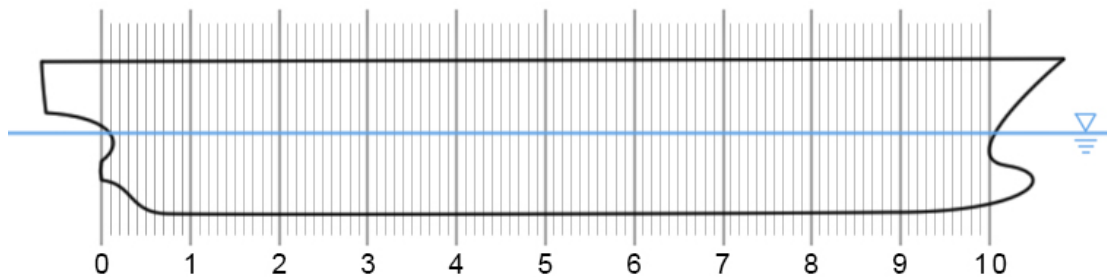


Abbildung 4.3: Hilfsspannenraster, das für die folgenden Rechnungen verwendet wird

4.2 Ablaufplan bei der Bewertung eines Schadensfalles

In diesem Abschnitt wird die Abfolge der durchzuführenden Schritte erläutert, die bei einem realen Havarieszenario durchgeführt werden müssen, um mit dem hier zu entwickelnden verfahren die Festigkeit eines Schiffes zu bewerten.

Für detailliertere Beschreibungen der einzelnen Berechnungsschritte können die nachfolgenden Kapitel 4.1 und 4.4 herangezogen werden.

Im ersten Schritt werden die Belastungsverteilungen für das vorliegende Schiff bestimmt. Diese Lasten ergeben sich aus der Gewichts- und Auftriebsverteilung des Schiffes, sowie aus eventuell eingeleiteten Kräften durch Grundberührungen und der Abschätzungen der Belastungen durch Seegang. Die dafür notwendigen Optionen und Werte werden in das Programm mit übersichtlichen Eingabemaske eingegeben.

Somit ergeben sich die resultierenden Verläufe über die Schiffslänge der vertikalen Scherkräfte und Biegemomente für Ruhewasserlinie und Seegang.

Auf Basis dieser Kurven werden nun die Längspositionen bestimmt, an denen eine Bewertung der Festigkeit notwendig ist. Zum einen muss die Position näher untersucht werden an der die Schiffsstruktur beschädigt ist. Zum anderen ist es notwendig die Festigkeit des Rumpfes an weiteren Stellen zu bewerten, an denen kritische Lasten auftreten können. Das Programm ermittelt dafür automatisch alle Minimal- und Maximalwerte der Belastungskurven und gibt diese Werte tabellarisch aus. Je nach Fall kann sich dabei eine Vielzahl an Extremstellen ergeben.

Es ist deshalb notwendig eine Auswahl der Längspositionen zu treffen an denen eine Festigkeitsuntersuchung notwendig ist. Da kritische Stellen dort liegen, wo besonders hohe Belastungen auftreten, müssen die Extrema mit den größten Amplituden in jedem Fall untersucht werden. Längspositionen an denen kleinere Amplituden der Kraft- und Momentenverläufe auftreten können vernachlässigt werden. Eine allgemeine Regel lässt sich hierfür nicht formulieren, da die Belastungsverteilungen extrem unterschiedlich sein können. Eine Bewertung einer Person mit ausreichendem technischem Verständnis und Erfahrung ist hierbei unumgänglich.

Je nach Schiff kann es notwendig sein zusätzliche Längspositionen zu untersuchen falls es Positionen gibt an denen die Festigkeit des Rumpfes ein Minimum erreicht, wie zum Beispiel bei Schiffen mit Sprung im Festigkeitsdeck, oder großen Öffnungen.

Nachdem festgelegt wurde welche Positionen zu betrachten sind, werden die zugehörigen Spanten modelliert und berechnet. Dafür ist es notwendig auf Basis der Konstruktionszeichnungen zweidimensionale Modelle der Spanten zu erstellen. Auch die Beschädigungen der Struktur werden in diesem Arbeitsschritt modelliert. Aus den Festigkeitsberechnungen ergeben sich die maximal zulässigen Scherkräfte und Biegemomente, die das Schiff an der betrachteten Längsposition ertragen kann.

Um eine Aussage zu treffen, ob die Schiffsstruktur den zu erwartenden Belastungen standhalten kann, werden an den gewählten Längspositionen die berechneten auftretenden Lasten aus Auftriebs- und Massenverteilung, Seegang, und Grundberührung mit den maximal zulässigen Belastungen des Schiffsquerschnittes mit eventuellen Beschädigungen verglichen. Dabei werden Sicherheitsfaktoren aufgeschlagen, die Effekte berücksichtigen, die in den verwendeten Modellen nicht berücksichtigt werden können, wie zum Beispiel lokale Lasten.

4.3 Berechnung der anzunehmenden Lasten

Für das zu entwickelnde Verfahren wird darauf verzichtet ein neues Programm mit eigener Benutzeroberfläche zu schreiben, da *Microsoft Excel* alle notwendigen Funktionen unterstützt, ein effizientes Arbeiten ermöglicht und zu den Standardwerkzeugen im Ingenieurwesen gehört. Es ist somit gut geeignet für die praktische Anwendung in einem Unternehmen wie *brand Marine Consultants* ohne dass zusätzliche Zeit für die Einarbeitung in ein neues Programm investiert werden muss.

4.3.1 Grundaufbau der Methode

Die auftretenden vertikalen Scherkräfte und Biegemomente sollen für den Fall bestimmt werden, dass das havarierte Schiff mit einer eventuellen Grundberührung am Unfallort liegt und für den Fall des Abtransportes zu einer Reparaturwerft, sodass Seegang berücksichtigt werden muss. Die Schnittkräfte und Momente werden aus den Querkräften im Schiff mit dem Ansatz von *Fricke* [11] ermittelt, wie in Abschnitt 2.1.1.2 beschrieben wurde. Dabei wird auf Basis der Verteilung von Verdrängungs- und Gewichtskräften über die Länge des Schiffes die auftretenden Scherkräfte und Biegemomente für jeden Schiffsquerschnitt bestimmt.

Das zu entwickelnde Programm soll in der Lage sein bestimmte Werte abzuschätzen, falls diese nicht vorliegen. Gleichzeitig soll es möglich sein die Ergebnisse zu präzisieren, indem genauere Eingaben vorgenommen werden. Dafür ist es notwendig eine Logikstruktur für die Berechnungswege zu entwickeln.

Um die Handhabung des Programmes so übersichtlich und anwenderfreundlich wie möglich zu halten, soll es eine *Ein- und Ausgabeseite* geben, auf der alle Auswahloptionen angezeigt werden und alle Felder markiert sind, die Eingaben erfordern. Hier werden Angaben über das Schiff gemacht, Ladungs- und Flutungszustände definiert und Daten bezüglich Grundberührungen angegeben. Damit es möglich ist die Auswirkungen der Eingabe unmittelbar zu sehen, sollen die Kraft- und Momentenverläufe in direkter Nähe dargestellt werden.

Aus diesen Angaben werden die Verteilungen der Auftriebs- und Gewichtskräfte über die Länge des Schiffes ermittelt, sowie Scherkraft- und Biegemomentverläufe. Eine genauere Beschreibung des Rechenweges befindet sich in Abschnitt 2.1.1.2.

Für die Berücksichtigung von Grundberührungen werden die eingetragenen Kräfte berechnet und der Auftriebsverteilung an der Längsposition der Grundberührung aufgeschlagen.

Auf die so ermittelten Belastungen durch Auftriebs- und Gewichtskräfte werden daraufhin optional Seegangsbelastungen aufaddiert.

Als Resultat werden die Verläufe der vertikalen Scherkkräfte und Biegemomente über die Schiffslänge dargestellt. Dabei wird die Möglichkeit gegeben die exakten Werte an einer definierten Längsposition auszugeben. Zusätzlich gibt das Programm automatisch die Positionen und Werte aus, an denen die resultierenden Kurven Extrema bilden.

4.3.2 Berechnungsschritte

In Abbildung 4.4 sind die Zusammenhänge der Rechenwege schematisch dargestellt. Am linken Bildrand sind die übergeordneten Bezeichnungen der Rechnungen benannt

4.3.2.1 Auftriebsverteilung

Da es einen nicht zu vernachlässigenden Aufwand bedarf die Rumpfform eines Schiffes exakt zu modellieren, werden die Auftriebskurven bei dem zu entwickelnden Verfahren aus typischen Spantvölligkeitsverteilungen ermittelt.

Eine geeignete Grundlage bietet eine Modellserie von Handelsschiffen, die von der *British Ship Research Association (BSRA)* entwickelt wurden [3]. Hierbei werden abhängig

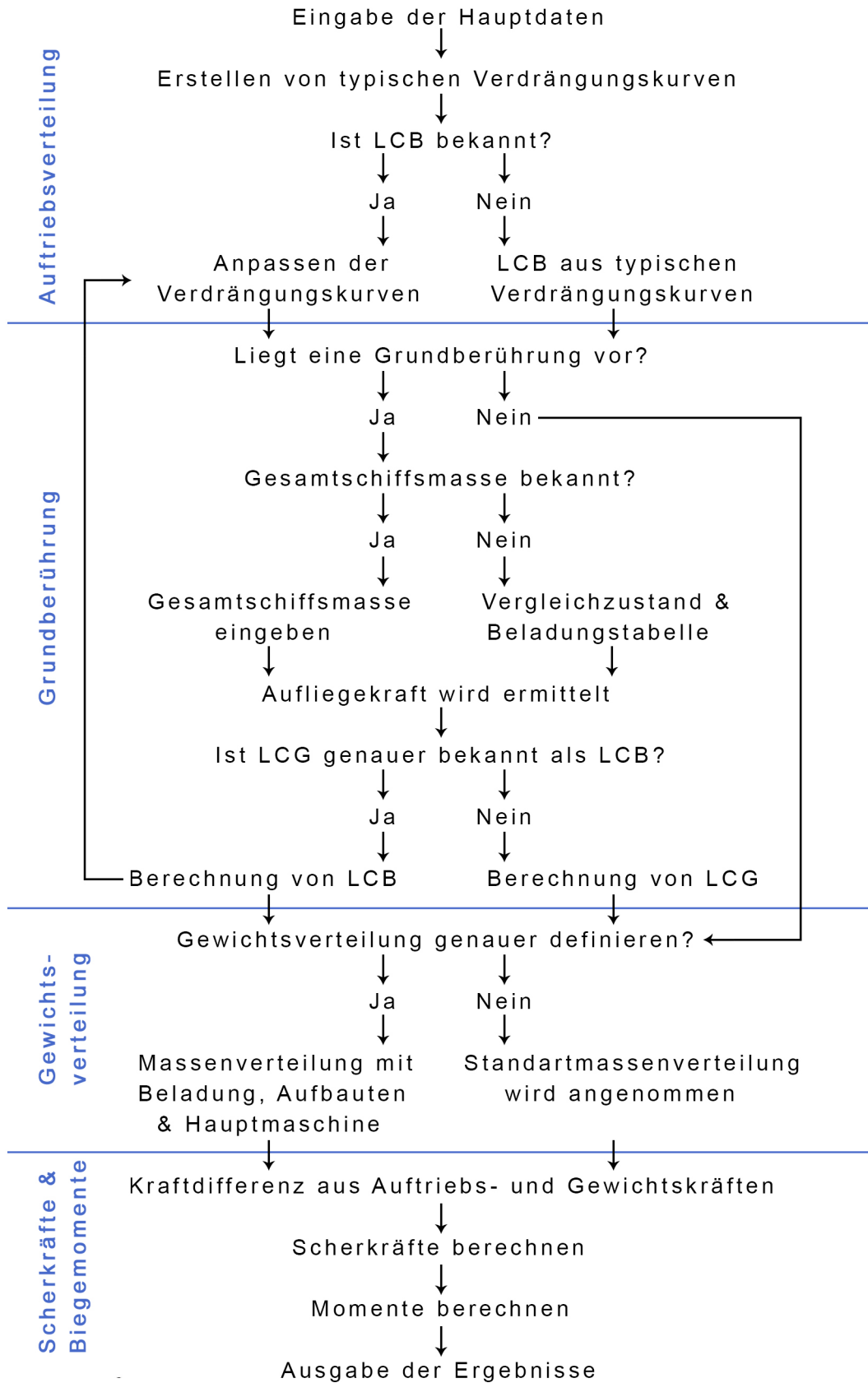


Abbildung 4.4: Logikstruktur des Berechnungsweges für Belastungen durch Massen- und Auftriebsverteilung

4.3 Berechnung der anzunehmenden Lasten

vom Völligkeitsgrad des Schiffes die Spantvölligkeiten über die Schiffslänge angegeben. Die sich ergebenden Auftriebsverteilungen sind dabei so ausgelegt, dass sich der Auftriebsschwerpunkt für völligere Schiffe 2% der Schiffslänge Richtung Vorschiff verlagert und für schlankere Schiffe bis zu 2,5% nach hinten.

Da die in Abschnitt 3.2 genannten Schiffstypen zumeist einen Bugwulst haben, werden die Kurven der *BSRA* für Schiffe mit Bugwulst in das Programm eingepflegt. Abbildung 4.5 zeigt die Verteilung der Spantvölligkeiten. Bei einem Völligkeitsgrad von 0,725 sind Sprünge in den Kurven zu sehen, da an dieser Stelle die Grenze gezogen wurde zwischen völligen Frachtschiffen und schlanken Massengutschiffen, beziehungsweise Tankern.

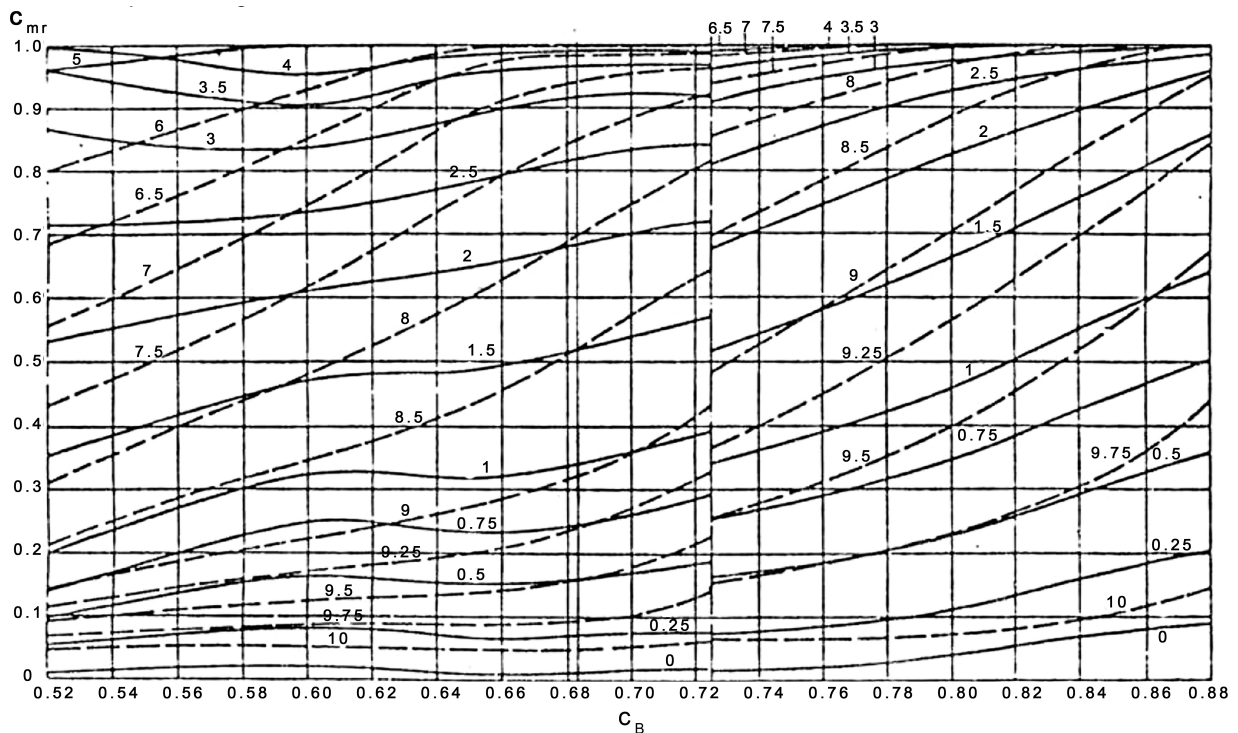


Abbildung 4.5: relative Spantvölligkeiten c_{mr} abhängig vom Völligkeitsgrad des Schiffes c_B für die *BSRA*-Modellserie [3]

Zusätzlich werden von der *BSRA* Kurven angegeben, die es ermöglichen Rumpfe zu modellieren, deren Lage des Auftriebsschwerpunktes von den Standardkurven abweicht. Dafür werden Werte angegeben, um welche die Hilfsspannten verschoben werden müssen, um den Auftriebsschwerpunkt 1% der Schiffslänge nach vorn zu verschieben. Diese sind in Abbildung 4.6 zu sehen.

Umsetzung im Programm

Im ersten Schritt werden die Spantvölligkeiten an den elf Hilfsspannten (0 bis 10) abhängig von der Gesamtvölligkeit des Schiffes ermittelt. Anschließend werden die Werte an

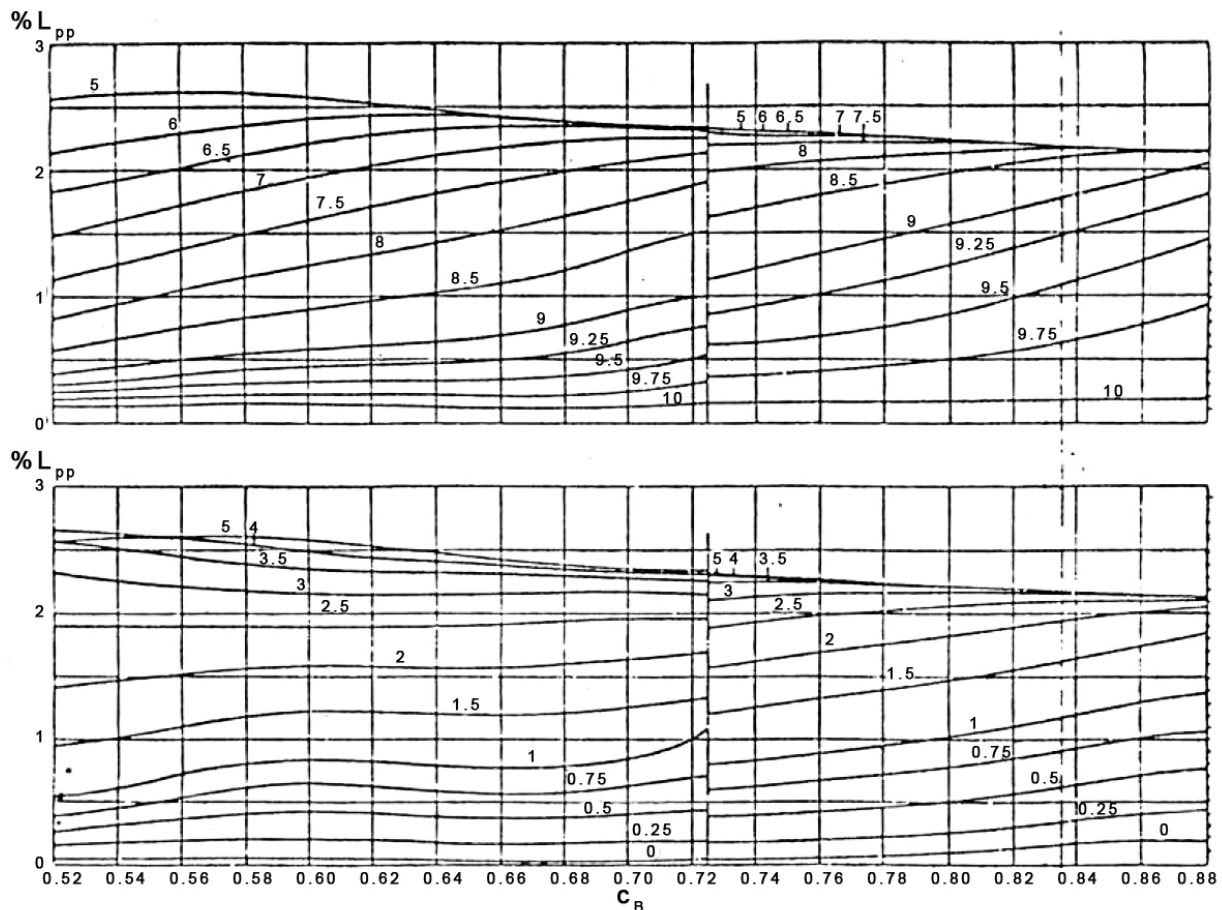


Abbildung 4.6: Hilfsspanntverschiebung für LCB-Verschiebung um 1% der Länge zwischen den Loten L_{pp} nach BSRA [3]

den dazwischen liegenden Hilfsspannten interpoliert. Um einen möglichst realistischen Verlauf über die Länge zu bekommen, wird auf Basis der sich ergebenden Stützpunkte ein Polynom entwickelt. Da es elf Stützstellen gibt können Polynome bis zur zehnten Ordnung gebildet werden. Es hat sich gezeigt, dass Polynome neunter und zehnter Ordnung dazu neigen stark ausgeprägte Extrema zwischen den Stützpunkten zu bilden, die keiner realistischen Verdrängungsverteilung entsprechen. Deshalb werden in dem Verfahren Polynome achter Ordnung verwendet.

Bei den Stützpunkten handelt sich um relative Spantvölligkeiten. Am Hauptspant sind diese eins, an den Schiffsenden null. Später wird diese Verteilung auf die Verdrängung des vorliegenden Schiffes bezogen.

Darüber hinaus soll die Trimmlage des Schiffes Berücksichtigung finden. Die Vorgehensweise der BSRA sieht keine Betrachtung des Trimmings vor. Jedoch muss gerade im Schadensfall damit gerechnet werden, dass Trimmlagen auftreten, die die Verdrängungskurven signifikant beeinflussen.

Eine Berücksichtigung der veränderten Wasserlinienfläche bei Trimmänderung wäre die

exakteste Variante. Jedoch müsste dafür der Rumpf dreidimensional modelliert werden, was für dieses Verfahren einen zu großen Arbeitsaufwand darstellt.

Um eine Annäherung zu erhalten, werden deshalb die vorher ermittelten Spantvölligkeiten mit einem Faktor gewichtet, der vom Trimm abhängt. Dieser Faktor wird mit Gleichung 4.1 ermittelt. An jedem Spant wird somit die Spantvölligkeit mit dem Verhältnis von Tiefgang in vertrimmter Lage zu mittlerem Tiefgang multipliziert.

Da der Trimm im Programm aus der Differenz der Tiefgänge am vorderen und hinteren Lot bestimmt wird, ergibt sich der Trimmfaktor k_{trimm} auf halber Schiffslänge zu eins, was einer unveränderten Verdrängung entspricht.

$$k_{trimm} = \frac{T_m + (t(N/10 - 0; 5))}{T_m} \quad (4.1)$$

$k_{trimm}(N)$	Gewichtungsfaktor durch Trimm an Hilfsspant Nummer N [–]
T_m	mittlerer Tiefgang [m]
t	Trimm [m]
N	Nummer des Hilfsspantes (von 0 bis 10) [–]

Für extreme Trimmsituationen, bei denen ein Teil des Rumpfes austaucht, oder das Freiborddeck zu Wasser kommt, müssen außerdem Begrenzungen für diese Gleichung implementiert werden. Die Summe im Zähler von Gleichung 4.1 spiegelt den Tiefgang mit Trimm an jedem Spant wieder. Im Programm wird deshalb die Begrenzung eingeführt, dass falls diese Summe negativ wird, der Rumpf also an dieser Spantposition austaucht, der Gewichtungsfaktor k_{trimm} zu null gesetzt wird.

Des Weiteren ist es notwendig die Höhe des Freiborddecks anzugeben. Dieser Wert dient als obere Grenze für die Summe im Zähler von Gleichung 4.1. Somit wird sichergestellt, dass komplett getauchte Spanten mit einer überproportional großen Verdrängung modelliert werden. Flutungen von Räumen unterhalb des Freiborddecks können in der Gewichtsverteilung (Abschnitt 4.3.2.3) berücksichtigt werden.

Die Gesamtverdrängung setzt sich aus den Einzelverdrängungen an den Hilfsspanten zusammen, wie in Gleichung 4.2 zu sehen ist. Dieser Zusammenhang wurde für das hier zu erstellende Programm entwickelt. Die Elementverdrängung ∇_{El} entspricht der Verdrängung eines prismatischen Hilfsspantabschnittes mit der Grundfläche des Hauptspantes, also mit einer relativen Spantvölligkeit c_{mr} von 1, ohne Berücksichtigung der Trimmlage.

$$\nabla = \sum_{i=0}^{10} (\nabla_{El} c_{mr}(i) k_{trimm}(i)) \quad (4.2)$$

∇ Gesamtverdrängung des Schiffes [t]

∇_{El} Verdrängung eines Hilfsspantabschnittes mit $c_{mr} = 1$ ohne Trimm [t]
 $c_{mr}(N)$ relative Spantvölligkeit an Hilfsspant Nummer N [-]

Da die Gesamtverdrängung des Schiffes für die Berechnungen angegeben wird, kann die Elementarverdrängung eines Hilfsspantabschnittes ∇_{El} errechnet werden. Diese Verdrängung ist für jeden Hilfsspantabschnitt gleich groß, weil die relative Spantvölligkeit c_{mr} und der Trimm an den einzelnen Hilfsspanten vorerst noch nicht berücksichtigt wird. Die gesamte Verdrängungen an jedem Hilfsspantabschnitt $\nabla_{Sp}(N)$ kann daraufhin mit Gleichung 4.3 bestimmt werden.

$$\nabla_{Sp}(N) = c_{mr}(N)k_{trimm}(N) \cdot \frac{\nabla}{\sum_{i=0}^{10} (c_{mr}(i)k_{trimm}(i))} \quad (4.3)$$

$\nabla_{Sp}(N)$ Verdrängung des Abschnittes an Hilfsspant Nummer N [t]

Die sich daraus ergebenden Verdrängungen an den Spanten entsprechen einer Aufteilung der gesamten Schiffsverdrängung auf die Spantpositionen. Um die Belastung als Streckenlast zu ermitteln, müssen diese Werte durch die Länge geteilt werden, die dieser Spant repräsentiert. Für die elf Hilfsspanten muss die Verdrängung somit durch $\frac{1}{11}L_{pp}$ geteilt werden.

Die so resultierenden Werte ergeben die Auftriebsverteilung mit der Lage des Auftriebsschwerpunktes der Modellserie der *BSRA*.

Falls die Lage des Verdrängungsschwerpunktes aus Formkurven, beziehungsweise Ladungsrechner des Schiffes bekannt ist, oder sich aus Berechnungen bei Grundberührung ergibt (siehe Abschnitt 4.3.2.2), kann diese Auswahloption auf der Eingabeseite gewählt werden.

Wenn die Lage des Verdrängungsschwerpunktes vom Nutzer definiert wird, ermittelt das Programm zunächst die Differenz der Längsposition des Auftriebsschwerpunktes in % L_{pp} . Durch lineare Interpolation der Verschiebungswerte aus der eingepflegten Tabelle nach Abbildung 4.6 werden die Verschiebungswerte der Spantpositionen ermittelt, um den Verdrängungsschwerpunkt um 1 % L_{pp} zu verschieben. Diese werden mit der vorher errechneten Differenz multipliziert. Damit können die neuen Spantpositionen errechnet werden. Diese beziehen sich auf die Spantvölligkeiten aus der ersten Berechnung, ohne Trimm. Nachdem die neuen Spantpositionen ermittelt wurden wird wie im ersten Schritt wieder eine Polynomfunktion gebildet und die Trimmgewichtung zugeschlagen. Um die Streckenlast an den Hilfsspanten zu ermitteln, werden die so erhaltenen Spantvölligkeiten wieder durch $\frac{1}{11}L_{pp}$ geteilt.

Bei der Eingabe von Werten für die Lage des Verdrängungsschwerpunktes, die stark von den Standardkurven abweichen, hat sich gezeigt, dass die zu erzielende Verschiebung des Auftriebsschwerpunktes nicht immer exakt erreicht wurde. Dieser Effekt kann darauf zurückgeführt werden, dass die Verschiebungskurven für Schwimmlagen mit ebenem Kiel entwickelt wurden. Deshalb wird der Berechnung ein zweiter Iterationsdurchlauf angehängt. Dafür wird aus dem Verhältnis der im ersten Iterationsschritt erzielten Schwerpunktsverschiebung zu der gewollten Verschiebung der Verschiebungsfaktor angepasst. Für Fälle ohne starken Trimm sind die Ergebnisse der Iterationsschritte identisch.

4.3.2.2 Aufliegekraft durch Grundberührung

Falls eine Grundberührung vorliegt, kann nicht mehr davon ausgegangen werden, dass Verdrängungs- und Massenkräfte gleich groß sind. Auch die Lage von Verdrängungs- und Massenschwerpunkt ist nicht mehr senkrecht übereinander. Abbildung 4.7 zeigt schematisch den vorliegenden Lastfall.

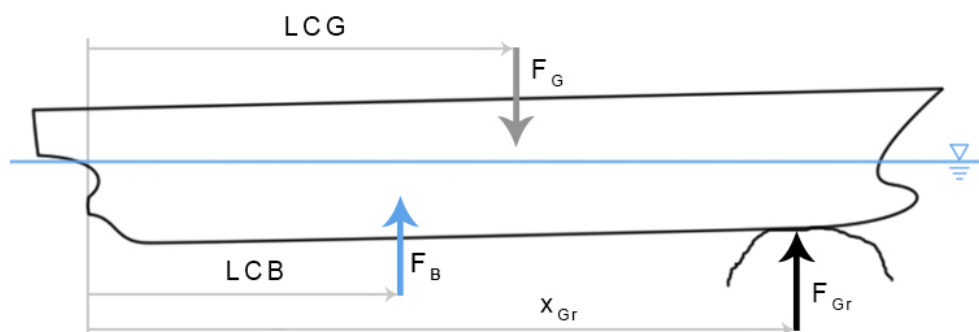


Abbildung 4.7: Skizze, Schiff mit Grundberührung, Seitenansicht

Zur Bestimmung der Kräfte und deren Angriffspunkte kann das vertikale Kräftegleichgewicht und das Momentengleichgewicht um die Querachse verwendet werden.

Die mittlere Längsposition der Grundberührung x_{Gr} kann mit relativ einfachen Mitteln exakt bestimmt werden, da der Schaden im Regelfall durch Taucher, oder Tauchroboter begutachtet und vermessen wird. Die eingeleitete Kraft an der Grundberührungsstelle F_{Gr} ist hingegen unbekannt und muss berechnet werden. Um das Gleichungssystem lösen zu können, muss ein weiterer Parameter als unbekannt angenommen werden.

Da es bei einem havarierten Schiff einfacher ist den Betrag der Auftriebs- und Massenkräfte zu ermitteln, als deren Angriffspunkte, wird in der zu entwickelnden Methodik gefordert diese Kräfte anzugeben.

Es ist somit notwendig entweder die Lage des Verdrängungsschwerpunktes LCB , oder des Gewichtsschwerpunktes LCG einzugeben. Der jeweils andere Wert kann daraufhin berechnet werden. In dem zu entwickelnden Programm wird die Auswahlmöglichkeit

gegeben diejenige Schwerpunktlage anzugeben, die für das havarierte Schiff genauer bestimmt werden kann.

Umsetzung im Programm

Während die Verdrängung bereits auf der Eingabeseite angegeben wird, muss im Falle einer Grundberührung zusätzlich das Schiffsgewicht eingegeben werden. Falls es bekannt ist, beispielsweise vom Ladungsrechner, kann es direkt eingegeben werden. Falls nicht, muss ein Vergleichszustand gewählt werden für den die Schiffsmasse bekannt ist. Diese Masse muss im Eingabefeld *Gesamtasse bei Vergleichszustand* eingegeben werden. Daraufhin müssen in der Beladungstabelle alle Massenveränderungen eingetragen werden, die den Vergleichszustand vom Zustand des havarierten Schiffes unterscheiden. Massen, die im Vergleichszustand enthalten sind, jedoch im vorliegenden Fall nicht, wie zum Beispiel geleerte Tanks, können als negative Massen eingetragen werden. Angaben über Hauptmaschine und Aufbauten haben hier keinen Einfluss, da sie im aktuellen und Vergleichszustand gleich groß sind.

Die Differenz aus Verdrängung und Gesamtmasse ergibt somit die eingeleitete Kraft an der Grundberührungsstelle. Um die Streckenlast an der Berührungsstelle zu erhalten, muss eine Bezugslänge ermittelt werden. Dafür muss auf der Eingabeseite die aufliegende Länge eingegeben werden. Diese ist im Regelfall durch Vermessungen von Tauchern oder Tauchrobotern bekannt und muss sonst abgeschätzt werden.

Da die Lasten nur an den Hilfsspanten eingeleitet werden können, kann diese Länge nicht exakt, sondern nur angenähert modelliert werden. Aus der mittleren Position der Grundberührung und deren Länge wird die exakte Anfangs- und Endposition im Hilfsspantenraster ermittelt. Daraufhin wird festgelegt auf welche Hilfsspanten die Grundberührung wirkt. Da einfaches Runden eine zu große Spanne an Hilfsspanten schaffen würde, werden nur die Hilfsspanten gewählt, die zwischen den errechneten exakten Positionen liegen.

Dieses Vorgehen funktioniert, solange zwischen Anfangs- und Endpunkt der aufliegenden Länge mindestens ein Hilfsspant liegt. Bei Grundberührungslängen kleiner als der Abstand benachbarter Hilfsspanten, also $\frac{1}{101}L_{pp}$, würde demnach kein Spant gewählt werden. Deshalb wird in diesem Fall die Grundberührungskraft auf den nächstgelegenen Hilfsspant mit $\frac{1}{101}L_{pp}$ verteilt.

Daraufhin wird ermittelt was für eine Länge die gewählten Spanten zusammen repräsentieren. Die Grundberührungskraft wird nun auf diese Länge bezogen, um die eingetragene Streckenlast im Hilfsspanttraster zu ermitteln. Diese wird daraufhin auf den Hilfsspanten der Grundberührung verteilt und zu der Auftriebsverteilung hinzu addiert.

Anschließend ist es notwendig die Lage der Schwerpunkte von Auftriebs- und Gewicht-

kräften zu ermitteln. Dafür wird ein Momentengleichgewicht mit den Kräften und Positionen aus Abbildung 4.7 um das hintere Lot erstellt. Wenn die Lage des Verdrängungsschwerpunktes LCB gegeben ist, wird Gleichung 4.4 verwendet, um die Gewichtsschwerpunktposition LCG zu ermitteln. Die mittlere Längsposition der Grundberührung x_{Gr} wird auf der Eingabeseite angegeben.

$$LCG = \frac{LCB \nabla + x_{Gr} \frac{F_{Gr}}{g}}{\Delta} \quad (4.4)$$

LCG Längsposition des Gewichtsschwerpunktes [m]

LCB Längsposition des Auftriebsschwerpunktes [m]

x_{Gr} mittlere Längsposition der Grundberührung [m]

F_{Gr} eingeleitete Vertikalkraft durch Grundberührung [kN]

g Erdbeschleunigung [$\frac{m}{s^2}$]

Δ Gesamtmasse des Schiffes [t]

Falls die Lage des Gewichtsschwerpunktes LCG als gegeben angenommen wird, kann die Verdrängungsschwerpunkt Lage LCB mit Gleichung 4.5 ermittelt werden.

$$LCB = \frac{LCG \Delta - x_{Gr} \frac{F_{Gr}}{g}}{\nabla} \quad (4.5)$$

In diesem Fall wird nicht mehr die Lage des Auftriebsschwerpunktes aus den unkorrigierten Spantvölligkeitskurven der *BSRA* verwendet. Die Standardverdrängungskurven werden mit den Verschiebungskurven aus Abbildung 4.6 an die in Gleichung 4.5 ermittelte Schwerpunktlage angepasst, wie es in Abschnitt 4.3.2.1 beschrieben wird.

4.3.2.3 Gewichtsverteilung

Für die Erstellung der Gewichtsverteilung des vorliegenden Schiffes soll im ersten Schritt angenommen werden, dass die gesamte Masse inklusive Ladung, Tankinhalte und Ausrüstung über die Schiffslänge verteilt ist, wie es in Abbildung 4.8 zu sehen ist. Für eine gegebene Lage des Massenschwerpunktes kann diese Kurve mit Hilfe der Verschiebung d des Massenschwerpunktes aus Mitte Schiff angepasst werden. Diese Massenverteilung stammt aus *Design Principles of Ships and Marine Structures* [4] und gibt eine allgemeingültige Annäherung, die für typische Rumpfformen von Handelsschiffen angewendet werden kann. Dabei wird die Hälfte der Schiffsmasse mittschiffs auf 40 % der Schiffslänge verteilt. Die restliche Masse wird an den Schiffsenden mit zwei Trapezen modelliert.

Um eine exaktere Modellierung der Gewichtsverteilung zu ermöglichen, sollen Eingabemöglichkeiten für Massen und deren Längspositionen gegeben werden. Massen, die einen relevanten Einfluss auf die Gewichtsverteilung haben, können zum einen

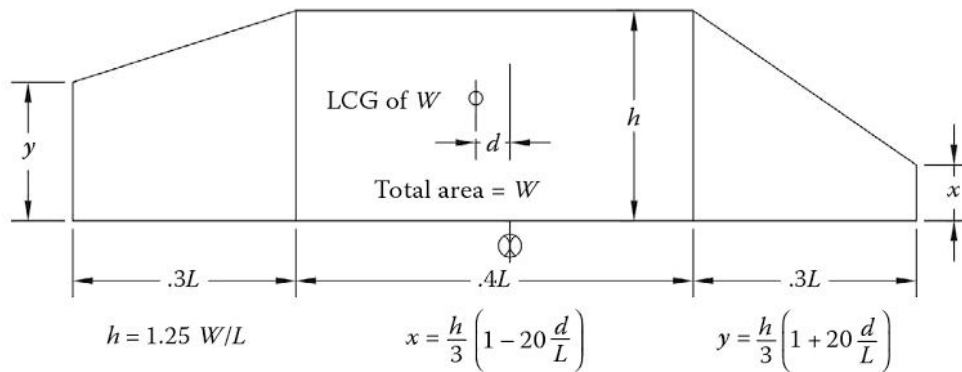


Abbildung 4.8: Annahme der Massenverteilung über die Schiffslänge nach Misra [4]

aus baulichen Gegebenheiten vorliegen, wie Hauptmaschine, Aufbauten oder Jack-up-Vorrichtungen. Zum anderen sind der Ladefall und die Füllstände der Tanks und Bunker relevant für eine exakte Angabe der Massenverteilung. Geflutete Räume können ebenfalls als zusätzliche Massen berücksichtigt werden.

Umsetzung im Programm

Bei der Erstellung der Standardgewichtsverteilung nach Abbildung 4.8 kann für den Fall ohne Grundberührung die Verdrängung der zu verteilenden Masse gleichgesetzt werden. Im Falle einer Grundberührung muss die Masse, wie in Abschnitt 4.3.2.2 beschrieben, entweder direkt angegeben werden, oder über Aufsummieren von einem Vergleichszustand und der Beladungstabelle bestimmt werden. Die Längsposition des Massenschwerpunktes wird wie zuvor beschrieben durch die Verschiebung d angepasst. Durch die bereichsweise Definition von linearen Funktionen wird die Verteilungskurve im Programm erstellt.

Um Beladung, Flutung, Hauptmaschine und Aufbauten zu berücksichtigen, kann das Auswahlfeld *Massenverteilung genauer definieren* auf der Eingabeseite bestätigt werden.

Aus der Beladungstabelle wird für jeden Raum die Streckenlast bestimmt, indem die Masse durch die zugehörige Länge geteilt wird. Die Anfangs- und Endpositionen werden umgerechnet auf die Positionen der Hilfsspannten. Daraufhin wird eine Massenmatrix erstellt, in der jede Zeile einem Raum entspricht und jede Spalte einer Längsposition. Die errechneten Streckenlasten jedes Raumes werden dann an den Spantpositionen eingefügt für die der Raum definiert ist. Durch Aufsummieren aller Einträge einer Spalte wird die gesamte Streckenlast an der zugehörigen Längsposition ermittelt. Diese Summierung wird für alle Spalten durchgeführt, sodass der Verlauf der gesamten Beladungsstreckenlast bekannt ist.

Das Gewicht der Hauptmaschine kann entweder direkt angegeben werden, oder durch eine Abschätzung über Typ und Leistung. Hierfür werden typische Leistungsgewichte für die gängigen Maschinentypen angenommen. Die Werte sind in Tabelle 4.1 angegeben und stammen aus dem *Handbuch Schiffsbetriebstechnik* von Meier-Peter [15]. Sie sind als grobe Schätzwerte zu verstehen, da es sich um Mittelwerte verschiedener Motorengrößen handelt.

Nachdem die Masse des Motors ermittelt wurde kann über die einzugebende Länge des Motors die resultierende Streckenlast ermittelt werden.

Maschinentyp	Leistungsgewicht
2-Takt	$35 \frac{kg}{kWh}$
4-Takt	$17 \frac{kg}{kWh}$

Tabelle 4.1: typische Leistungsgewichte von Hauptmaschinentypen

Mit Hilfe der Tabelle zur Verteilung der *Gewichte durch Aufbauten* können deren Massen abgeschätzt werden. Nach *Estimation Methods for Basic Ship Design* [16] können die Massen bezogen auf die Decksfläche mit Werten zwischen $190 \frac{kg}{m^2}$ und $225 \frac{kg}{m^2}$ angenommen werden, je nachdem wo sich der Aufbau befindet. Da sich diese Werte nur geringfügig unterscheiden und eine zusätzliche Unterscheidung das hier zu entwickelnde Verfahren zusätzlich verkomplizieren würde, wird im Folgenden ein Mittelwert von $200 \frac{kg}{m^2}$ für alle Decks angenommen. Nach Multiplikation des Decksflächengewichtes mit der Anzahl der Decks und der Schiffsbreite ist die Streckenlast für jeden Aufbau bekannt und kann zusammen mit der Last durch die Hauptmaschine in eine neue Massenmatrix, wie oben beschrieben, eingefügt werden. Es resultiert eine Verteilung der Streckenlast durch Aufbauten und Maschine für alle Hilfsspanen über die gesamte Schiffslänge.

Um die Gewichtsverteilung für das gesamte Schiff zu erhalten, werden zunächst alle Massen, die nicht durch die Beladungstabelle, Hauptmaschine und Aufbauten definiert wurden, mit der zuvor verwendeten Standardgewichtsverteilung verteilt. Dafür wird vom Gesamtgewicht, mit dem die erste Gewichtsverteilung angenähert wurde, die Summe aller definierten Massen abgezogen.

Da die Lage des Gewichtsschwerpunktes der Gesamtheit aller Massen beibehalten werden muss, wird die Verschiebung d der Standardverteilung neu ermittelt. Dafür wird ein Momentengleichgewicht um das hintere Lot aufgestellt. Dieses ist in Gleichung 4.6 angegeben und umgestellt für die Bestimmung der Längsposition des Gewichtsschwerpunktes der Massen, die mit der Standardverteilung verteilt werden. Im Programm müssen dafür für jeden Raum, Aufbau und die Hauptmaschine die Positionen der Massen-

schwerpunkte ermittelt und gewichtet werden.

$$LCG_{std} = \frac{\Delta LCG_G - \Delta_{Be} LCG_{Be} - \Delta_{Au} LCG_{Au} - \Delta_{Hm} LCG_{Hm}}{\Delta_{std}} \quad (4.6)$$

LCG_{std} Längsposition des Schwerpunktes der Masse der Standardverteilung [m]

LCG_G Längsposition des Schwerpunktes der gesamten Schiffsmasse [m]

LCG_{Be} Längsposition des Schwerpunktes der Masse aus der Beladungstabelle [m]

Δ_{Be} Gesamtmasse aus der Beladungstabelle [t]

LCG_{Au} Längsposition des Schwerpunktes der Masse der Aufbauten [m]

Δ_{Au} Gesamtmasse der Aufbauten [t]

LCG_{Hm} Längsposition des Schwerpunktes der Masse der Hauptmaschine [m]

Δ_{Hm} Gesamtmasse der Hauptmaschine [t]

Δ_{std} Masse für die Standardverteilung [t]

Mit der neu errechneten Gewichtsschwerpunktlage kann nun die neue Standardmassenverteilung ermittelt werden. Durch Aufaddieren der Streckenlasten aus der Beladungstabelle, den Aufbauten und der Hauptmaschine ergibt sich die Massenverteilung des gesamten Schiffes.

4.3.2.4 Berücksichtigung der Krängung

Für die Berücksichtigung des Krafteintrages durch Krängung gibt es verschiedene Ansätze. Eine einfache Möglichkeit bietet die Theorie kleiner Neigungen, bei der ein linearer Zusammenhang zwischen Krängung und aufrichtenden Hebel zu Grunde liegt. Da in Havariefällen jedoch auch größere Krängungswinkel auftreten, können die Ergebnisse, die sich mit diesem Ansatz ergeben, nicht als konservativ betrachtet werden.

Die Verwendung von Kräftegleichgewichten bietet die Möglichkeit auch größere Krängungswinkel zu betrachten. Dabei bleibt das Gleichgewicht aus Auftriebs-, Gewichts- und eventueller Grundberührungskraft, wie es in Abschnitt 4.3.2.2 verwendet wurde, erhalten. Es liegt also nahe weiterhin die eingetragene Grundberührungskraft aus Gewicht und Auftrieb zu bestimmen. Auch die Berechnung der Längsposition des Verdrängungs-, beziehungsweise Gewichtsschwerpunktes kann genau so erfolgen, wie in Abschnitt 4.3.2.2 beschrieben.

Eine Betrachtung eines zusätzlichen Momentengleichgewichtes in der y - z -Ebene ist nicht notwendig, da die Querpositionen der angreifenden Kräfte keinen Einfluss auf die Verteilung der Kräfte in Längsrichtung haben.

Umsetzung im Programm

Um die Krängung für die Berechnung der vertikalen Kräfte im Schiffsrumpf zu berücksichtigen, ist es somit lediglich notwendig darauf zu achten, dass die eingegebene Verdrängung und die zugehörige Schwerpunktposition LCB für den gekrängten Schiffsrumpf gelten. Diese Werte können unter Berücksichtigung von Trimm und Krängung aus den Formkurven, beziehungsweise dem Bordrechner, entnommen werden. Die weiteren Berechnungen entsprechen der Vorgehensweise aus Abschnitt 4.3.2.2. Falls der Wert für die Verdrängung des gekrängten Schiffskörpers nicht zugänglich ist, kann die Krängung in der Berechnung nicht berücksichtigt werden.

4.3.2.5 Scherkräfte und Biegemomente

Der Verlauf der vertikalen Scherkräfte über die Schiffslänge ergibt sich durch Integrieren der in die Schiffsstruktur eingeleiteten vertikalen Kräfte über die Schiffslänge, wie in Abschnitt 2.1.1.2 erläutert. An den Schiffsenden sind diese Scherkräfte gleich null.

Die eingeleiteten Kräfte ergeben sich aus der Differenz aus Gewichts-, Auftriebs- und eventuellen Grundberührungskräften. Sind diese Kräfte für einen freigeschnittenen Querschnitt im Gleichgewicht, so ist die eingeleitete Kraft aus dem dahinter liegenden Querschnitt gleich der Kraft, die in den davor liegenden Querschnitt eingeleitet wird.

Um die vertikalen Biegemomente zu berechnen wird der Verlauf der Scherkräfte über die Schiffslänge integriert. Da an den Schiffsenden keine Momente angreifen sind die Momente dort ebenfalls gleich null.

Umsetzung im Programm

Im ersten Schritt muss die vertikale Kraftdifferenz für jeden Querschnitt berechnet werden. In Übereinstimmung mit der Vorzeichenkonvention, die in Abschnitt 4.1 getroffen wurden, wird die Differenz mit Gleichung 4.7 berechnet.

$$f_v(N) = f_G(N) - f_B(N) \quad (4.7)$$

$f_v(N)$ resultierende Vertikalstreckenlast an Hilfsspannt $N \left[\frac{kN}{m} \right]$

$f_G(N)$ Streckenlast durch Massen an Hilfsspannt $N \left[\frac{kN}{m} \right]$

$f_B(N)$ Streckenlast durch Auftrieb und Grundberührung an Hilfsspannt $N \left[\frac{kN}{m} \right]$

Für die nun folgende numerische Integration muss berücksichtigt werden, dass in der Berechnungen 101 Hilfsspannten betrachtet werden. Eine genauere Erläuterung dazu befindet sich in Abschnitt 4.1. Die Integration startet an Position null am hinteren Lot. Da das Schiff nicht eingespannt ist muss der Scherkraftverlauf an den Schiffsenden zu null werden. Die eingeleitete Streckenlast wird am jeweiligen Spant mit $\frac{L_{pp}}{101}$ multipliziert und

auf die Lasten vorhergehender Spanten aufaddiert, wie in Gleichung 4.8 beschrieben.

$$Q(N) = \sum_{i=0}^N \left(f_v(i) \frac{L_{pp}}{101} \right) \quad (4.8)$$

$Q(N)$ Scherkraft an Hilfsspant N [kN]

Da schon bei Spant null angefangen wird zu summieren ergibt sich dort in den Berechnungen schon eine Scherkraft ungleich 0 kN. Solange die Integration korrekt ablaufen kann, endet die Summierung im letzten Iterationsschritt immer bei 0 kN. Diese Abweichung von den realen Randbedingungen am vorderen Lot ist bei der diskreten Integration nicht vermeidbar, da bei jedem der 101 Spanten ein Wert aufaddiert wird und somit 102 Positionen notwendig wären, um zu Beginn und am Ende einen Wert von 0 kN zu erreichen. Um diese Ungenauigkeit auszugleichen, wird die gesamte Kurve um eine Konstante n_Q verschoben, die der Hälfte der Scherkraft an Spant null entspricht, wie in Gleichung 4.9 zu sehen ist.

$$n_Q = \frac{Q(N = 0)}{2} \quad (4.9)$$

n_Q Konstante zur Korrektur des Scherkraftverlaufes [kN]

Die somit auftretende Abweichung von null ist klein gegenüber den Werten im Verlauf der Kurve, solange sinnvolle Werte eingegeben werden. Bei fehlerhaften Eingaben, wie zum Beispiel durch Verwechslung von Einheiten, Schwerpunktpositionen, die weit außerhalb der Schiffsmittle liegen, oder Ähnliches, kommt es dazu dass die diskrete Integration die Ungenauigkeiten jedes Schrittes aufsummiert und somit am Ende ein Scherkraftverlauf errechnet wird, der an den Schiffsenden nicht zu null wird. Als Richtwert kann davon ausgegangen werden, dass eine fehlerhafte Berechnung vorliegt, sobald die Scherkraftwerte an den Schiffsenden größer sind als 10 % vom Maximum des Verlaufes.

Zur Berechnung der vertikalen Biegemomente müssen die Scherkräfte über die Schiffslänge integriert werden. Dafür wird die gleiche Vorgehensweise wie zur Berechnung der Scherkräfte genutzt. Nach Multiplikation mit der Initiallänge des Spantabschnittes $\frac{L_{pp}}{101}$ werden die Momente über die Hilfsspanten aufsummiert.

Die sich ergebende Abweichung von null am Ende der Iteration wird wieder angeglichen, indem eine Konstante aufaddiert wird. Durch die Ungenauigkeiten der diskreten Integration treten bei diesem Integrationsschritt Abweichungen von null an beiden Loten auf. Die Korrekturkonstante n_M ist deshalb die Hälfte der Summe von den Momenten an den Loten, wie in Gleichung 4.10 zu sehen ist.

$$n_M = \frac{M(N = 0) + M(N = 10)}{2} \quad (4.10)$$

n_M Konstante zur Korrektur der Biegemomentenverlaufes [kNm]

Es wird darauf verzichtet andere Korrekturfaktoren einzufügen, die den Momentenverlauf an den Enden zu null korrigieren, da eine solche Korrektur die Gefahr birgt relevante Fehler in den Eingaben, oder Berechnungen auszugleichen und somit trotz fehlerhafter Eingaben Ergebnisse angezeigt werden könnten, die realistisch aussehen.

Auch hier gilt, dass kleine Abweichungen des Momentenverlaufes von null an den Schiffsenden durch die systematischen Fehler der diskreten Integration unvermeidbar, aber auch nicht von Relevanz sind. Bei Anfangs- und Endwerten des Verlaufes, die größer als 10% des Extremwertes sind, muss davon ausgegangen werden, dass fehlerhafte Eingaben vorliegen.

Um die exakten Ausgabewerte der Scherkraft- und Biegemomentenrechnung an einer bestimmten x -Position zu erhalten, kann die Längskoordinate im Eingabefeld x -Position der Ausgabewerte eingegeben werden. Die angezeigten Werte ergeben sich aus linearer Interpolation zwischen den beiden nächstgelegenen Hilfsspannen.

Zusätzlich ermittelt das Programm alle lokalen Extremstellen der Scherkraft- und Biegemomentverläufe und gibt diese in einer Tabelle nach Längsposition sortiert aus. Darüber hinaus wird in der Tabelle für jede Position angezeigt ob der Extremwert bei dem Scherkraft-, oder dem Biegemomentverlauf vorliegt und ob es sich dabei um ein Minimum, oder Maximum handelt. Die zugehörigen Werte der Kurven werden ebenfalls in der Tabelle ausgegeben. Auf Basis dieser Übersicht kann bei der Anwendung die Entscheidung getroffen werden welche Spanten untersucht werden müssen.

4.3.2.6 Abschätzung der Seegangslasten nach IACS

In den *Common Structural Rules* der IACS [7] (Ch.4, Sec.3.3) sind Methoden angegeben mit denen Scherkräfte und Biegemomente, die durch Seegang eingebracht werden, abgeschätzt werden können. Diese sollen optional zu den Ergebnissen der vorherigen Berechnungen aufgeschlagen werden, um Seegangslasten zu berücksichtigen, die während des Transportes zur Reparaturwerft auftreten können.

Umsetzung im Programm

Zur Abschätzung der Seegangslasten sind in den *Common Structural Rules* [7] (Ch.4, Sec.3.3) die Gleichungen 4.11, 4.12 und 4.13 angegeben.

$$Q_{WV} = 30F_Q f_p CLB(c_B + 0.7)10^{-2} \quad (4.11)$$

$$M_{WV,h} = 190F_M f_p CL^2 B c_B 10^{-3} \quad (4.12)$$

$$M_{WV,s} = 110F_M f_p CL^2 B(c_B + 0.7)10^{-3} \quad (4.13)$$

Q_{WV}	vertikale Scherkraft durch Seegang [kN]
$M_{WV,h}$	vertikales Biegemoment durch Seegang bei Hogging [kNm]
$M_{WV,s}$	vertikales Biegemoment durch Seegang bei Sagging [kNm]
F_Q	Verteilungsfaktor von Q_{WV} [-]
F_M	Verteilungsfaktor von $M_{WV,h}$ und $M_{WV,s}$ [-]
f_p	Wahrscheinlichkeitsfaktor [-]
C	Wellenparameter [-]

Die Verteilungsfaktoren F_Q und F_M nehmen, abhängig von der Längsposition, Werte zwischen 0 und 1 an. Somit wird ein Verlauf über die Schiffslänge modelliert. Die genaue Verteilung kann in den Vorschriften nachgeschlagen werden. Bei den Verteilungsfaktoren F_Q werden verschiedene Verläufe angegeben für positive und negative Scherkräfte. Im Programm werden die sich daraus ergebenden Scherkräfte als $Q_{WV,pos}$ und $Q_{WV,neg}$ bezeichnet.

Der Wahrscheinlichkeitsfaktor f_p wird auf Basis der Wahrscheinlichkeit bestimmt, mit der der Seegangslastverlauf überschritten wird. Die Vorschriften nehmen für f_p einen Wert von 1 an, wenn ein Wahrscheinlichkeitslevel von 10^{-8} zu Grunde gelegt werden kann, was nach *Det Norske Veritas* [17] einer Wiederholungsrate von 20 Jahren entspricht.

Alternativ bieten die Vorschriften an, einen Wahrscheinlichkeitsfaktor f_p von 0,5 zu verwenden, was mit einem Wahrscheinlichkeitslevel von 10^{-4} einer täglichen Wiederholungsrate entspricht.

Auf der Eingabeseite kann ausgewählt werden für welche Wiederholungsrate Seegangslasten generiert werden sollen. Während für eine Überführung zur einer in der Nähe liegenden Werft die tägliche Wiederholungsrate genügt, kann bei geringfügigen Strukturschäden ein späterer Werftaufenthalt legitim sein, wenn mit den stärkeren Seegangslasten der 20 Jahres-Wiederholungsrate gerechnet wird.

Der Wellenparameter C kann abhängig von der Schiffslänge bestimmt werden, wie in den *IACS*-Vorschriften [7] (Ch.1, Sec.2.3.1) beschrieben wird.

Die Werte für die Biegemomente aus den Gleichungen 4.12 und 4.13 sind positiv, was für die Hogging-Situation auch korrekt ist. Um vorzeichenrichtig weiter zu arbeiten müssen Sagging-Momente negativ angenommen werden.

Auf der Ein- und Ausgabeseite kann die Auswahl getroffen werden, dass die Verläufe der Seegangslasten berücksichtigt werden. Außerdem kann gewählt werden, ob der Wahrscheinlichkeitsfaktor für eine 20 Jahres Periode gewählt werden soll, oder für eine tägliche Wiederholung.

Neben den Belastungen durch die Verteilung der Massenkräfte wird auch für die Seegangsbelastungen der exakte Wert an einer Position x_A ausgegeben. Dabei ist darauf zu achten, dass bei den Seegangslasten für jede x -Position sowohl für die Scherkräfte, als auch für die Biegemomente zwei Kurven zur Verfügung stehen. Wenn auf der *Ein- und Ausgabeseite* die Option getroffen wird Seegangslasten zu berücksichtigen, werden somit sowohl Ergebnisse für den Hogging-, als auch für den Sagging-Fall ausgegeben. Auch die automatische Ermittlung der Extremwerte muss leicht abgewandelt werden, wenn Seegangsbelastungen berücksichtigt werden, um zu vermeiden, dass unübersichtlich viele Extrema ausgewertet werden, die nicht von Belang sind.

So werden bei den Kurven mit positiven Seegangsaufschlag nur die Maxima betrachtet, und bei den Kurven, bei denen der Seegangsaufschlag ein negatives Vorzeichen hat, nur die Minima. Für die sich ergebenden Längspositionen werden auch hier die Art der Extrema mit zugehörigen Werten ausgegeben.

4.3.3 Validierung der Ergebnisse

Im Folgenden wird untersucht, ob die mit dem Programm errechneten Lasten bei Ruhewasserlinie realistische Ergebnisse liefern. Dafür wird eine Vorgehensweise des *DNV GL* herangezogen zur Abschätzung von vertikalen Scherkräften und Biegemomenten für frühe Entwurfsstadien.

Von der *IACS* [7] (Ch.4, Sec.3, 2.2.2) wird eine ähnliche Vorgehensweise vorgeschlagen, die jedoch lediglich die Biegemomente abschätzt. Es wird dort kein Verfahren erwähnt, mit dem Scherkräfte in einem frühen Entwurfsstadium abgeschätzt werden können.

4.3.3.1 Ermittlung der Ruhewasserlasten nach *DNV GL*

Zur Abschätzung der Scherkräfte bei Ruhewasserlinie nach *DNV GL* [6] (Sec.4.2.4) werden die Gleichungen 4.14 und 4.15 verwendet.

$$Q_{SW,pos} = \frac{5 f_{qs} M_{SW,min}}{L} \quad (4.14)$$

$$Q_{SW,neg} = \frac{-5 f_{qs} M_{SW,min}}{L} \quad (4.15)$$

$Q_{SW,pos}$	positive Scherkraft bei Ruhewasser [kN]
$Q_{SW,neg}$	negative Scherkraft bei Ruhewasser [kN]
f_{qs}	Verteilungsfaktor über die Schiffslänge nach [6] (Sec.4.2.4.1) [-]
$M_{SW,min}$	vertikales Biegemoment bei Ruhewasser [kNm]

Das vertikale Biegemoment $M_{SW,min}$ ist das Maximum der Beträge der Biegemomente bei Ruhewasser durch Hogging $M_{SW,h}$ und Sagging $M_{SW,s}$, die mit den Gleichungen 4.16 und 4.17 des *DNV GL* [6] (Sec.4.2.2) ermittelt werden. Diese unterscheiden sich nur geringfügig von den Gleichungen, die von der *IACS* angegeben werden, sind jedoch notwendig, um die Abschätzung nach *DNV GL* durchzuführen.

$$M_{SW,h} = f_{sw}(171 CL^2 B(c_B + 0,7)10^{-3} - M_{WV,h}) \quad (4.16)$$

$$M_{SW,s} = -0,85 f_{sw}(171 CL^2 B(c_B + 0,7)10^{-3} + M_{WV,s}) \quad (4.17)$$

$M_{SW,h}$	vertikales Biegemoment bei Ruhewasserlinie durch Hogging [kNm]
$M_{SW,s}$	vertikales Biegemoment bei Ruhewasserlinie durch Sagging [kNm]
f_{sw}	Verteilungsfaktor über die Schiffslänge nach [6] (Sec.4.2.2.1) [-]

Die vertikalen Biegemomente durch Seegang $M_{WV,h}$ und $M_{WV,s}$ können mit den Gleichungen 4.18 und 4.19 des *DNV GL* [6] (Sec.3.1.1) berechnet werden.

$$M_{WV,h} = 0,19 f_{nl,vs} f_m f_t C L^2 B c_B \quad (4.18)$$

$$M_{WV,s} = -0,19 f_{nl,vs} f_m f_t C L^2 B c_B \quad (4.19)$$

f_m	Verteilungsfaktor über die Schiffslänge nach [6] (Sec.4.3.1.1) [-]
f_t	Faktor abhängig vom Entwurfsszenario [-]
$f_{nl,vh}$	Faktor zur Berücksichtigung nichtlinearer Effekte bei Hogging [-]
$f_{nl,vs}$	Faktor zur Berücksichtigung nichtlinearer Effekte bei Sagging [-]

Der Faktor C ist der Wellenparameter, der auch in den Seeganglastabschätzungen der *IACS* [7] (Ch.1, Sec.2.3.1) verwendet wird.

Faktor f_t kann laut Vorschriften des *DNV GL* [6] (Sec.4, 2.2.1) für diese Berechnung zu 1 gesetzt werden.

Der Faktor zur Berücksichtigung nichtlinearer Effekte $f_{nl,vh}$ bei Hogging hat für Festigkeitsberechnungen den Wert 1. Für Sagging kann dieser Faktor mit Gleichung 4.20 ermittelt werden.

$$f_{nl,vs} = 0,58 \left(\frac{c_B + 0,7}{c_B} \right) \quad (4.20)$$

Die sich somit ergebenden Verläufe für Scherkräfte und Biegemomente werden nur auf der Tabellenseite *Validierung* dargestellt.

4.3.3.2 Vergleich und Bewertung der Ergebnisse

Um die Ergebnisse der Rechnungen zu validieren, werden drei Schiffe betrachtet, die in Tabelle 4.2 genannt sind. Die angegebenen Werte stammen aus der Online-Datenbank *MarineTraffic* [18].

Schiffsdaten	Clara	YM Witness	Volcan de Timanfaya
Schiffstyp	Massengutfrachter	Containerschiff	RoRo-Fähre
Länge zwischen den Loten	225 m	368 m	142,45 m
Breite	32,26 m	51 m	24,2 m
Völligkeitsgrad	0,84	0,76	0,79
Tiefgang am vorderen Lot	7 m	14,2 m	5,4 m
Tiefgang am hinteren Lot	7 m	14,2 m	5,4 m
Verdrängung	41.600 t	198.000 t	14.300 t

Tabelle 4.2: betrachtete Schiffe zur Validation der Lastverläufe

Die Ergebnisse für die *YM Witness* sind in den Abbildungen 4.9 und 4.10 dargestellt. Die Lastverläufe der anderen Schiffe sind im Anhang von 8.1 bis 8.4 zu finden

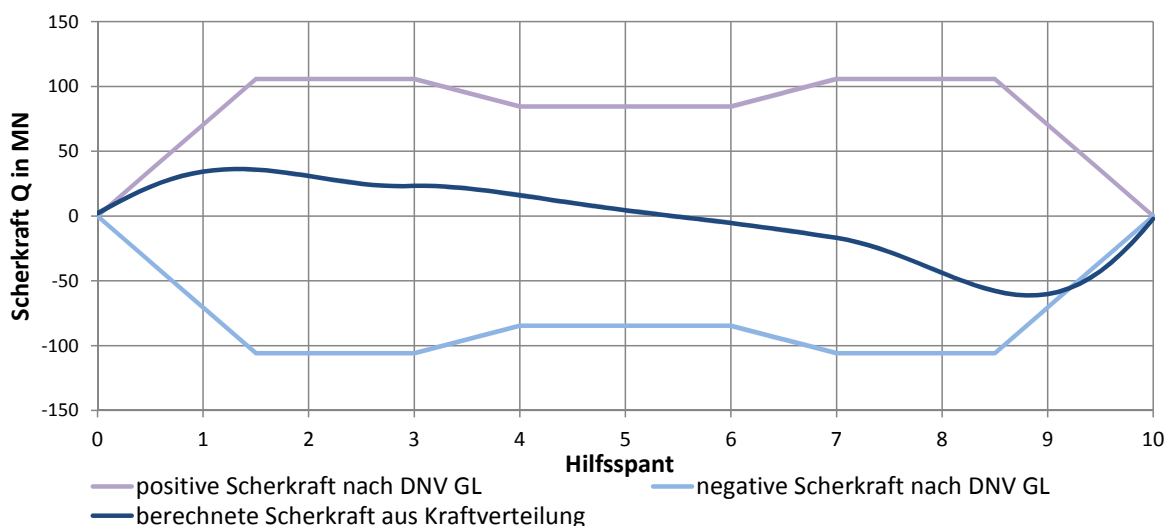
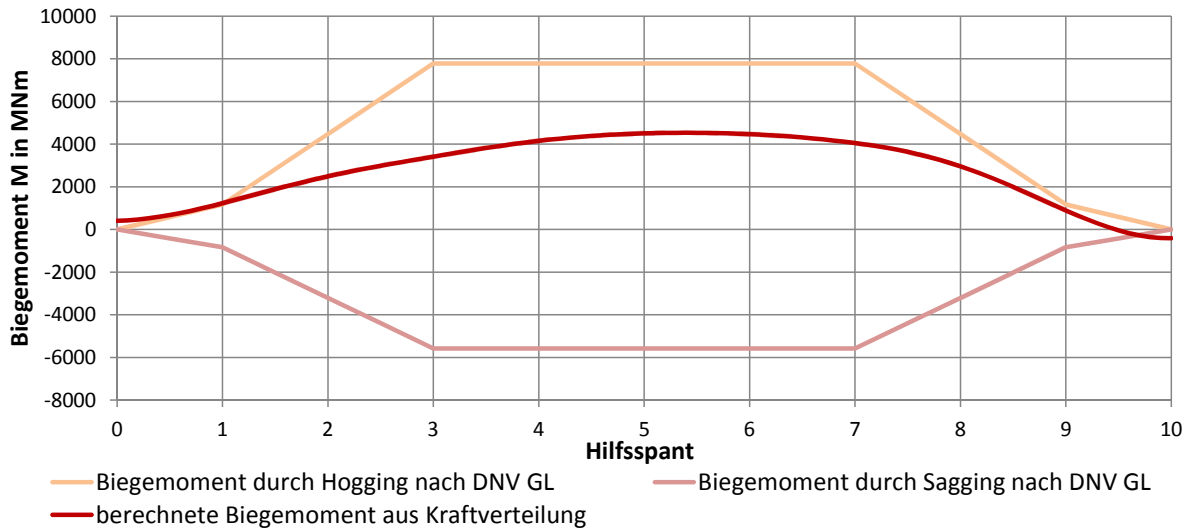


Abbildung 4.9: vertikaler Scherkraftverlauf des Containerschiffes *YM Witness*

Die dargestellten Belastungen werden mit der Standardmassenverteilung und ohne Grundberührung berechnet.

Für alle drei Schiffe liegen die auf Basis der Massenverteilung errechneten Lastverläufe unterhalb der Kurven, die nach *DNV GL* angenommen werden. Dass die berechneten Lastverläufe teilweise wesentlich kleinere Lasten vorhersagen als die Vorschriften des

Abbildung 4.10: vertikaler Biegemomentverlauf des Containerschiffes *YM Witness*

DNV GL annehmen, lässt sich darauf zurückführen, dass die verwendete Standardmassenverteilung das Schiffsgewicht sehr homogen auf die Schiffslänge verteilt und somit keine Beladungsfälle widerspiegelt, die zu starkem Hogging, oder Sagging führen. Die Vorschriften des *DNV GL* hingegen schätzen die Lasten ab, die bei Ladefällen mit Extrembelastungen auftreten.

Die Validierung zeigt, dass das hier zu entwickelnden Programm realistische Lastverläufe ausgibt.

4.3.4 Fehlerbetrachtung und Grenzen

Durch die Annahme der Verdrängungskurven nach den Modellen der *BSRA* ist jede Berechnung mit der Annahme verbunden eine Rumpfform zu betrachten, die typischen Handelsschiffen der letzten Jahrzehnten entspricht. Dieses Verfahren kann keine besonderen Formgebungen berücksichtigen, wie zum Beispiel *SWATHs*, Segelschiffe, oder Schnellboote. Falls so ein Fall betrachtet werden soll, muss diese neue Verdrängungsverteilung zu Anfang der Berechnungen eingebunden werden, also auf der Tabellenseite *Auftriebsverteilung BSRA* bei der linearen Interpolation der relativen Spantvölligkeiten.

Die Annahme der Verwendung eines linearen Verteilungsfaktors zur Berücksichtigung des Trimms kann nur als realistisch angesehen werden, solange keine extremen Trimmlagen auftreten bei denen große Teile des Freiborddecks zu Wasser kommen. Da dieser Fall jedoch in realen Schadensfällen auftreten kann, gibt es die Möglichkeit den Auftriebsschwerpunkt manuell einzugeben. Dieser muss den Verdrängungskurven in den Formblättern entnommen werden. Weitere Anpassungen der Auftriebsverteilung bei extremen Trimmlagen sind möglich indem in der *Beladungstabelle* positive, oder negative

Massen modelliert werden. Falls große Bereiche des Schiffes komplett unter Wasser, oder ausgetaucht sind, muss die Auftriebsverteilung manuell eingegeben werden.

Für die Krängung des Schiffes gilt ebenfalls, dass lediglich moderate Winkel berücksichtigt werden können. Da die betrachteten Auftriebs- und Massenkräfte, sowie die Erdbeschleunigung, im ortsfesten Koordinatensystem immer parallel zur z -Achse verlaufen, sind die errechneten Scherkräfte und Biegemomente ebenfalls ortsfest. Bei starken Krängungswinkeln stimmen diese Belastungen nicht mehr mit dem schiffsfesten Koordinatensystem überein. Für Krängungswinkel unter 10° hat dieser Umstand keinen signifikanten Einfluss. Bei großen Krängungswinkeln liefert das Programm Ergebnisse, die nicht mehr als konservativ betrachtet werden können.

Eine weitere Einschränkung ergibt sich daraus, dass das Programm lediglich die globalen Lasten betrachtet. Lokale Effekte werden nicht berücksichtigt, können jedoch vor allem an den Stellen mit Beschädigung, oder der Grundberührung zu Spannungsspitzen führen, die mit einer globalen Betrachtung nicht berücksichtigt werden.

Für eine genaue Lastprognose in besonders kritischen Fällen, wie bei einem Schiff auf einem scharfkantigen Riff, ist eine Betrachtung der lokalen Schiffskonstruktion in einem separaten Modell notwendig.

Die Vorgehensweise zur Erstellung der genauer definierten Gewichtsverteilung mit der Massenmatrix kann fehlerhafte Ergebnisse erzeugen, wenn die Länge des Tanks, oder Aufbaus als extrem kurz angegeben wird. Da die Streckenlast mit der eingegebenen Länge errechnet wird kann es durch die Einteilung in das Raster der Hilfsspannten dazu kommen, dass beispielsweise ein extrem kurzer Aufbau mit 1 m Länge auf zwei Hilfsspannten aufgeteilt wird. Für Längenangaben über $\frac{1}{101} L_{pp}$ ist diese Ungenauigkeit von untergeordneter Bedeutung. Falls Eingaben erfolgen, die eine Last auf eine kürzere Länge verteilen, gibt das Programm eine Warnung aus.

4.4 Berechnung der maximal zulässigen globalen Belastungen

In diesem Abschnitt wird eine Vorgehensweise entwickelt, um die maximal zulässigen vertikalen Scherkräfte und Biegemomente für einen gegebenen Schiffsquerschnitt mit eventuellen Beschädigungen zu bestimmen. Dazu wird eine geeignete Software ausgewählt und vorgestellt. Anschließend wird ein Ablaufplan entwickelt, der das genaue Vorgehen beschreibt.

4.4.1 Auswahl des Programmes zur Längsfestigkeitsanalyse

Zur Bewertung der Längsfestigkeit von Schiffsstrukturen bietet es sich an, auf die Vorschriften von Klassifikationsgesellschaften zurückzugreifen. Wie bereits im Abschnitt 2.1.1.1 erläutert, empfiehlt die *IACS* die Anwendung der *Smith*-Methode, die bereits in verschiedenen Programmen von Klassifikationsgesellschaften umgesetzt wird.

In einem Paper der *University of Zagreb* [19] werden die Ergebnisse verschiedener Programme verglichen, die den *Smith*-Ansatz verwenden. Dabei ist *MARS2000* von *Bureau Veritas* das einzige Programm, das kontinuierlich konservativere Ergebnisse liefert, als die Mittelwerte der anderen betrachteten Verfahren.

Des weiteren ist zum Zeitpunkt dieser Untersuchung *MARS2000* das einzige Programm zur Berechnung der Längsfestigkeit, das lizenz- und kostenfrei zur Verfügung steht, und somit für jeden verfügbar ist. Außerdem bietet *Bureau Veritas* einen zuverlässigen Online-Support per E-Mail.

Für die weiteren Berechnungen ist *MARS2000* somit das am besten geeignete Programm.

4.4.2 Erstellung von Vorlagen für verschiedene Schiffstypen

Wie in Abschnitt 2.1.2.4 beschrieben, ist es für die Anwendung der *Smith*-Methode notwendig den Schiffsquerschnitt zu modellieren, für den die Festigkeit berechnet wird. Um die Anwendung der hier entwickelten Methodik zu beschleunigen, werden Querschnittsvorlagen für einige Schiffstypen entwickelt, die häufig benötigt werden. Diese müssen bei der späteren Anwendung nur noch auf die richtige Größe skaliert werden und die Spezifikationen der Bauteile eingetragen werden. Es werden nur Mitschiffssektionen erstellt, da sich die Formen und Konstruktionen an den Schiffsenden schlecht verallgemeinern lassen. Bei Untersuchungen außerhalb des Mitschiffsbereiches muss die betroffenen Sektion komplett neu modelliert werden.

Auf Basis der Betrachtungen in Abschnitt 3.2 werden die Schiffstypen bestimmt, die am häufigsten in Schiffsunglücke involviert sind. Im Folgenden befindet sich eine Auflistung der Schiffstypen, für die Vorlagen erstellt werden.

- Massengutschiffe
- Containerschiffe
- RoRo-Schiffe
- Tanker
- Chemikaliertanker

Für Tanker, RoRo- und Containerschiffe liegen genug Unterlagen vor, um Vorlagen für verschiedene Größenordnungen dieser Schiffstypen zu modellieren.

Um die späteren Anpassungen der Vorlagen zu vereinfachen, wird nur eine Seite der Spanten modelliert. Somit werden Fehler bei der doppelten Eingaben des symmetrischen Querschnittes vermieden. Zur Modellierung von unsymmetrischen Konstruktionen und Beschädigungen kann diese Seite in einem späteren Arbeitsschritt gespiegelt und weiter bearbeitet werden.

4.4.3 Vorgehensweise bei Festigkeitsberechnungen mit *MARS2000*

4.4.3.1 Modellierung des Querschnittes

Zur Bestimmung der zulässigen globalen Belastungen mit der *Smith*-Methode müssen alle Bauteile definiert werden, die zur Längsfestigkeit beitragen. Nach *IACS* [7] (Ch.5, Sec.2) werden dafür alle Platten und Steifen betrachtet, die unter dem Gurtungsdeck liegen und in Schiffslängsrichtung durchgängig sind. Lukensäule, Deckshäuser und Aufbauten werden nur als tragend betrachtet, wenn sie länger sind als 0,15 der Schiffslänge und innerhalb des Bereiches von $0,4 L$ um die Schiffsmittle liegen. Gefaltete Längsschotte, Schanzkleider und Bilgekiele werden als nicht tragend betrachtet.

Als Ausgangspunkt für die Modellierung kann eine der Vorlagen aus 4.4.2 gewählt werden. In der *Edit*-Umgebung können daraufhin alle relevanten Details geändert werden. Im Folgenden wird eine Auswahl der wichtigsten Funktionen in *MARS2000* beschrieben, die notwendig sind, um einen Spant zu modellieren. Für weiterführende Informationen kann auf das Benutzerhandbuch von *MARS2000* [20] zurückgegriffen werden.

Vorab können verbaute Materialien und deren Eigenschaften definiert werden, die vom Standard, dem Schiffbaustahl *St235*, abweichen. Dafür müssen Einträge in die Materialtabelle in *Basic Ship Data* hinzugefügt werden. Bei der späteren Beschreibung der Bauteile kann auf diese Werkstoffdatenbank zurückgegriffen werden.

Im Menü am linken Bildschirmrand befinden sich die Werkzeuge, die zur Modellierung benötigt werden. Mit dem *Panels*-Werkzeug können Positionen von Plattenfeldern definiert werden. Diese liegen auf den Verbindungslinien zwischen Punkten, deren Lage mit dem *Nodes*-Werkzeug festgelegt werden. Mit diesen beiden Werkzeugen kann das Grundgerüst des Spantes gebaut werden. Mit dem *+* und *-* Knöpfen am linken Rand können Paneele und Punkte hinzugefügt, oder entfernt werden. Punkte, an denen mehr als zwei Paneele zusammenstoßen, können mit den drei *Intersection*-Modi des *Node*-Werkzeuges definiert werden. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Paneele nicht an zwei Punkten mit den gleichen Koordinaten enden, sondern der selbe Punkt genutzt

wird. So kann gewährleistet werden, dass das Programm den Punkt als Ort erhöhter Steifigkeit berücksichtigt. Lagebeziehungen, wie zum Beispiel vertikal übereinanderliegende Punkte, können rechts im *Tools*-Fenster des *Nodes*-Werkzeuges gewählt werden.

Zur Anpassung einer Spantvorlage empfiehlt es sich mit der Festlegung der Außenhaut anzufangen. Boden, Kimmradius und Seite bestehen aus einem Paneel, das mit dem *Bilge-Wizard* erstellt wird, einem Hilfswerkzeug zur Erstellung der Außenhaut. Deshalb genügt es mit dem *Nodes*-Werkzeug auf den Kimmradius zu klicken und im Menü rechts die Schiffsbreite und den Kimmradius festzulegen. Alle weiteren Koordinaten des Querschnittes können daraufhin angepasst werden.

Nachdem die Positionen aller Paneele festgelegt sind, können diese mit dem *Strakes*-Werkzeug in Plattenfelder unterteilt werden, denen Plattendicken zugewiesen werden. Um eine Unterteilung eines Paneels hinzuzufügen, oder zu entfernen können die + und - Knöpfe verwendet werden. Die Länge und Dicke eines Plattenfeldes wird daraufhin im Menü rechts definiert.

Im letzten Schritt der Modellierung werden mit dem *Longitudinal Stiffener*-Werkzeug Längssteifen verteilt. Für das ausgewählte Paneel können mit den + und - Knöpfen Steifen hinzugefügt oder entfernt werden. Im Menü rechts können die Eigenschaften der Steifen, die Anzahl der Wiederholungen und die Positionen festgelegt werden.

4.4.3.2 Berücksichtigung von Korrosion

Da die Plattendicken in den Konstruktionszeichnungen einen Korrosionszuschlag enthalten, ist es notwendig für die Festigkeitsberechnungen die Dicken der Platten zu reduzieren. Der Korrosionszuschlag einer Platte ist abhängig von der Art des Raumes, den sie begrenzt. Daher ist es notwendig im Modell zu definieren was die Räume enthalten. Mit dem *Compartements*-Werkzeug können Räume entlang der Paneele definiert und einem Typ zugewiesen werden.

Die Reduktion der Plattendicken wird daraufhin in *MARS2000* automatisch durchgeführt.

Es kann dabei unterschieden werden, ob die Vorschriften des *Bureau Veritas*, oder der *IACS* für Tank- und Massengutschiffe verwendet werden sollen. Dafür kann unter *Basic Ship Data* bei *Notations & Main Data* der Schiffstyp gewählt werden. Für die meisten wählbaren Schiffstypen gelten die Regeln des *Bureau Veritas*. Nur für die Wahloptionen *Oil Tanker CSR* und *Bulk Carrier CSR* werden die harmonisierten Vorschriften nach *IACS Common Structural Rules* angewendet. Beide Varianten sind legitim und unterscheiden sich nur geringfügig. Für die Anwendung der *IACS*-Vorschriften fordert *MARS2000* zusätzliche Eingaben bezüglich der Raumaufteilungen.

Während in den Regularien von *Bureau Veritas* gefordert wird den kompletten Korro-

sionszuschlag abzuziehen wird nach *IACS* nur die Hälfte abgezogen. Bei genauerer Betrachtung der Ermittlung dieser Korrosionszuschläge stellt sich heraus, dass nach *IACS* auch dementsprechend höhere Korrosionszuschläge gefordert werden. Eine genauere Gegenüberstellung befindet sich in Tabelle 4.3. Die vollständigen Tabellen sind in den *Common Structural Rules* [7] (Ch.3, Sec.2 1.2.1) und in den Vorschriften von *Bureau Veritas* [21] (Pt.B, Ch.4, Sec.2 3.1.1) zu finden. Die Wahl der Vorschriften wird somit letztendlich nur einen geringen Einfluss auf die verbleibenden Plattendicken und somit auf die Endergebnisse haben.

Raum	<i>Bureau Veritas</i>	<i>IACS</i>
Ballasttank	1 mm	1,2 mm - 2 mm
Laderaum für Trockenschüttgut	1 mm - 1,75 mm	1,8 mm - 5,2 mm
Frischwassertank	0,5 mm	0,7 mm
Seewasser und - Luft ausgesetzt	0,5 mm	1,0 mm

Tabelle 4.3: Vergleich der Korrosionszuschläge nach *Bureau Veritas* und *IACS*

4.4.3.3 Berücksichtigung von Schäden

Da Strukturschäden in der Regel unsymmetrisch bezüglich der Schiffsmittle auftreten, ist es notwendig die modellierten Spanthälften zu einem kompletten Spant zu vervollständigen. Dafür muss zum einen in der *Edit*-Umgebung unter *Section - Main Data* eingestellt werden, dass der komplette Spant modelliert wird, anstatt nur einer Hälfte. Bei der Auswahl dieser Option erweitert sich die *y*-Achse des Koordinatensystems auf die andere Schiffshälfte.

Zum anderen muss anschließend das vorhandene Modell kopiert und um die *z*-Achse gespiegelt werden, um die modellierte Schiffsstruktur zu vervollständigen. Dafür steht bei der Auswahl des *Panels*-Werkzeuges im rechten Menü unter *Tools* die Option *Duplicate and Mirror Section* zur Verfügung. Mit dieser Funktion wird aus einer Spanthälfte ein vollständiger Spant. Platten auf der Mitschiffsachse werden nicht kopiert, um Doppelungen auf dieser Achse zu vermeiden.

Zur Modellierung von Schäden können die Plattenabschnitte und anliegende Steifen in den nichttragenden Bereichen gelöscht werden. Dafür können Abschnitte mit der *Split Panel*-Funktion des *Panels*-Werkzeuges heraus getrennt und daraufhin entfernt werden.

Es ist darauf zu achten, dass für die Berechnung der zulässigen Scherkräfte Probleme auftreten, wenn der Querschnitt unterbrochen wird. *MARS2000* kann Schubspannungen nicht berechnen, wenn der Schiffsquerschnitt in zwei Teile geteilt wird, wie es bei

Beschädigungen an einer einfachen Außenhaut, oder einfachen Bodenstruktur der Fall ist, wenn keine durchgehenden Decks vorliegen. Diese Problematik wird im Abschnitt 5 näher betrachtet.

Für Untersuchungen von Querschnitten in der Nähe einer großen Beschädigung muss berücksichtigt werden, dass sich für die Zugspannungsverteilungen Schattenbereiche bilden. Diese Bereiche liegen direkt vor und hinter nicht tragenden Bereichen und tragen nicht zur Längsfestigkeit bei. In Abbildung 4.11 ist die Lage dieser Schattenbereiche nach Untersuchungen des *Ship Structure Committee* [5] dargestellt. So wird angenommen, dass der Bereich neben der Öffnung durch ein gleichschenkliges Dreieck mit einem Öffnungswinkel von circa 30° beschrieben werden kann. In den Vorschriften der *IACS* [7] (Pt.B, Ch.5, Sec.1 1.2) werden für kleine Öffnungen ebenfalls Schattenbereiche mit 30° Öffnungswinkel angenommen. Auch wenn diese Vorgehensweise nicht alle Details der Struktur betrachtet, wird sie als ausreichend genau beschrieben, um die auftretenden Effekte zu berücksichtigen.

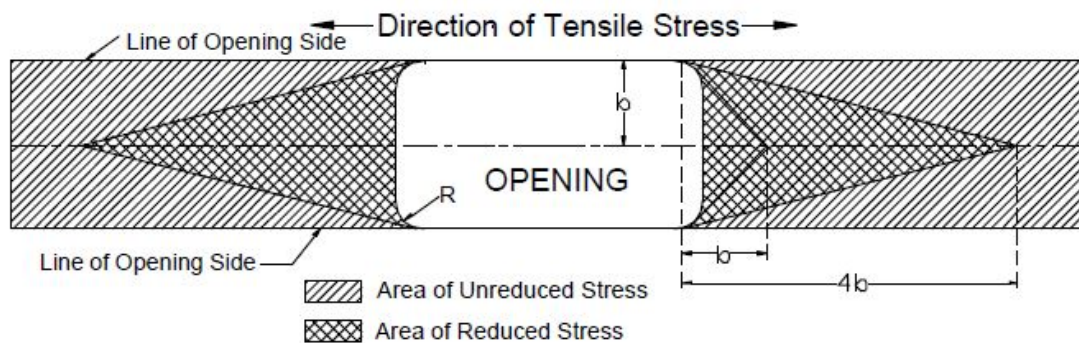


Abbildung 4.11: Schattenbereiche für Spannungsverläufe neben Öffnungen, *Ship Structure Committee* [5]

Für geringfügige Verformungen kann davon ausgegangen werden, dass Bauteile weiterhin einen Beitrag für die Gesamtfestigkeit leisten. Ein vollständiges Vernachlässigen von minimal verformten Bauteilen führt zu unnötig konservativen Ergebnissen. Von den Klassifikationsgesellschaften und der *IACS* liegen jedoch keine Richtlinien vor, die festlegen ab welchem Grad der Verformung ein Bauteil als nicht tragend angesehen werden muss.

Einige Richtwerte werden von *Benkovsky* [22] gegeben. Demnach ist es legitim mit der Reparatur von Beschädigungen bis zum nächsten planmäßigen Dockaufenthalt zu warten, wenn die folgenden Bedingungen eingehalten werden:

Die Länge der Eindellung ist kleiner als 20 % des Spantabstandes und das Verhältnis von Länge zu Tiefe der Verformung ist nicht größer als $\frac{1}{20}$.

Lokale Dellen können vernachlässigt werden, wenn die Tiefe der Eindellung nicht größer ist als das Fünffache der Plattendicke und das Verhältnis von Eindellungstiefe zu Spantabstand kleiner ist als $\frac{1}{20}$.

Nach *Hayward* (2007) [23] müssen Strukturen umgehend repariert werden, wenn die Verformungstiefe größer ist als $\frac{1}{12}$ des Spantabstandes.

4.4.3.4 Durchführung der Berechnungen

Für die Ermittlung der zulässigen Scherkräfte und Biegemomente bei *MARS2000* muss in der *Rules*-Umgebung, die über das Hauptmenü erreicht werden kann, der *Ultimate Strength Check* gewählt werden. Mit dem *w*-Symbol am linken Bildschirmrand können die *Hull Girder Strength Criteria* geöffnet werden, bei denen unter dem Reiter *Ultimate Strength* das maximal zulässige vertikale Biegemoment M_u angezeigt wird.

Die maximal zulässigen Scherkräfte können in den Exportdaten gefunden werden. Dafür muss im Menü an der linken Seite bei *Print Results* das Häkchen bei *Global Strength Criteria* gesetzt werden. Im *Preview* auf Seite zwei können die zulässigen vertikalen Scherkräfte gefunden werden. Es ist darauf zu achten, dass dabei der erste der drei Werte, die *Total Admissable Vertical Shear Force*, verwendet wird. Die beiden weiteren Kräfte enthalten Abzüge für Seegang, die weitere Eingaben berücksichtigen, auf die hier bisher nicht eingegangen wurde.

Die theoretischen Hintergründe dieser Rechnungen sind in den Abschnitten 2.1.2.4 und 2.1.2.5 näher erläutert.

4.4.4 Fehlerbetrachtung und Grenzen

Die einfache Programmierbarkeit und die praktische Handhabung der *Smith*-Methode und die Theorie über Schubspannungsverteilungen in dünnwandigen Querschnitten machen sie zu nützlichen Werkzeugen bei der Analyse von Schiffsstrukturen. Dennoch führen die getroffenen Vereinfachungen dazu, dass auch diese Methoden nicht immer exakte Vorhersagen liefern.

Einer der wichtigsten Einschränkungen resultiert aus der Annahme, dass nur ein zweidimensionaler Querschnitt betrachtet werden kann, der unabhängig von benachbarten Strukturen agiert. Es ist somit nicht möglich die exakten dreidimensionalen Verläufe der Lasten in der globalen Schiffsstruktur zu simulieren. Durch die Betrachtung des Schiffskörpers als Prisma können Spannungskonzentrationen durch Lastumlenkungen in Schiffslängsrichtung, wie sie beispielsweise an den Rändern von Beschädigungen, oder um große Öffnungen auftreten, nicht realistisch dargestellt werden.

Dies kann berücksichtigt werden, indem Schattenbereiche für Spannungsverläufe ein-

bezogen werden. Für die Modellierung von Querschnitten mit Schäden empfiehlt es sich leicht beschädigte Bereiche als nicht tragend zu betrachten, obwohl diese im Realfall immer noch einen Teil der umliegenden Spannungen aufnehmen. Mit dieser Herangehensweise überschätzt die *Smith*-Methode den Einfluss des Schadens tendenziell, was jedoch legitim ist, da diese unsichere Einflussgröße konservativ abgeschätzt wird.

Bei der *Smith*-Methode treten zusätzliche Ungenauigkeiten auf, da die verwendeten Spannungs-Dehnungs-Kurven alle Versagensarten der Bauteile und des Materials zusammengefasst enthalten. Eine präzise Abwägung der Lastüberlagerungen im Bauteil ist somit nicht möglich. Durch die langjährige Erfahrung der Klassifikationsgesellschaften und Forschungseinrichtungen in der Anwendung der *Smith*-Methode können die implementierten Spannungs-Dehnungs-Kurven jedoch als ausreichend gut etabliert angesehen werden. Für ungewöhnliche Konstruktionen, die andere Elemente als Kombinationen aus Platten und Steifen aufweisen, oder andere Materialien als Stahl enthalten, muss ohnehin eine detailliertere Analyse mit einem anderen Verfahren durchgeführt werden, wie zum Beispiel mit *Finite Elemente Methoden*.

Des Weiteren wurden die Spannungs-Dehnungs-Kurven lediglich für Elemente erstellt, die aus Kombinationen von einem Plattenabschnitt und einer zugehöriger Steife, beziehungsweise Kreuzungspunkten zweier Platten, sogenannten harten Punkten, bestehen. Dadurch können nur Fehlermodi berücksichtigt werden, die bei einzelnen Elementen auftreten können. In Abbildung 4.12 (A) sind lokal beulende Elemente dargestellt, wie sie mit der *Smith*-Methode berechnet werden können.

Versagensarten, die durch ein Zusammenspiel mehrerer Elemente auftreten, wie zum Beispiel großflächiges Beulen, können nicht berücksichtigt werden. Dieser Fall ist in Abbildung 4.12 (B) skizziert.

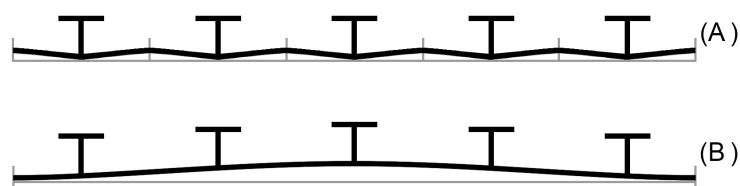


Abbildung 4.12: Gegenüberstellung von Beul-Fehlermodi bei Paneelen

Nach *Benson et al.* [24] ist lokales Beulen (A) für gängige Konstruktionen in kommerziellen Stahlschiffen die weitaus üblichere Versagensform. Verformungen durch das Zusammenspiel mehrere Platten-Steifen-Elemente treten eher bei Leichtbaukonstruktionen auf. Für die Schiffe, die mit dem hier zu entwickelnden Verfahren betrachtet werden sollen, ist diese Einschränkung somit von untergeordneter Bedeutung.

Durch die separate Betrachtung nebeneinanderliegender Elemente können außerdem im Modell Szenarios auftreten, bei denen direkt benachbarte Elemente extrem verschiedene Spannungszustände einnehmen. Ein solcher Effekt würde in Realität nicht auftreten, da Spannungsverläufe stetig sind.

Bei der Anwendung der *Smith*-Methode ist es jedoch lediglich möglich zu ermitteln, wie viel Spannung in den einzelnen Bauteilen auftritt. Es kann nicht darauf geschlossen werden welcher Fehlermodus in diesem Spannungszustand bei der Erstellung der Spannungs-Dehnungs-Kurve aufgetreten ist. Somit lässt es sich nicht vermeiden, dass benachbarte Elemente verschiedene Fehlermodi einnehmen können. Ungenauigkeiten müssen deshalb durch Sicherheitsfaktoren berücksichtigt werden.

Auch Lastüberlagerungen werden bei den Berechnungen mit *MARS2000* nicht berücksichtigt. Die Spannungs-Dehnungs-Kurven gelten für jedes Bauteil unabhängig von der eventuellen Scherbelastung, die ebenfalls vom Bauteil aufgenommen werden muss und die Dehnbelastbarkeit reduzieren kann. Diese Vereinfachung kann jedoch als legitim angesehen werden, wenn man betrachtet wo die größten Lasten auftreten. Wie in Abbildung 4.13 an zwei exemplarischen Querschnitten zu sehen ist, treten die maximalen Schubspannungen durch vertikale Scherkräfte in der Außenhaut auf Höhe der neutralen Achse auf und nehmen zum Boden und zum Gurtungsdeck hin ab.

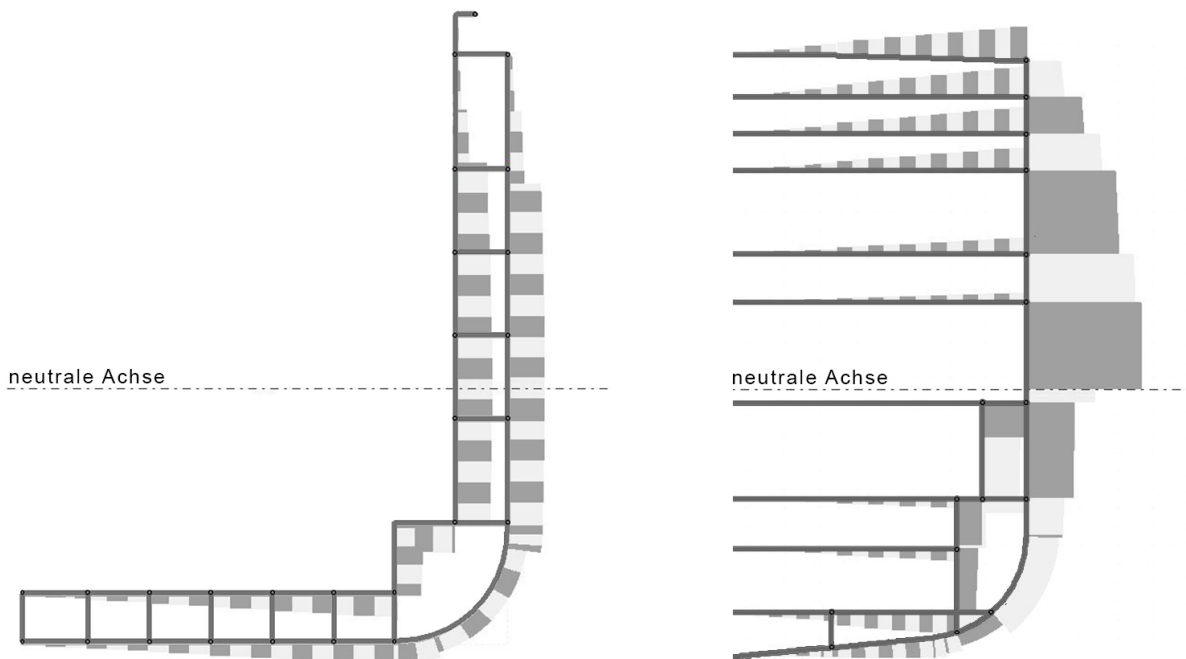


Abbildung 4.13: Verteilung der Schubspannungen durch vertikale Scherkräfte in Schiffsquerschnitten (Berechnung mit *MARS2000*)

Zug- und Druckspannungen, die durch vertikale Biegung des Schiffsquerschnittes auftreten sind definitionsgemäß auf der neutralen Achse gleich null und werden bei den

größten Entfernungen zur neutralen Achse maximal, also im Doppelboden und im Gurtungsdeck. Da der Verlauf der Schubspannung nach *IACS* so angepasst wird, dass dieser beim absoluten Maximum die maximal zulässige Spannung des Materials erreicht bevor plastische Verformung eintritt, sind die zu erwartenden Schubspannungen im Doppelboden und im Gurtungsdeck immer weit entfernt von der Belastbarkeitsgrenze. Da die Höchstwerte dieser beiden Belastungen nicht zusammenfallen, ist eine Überlagerung zulässig.

Weitere globale Belastungsformen, die der Schiffskörper aufnehmen muss sind horizontale Momente und Scherkräfte, sowie Scherkräfte durch Torsion um die Schiffslängsachse.

Von *Henn et al.* [25] wird ausgeführt, warum es nicht notwendig ist diese Lasten für jedes Schiff zu bestimmen und zu überlagern. Dabei wird vor allem darauf verwiesen, dass die anzunehmenden Extremlasten in der Betriebszeit eines Schiffes zufällig verteilt und sehr selten auftreten. Ein gleichzeitiges Auftreten der maximalen Lasten kann daher als so unwahrscheinlich eingestuft werden, dass es nicht sinnvoll ist eine Struktur darauf auszulegen.

In den Vorschriften der *IACS* werden Überlagerungseffekte durch die Verwendung von Sicherheitsfaktoren vereinfacht berücksichtigt.

Eine wichtige Einschränkung für die Anwendung des hier zu entwickelnden Verfahrens ergibt sich daraus, dass die Schubspannungsverläufe mit *MARS2000* nicht berechnet werden können, wenn in der zweidimensionalen Querschnittsbetrachtung zwei getrennte Teile vorliegen. Dieses Szenario kann auftreten, wenn ein Schiff an der Schadensstelle nur eine einfache Hülle hat und keine weiteren Decks, oder Längsschotte.

Eine Möglichkeit für diese Querschnitte zulässige Schubspannungen zu ermitteln wird in Abschnitt 5 entwickelt.

Abschließend wird darauf verwiesen, dass bei der Anwendung der *Smith*-Methode und der Theorie über Schubspannungen in dünnwandigen Querschnitten immer beachtet werden muss, dass ausschließlich die Widerstandsfähigkeit gegen globale Belastungen betrachtet wird. Jedoch werden die Bauteile im Schiffsrumpf zusätzlich durch eine Vielzahl von lokalen Effekten belastet. Da eine gesamtheitliche Betrachtung aller Belastungen in einem Modell sehr aufwändig und unübersichtlich wäre, werden im folgenden Kapitel Untersuchungen durchgeführt, um die zu erwartenden lokalen Effekte mit ausreichender Genauigkeit und Sicherheit abschätzen zu können.

4.5 Auswertung der Berechnungen

4.5.1 Übersicht über lokale Belastungen

Neben den globalen Lasten im Schiffsrumpf werden Bauteile auch durch lokale Belastungen beansprucht. In *Schiffstechnik und Schiffbautechnologie* [26] wird ein Überblick darüber gegeben welche Kräfte und Momente an einem Schiff angreifen. Auf Basis der dort erwähnten Lasten ist im Folgenden eine Auflistung gegeben, welche Belastungen für ein havariertes Schiff von Bedeutung sein können.

- Gravitationskräfte
 - hydrostatischer Wasserdruck
 - Druck durch flüssige / schüttbare Ladung und Betriebsstoffe
 - Gewicht von Maschinen, Ausrüstung und Ladung
 - Wasser an Deck
- Hydrodynamische Kräfte
 - Druckverteilung durch Wellen
 - Slamming, Wasserschlag, Kavitation
 - Propellerschlag
- Trägheitskräfte und -momente
 - Maschinen und Ausrüstung
 - Ladung und Betriebsstoffe (fest oder mit freier Oberfläche)
- Bodenreaktionen
 - Dockkräfte
 - lokale Grundberührungskräfte
- Vortrieb
 - Schub am Drucklager
 - Abstützmoment der Maschine
- Sonstiges
 - Schleppen, Festmachen, Ankern, Wind, Eis, Vibration

Auf Grund der Vielfältigkeit der auftretenden Lasten und da diese in der Praxis nicht ausreichend genau bestimmt werden können, ist es für eine praktische Anwendung nicht realisierbar diese im Einzelnen zu betrachten. Eine umfangreiche Untersuchung

dieser Einflüsse ist so zeitintensiv und aufwändig, dass eine zeitnahe Prognose nicht möglich ist.

Auch wenn es für die Genauigkeit der Prognosen förderlich wäre einzelne Aspekte dieser Auflistung zu berechnen, so ist es dennoch notwendig letztendlich eine pauschalisierende Abschätzung der weiteren Belastungen durchzuführen, die durch die Betrachtung einzelner Effekte nicht abgedeckt wurden.

Für eine solche Erstellung neuer Sicherheitsfaktoren wäre es notwendig umfangreiche Messdaten auszuwerten, die genau diejenigen Effekte berücksichtigen, die nicht im Detail untersucht wurden. Da eine solche Datenbasis nicht vorliegt, können diese notwendigen Sicherheitsfaktoren nicht ermittelt werden. Einer Berechnung einzelner Effekte könnte somit keine Abschätzung aller verbleibenden Aspekte folgen, sodass es für die praktische Anwendung keinen Mehrwert darstellt.

Eine Möglichkeit die oben genannten Effekte bei der Bewertung der Festigkeit einer Schiffsstruktur gesamtheitlich zu berücksichtigen ist die Verwendung von Sicherheitsfaktoren, wie sie von der *IACS* angegeben werden. Diese werden im folgenden Kapitel 4.5.2 erläutert.

4.5.2 Bewertung der Ergebnisse

Eine Methode zur Berücksichtigung von Belastungen, die über die globalen Scherkräfte und Biegemomente hinausgehen, bietet die *IACS* [7] (Ch.5, Sec.2, 2.1.1 / 2.3.1), indem Sicherheitsfaktoren aufgeschlagen werden, die in Gleichung 4.21 zu sehen sind.

$$(M_{SW} + \gamma_W M_{WV}) \gamma_R \leq M_U \quad (4.21)$$

M_{SW} vertikales Biegemoment bei Ruhewasser [kNm]

M_{WV} vertikales Biegemoment durch Seegang [kNm]

M_U maximal zulässiges vertikales Biegemoment [kNm]

γ_W Sicherheitsfaktor, anzunehmen mit 1,2 [–]

γ_R Sicherheitsfaktor, anzunehmen mit 1,1 [–]

Es lässt sich erkennen, dass die größere Beaufschlagung mit 20% proportional zu den Seegangslasten erfolgt, während der Sicherheitsfaktor γ_R , der auf das Gesamtmoment aufgeschlagen wird, lediglich 10% beträgt. Es wird also davon ausgegangen, dass der Großteil der zusätzlichen Lasten, die neben den globalen Momenten auftreten, durch Seegang hervorgerufen wird.

Für die Scherkräfte fordert die *IACS* [7] (Ch.5 Sec.1 3.2.1) lediglich die Einhaltung der Bedingung in Gleichung 4.22, dass an der Stelle im Querschnitt, wo die größte Spannung auftritt, die zulässige Schubspannung von $120 \frac{N}{mm^2}$ nicht überschritten wird.

Dieser Wert beinhaltet bereits einen Sicherheitsfaktor, da für Schiffbaustahl mit der Bezeichnung *St235* eine Streckgrenze von $235 \frac{N}{mm^2}$ angenommen werden kann und die Schubfestigkeit für normalfesten Konstruktionsstahl nach Ausführungen von *Voßviek et al.* [27] dem 0,58-fachen der Streckgrenze entspricht, also $136,3 \frac{N}{mm^2}$.

$$\tau \leq \frac{120}{k} \frac{N}{mm^2} \quad (4.22)$$

τ Schubspannung $[\frac{N}{mm^2}]$

k Materialfaktor nach *IACS* (Ch.3 Sec.1 2.2.1) [–]

Die Sicherheitsfaktoren, der hier beschriebenen Vorgehensweise, wurden entwickelt, um die Dimensionierung von Strukturen und Bauteilen in der Entwurfsphase eines Schiffes vornehmen zu können. Da havarierte Schiffe mit der in dieser Arbeit entwickelten Methodik jedoch nicht weitere 25 Jahre in Betrieb sein sollen, kann davon ausgegangen werden, dass die oben genannten Sicherheitsfaktoren konservativer sind, als es für eine Verholung zur nächsten Reparaturwerft notwendig ist. Dennoch bietet diese Herangehensweise eine Bewertungsgrundlage, der eine vieljährige Erfahrung zu Grunde liegt und deren Ergebnisse deshalb als zuverlässig angesehen werden können.

5 Entwicklung einer Methodik für geteilte Querschnitte

5.1 Motivation

Wie bereits im Abschnitt 4.4.3 erwähnt, treten bei den Berechnungen mit *MARS2000* Fehlermeldungen auf, sobald Plattenteile aus einem Spant entfernt werden, die dazu führen, dass in der zweidimensionalen Querschnittsbetrachtung zwei separate Teile ohne Verbindung entstehen. Da dieser Fall jedoch bei verschiedenen Schadensszenarios eintreten kann, wird in diesem Kapitel eine Methode entwickelt, mit der die zulässige Scherkraft auch für einen geteilten Querschnitt berechnet werden kann.

5.2 Ansatz

Eine naheliegende Möglichkeit, um die Problematik zu lösen, ist die Entwicklung eines neuen Programmes. Das würde jedoch ebenfalls bedeuten das in *MARS2000* erstellte Querschnittsmodell in ein weiteres Programm einzupflegen. Des Weiteren ist die Programmierung der Theorie über Schubspannungen in dünnwandigen Querschnitten verhältnismäßig umfangreich, wenn die Möglichkeit gegeben sein soll jegliche Spantformen zu betrachten. Neben dem automatischen Erkennen von Positionen, an denen die Schubspannungen zu null werden, müssen auch Spannungsaufteilungen an Kreuzungspunkten von Platten automatisiert berechnet werden können. Bei einer zusätzlichen Verdrehung der neutralen Achse durch unsymmetrische Beschädigungen und möglichen Unterteilungen des Querschnittes würde ein Programm entstehen, das zu umfangreich ist, um im Rahmen dieser Ausarbeitung programmiert zu werden.

Für den Fall, dass mit der in Abschnitt 4.4.3 beschriebenen Vorgehensweise keine Berechnung für die maximal zulässige Scherkraft durchgeführt werden kann, wird deshalb ein vereinfachendes Verfahren entwickelt.

Dafür wird untersucht von welchen Faktoren die maximal zulässige Scherkraft eines beschädigten Spantes am stärksten beeinflusst wird und wie sich die Schubspannungen in beschädigten Querschnitten verteilen.

Auf Basis dieses Wissens wird im Anschluss eine Methodik entwickelt, die beschreibt, wie das Modell in *MARS2000* verändert werden muss, um Berechnungen durchführen zu können.

5.3 Vorgehensweise

Im ersten Schritt wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, bei der die Größe der Beschädigung variiert wird. Die maximal zulässigen Scherkräfte werden mit *MARS2000* sowohl für Bodenbeschädigungen, als auch für Schäden an der Schiffseite berechnet. Dafür werden Beschädigungen an der Bodenstruktur ausgehend von der Schiffsmitte und von der Kimm betrachtet. In Abbildung 5.1 sind die Positionen skizziert. Um das prinzipielle Verhalten der Struktur mit einem adäquaten Berechnungsaufwand zu analysieren, wird die Breite der Schäden mit einer Schrittweite von 10% der Schiffsbreite variiert.

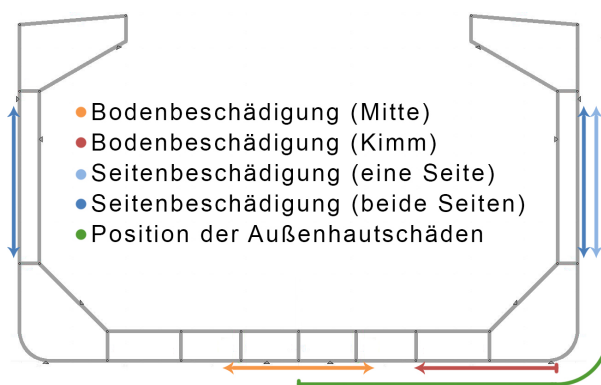


Abbildung 5.1: Position und Ausdehnung der angenommenen Schäden

Die Schäden an den Schiffsseiten werden untersucht, indem die Höhe der Schäden, ausgehend von der Schadensmitte auf halber Seitenhöhe, verändert wird, wobei eine Schrittweite von 10% der Seitenhöhe verwendet wird.

Um zu gewährleisten, dass das Programm diese Rechnungen durchführen kann, wird ein Spant eines Massengutfrachters betrachtet, der sowohl an den Schiffsseiten, als auch im Boden eine doppelwandige Struktur aufweist. Die Beschädigungen werden lediglich an der Außenhaut des Schiffes modelliert, um zu gewährleisten, dass der Querschnitt nicht unterteilt wird.

Nach der detaillierten Betrachtung der Effekte an dem Spant des Massengutfrachters wird überprüft, ob sich andere Schiffstypen ähnlich verhalten. Abbildung 5.2 zeigt die weiteren betrachteten Querschnitte.

Neben dem Massengutfrachter (A) wird ein Containerschiff (B) betrachtet, das ebenfalls doppelwandige Seiten und Böden besitzt. Der Querschnitt des Öltankers (C) weist auch eine doppelte Boden- und Seitenstruktur auf, sowie ein geschlossenes Festigkeitsdeck und ein Längsschott. Die RoRo-Fähre (D) hat einen Doppelboden und eine einfache Außenhaut an den Schiffsseiten, sowie ein geschlossenes Zwischen- und Festigkeitsdeck.

Nachdem der Einfluss der Schadensgröße untersucht wurde, wird betrachtet, wie groß

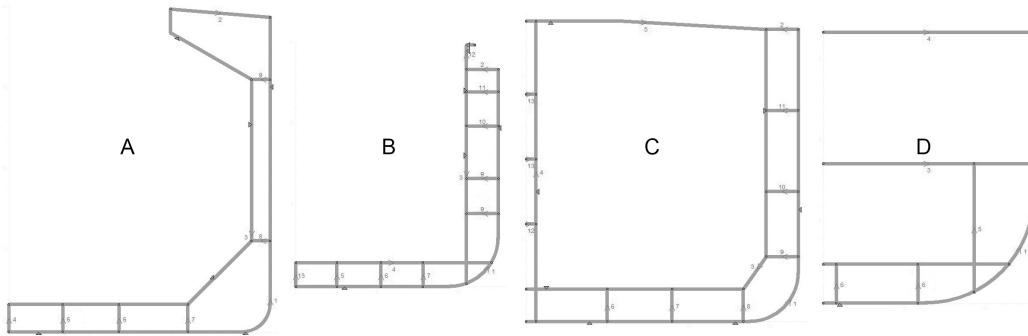


Abbildung 5.2: zu untersuchende Schiffsquerschnitte

der Einfluss der Position des Schadens auf die maximal zulässige Scherkraft ist. Dafür wird ein Schaden in der Außenhaut angenommen, der diese lediglich punktuell durchstößt. Die Position des Schadens wird ausgehend von der Schiffsmitte in fünf Schritten bis in die Kimm und anschließend mit fünf weiteren Schritten bis zum Festigkeitsdeck verschoben, wie in Abbildung 5.1 dargestellt.

Anschließend wird untersucht, wie sich die Schubspannungen in den anderen Querschnitten aus Abbildung 5.2 verteilen, wenn sie Beschädigungen an der Außenhaut aufweisen. Durch das Abschätzen der Spannungen in der verbleibenden Struktur nahe der Schadensstelle, wird anschließend festgelegt, wie das Modell eines geteilten Querschnittes angepasst werden kann, um eine konservative Berechnung zu gewährleisten, die den Effekt der Beschädigung lediglich gering überschätzt.

5.4 Sensitivitätsanalyse

5.4.1 Einfluss der Schadensgröße

Abbildung 5.3 zeigt den Zusammenhang zwischen Schadensausmaß und resultierender zulässiger Scherkraft des Querschnittes eines Massengutfrachters.

Die zulässige Scherkraft für den unbeschädigten Fall liegt bei 92,5 MN. Dieser Punkt stellt den Ausgangspunkt der vier Graphen dar. Für fast alle Schadensszenarios reduziert sich die zulässige Scherkraft signifikant sobald der Spant an einer Stelle unterbrochen wird. Lediglich für Schäden, die in der Schiffsmitte liegen, ist kein Einfluss festzustellen.

Dieser Effekt tritt auf, da Scherkräfte, wie in Abschnitt 2.1.2.5 näher erläutert, hauptsächlich von den senkrechten Elementen eines Querschnittes aufgenommen werden. In Abbildung 5.4 ist der Schubspannungsverlauf in einem unbeschädigten Querschnitt eines Massengutfrachters beispielhaft dargestellt. Es ist leicht zu sehen, dass die vertikalen Schubspannungen in der Schiffsmitte verschwinden im gesamten Boden wesent-

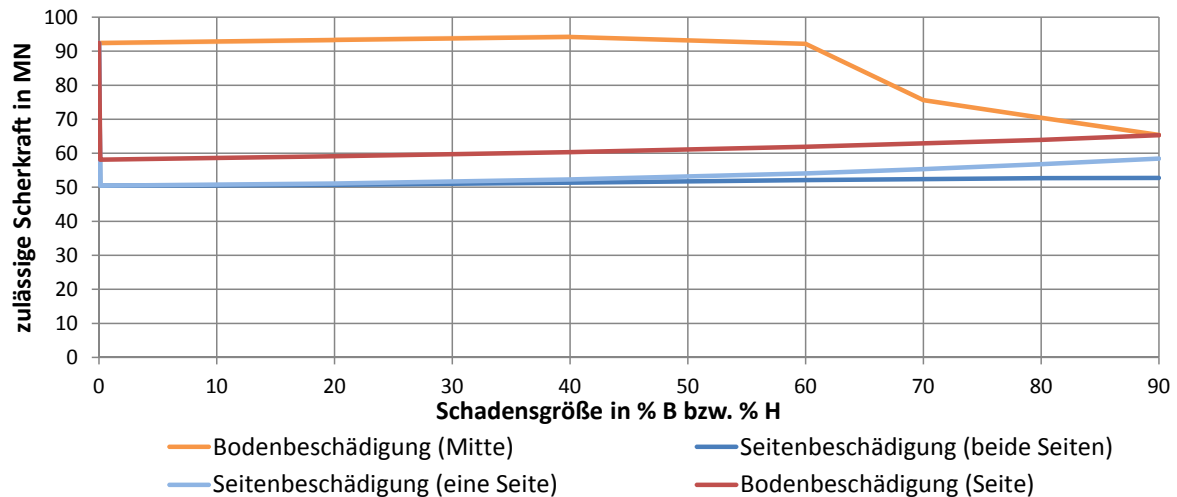


Abbildung 5.3: Abhängigkeit der zulässigen Scherkraft von der Größe des Schadens für den Querschnitt eines Massengutfrachters

lich geringer sind als in den Schiffsseiten.

Der Wegfall eines Plattenabschnittes an einer Stelle, wo kaum Spannungen auftreten, hat somit keinen relevanten Einfluss auf den Spannungsverlauf im restlichen Querschnitt. Beschädigungen an Positionen, an denen große Schubspannungen auftreten, reduzieren die Gesamtfestigkeit hingegen erheblich.

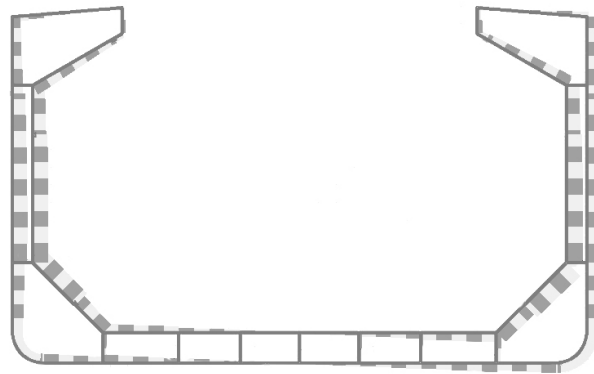


Abbildung 5.4: Schubspannungsverlauf im unbeschädigten Querschnitt eines Massengutfrachters (Berechnungen mit *MARS2000*)

Eine weitere Auffälligkeit in Abbildung 5.3 ist, dass die zulässige Scherkraft für alle Schadensszenarios geringfügig zunimmt, wenn die eingebrachten Beschädigungen vergrößert werden. Dieser positive Anstieg ist auf eine Umverlagerung der Schubspannungen zurückzuführen, die im Folgenden erläutert wird.

Ein direkter Vergleich der Schubspannungsverläufe von zwei identischen Spanten mit unterschiedlich großen Seitenbeschädigungen ist in Abbildung 5.5 dargestellt.

Es zeigt sich, dass bei einer Vergrößerung des Schadens auf der Steuerbordseite die maximale Spannung auf Höhe der Wasserlinie unverändert bleibt. Dies entspricht der

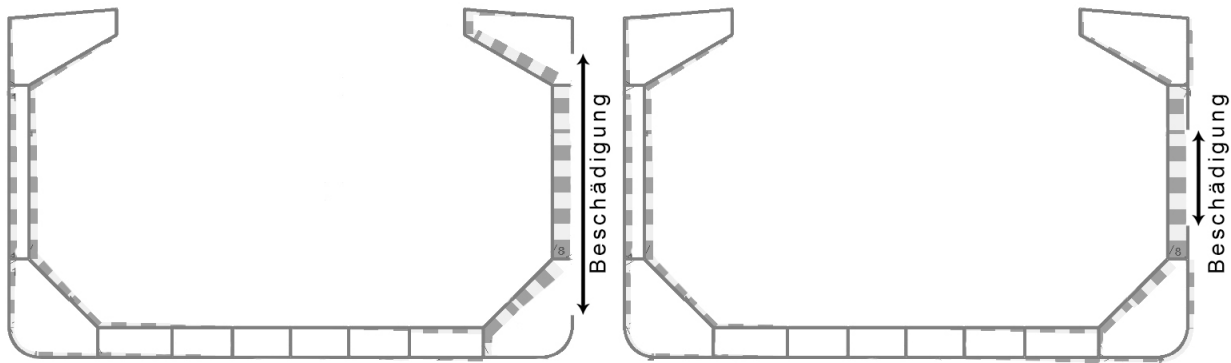


Abbildung 5.5: Schubspannungsverläufe im Querschnitt eines Massengutfrachters mit verschiedenen großen Seitenbeschädigungen (Berechnungen mit *MARS-2000*)

angenommenen Festigkeitsbedingung, die fordert dass die Schubspannung im gesamten Querschnitt den Materialkennwert von $120 \frac{N}{mm^2}$ nicht überschreitet. Da die Schubspannungsverläufe kontinuierlich sind, müssen diese Spannungen von den angrenzenden Bauteilen aufgenommen werden.

Außerdem lässt sich erkennen, dass bei dem Schadensfall mit der größeren Beschädigung auch höhere Spannungen im Hopper- und Wingtank auftreten. Für dieses Szenario sind die Kastenquerschnitte dieser Tanks unterbrochen, während sie bei dem kleineren Schaden geschlossen bleiben.

In Abbildung 5.6 ist links der Effekt, dass sich Schubspannungen bei Plattenkreuzungen aufsummieren, skizziert. Somit wird in den beiden Seiten des Kastenprofils im Maximum die Hälfte der Spannung erreicht, die in die angeschlossene Platte eingeleitet wird.

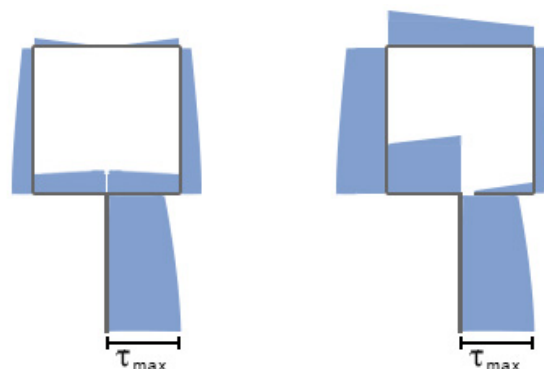


Abbildung 5.6: Skizze von Schubspannungsverläufen in geschlossenem und unterbrochenem Querschnitt

Das Unterbrechen des geschlossenen Querschnittes in der rechten Skizze führt dazu, dass sich die Schubspannung über die gesamte Seitenlänge des geöffneten Kastenquerschnittes aufbaut und sich nicht am Kreuzungspunkt summiert. Da sich die zulässige Scherkraft aus der Integration der Schubspannung über diese Länge ergibt, ist die

blau markierte Fläche proportional zur zulässigen Scherkraft des Querschnittes. Man erhält somit bei dem geöffneten Querschnitt größere zulässige Scherkräfte als bei dem geschlossenen Querschnitt. Dieser Effekt tritt jedoch nur auf, da die maximale Schubspannung im dem Bauteil erreicht wird, dass dem Kastenprofil ist.

Bei der Betrachtung eines geschlossenen Querschnittes ohne das restliche umliegende Schiff würde die zulässige Scherkraft eines geschlossenen Profils größer ausfallen als bei einem geöffneten, da dann innerhalb des Kastenquerschnittes die $120 \frac{N}{mm^2}$ nicht überschritten werden dürfen.

In Abbildung 5.3 ist außerdem zu sehen, dass sich die zulässige Scherkraft für den Fall der Außenhautbeschädigung in der Schiffsmitte erst reduziert, wenn über 60 % der Schiffsbreite beschädigt sind. Das entspricht exakt dem Punkt, an dem der Hoppertank beschädigt wird. Eine Beschädigung an der Außenhaut im Bereich des Doppelbodens hat demnach keinen signifikanten Einfluss auf die maximal zulässige Scherkraft.

Um zu überprüfen, ob dieser Effekt auch bei anderen Schiffstypen auftritt, werden die in Abbildung 5.2 dargestellten Spanten untersucht. Tabelle 5.1 zeigt die Ergebnisse der Berechnungen der Querschnitte in intaktem Zustand und mit einer Beschädigung der Außenhaut über die gesamte Breite des Doppelbodens, jedoch ohne Beschädigung der Kastenquerschnitte im Kimmbereich, also Hoppertanks oder Ähnliches.

Schiffstyp	zulässige Scherkraft	
	intakter Doppelboden	Doppelbodenbeschädigung
Massengutfrachter	92,45 MN	92,18 MN
Containerschiff	51,08 MN	50,63 MN
Öltanker	104,01 MN	103,12 MN
RoRo-Fähre	35,63 MN	35,37 MN

Tabelle 5.1: zulässige Scherkraft für Schiffstypen mit Doppelbodenbeschädigungen

Da die zulässige Scherkraft in keinem der Fälle um mehr als 0.9 % reduziert wird, kann daraus geschlossen werden, dass eine Beschädigung an der Außenhaut des Doppelbodens mittschiffs, also ohne Beschädigung der Querschnitte im Kimmbereich, keinen signifikanten Einfluss auf die zulässige Scherkraft hat.

5.4.2 Einfluss der Schadensposition

In Abbildung 5.7 ist die Abhängigkeit zwischen der Position eines lokalen Schadens an der Außenhaut und der maximal zulässigen Scherbelastung dargestellt. Dabei wird ein punktueller Durchstoß der Außenhaut von der Schiffsmitte nach außen und an der Schiffsseite bis zum Festigkeitsdeck verschoben.

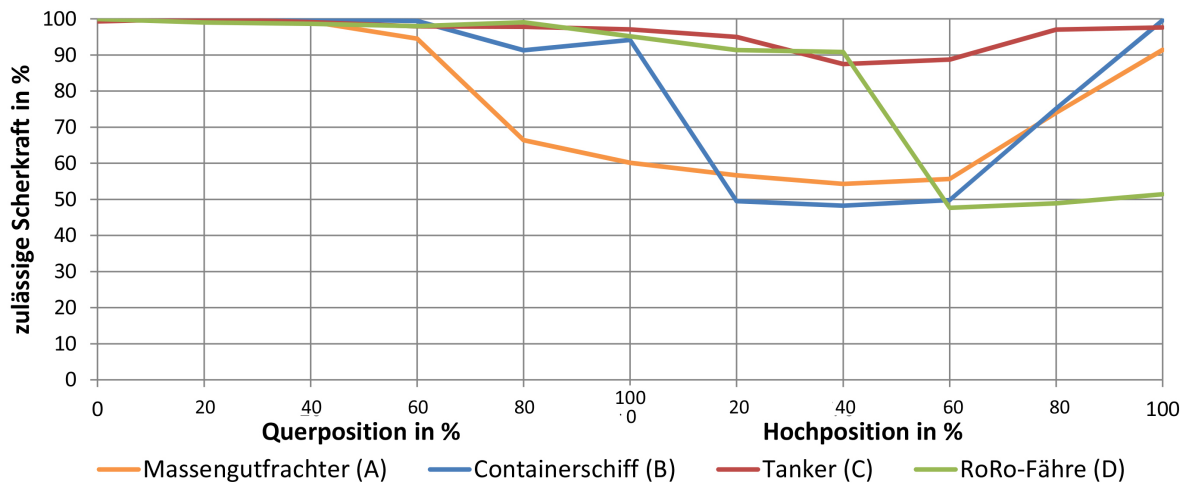


Abbildung 5.7: Abhängigkeit der zulässigen Scherkraft eines Querschnittes von der Position des Schadens an der Außenhaut

Wie in den vorherigen Betrachtungen lässt sich erkennen, dass Schäden an der Außenhaut bis zu einer Position innerhalb von 60 % der Schiffsbreite für alle betrachteten Schiffstypen keinen signifikanten Einfluss haben.

Zunächst wird das Strukturverhalten des Massengutfrachters untersucht. Bei einer Beschädigung des Hoppertanks reduziert sich die zulässige Scherkraft auf 60 % im Vergleich zum unbeschädigten Fall. Für Beschädigungen im unteren und mittleren Bereich der Schiffsseite ergeben sich ähnliche Werte. Dabei ist zu beachten, dass die Schäden an nur einer Schiffsseite eingebracht werden und in Folge dessen die zulässigen Scherkräfte des gesamten Querschnittes auf bis zu 55 % reduziert werden. Dieser Effekt ist darauf zurückzuführen, dass die maximalen Schubspannungen nicht mehr in den inneren und äußeren Seitenwänden auf beiden Schiffsseiten erreicht wird, sondern nur noch in der inneren Wand auf der Schiffsseite mit Beschädigung. Auf der unbeschädigten Schiffsseite treten in den beiden Seitenwänden lediglich 50 % der maximal zulässigen Schubspannungen auf. In Abbildung 5.8 ist dieser Vergleich dargestellt.

Schäden die oben an den Schiffsseiten auftreten haben wiederum einen geringen Einfluss auf die Scherbelastbarkeit. Bei einer punktuellen Unterbrechung des Kastenprofils im Wingtank an der obersten Seitenposition können immer noch 90 % der Scherkräfte vom unbeschädigten Fall aufgenommen werden.

Der Abgleich dieser Beobachtungen mit dem Schubspannungsverlauf für den unbeschädigten Fall in Abbildung 5.8 (links) bestätigt der zuvor getroffenen Aussage, dass der Einfluss eines Schadens umso größer ist, je größer die Schubspannung an dieser Position im unbeschädigten Querschnitt ist.

Der Spant des Containerschiffes zeigt ein ähnliches Verhalten wie der Spant des Mas-

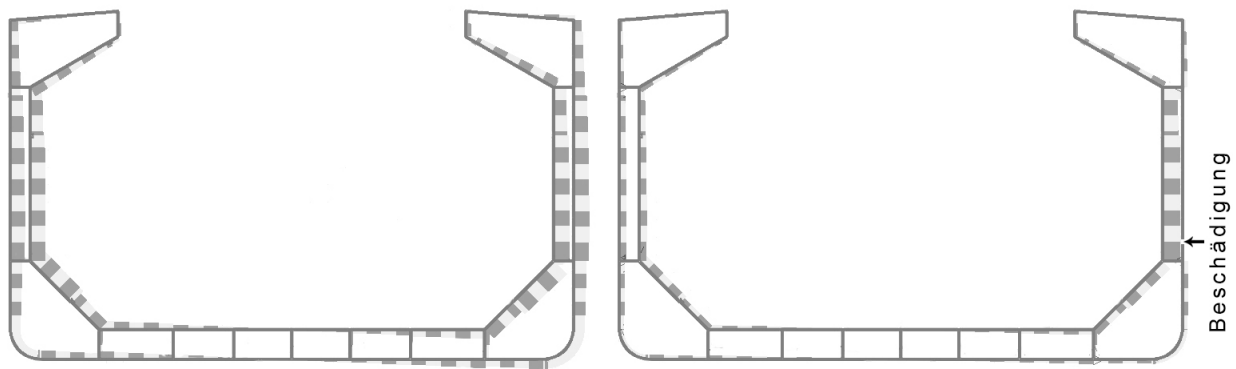


Abbildung 5.8: Schubspannungsverläufe im Querschnitt eines Massengutfrachters im unbeschädigten Fall und mit punktueller Beschädigung im unteren Seitenbereich (Berechnungen mit *MARS2000*)

sengutfrachters. Der einzige signifikante Unterschied ist, dass bei Bodenbeschädigungen bis in die Kimm über 90 % der zulässigen Scherkraft aufgenommen werden können. Für Beschädigungen an den Schiffsseiten reduziert sich die zulässige Scherkraft wiederum auf circa 50 % im Vergleich zum unbeschädigten Fall.

Der verzögerte Abfall der Kurve tritt auf, da eine Beschädigung des Bodens bis hin zur Kimm keinen geschlossenen Kastenquerschnitt öffnet, der in den Schiffsseiten liegt. Dadurch kann die unbeschädigte doppelwandige Seitenstruktur die gleichen Schubspannungen aufnehmen, wenn die Bodenstruktur weit außen beschädigt ist. In Abbildung 5.2 sind die konstruktiven Unterschiede der beiden Querschnitte zu sehen.

Für den betrachteten Öltanker reduziert sich die zulässige Scherkraft unabhängig von der Schadensposition kaum, da das Längsschott in der Schiffsmitte die Lasten sowohl im beschädigten, als auch im unbeschädigten Fall aufnimmt.

Auch für den Querschnitt der RoRo-Fähre reduziert sich die zulässige Scherkraft um weniger als 10 % solange die Beschädigung im Bodenbereich, oder unter 40 % der Seitenhöhe liegt. Für diese Schadenspositionen bleibt der geschlossene Kastenquerschnitt über dem Zwischendeck unbeschädigt, wie in Abbildung 5.2 zu sehen ist. Da der untere Kastenquerschnitt, der aus Zwischendeck und Doppelboden gebildet wird, doppelwandig ist, bleibt dieser bei Beschädigungen geschlossen, sodass die zulässige Scherkraft kaum reduziert wird.

Schäden, die über 40 % der Seitenhöhe liegen und den oberen Kastenquerschnitt unterbrechen, reduzieren die zulässige Scherkraft auf circa 50 %, wie bei den Querschnitten des Massengutschiffes und des Tankers. Bei der RoRo-Fähre steigt jedoch die zulässige Scherkraft nicht an, wenn die Beschädigung näher zum Festigkeitsdeck verschoben wird.

Dieses Verhalten unterscheidet sich stark von den anderen betrachteten Querschnitten.

Jedoch ist anzumerken, dass sich nur Querschnitte derartig verhalten, wenn großräumige Kastenprofile auftreten und somit durchgehende Decks vorliegen. Folglich werden diese beschädigten Querschnitte nicht zweigeteilt und können immer mit *MARS2000* berechnet werden. Eine weitere Untersuchung von Querschnitten mit großräumigen Kastenprofilen ist deshalb nicht notwendig.

5.4.3 Folgen für die Untersuchung der Schadensstelle

Aus den vorangegangenen Untersuchungen wird nun abgeleitet für welche Schadensszenarios es besonders wichtig ist die Schäden exakt zu modellieren und für welche Schäden eine großzügige Abschätzung ausreicht.

Viele Werte, die bei der Anwendung des hier entwickelten Verfahrens eingegeben werden müssen, lassen sich exakt bestimmen. Dazu gehören die Abmaße und Schwimmage des Schiffes, sowie die Massenverteilung und die Strukturelemente des Querschnittes.

Die größte Unsicherheit bei der Eingabe tritt bei der Modellierung des Schadens auf. Besonders bei Beschädigungen unter der Wasserlinie sind optische Untersuchungen des Rumpfes bei Seegang, oder Grundberührungen nicht möglich, sodass eine schnelle Risikoabschätzung für die Situation vor Ort erschwert wird. Aber auch bei günstigen Wetterbedingungen und ausreichender Sicherheit vor dem Abrutschen des Wracks von der Grundberührungsposition können schlechte Sichtverhältnisse auftreten, die zu einem Restrisiko und Ungenauigkeiten bei der Ermittlung des Schadensausmaßes führen.

Aus den vorherigen Betrachtungen kann geschlossen werden, dass der Einfluss, den eine Beschädigung auf die zulässige Scherkraft hat um so größer ist, je größer die Schubspannungen an der Schadensposition im unbeschädigten Fall ist. Da Beschädigungen an der Außenhaut in der Bodenstruktur des Schiffes nur einen geringen Einfluss auf die zulässige Scherkraft haben, ist es in diesen Fällen nicht notwendig das Ausmaß der Beschädigungen im Detail zu untersuchen. Der Schaden kann somit großflächig konservativ abgeschätzt werden ohne die zulässige Scherkraft signifikant zu unterschätzen. Beschädigungen im Kimmbereich, beziehungsweise an den Hoppertanks und an den Schiffsseiten hingegen beeinflussen das Endergebnis signifikant und sollten deshalb bei einer Havarie so genau wie möglich vermessen werden.

5.5 Ausarbeitung der Methodik für die Berechnungen

Nachdem der Schaden vermessen ist, werden die Festigkeitsberechnungen durchgeführt. Dafür wird in diesem Abschnitt eine Vorgehensweise entwickelt, mit der es mög-

lich ist die zulässige Scherkraft eines Querschnittes für Schadensfälle zu ermitteln, die mit dem im Abschnitt 4.4.3 beschriebenen Vorgehen nicht berechnet werden können. Dafür werden die Schubspannungsverläufe in Querschnitten betrachtet, die eine Beschädigung erlitten haben und mit *MARS2000* berechnet werden können. Es werden zwei Vorgehensweisen entwickelt, die abhängig von der Schadensposition angewendet werden.

Abbildung 5.9 zeigt den Spannungsverlauf eines beschädigten Massengutfrachters mit einer Beschädigung im Doppelboden. Es lässt sich erkennen, dass in der verbleibenden Bodenstruktur Spannungen auftreten, die wesentlich geringer sind als in den Schiffsseiten.

Der Anteil der grau gestreiften Fläche von den verbleibenden Teilen der Doppelbodenstruktur über die Breite des beschädigten Bereiches beträgt lediglich 3,5%. Das entspricht somit auch dem Anteil der zulässigen Scherkraft, die von diesem Bereich des Doppelbodens aufgenommen wird.

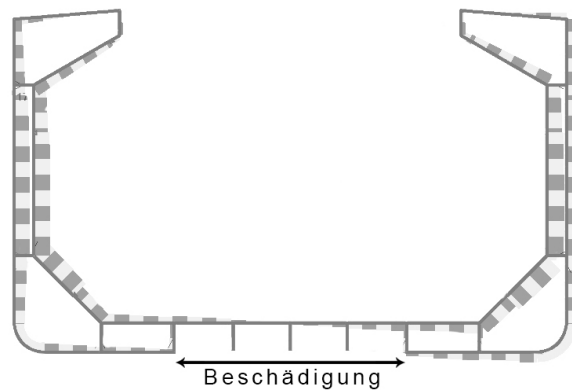


Abbildung 5.9: Schubspannungsverlauf im Querschnitt eines Massengutfrachters mit Beschädigung der Außenhaut mittschiffs (Berechnungen mit *MARS2000*)

Das Entfernen der gesamten Doppelbodenstruktur mittschiffs führt dazu, dass zwei getrennte Abschnitte in der Querschnittsansicht auftreten und somit keine Berechnungen mit *MARS2000* durchgeführt werden können.

Durch das Entfernen der Doppelbodenelemente mittschiffs wird die Nullstelle der Schubspannungsverläufe nicht mehr wie in Abbildung 5.9 mittschiffs liegen, sondern an den Innenseiten der verbleibenden Bodenstruktur. Dieses System lässt sich vereinfacht modellieren, indem die Schiffsseiten zusammengerückt werden, wie in Abbildung 5.10 dargestellt.

Die Berechnungen ergeben für den in Abbildung 5.9 dargestellten Fall mit Verlust der Außenhautplatten eine zulässige Scherkraft von 94,2 MN und für den in Abbildung 5.10 skizzierten Fall des kompletten Doppelbodenkollapses 93,5 MN. Die Reduktion durch den Wegfall der inneren Doppelbodenelemente beträgt somit lediglich 0,7%. Auffällig

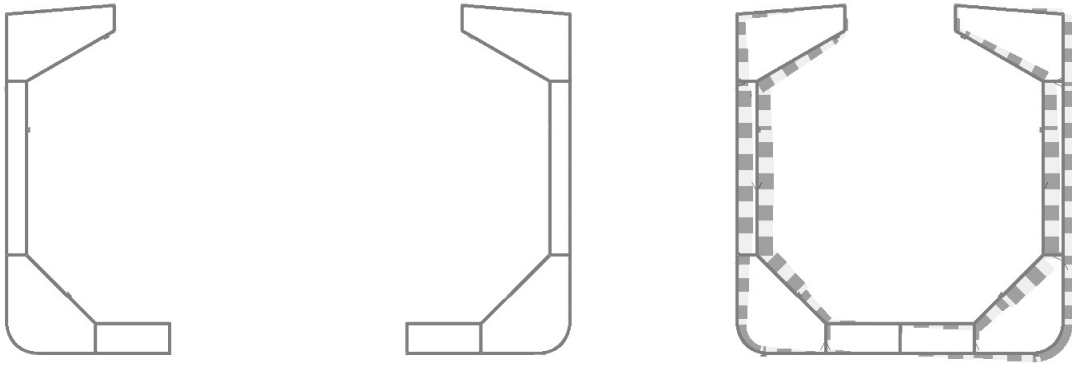


Abbildung 5.10: Schubspannungsverlauf im Querschnitt eines Massengutfrachters mit Beschädigung des Doppelbodens mittschiffs (Berechnungen mit *MARS2000*)

ist, dass dieser Wert geringer ist, als der oben erwähnte Anteil, den die innere Doppelbodenstruktur aufnimmt mit 3,5%. Das bedeutet, dass sich die Spannungen im Fall des kompletten Doppelbodenkollapses so umverlagern, dass sie im Durchschnitt größere Werte annehmen.

Letztendlich zeigt sich, dass der Einfluss der Schäden im Bodenbereich eines Schiffes kaum Einfluss auf die maximal zulässige Scherkraft hat. Auch bei den anderen betrachteten Schiffstypen ohne Längsschott treten in keinem Schadensfall mit Beschädigung im Bodenbereich Schubspannungen auf, die einen größeren Beitrag zur zulässigen Scherkraft leisten.

Auf Grund dieses Zusammenhanges kann davon ausgegangen werden, dass auch Beschädigungen im Bodenbereich, die nicht exakt in der Schiffsmitte liegen, und die resultierenden Schubspannungsverläufe somit nicht symmetrisch sind, keinen relevanten Einfluss auf die resultierende Scherkraft haben.

Solange bei einer Bodenbeschädigung der Tankquerschnitt in der Kimm des Rumpfes, also Hoppertank oder Ähnliches, nicht beschädigt ist kann der Schiffsquerschnitt modelliert werden, indem die Schiffsseiten zusammengerückt werden.

Für Bodenbeschädigungen ist es hingegen weitaus kritischer die globalen Biegemomente zu untersuchen, da die zulässigen Momente stark von den Bauteilen im Boden abhängen. Diese Berechnungen können für alle Schadensfälle mit dem standardmäßigen Vorgehen aus Abschnitt 4.4.3 durchgeführt werden, da zulässige Biegemomente auch für geteilte Querschnitte mit *MARS2000* berechnet werden können.

Für Querschnitte mit Schäden an der Schiffseite ist ein anderes Vorgehen notwendig. Wie in Abbildung 5.5 zu sehen, treten bei einer Beschädigung der Außenhaut einer doppelwandigen Schiffseite die Maximalspannungen in der verbleibenden Seitenstruktur nahe der Schadensstelle auf. Ein vollständiger Kollaps des Seitenbereiches führt wieder zu einer Auftrennung des Querschnittes in zwei Abschnitte, die nicht zusammen mit

der Theorie über Schubspannungen in dünnwandigen Querschnitten berechnet werden kann.

Die Möglichkeit zulässige Scherkräfte von zwei Querschnitten in separaten Rechnungen zu bestimmen lässt sich nicht mit der zu Grunde liegenden Festigkeitshypothese vereinbaren, dass in einem berechneten Querschnitt maximal $120 \frac{N}{mm^2}$ erreicht werden. Ein Aufaddieren der zulässigen Scherkräfte der Einzelquerschnitte würde implizieren, dass die Maximalspannungen in beiden Teilquerschnitten gleichzeitig erreicht werden.

Da diese Annahme nicht zutreffend ist, wird empfohlen, den konservativeren Ansatz zu wählen und den Beitrag des oberen Seitenbereiches, also des Wingtanks, zur Gesamtfestigkeit zu vernachlässigen. Dieser Ansatz ist in Abbildung 5.11 dargestellt.

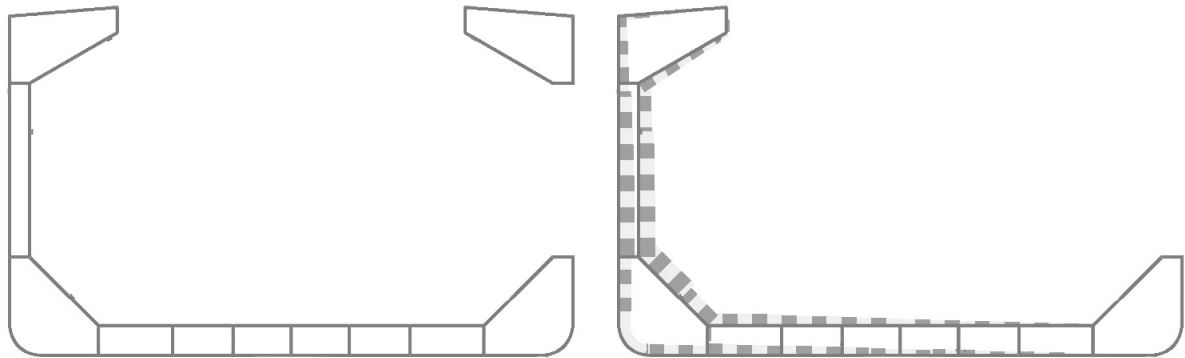


Abbildung 5.11: Schubspannungsverlauf im Querschnitt eines Massengutfrachters mit Beschädigung der doppelten Wandstruktur (Berechnungen mit *MARS-2000*)

Durch das komplette Wegfallen der Seitenstruktur reduziert sich die zulässige Scherkraft von 52,3 MN im Fall des Außenhautkollapses aus Abbildung 5.5 auf 42,7 MN. Die Differenz aus diesen beiden Schadensfällen ist verhältnismäßig klein, da im Falle des kompletten Verlustes der Schiffsseite die Schubspannungen in den beiden verbleibenden senkrechten Seitenelementen den maximalen Materialkennwert erreichen und somit einen wesentlich größeren Anteil der Scherkraft aufnehmen als im Schadensszenario aus Abbildung 5.8, bei dem nur die Außenhaut beschädigt wurde.

Beschädigungen der gesamten Struktur im Kimmbereich können mit dem gleichen Vorgehen modelliert werden. Alle darüber liegenden Bereiche werden dabei aus dem Modell entfernt. Dieses Vorgehen vernachlässigt einen signifikanten Beitrag zur Gesamtfestigkeit durch die verbleibende Schiffsseite, ist jedoch die einzige Möglichkeit Berechnungen mit *MARS2000* durchzuführen, und gibt konservative Ergebnisse aus. Es kann in diesen Fällen dazu kommen, dass die zulässigen Kräfte stark unterschätzt werden.

5.6 Zusammenfassung der Methodik

Für alle Schiffstypen mit Schadensszenarios, die nicht dazu führen, dass zwei separate Abschnitte im Querschnitt entstehen, kann das Standardvorgehen aus Kapitel 4.4.3 angewendet werden.

Wenn ein Spant so beschädigt wird, dass zwei Teile entstehen, müssen für die Berechnung der zulässigen Scherkräfte gesonderte Modelle mit *MARS2000* erstellt werden. Die zulässigen vertikalen Biegemomente können für alle Schadensszenarios mit der standardmäßigen Vorgehensweise berechnet werden.

Für den Fall dass der Schiffsquerschnitt durch eine Beschädigung im Bodenbereich geteilt ist, der geschlossene Kastenquerschnitt im Kimmbereich jedoch nicht beschädigt wird, können die beiden Seiten des Schiffes um die Breite des Schadens zusammengedrückt werden, sodass ein unterbrechungsfreier Schiffsquerschnitt entsteht, wie in Abbildung 5.10 dargestellt ist. Mit diesem Querschnitt können daraufhin die Berechnungen der zulässigen Scherkraft durchgeführt werden.

Im Falle eines Schadens im Kimmbereich, oder an einer der Seiten, bei dem der Schiffsquerschnitt geteilt wird, müssen im Modell sowohl die beschädigten Bereiche entfernt werden, als auch die intakten Querschnitte, die sich daran anschließen, wie in Abbildung 5.11 skizziert. Da diese Vorgehensweise zum Teil stark konservative Ergebnisse liefert, empfiehlt sich bei Fällen, bei denen die zu erwartenden Belastungen größer sind als die maximal zulässigen Lasten eine Analyse mit *Finite Elemente Methoden*.

6 Untersuchung eines realen Schadensfalles

Bei dem folgenden Szenario handelt es sich um einen von *brand Marine Consultants* zur Verfügung gestellten Schadensfall. Auf eine konkrete Benennung des Schiffes und des Ortes wird aus datenschutzrechtlichen Gründen verzichtet. Es wurde dabei ein Schadensszenario gewählt, welches den Sonderfall der Berechnungen mit geteiltem Querschnitt beinhaltet.

Mit der Durchführung der Berechnungen soll die praktische Anwendbarkeit des hier entwickelten Verfahrens überprüft werden. Mit der Durchführung der Berechnungen soll überprüft werden, in wie weit das hier entwickelten Verfahrens Mängel bei der praktischen Anwendung aufweist.

6.1 Beschreibung der Ausgangssituation

Im vorliegenden Fall handelt es sich um einen LPG-Tanker, der Backbord auf Höhe des Maschinenraums einen Kollisionsschaden erlitten hat. Durch kleinere Lecks unter der Wasserlinie drang Wasser in den Maschinenraum ein. Diese konnten noch vor Ort geschlossen werden, sodass der Maschinenraum anschließend leer gepumpt werden konnte und ein stabiler Schwimmzustand erreicht wurde. Risse und Öffnungen über der Wasserlinie wurden ebenfalls provisorisch verschlossen.

Im vorliegenden Zustand liefert ein an Deck gestellter Generator Strom für alle notwendigen Einrichtungen, wie Beleuchtung, Bilgepumpe und die Feuerlöschpumpe.

In Tabelle 6.1 sind die wichtigsten Daten des Schiffes zusammengefasst, die zur Berechnung notwendig sind.

Schiffstyp	LPG-Tanker
L_{pp}	115 m
B	19 m
T	7,4 m
∇	13.170 t
z_F	9,8 m
Maschinentyp	2-Takt
P_{MCR}	4.900 kW

Tabelle 6.1: Hauptdaten des Schiffes

Da es nahe der Unfallstelle keine Reparaturwerft gibt, die die notwendigen Arbeiten durchführen kann, soll der Tanker über Atlantik und Mittelmeer geschleppt werden. Die

Seegangs- und Wetterprognosen für diese Route sind für das Zeitfenster des Schleppvorganges günstig.

6.2 Berechnung der auftretenden Lastverläufe

Die Längsfestigkeitsberechnungen werden für drei Zustände durchgeführt.

Ladefall 1 entspricht der Situation direkt nach der Kollision. Der Maschinenraum ist geflutet und die Laderäume sind gefüllt.

In *Ladefall 2* wurde das LPG bereits an ein anderes Schiff übergeben und der Maschinenraum provisorisch abgedichtet und teilweise geleert.

Für *Ladefall 3* ist das Schiff für das Schleppen durch Ballast hecklastig getrimmt und der Maschinenraum vollständig leer gepumpt.

Um die Gewichtsverteilung so exakt wie möglich zu modellieren, werden die Beladungszustände mit den jeweiligen Tankfüllständen in das Programm eingegeben. Auch das Gewicht der Aufbauten und das aus der Leistung abgeschätzte Hauptmaschinengewicht werden eingepflegt.

Abbildung 6.1 zeigt die Verläufe der angreifenden Massen- und Auftriebskräfte, sowie die resultierende vertikale Kraftdifferenz über der Schiffslänge für *Ladefall 2*. Dieser Ladefall wird hier beispielhaft dargestellt, da hierbei die größten Scherkräfte und Biegemomente an der Schadensstelle erzeugt werden. Durch den gefluteten Maschinenraum tritt hierbei ein stark hecklastiger Trimm auf, der den Auftriebsschwerpunkt in Richtung Hinterschiff verschiebt.

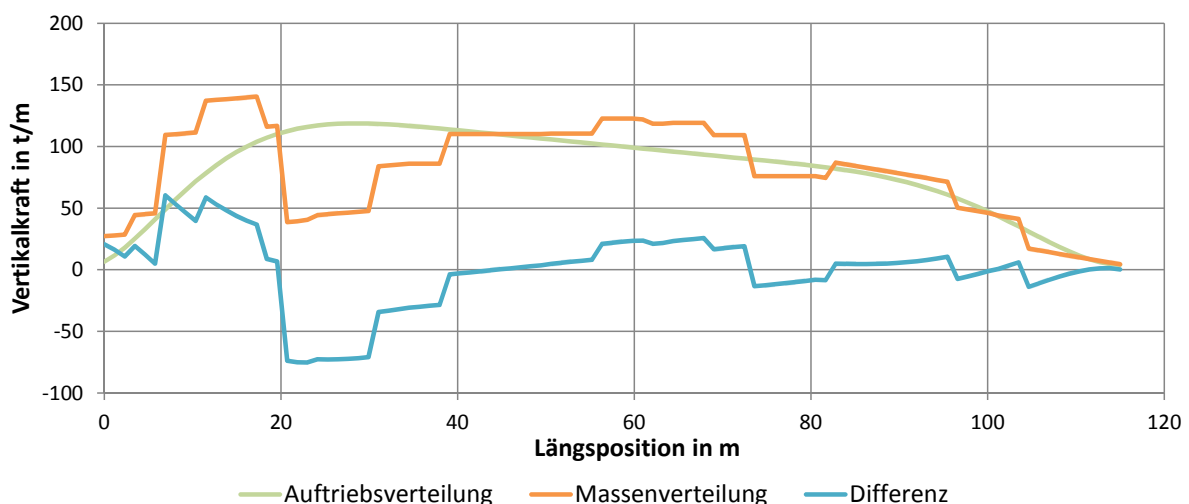


Abbildung 6.1: angreifende Vertikalkräfte am Beispielschiff mit *Ladefall 2*

Die Querkraftverläufe der beiden anderen Ladefälle führen dazu, dass an unterschiedlichen Längspositionen Extrema der Scherkräfte und Momente auftreten, die ebenfalls

von der Struktur aufgenommen werden müssen. Die zugehörigen Verteilungen der Querkräfte sind hier nicht weiter von Belang, jedoch der Vollständigkeit halber im Anhang in den Abbildungen 8.5 und 8.10 dargestellt.

In den Abbildungen 6.2 und 6.3 sind die zugehörigen Verläufe für die globalen vertikalen Scherkräfte und Biegemomente dargestellt. Die Graphen der Summen aus Ruhewasser- und Seegangslasten beinhalten die Sicherheitsfaktoren der IACS.

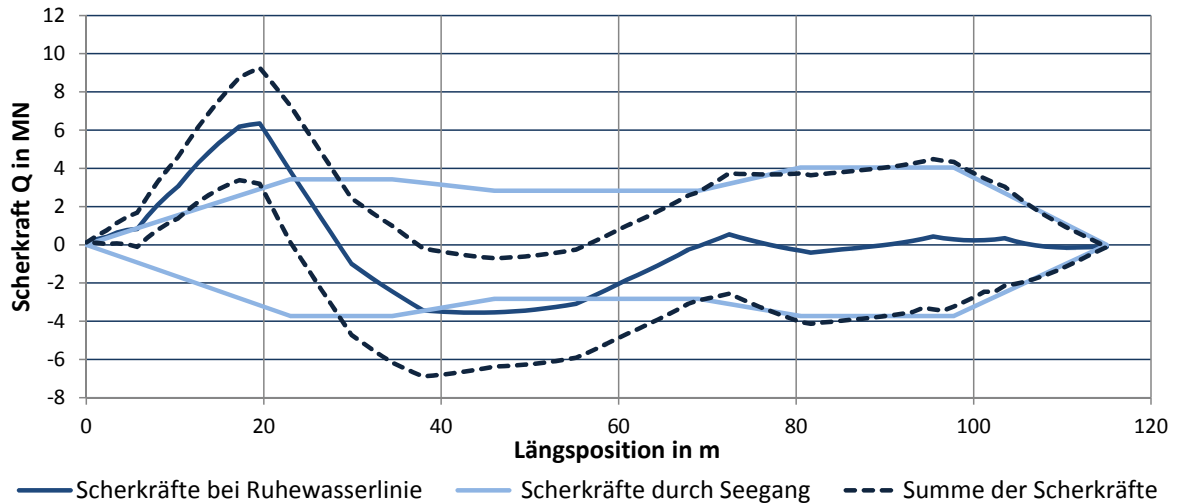


Abbildung 6.2: Verteilung der auftretenden vertikalen Scherkräfte am Beispielschiff mit *Ladefall 2* mit Seeganglasten für einen Tag

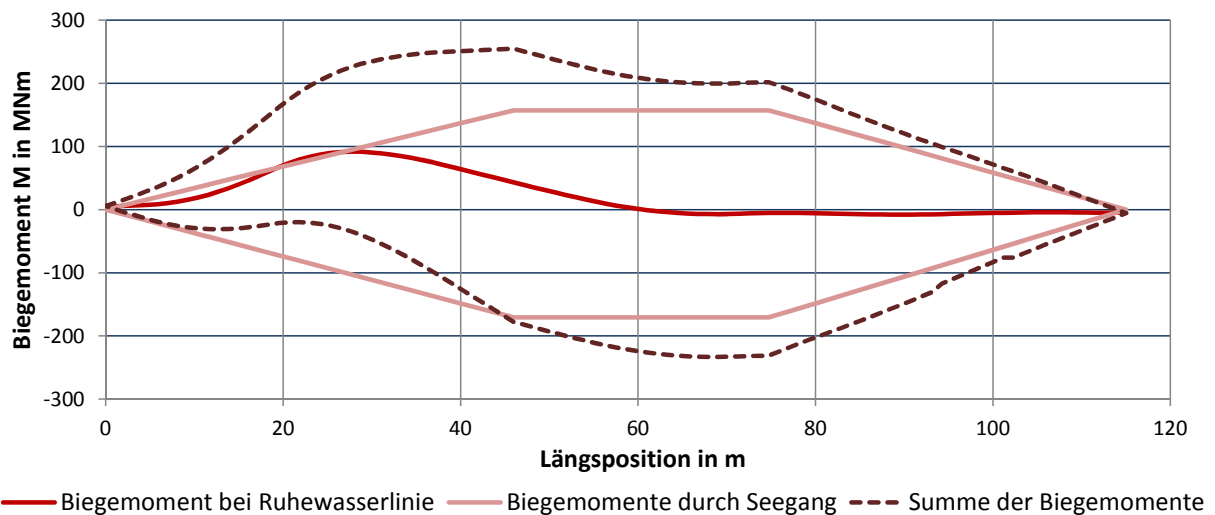


Abbildung 6.3: Verteilung der auftretenden vertikalen Biegemomente am Beispielschiff mit *Ladefall 2* mit Seeganglasten für einen Tag

Es ist zu erkennen, dass die Belastungen im hinteren Viertel des Schiffes ihr globales Maximum erreichen. Das ist auf den stark ausgeprägter Sprung in der Kurve der

Querkraftdifferenz bei der Längsposition 20 m zurückzuführen. Dieser wird durch der teilgeflutete Maschinenraum, der bis zur Längsposition 20 m reicht, in Kombination mit den leeren LPG-Tanks verursacht.

Die Seegangbelastungen werden dabei mit einer Wiederholungsrate von einem Tag angenommen. Da die Überführung des Schiffes direkt zur Reparaturwerft erfolgt, kann diese Annahme, auch wenn die Reise mehrere Tage umfasst, vertreten werden, solange eine genügende Sicherheit für ruhige Wetterverhältnisse eingehalten wird. Ein solches Zeitfenster, in dem die Wetterlage stabil und ruhig ist, wird für einen Schleppverband ohnehin benötigt. Für unvorhergesehene Zwischenfälle und gefährliche Wetterlagen müssen im Vorhinein Standorte auf der Route festgelegt werden, an denen der Schleppverband sicher abwarten, oder festmachen kann.

Um zu bestimmen wie groß der Einfluss des Zeitraumes ist, für den die Seegangslasten abgeschätzt werden, sind die Lastverläufe für *Ladefall 2* mit Seegangslasten, wie sie nach IACS für einen Zeitraum von 20 Jahren angenommen werden müssen, in Abbildung 6.4 und 6.5 dargestellt.

Die weiteren Verteilungen der Belastungen für *Ladefall 1* und *3* mit Seegangbelastungen für einen Tag, beziehungsweise 20 Jahre können im Anhang in den Abbildungen 8.6 bis 8.14 eingesehen werden.

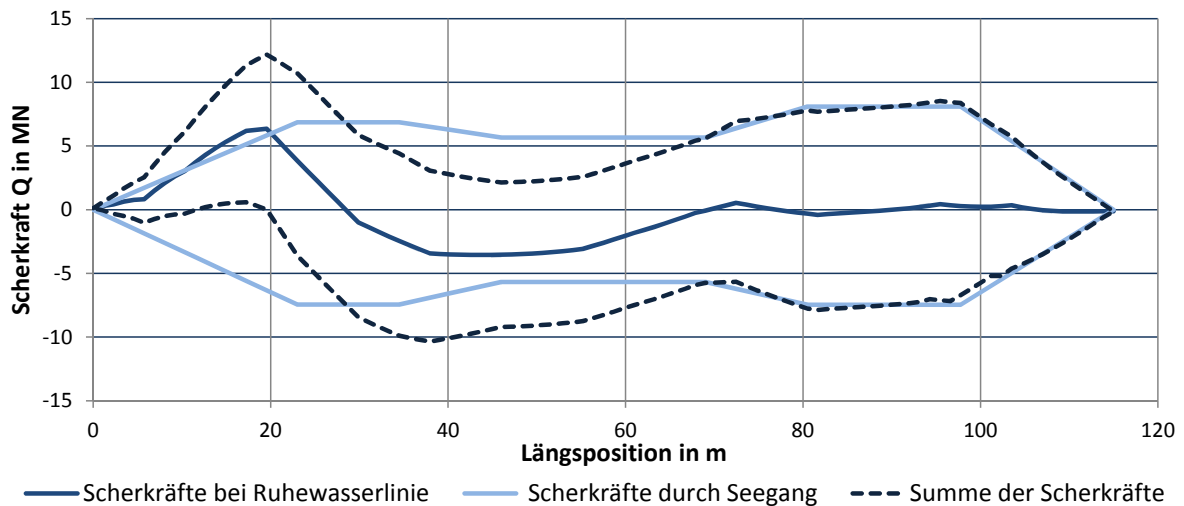


Abbildung 6.4: Verteilung der auftretenden vertikalen Scherkräfte am Beispielschiff mit *Ladefall 2* mit Seegangslasten für 20 Jahre

Es zeigt sich, dass die Seegangslasten bei der Annahme von einem Zeitraum von 20 Jahren doppelt so hoch sind, wie bei der einer Wiederholungsrate von einem Tag. Dieser Zusammenhang ergibt sich aus dem Wahrscheinlichkeitsfaktor f_p , der in Abschnitt 4.3.2.6 näher erläutert wird.

Es ist dabei außerdem zu sehen, dass der Anteil der Seegangslasten schon bei einer

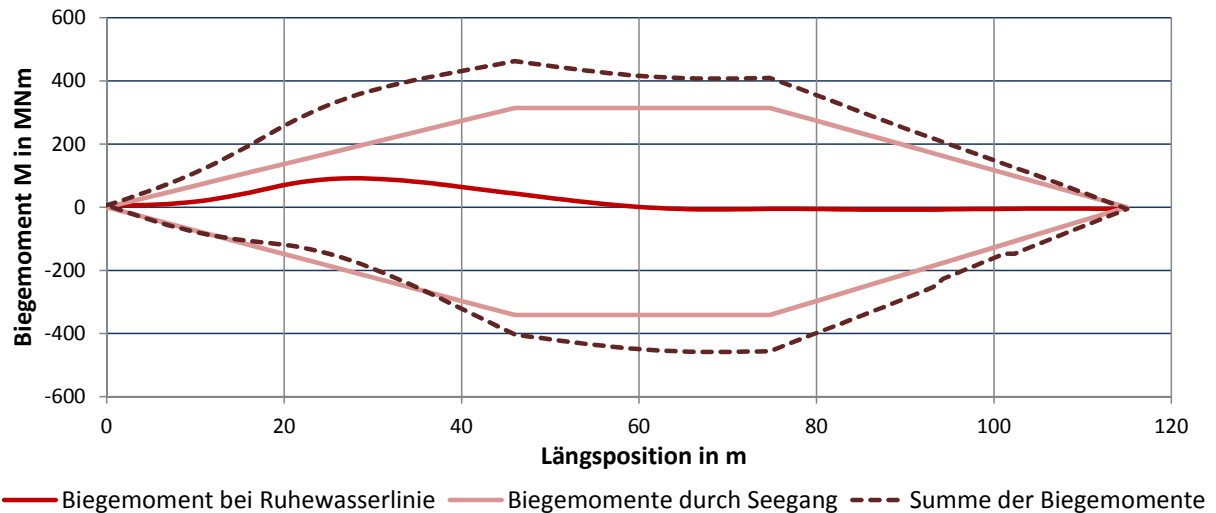


Abbildung 6.5: Verteilung der auftretenden vertikalen Biegemomente am Beispielschiff mit *Ladefall 2* mit Seeganglasten für 20 Jahre

Wiederholungsrate von einem Tag für den Großteil der Längspositionen größer ist, als der Einfluss durch die Kräfte bei Ruhewasser.

Durch die Annahme von Seeganglasten von 20 Jahren verstärkt sich dieser Effekt. Während der Beitrag der Ruhewasserlasten auf die Scherkraftverteilung für alle Ladefälle noch relevant ist, so ist der Einfluss auf die Biegemomente nur noch sehr gering. Zusammenfassend lässt sich daraus ableiten, dass die Wahl des Zeitraumes der Seeganglasten einen signifikanten Einfluss auf das Endergebnis der Berechnungen hat und wichtiger sein kann als eine detaillierte Modellierung der Gewichtsverteilung.

Nach dem Ermitteln der Lastverläufe werden die Längspositionen bestimmt, an denen die Festigkeit des Rumpfes untersucht werden muss.

Dazu gehört die eigentliche Längsposition der Beschädigung. Die größten Verformungen treten circa 16 m vor dem hinteren Lot auf. Ein Vergleich der Belastungskurven an dieser Längsposition zeigt, dass die größten Belastungen an dieser Stelle bei *Ladefall 2* zu erwarten sind.

Wie in den Abbildungen 6.2, 8.6 und 8.11 zu sehen ist, liegt das globale Maximum der Scherkraft aller Verläufe mit *Ladefall 2* bei 20 m und das globale Minimum mit *Ladefall 3* bei 38 m. Die weiteren Extrema der Scherkraftverläufe können vernachlässigt werden, da diese wesentlich kleiner sind als an den zu untersuchenden Positionen.

Das globale Maximum des Biegemomentenverlaufes wird mit *Ladefall 1* bei 46 m erreicht, das globale Minimum mit *Ladefall 3* bei 63 m. Auch hier sind die weiteren auftretenden Extrema nicht kritisch für die Längsfestigkeit, da an den anderen Positionen und Ladefällen nur Werte erreicht werden, die um ein Vielfaches kleiner sind. Die exakten Ausgabewerte der Verläufe an den jeweiligen Positionen sind in Tabelle 6.2 angegeben.

Längsposition	Ladefall	Q_{pos} in MN	Q_{neg} in MN	M_h in MNm	M_s in MNm
16 m	2	8,12	3,14	122,42	-28,14
20 m	2	9,27	3,19	162,62	-21,35
38 m	3	-0,73	-7,20	176,12	-167,47
46 m	1	0,39	-5,36	251,75	-154,39
63 m	3	2,72	-2,80	146,06	-270,41

Tabelle 6.2: zu erwartende Belastungen des Beispielschiffes

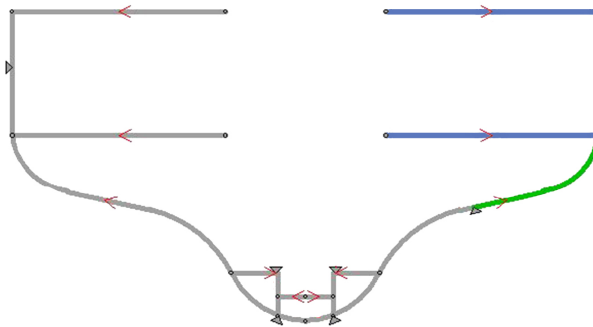
An der Schadensstelle bei 16 m werden dafür alle anzunehmenden Lasten mit den zulässigen Belastungen abgeglichen. Für die anderen Positionen sind nur die Werte relevant, die ein Extremum erreichen. Alle weiteren Werte der Tabelle müssen nicht näher betrachtet werden und sind ausgegraut dargestellt.

6.3 Berechnung der zulässigen Belastungen

Für die zuvor ermittelten Längspositionen, an denen die Festigkeit untersucht werden soll, werden nun die Spanten mit *MARS2000* modelliert und berechnet.

Für das vorliegende Schiff war es lediglich möglich die Konstruktionszeichnungen der Spanten an der Schadensstelle und eines regulären Spantes mittschiffs zu bekommen. Mit diesen Informationen können die Spanten an den Positionen 16 m, 38 m, 46 m und 63 m exakt beschrieben werden. Für den Spant 20 m vor dem hinteren Lot wird aus den Werten der nebenliegenden Spanten interpoliert.

Abbildung 6.6 zeigt einen Screenshot des Spantes an der Schadensstelle. Das Poopdeck des Schiffes ist nicht in das Modell eingepflegt, da es nur in den hinteren 17 % der Schiffslänge liegt und somit nicht zur globalen Längsfestigkeit beiträgt.

Abbildung 6.6: mit *MARS2000* modellierter Spant bei Längsposition 16 m

Im grün markierten Bereich sind Verformungen aufgetreten, die so stark sind, dass diese Bauteile als nicht tragend angenommen werden. Im Modell wird das berücksichtigt, indem die dort liegenden Elemente entfernt werden. Mit dem sich ergebenden Querschnitt können die Berechnungen der zulässigen Biegemomente durchgeführt werden.

Da der Schiffsquerschnitt durch das Entfernen der grün markierten Außenhaut in mehrere Teile aufgeteilt wird, können die Berechnungen der zulässigen Scherkraft mit *MARS2000* nicht ohne Weiteres durchgeführt werden. Für diese Berechnungen werden die blau markierten Decks aus dem Modell entfernt.

Durch das definieren der *Compartements* unterhalb der Maschine als Öltanks wird von *MARS2000* der zugehörige Korrosionsabzug der Plattendicke durchgeführt. Die weiteren Räume werden als *Dry Spaces* beschrieben.

In Abbildung 6.7 ist das Modell des Hauptspantes dargestellt, wie es für die Längspositionen 38 m, 46 m und 63 m verwendet wird. Da hier keine Schäden vorliegen, muss das Modell nicht weiter angepasst werden. Auch hier werden die *Compartements* entsprechend dem Tankplan definiert, um Korrosionsabzüge zu berücksichtigen.

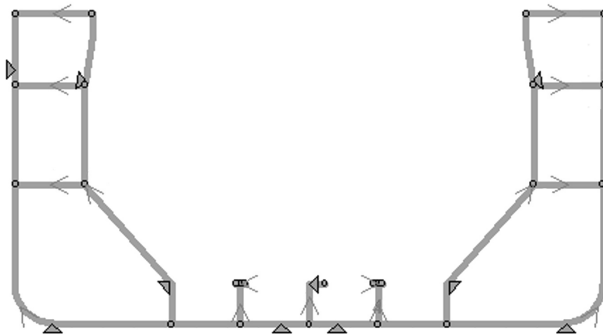


Abbildung 6.7: mit *MARS2000* modellierter Spant für die Längspositionen 38 m, 46 m und 63 m

Für die Ermittlung der Werte für den Spant bei 20 m wird angenommen, dass der hinterste Spant, der zum parallelen Mittelschiff gehört an der hinteren Schulter, also bei circa 30 m, liegt. Daraufhin wird zwischen dem Spant bei 16 m im unbeschädigten Zustand und dem Spant an der hinteren Schulter linear interpoliert. Tabelle 6.3 zeigt die Ergebnisse der Berechnungen mit *MARS2000*, die anschließend mit den auftretenden Lasten an den jeweiligen Positionen abgeglichen werden.

Spantposition	Q_{zul} in MN	$M_{h,zul}$ in MNm	$M_{s,zul}$ in MNm
16 m (beschädigt)	±11,83	433,93	-411,51
20 m (unbeschädigt)	±27,66	618,18	-616,74
38 m, 46 m, 63 m (unbeschädigt)	±42,02	921,19	-916,16

Tabelle 6.3: zulässige Belastungen des Beispielschiffes

6.4 Bewertung der Festigkeit

Beim Vergleich der zu erwartenden Belastungen mit den aufgeschlagenen Sicherheitsfaktoren der *IACS* aus Tabelle 6.2 mit den maximal zulässigen Lasten aus Tabelle 6.3 zeigt sich, dass in keinem Beladungszustand eine Überlast zu erwarten ist. Der kritischste Zustand ergibt sich direkt an der Schadensstelle mit Beladungszustand 2. Dort sind die Scherbelastungen mit 8,12 MN nahe an der zulässigen Last von 11,83 MN. Auch für die Annahme von Seegangslasten in einem Zeitbereich von 20 Jahren ergibt sich lediglich eine Scherkraft von 10,5 MN, was immer noch unterhalb der maximal ertragbaren Last liegt. Dies ist jedoch ein rein theoretischer Fall, da das Schleppen des Schiffes nur mit Beladungszustand 3 erfolgt. Für diesen Zustand sind auch mit einem Zeitraum der Seegangslasten von 20 Jahren keine kritischen Lasten zu erwarten.

Mit Hinblick auf die globale Festigkeit der Schiffsstruktur ist im Verlauf der Havarie kein kritischer Zustand eingetreten und der Tanker kann mit der Gewichtsverteilung von Ladefall 3 sicher abgeschleppt werden ohne dass weitere konstruktive Maßnahmen ergriffen werden müssen.

7 Auswertung

7.1 Zusammenfassung und Bewertung des Verfahrens

Die Anwendung der hier entwickelten Methodik an einem beispielhaften Szenario hat gezeigt, dass die notwendigen Funktionen vorhanden sind, um auf Basis der Informationen, die bei einem Schiffsunglück zeitnah verfügbar sind, eine ausreichend exakte Bewertung der Situation zu ermöglichen. Dabei wurde bei der Entwicklung des Verfahrens darauf geachtet, dass die zu Grunde liegenden Annahmen durchgehend konservativ sind.

Die Untersuchung des Beispiels hat weiterhin gezeigt, dass die Durchführung der Berechnungen zur Bewertung einer Situation innerhalb weniger Stunden möglich ist. Das entspricht den zu Beginn dieser Arbeit ermittelten Anforderungen an den Arbeitsaufwand.

Auch die Möglichkeit Werte, wie beispielsweise die Lage des Verdrängungsschwerpunktes und die Gewichtsverteilung des Schiffes, für erste Prognosen abzuschätzen wurde in das Programm integriert. Es ist außerdem auch möglich Flutungs- und Ladefälle detailliert zu modellieren.

Für die Abschätzung der auftretenden Seegangslasten konnte ebenfalls eine zuverlässige und etablierte Methode gefunden werden. Dabei können die anzunehmende Lasten sowohl bestimmt werden, wie es von den Klassifikationsgesellschaften für weltweite Seefahrt gefordert wird, als auch für reduzierte Seegangsbeanspruchungen für die Verholung in eine Reparaturwerft.

Des weiteren wurde die Möglichkeit geschaffen den Lasteintrag durch Grundberührung abzuschätzen.

Auch die Sicherheitsfaktoren zur Berücksichtigung schwer zu berechnender Effekte wurden anwendungsfreundlich integriert.

Die zu Beginn dieser Arbeit beschriebenen Anforderungen an die Funktionen und die Anwendbarkeit des hier entwickelten Verfahrens werden somit vollständig erfüllt.

Dennoch gibt es Punkte, die die Anwendbarkeit des Verfahrens einschränken.

Während in Abschnitt 4.3.4 eine Fehlerbetrachtung der Methodik zur Bestimmung der auftretenden Belastungen durchgeführt wurde und in Abschnitt 4.4.4 eine kritische Auseinandersetzung mit der Methode zur Bestimmung der zulässigen Lasten erfolgte, wird im Folgenden darauf eingegangen was an dem gesamten Verfahren als kritisch zu sehen ist.

So wird eine Vielzahl von Effekten durch das Aufschlagen von Sicherheitsfaktoren berücksichtigt, die zu Ungenauigkeiten führen und Potential für exaktere Einschätzungen bieten. Auch wenn die detailliertere Berechnung ausgewählter Effekte die Genauigkeit und Zuverlässigkeit des Verfahrens verbessern würde, so ist jedoch darauf zu achten, dass die nachträglich aufzuschlagenden Sicherheitsfaktoren angepasst werden müssten. Eine solche Abschätzung von Einflüssen verschiedener Effekten erfordert umfangreiche Untersuchungen und eine Validierung im praktischen Gebrauch, um als zuverlässiges Werkzeug genutzt werden zu können.

Das in dieser Arbeit verwendete Vorgehen, bei dem alle zusätzlichen Effekte durch Sicherheitsfaktoren abgeschätzt werden, bietet den Vorteil, dass es eine zuverlässige Bewertungsbasis darstellt, da die Sicherheitsfaktoren bereits über mehrere Jahre angewendet werden, und es innerhalb kurzer Zeit durchführbar ist.

Des Weiteren hat sich bei den beispielhaften Betrachtungen gezeigt, dass die Seegangslasten einen großen Teil der anzunehmenden Lasten ausmachen. Da der Einfluss so signifikant ist, wäre es nützlich bei kritischen Fällen, bei denen die Seegangsbelastungen nach den Anforderungen der *IACS* dazu führen, dass die zulässigen Belastungen der Struktur überschritten werden, eine genauere Betrachtung durchzuführen. Dafür müssten Seegangsberechnungen für die geplante Route zur Werft mit den vorherrschenden Seegangsverhältnissen durchgeführt werden, für die das vorliegende Schiff in einer geeigneten Software modelliert werden muss.

Es empfiehlt sich die hier implementierte Abschätzung der Seegangslasten als erste Bewertungsgrundlage zu verwenden und bei Bedarf zu einem späteren Zeitpunkt eine exaktere Prognose vorzunehmen.

Ein Schwachpunkt der hier entwickelten Verfahrensweise tritt bei der Berechnung der zulässigen Scherkräfte für Querschnitte auf, die im Kimm-, oder unteren Seitenbereich so beschädigt wurden, dass zwei getrennte Teile vorliegen.

Durch die Teilung des Querschnittes können die Spannungen in einer der verbleibenden Seitenstrukturen nicht berücksichtigt werden, sodass mit stark konservativen Ergebnissen zu rechnen ist. Da sich mit *MARS2000* diese Berechnungen mit allen verbleibenden Bauteilen nicht durchführen lassen und auch vergleichbare Programme wie *Poseidon* vom *DNV GL* diese Berechnungen nicht durchführen können, muss für eine genauere Betrachtung dieser Problematik ein anderer Berechnungsansatz gewählt werden.

Diese stark konservativen Prognosen treten jedoch nur bei Schiffen ohne durchgehende Decks mit Beschädigungen im Kimm-, oder unteren Seitenbereich auf, die die komplette Struktur durchstoßen, also lediglich in einem Bruchteil aller Havarieszenarios. Beschädigungen im Bodenbereich haben keinen signifikanten Einfluss auf die zulässigen Scherkräfte. Somit ist dieser Sachverhalt als Einschränkung des hier entwickelten

Verfahrens für den zuvor genannten Sonderfall anzusehen. Die Berechnungen der zulässigen vertikalen Biegemomente sind von dieser Einschränkung nicht betroffen.

Für alle Berechnungen ist weiterhin darauf zu achten, dass nur die globale Längsfestigkeit des Schiffes untersucht wird. Insbesondere direkt an den Schadensstellen und an den Grundberührungspositionen können lokale Effekte auftreten, die nicht durch die verwendeten Sicherheitsfaktoren abgedeckt werden, und somit durch den progressiven Kollaps benachbarter Bauteile zu Schäden führen können, die auch die globale Festigkeit reduzieren können. Für detaillierte Untersuchungen lokaler Lastsituationen können Berechnungen mit *FEM* durchgeführt werden.

7.2 Fazit

Abschließend soll darauf hingewiesen werden, dass das hier entwickelte Verfahren als eine zuverlässige Methode angesehen werden kann, um die Längsfestigkeit eines havarierten Schiffes zu bewerten.

Sowohl die Berücksichtigung von Grundberührungskräften und Seegangslasten, als auch etablierte Sicherheitsfaktoren, konnten in das Verfahren implementiert werden. Auch das Modellieren von konkreten Beladungs- und Flutungszuständen wurde anwendungsfreundlich integriert.

Mit der hier entwickelten Verfahrensweise ist es somit möglich für die gängigsten Schadensfälle innerhalb weniger Stunden eine vertrauenswürdige Bewertungsgrundlage zu entwickeln, mit der es möglich ist zu entscheiden welche weiteren Schritte für den Abtransport des Schiffes eingeleitet werden müssen.

Das Verfahren kann somit die zu Beginn der Arbeit beschriebene Lücke zwischen exakteren *FEM*-Rechnungen, die zu aufwändig sind, und bisher verwendeten groben Festigkeitsabschätzungen füllen.

Für weitergehende Untersuchungen gibt es dennoch Punkte, die einen Mehrwert für das Verfahren darstellen würden.

Dazu gehört insbesondere die Prognose von den zu erwartenden Seegangslasten für bestimmte Routen und Wetterbedingungen auf den Schiffskörper und die Möglichkeit Scherkräfte für Schiffsquerschnitte zu bestimmen, die in zwei separate Teile geteilt wurden.

Literaturverzeichnis

- [1] Allianz Global Corporate and Specialty. *Safety and Shipping Review*. 2016.
- [2] <http://www.brand-marine.com/>. 20.06.2017.
- [3] K. Rupp. *Zeichnen von Schifflinien*. Institut für Entwerfen von Schiffen und Schiffstheorie, universität Hannover, 1981.
- [4] S. Misra. *Design Principles of Ships and Marine Structures*. CRC Press, Raylor and Francis Group, 2005.
- [5] P. J. Pluta et al. *Compensation for openings in Primary Ship Structure*. Ship Structure Committee, 2002.
- [6] DNV GL. *Rules for Classification, Part 3 Hull, Chapter 4 Loads*. 2017.
- [7] IACS. *Common Structural Rules for Bulk Carriers*. 2010.
- [8] J. Tournadre. *Anthropogenic pressure on the open ocean: The growth of ship traffic revealed by altimeter data analysis*. 2014.
- [9] C. Smith. *Influence of local compressive failure on ultimate longitudinal strength of a ship's hull, PRADS Symposium, S.73 ff*. Tokyo, 1977.
- [10] J. K. Paik et al. *Ultimate Strength of Ship Hulls Under Combined Vertical Bending, Horizontal Bending, and Shearing Forces*. 1996.
- [11] W. Fricke. *Schiffskonstruktion I*. 2010.
- [12] B. Klein. *FEM Grundlagen und Anwendungen der Finite-Elemente-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau, 9. Auflage*. Springer Vieweg, 2012.
- [13] F. Lopez F. Al-Hazam. *Finite element analyses for limit state design of concrete structures*. 2005.
- [14] M. Shama. *Torsion and Shear Stresses in Ships*. Springer Verlag, 2010.
- [15] H. Meier-Peter (Hrsg.). *Handbuch Schiffsbetriebstechnik, 2. Auflage*. Seehafen Verlag, 2012.
- [16] M. Ventura. *Estimation Methods for Basic Ship Design*. Instituto Superior Tecnico, Lisboa, 2013.
- [17] Det Norske Veritas AS. *Structural Design of Offshore Ships*. 2011.

- [18] www.marinetraffic.com. 02.09.2017.
- [19] M Bičak J. Andrić, S. Kitarović. *IACS Incremental - iterative method in progressive collapse analysis of various hull girder structures*. 2013.
- [20] Bureau Veritas. *MARS2000 Users guide*. 2000.
- [21] Bureau Veritas. *Rules for Classification of Steel Ships*. 2017.
- [22] D.G. Benkovsky. *Technology of Ship Repairing*. MIR Publishers, Moscow, 1970.
- [23] R. Hayward. *Principles of Plastic Design. In Increasing the Safety of Icebound Shipping, Vol. 2*. Helsinki University of Technology, Ship Laboratory, 2007.
- [24] R.S.Dow S. Benson, J. Downes. *A Comparison of Numerical Methods to Predict the Progressive Collapse of Lightweight Aluminium Vessels*. School of Marine Science and Technology, Newcastle University.
- [25] A. E. Henn et al. *Probability based Ship Design, Loads and Load Combinations*. Ship Structure Committee, 1994.
- [26] R. S. Marquardt C. F. Mayer. *Schiffstechnik und Schiffbautechnologie, S.15*. Verband für Schiffbau und Meerestechnik e. V., Hamburg, 2006.
- [27] J. Voßiek H. Wittel D. Jannasch, D. Muhs. *Roloff/Matek Maschinenelemente, 20. Auflage, S.47*. Vieweg+Teubner, 2009.

8 Anhang

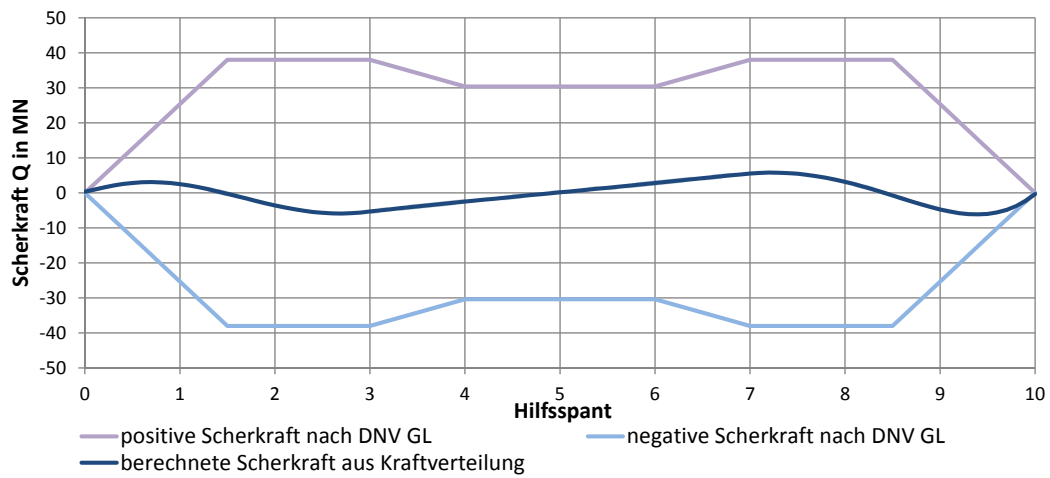


Abbildung 8.1: vertikaler Scherkraftverlauf des Massengutfrachters *Clara*

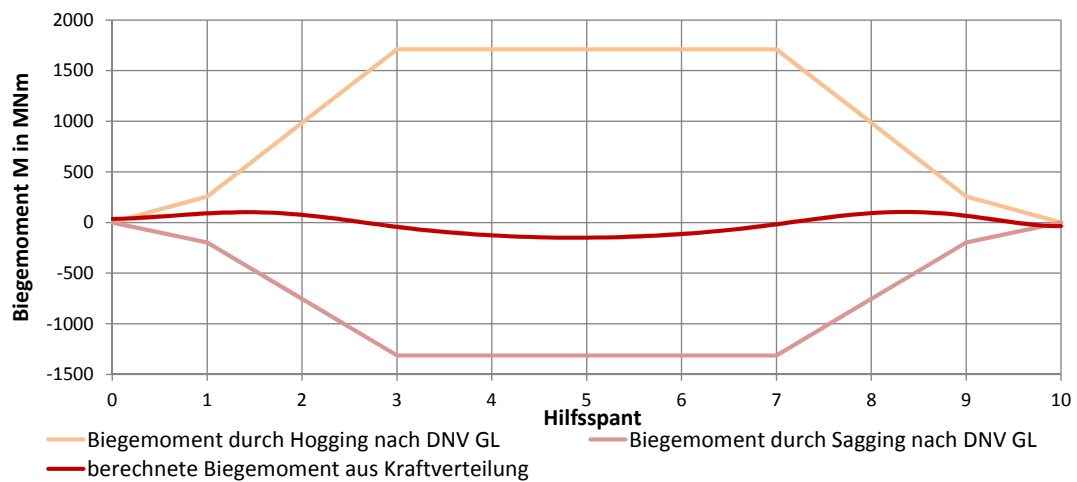


Abbildung 8.2: vertikaler Biegemomentenverlauf des Massengutfrachters *Clara*

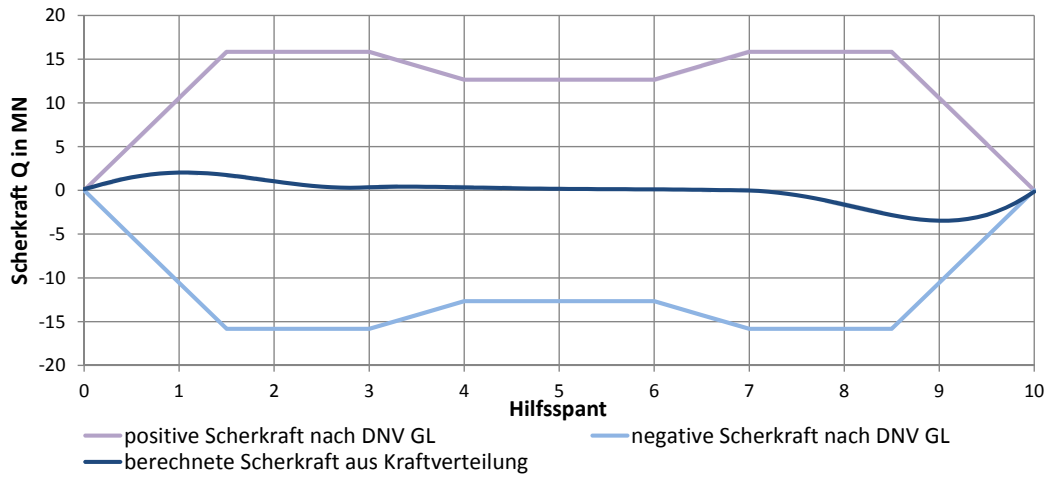


Abbildung 8.3: vertikaler Scherkraftverlauf der RoRo-Fähre *Volcan de Timanfaya*

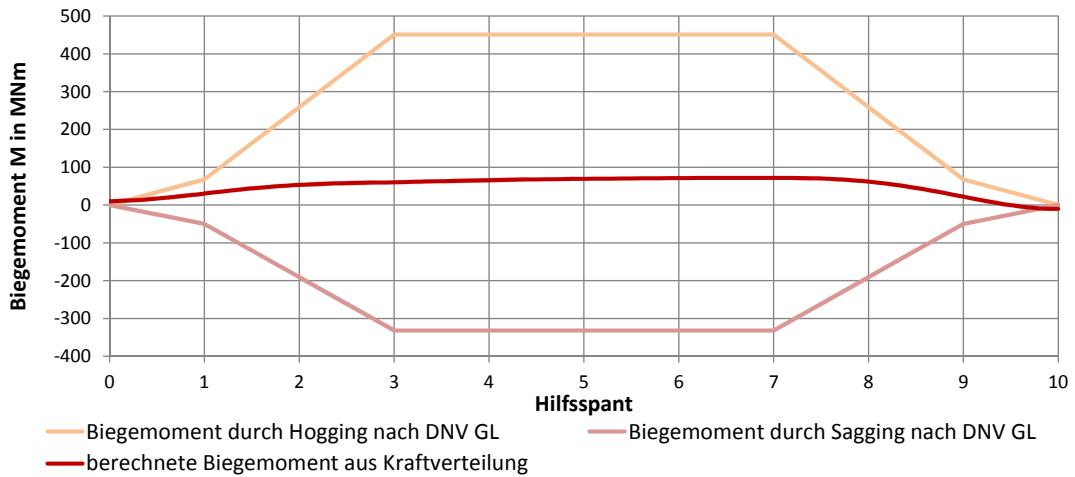


Abbildung 8.4: vertikaler Biegemomentenverlauf der RoRo-Fähre *Volcan de Timanfaya*

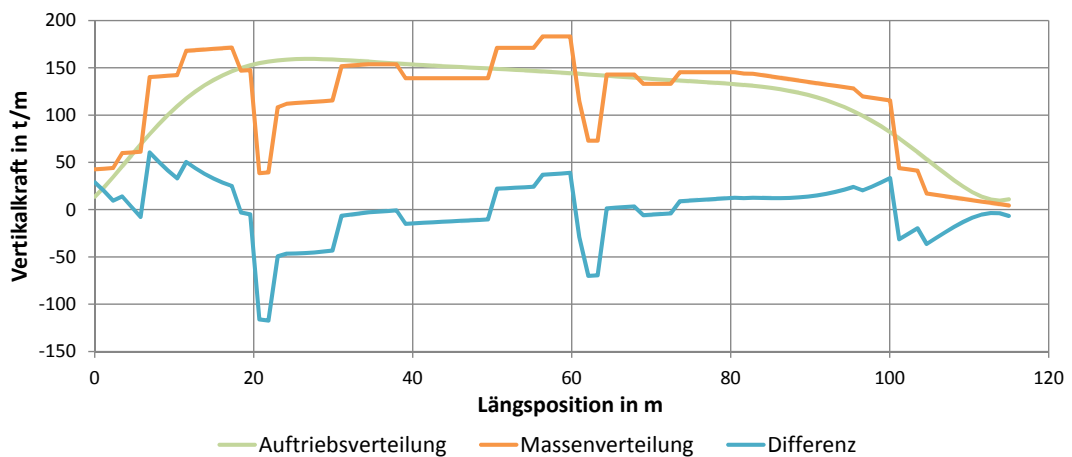


Abbildung 8.5: angreifende Vertikalkräfte am Beispielschiff mit *Ladefall 1*

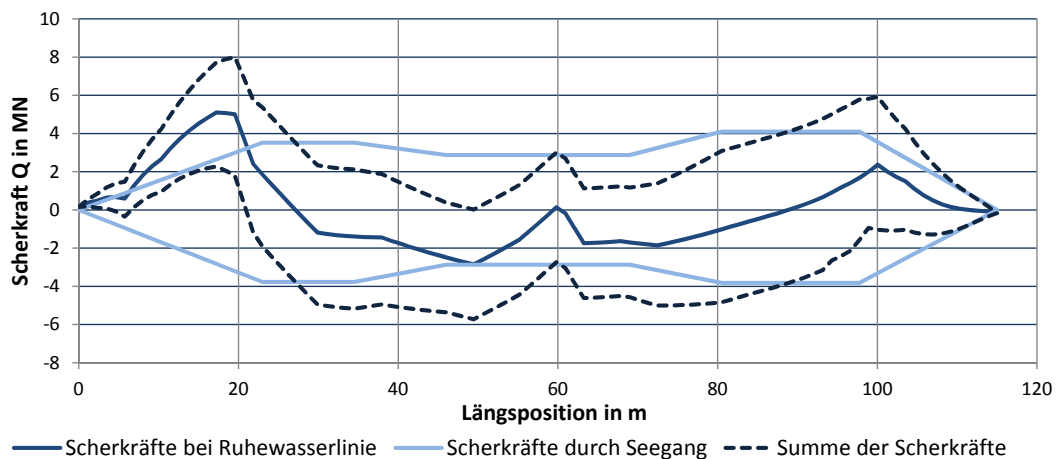


Abbildung 8.6: Verteilung der auftretenden vertikalen Scherkräfte mit *Ladefall 1* mit Seeganglasten für einen Tag

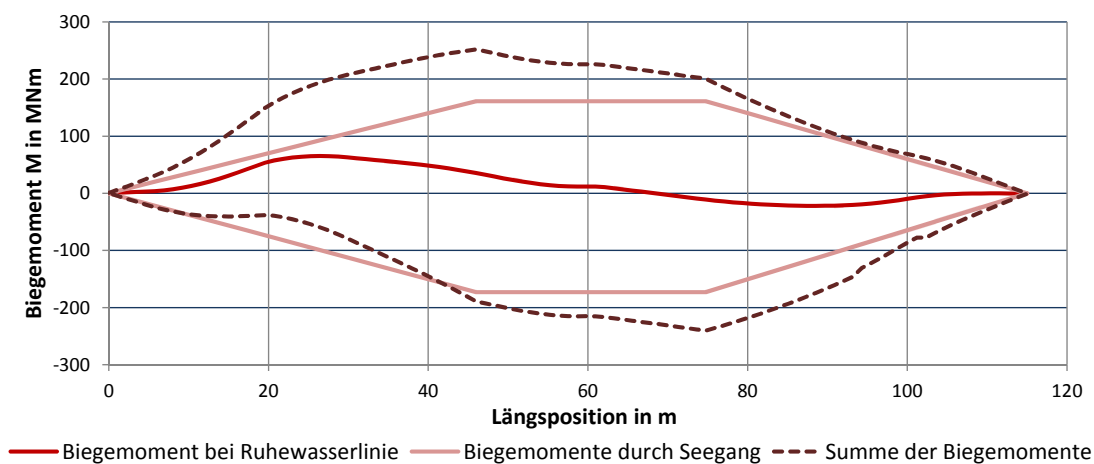


Abbildung 8.7: Verteilung der auftretenden vertikalen Biegemomente mit *Ladefall 1* mit Seeganglasten für einen Tag

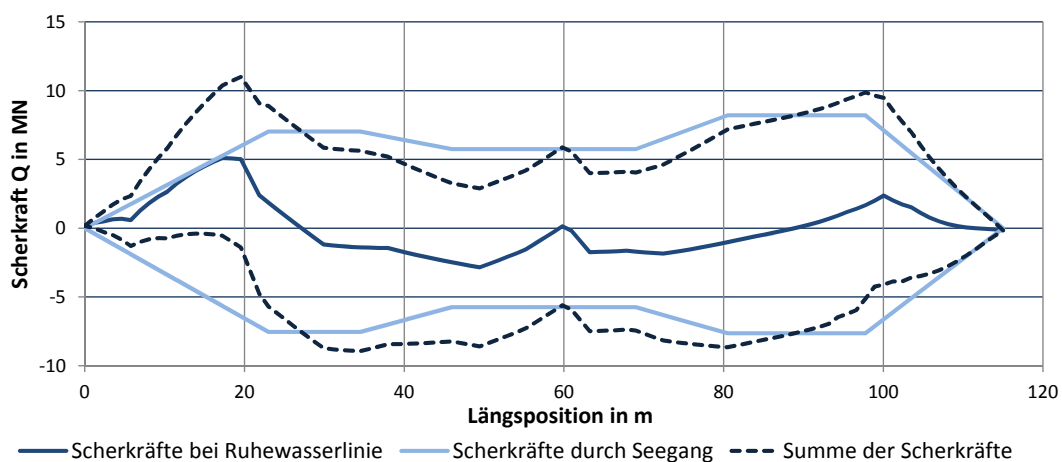


Abbildung 8.8: Verteilung der auftretenden vertikalen Scherkräfte mit *Ladefall 1* mit Seeganglasten für 20 Jahre

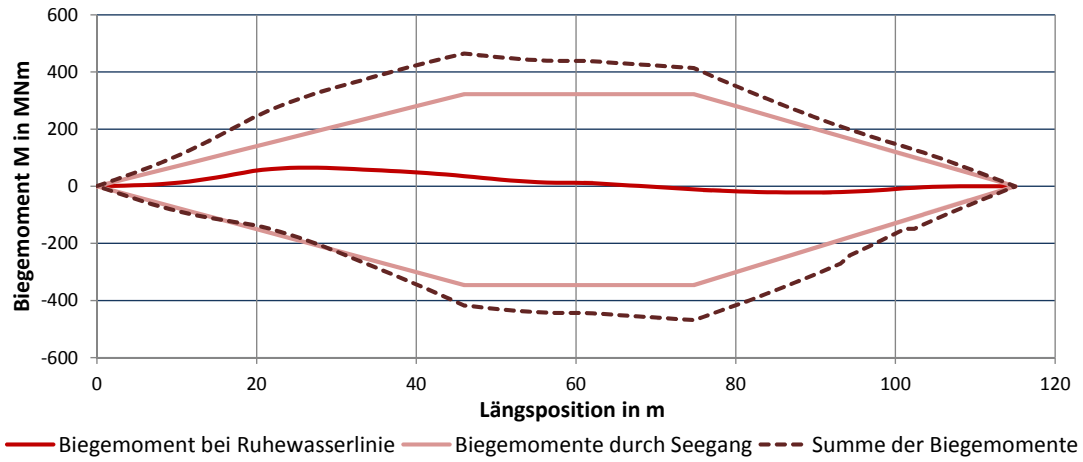


Abbildung 8.9: Verteilung der auftretenden vertikalen Biegemomente mit *Ladefall 1* mit Seeganglasten für 20 Jahre

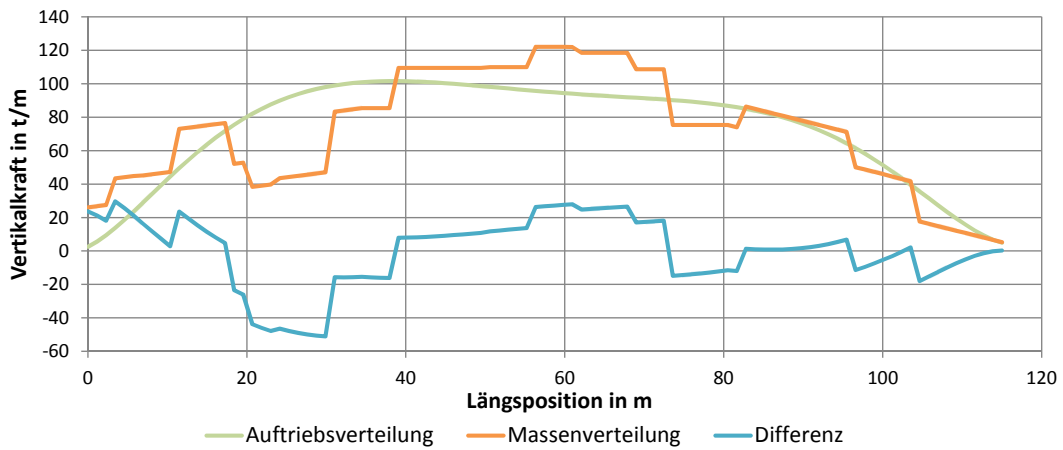


Abbildung 8.10: angreifende Vertikalkräfte am Beispielschiff mit *Ladefall 3*

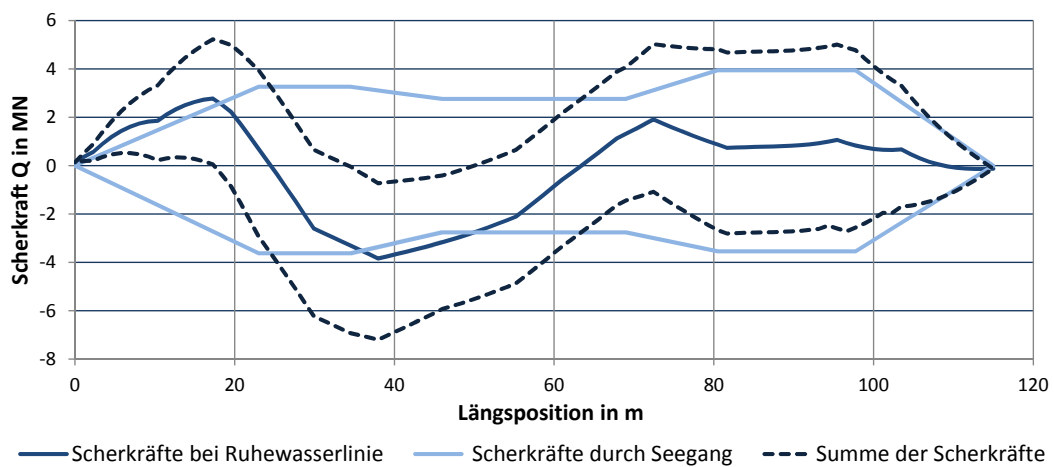


Abbildung 8.11: Verteilung der auftretenden vertikalen Scherkräfte mit *Ladefall 3* mit Seeganglasten für einen Tag

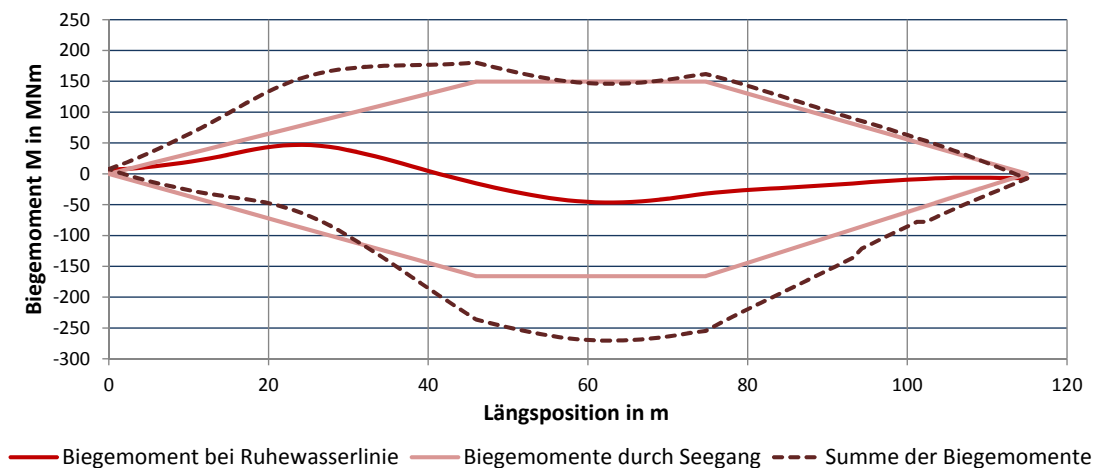


Abbildung 8.12: Verteilung der auftretenden vertikalen Biegemomente mit *Ladefall 3* mit Seeganglasten für einen Tag

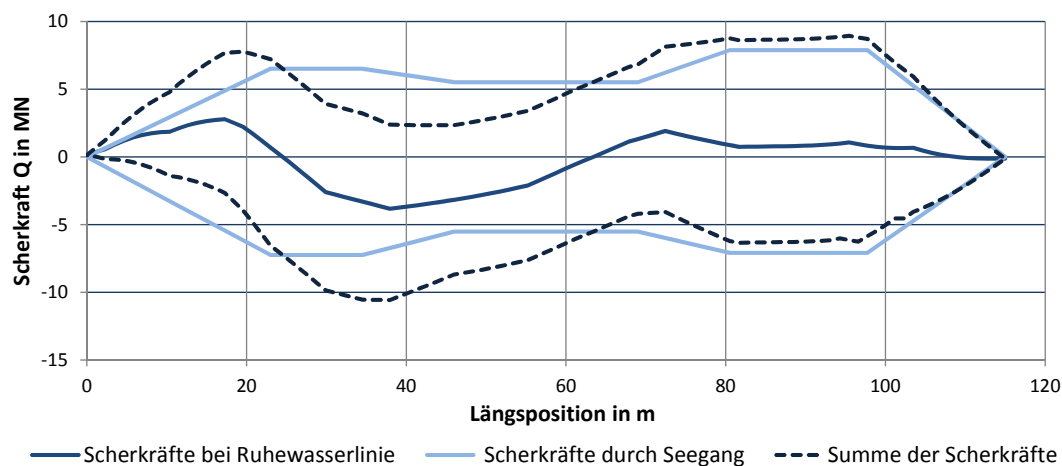


Abbildung 8.13: Verteilung der auftretenden vertikalen Scherkräfte mit *Ladefall 3* mit Seeganglasten für 20 Jahre

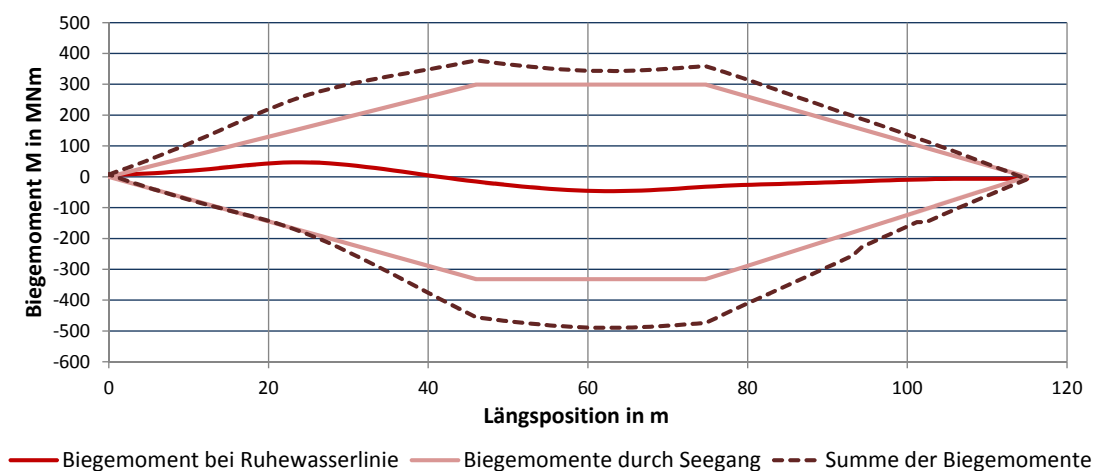


Abbildung 8.14: Verteilung der auftretenden vertikalen Biegemomente mit *Ladefall 3* mit Seeganglasten für 20 Jahre