

641 | Juni 2008

SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

**Festschrift anlässlich des 100.
Geburtstages von Prof. Dr.-Ing. Kurt
Wendel**

Gedanken zur Schiffssicherheit

TUHH

Technische Universität Hamburg-Harburg

Festschrift anlässlich des 100. Geburtstages von Prof. Dr.-Ing. Kurt Wendel

Gedanken zur Schiffssicherheit

Hamburg, Technische Universität Hamburg-Harburg, 2008

© Technische Universität Hamburg-Harburg
Schriftenreihe Schiffbau
Schwarzenbergstraße 95c
D-21073 Hamburg

<http://www.tuhh.de/vss>

Festschrift
anlässlich des 100. Geburtstages von
Prof. Dr.-Ing. Kurt Wendel

Gedanken zur Schiffssicherheit

Herausgegeben von
Prof. Dr.-Ing. Stefan Krüger
Dr.-Ing. Wilfried Abels

© 2008 Schriftenreihe Schiffbau der
Technischen Universität Hamburg-Harburg

Schwarzenbergstraße 95c
21073 Hamburg

ISBN 978-3-89220-641-5



Prof. Dr.-Ing. Kurt Wendel (†)

Prof. Dr.-Ing. Kurt Wendel (†) 100 Jahre

Prof. Kurt Wendel, ein erfahrener Ingenieur, ein exzellenter Wissenschaftler, ein erfolgreicher Unternehmer und ein verehrenswerter Mensch, hat die Schiffstechnik beeinflußt wie nur ganz wenige andere. Sein Lebenswerk ist in Breite, Tiefe und Nachhaltigkeit außergewöhnlich. Mit seinem Blick für das Wesentliche und Machbare und seiner praktischen Erfahrung erkannte er Probleme schnell und brachte sie mit Hilfe seiner natur- und ingenieurwissenschaftlichen Fähigkeiten einer Lösung näher.

Dies war sicher auch in seinem nicht alltäglichen Werdegang begründet. Mittlere Reife, Schiffbaulehre, Ingenieurschule und anschließende Arbeit als Schiffbau-Ingenieur waren die Basis für seine praktischen Fähigkeiten, nachgeholt Extern-Abitur, dreisemestriges Mathematik- und Physik-Studium an der Universität Hamburg, Schiffbaustudium an der Technischen Hochschule Berlin-Charlottenburg mit anschließender Assistenten- und Obergeringenieur-Tätigkeit gaben ihm das wissenschaftliche Rüstzeug. Dabei hatte er bedeutende Lehrer: Von Georg Schnadel erhielt er viele Anregungen, bei Fritz Horn diplomierte er, und Georg Weinblum war sein Doktor-Vater.

Im November 1938 bestand er die Diplomprüfung mit einem sehr guten Ergebnis, im Mai 1943 promovierte er mit Auszeichnung. Seine Dissertation über hydrodynamische Massen und Massenträgheitsmomente war nicht seine erste Veröffentlichung, aber sie war die erste von besonderer Tragweite, sie bedeutete über Jahrzehnte das Standardwerk bei der Berechnung von Schiffsschwingungen und -vibrationen.

Die 1942 begonnene Tätigkeit als Abteilungsleiter bei der Gebr. Sachsenberg AG, wo er die verschiedenartigsten Schiffe wie Betonfrachtschiffe, Tragflächenboote und U-Boote entwarf, und die anschließende Arbeit als Abteilungsleiter in der U-Boots-Fertigung bei Blohm & Voss ließen ihn Erfahrungen in Werft-Organisation und Werftbetrieb sammeln.

Schon kurz nach dem Zusammenbruch und dem Ausscheiden bei Blohm & Voss im Juni 1945 begann er als Dozent für Entwerfen von Schiffen, Schiffstheorie, Mathematik und Mechanik an der Ingenieurschule Hamburg. Im Sommersemester 1952 wurde er als Ordinarius für Entwerfen von Schiffen und Schiffstheorie an die Technische Hochschule Hannover berufen. Gleichzeitig vertrat er als Honorarprofessor den Lehrstuhl für Entwerfen von Schiffen am Institut für Schiffbau der Universität Hamburg. Beide Funktionen hat er bis zu seiner Emeritierung 1976 ausgeübt.

In dieser Zeit hat er bedeutende Beiträge zum Schiffsentwurf und besonders zur Schiffssicherheit geleistet.

Mitte der 50er Jahre hatte ihn berührt, daß "Schiffe länger im Hafen als auf See zu finden sind". Er führte als erster wissenschaftliche Untersuchungen der damals üblichen Umschlagsmethoden mit dem Ergebnis durch, daß er die Luken als zu klein erkannte und das "offene Schiff" propagierte. Auch die damit verbundene Gefährdung durch Torsion erkannte er. Jedoch wie bei manch anderer Idee fand er nicht das Interesse der Fachwelt, hier nicht einmal das der Kollegen. Er dachte manchmal zu weit voraus. Die Realisierung des „offenen Schiffes“ in Form des Containerschiffes folgte wenig später,

leider zuerst im Ausland. Sein Gespür für Künftiges bewies er zur gleichen Zeit auch, indem er die intensive Nutzung der gerade auf gekommenen Elektronenrechner für schiffbauliche Berechnungen vortrachte und auch in die Lehre einführte.

Ganz entscheidend hat er die Entwicklung der Schiffssicherheit und deren Vorschriften beeinflusst. Als Konsequenz aus mehreren Gutachten über Schiffsunfälle ("Pamir", "Lohengrin", "Melanie Schulte") hat er zur Beurteilung der Intaktabilität die "Stabilitätsbilanz" eingeführt, in der alle krängenden Momente dem aufrichtenden Moment gegenübergestellt werden. Zur Kontrolle der metazentrischen Höhe im Bordbetrieb hat er ein "Stabilitätsmeßgerät" und später für die Stabilitätskontrolle einen Bordrechner entwickeln lassen.

Epochemachend war seine Idee, die Lecksicherheit mit Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung zu bewerten, heute eine Selbstverständlichkeit. Auch die Anregung zur Berücksichtigung der Längsunterteilung bei der Bewertung der Lecksicherheit stammt von ihm.

Dem Mangel an jeglicher Fachinformation nach dem Zusammenbruch hat er dadurch abgeholfen, daß er 1948 die Verleger der Schifffahrtszeitschrift HANSA überzeugte, das Fachorgan durch eine Rubrik "Schiffbau und Schiffsmaschinenbau" zu erweitern, deren Schriftleitung er übernahm. Ab 1950 gab er alle zwei Jahre das "Handbuch der Werften" heraus, in dem die neuesten Kenntnisse und Entwicklungen in für die Anwendung brauchbarer Form dargeboten wurden. Im Jahr 2002 erschien der 26. Band. Für die Dokumentation der Ergebnisse schiffstechnischer Forschung gründete er 1952 die Zeitschrift SCHIFFSTECHNIK, ein trotz der deutschen Sprache international angesehenes Fachorgan, das heute als „Ship Technology“ in Englisch erscheint. Für den direkten Technologietransfer in die Praxis und für die Gewinnung von Erfahrungen aus der Praxis gründete er 1955 zusammen mit seinem ersten Assistenten das Ingenieurbüro SCHIFFKO.

Auch in der Schiffbautechnischen Gesellschaft hat Prof. Wendel gestaltend gewirkt: Als Leiter des Fachausschusses "Schiffsentwurf und Schiffssicherheit" über 26 erfolgreiche Jahre, als langjähriges Mitglied des Vorstandsrates und als Vorsitzender des Satzungsausschusses. Die Gesellschaft dankte ihm durch alle ihr zur Verfügung stehenden Ehrungen: 1970 Silberne Denkmünze, 1988 Ehrenmitgliedschaft, 1993 Goldene Denkmünze.

Prof. Wendel war nicht jedem gegenüber ein bequemer Partner. Seine oft unkonventionellen Ideen, seine Konsequenz und seine Beharrlichkeit ließen ihn manchmal eigenwillig erscheinen.

Für viele - und besonders seine Mitarbeiter und die Studenten - war etwas anderes wichtiger: Prof. Wendel war bei allen wissenschaftlichen Leistungen und Erfolgen Mensch geblieben, der mit beiden Beinen auf der Erde stand. Ob es die Lattenspritze, das Ordensfest, das Faschingsfest, andere studentische Feste oder von ihm selbst veranstaltete Betriebsausflüge oder Neujahrsempfänge waren, Prof. Wendel war immer voll in Aktion.

Seine wissenschaftlichen Leistungen bleiben dem Fach erhalten, die Persönlichkeit bleibt in der Erinnerung seiner Schüler, der stets elegant gekleidete, seriöse, anspruchsvolle und erfolgreiche Wissenschaftler auf der einen Seite und der lebensbejahende, fröhliche Mensch auf der anderen.

Verfasser: Prof. Dr.-Ing. Harald Keil

Mai 2008

Inhaltsverzeichnis

1908 - Professor Wendel - 1988

Bruno Arndt 1

SCHIFFKO – Gründungsgedanken und erreichte Ziele bis heute

Dipl.-Ing. Albrecht Delius, SCHIFFKO GmbH Hamburg 6

Stabilität, Schwimmfähigkeit und Wahrscheinlichkeit

Dipl.-Ing. Hormann, ehemals Germanischer Lloyd 9

Einführung des Seeganges in die Stabilitätsbilanz nach Wendel

Prof. Dr.-Ing. Kastner, Hochschule Bremen 14

Wendel und Computer

Prof. Dr.-Ing. Söding, TU Hamburg-Harburg 19

Entwicklung eines Intaktstabilitätskriteriums zur Vermeidung des Kenterns in nachlaufendem Seegang

Dipl.-Ing. Florian Kluwe, TU Hamburg-Harburg 28

Neuere Erkenntnisse über den Untergangsverlauf der ESTONIA

Dr.-Ing. Petri Valanto, Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt 47

Bewertung der Sicherheit der Unterteilung des Schiffes durch Monte-Carlo-Simulationen von Beschädigungsszenarien

Prof. Dr.-Ing. Stefan Krüger, TU Hamburg-Harburg 60

1908 - Professor Wendel -1988

Ein Mensch von 80 Lebensjahren
hat viel getan und viel erfahren.
Wieviel dies war, das weiß nicht jeder,
darum greift der Chronist zur Feder.
Er spitzt sie an und taucht dann tief
in der Vergangenheit Archiv,
um an das Tageslicht zu holen,
was teils vergessen, teils verschollen.

Im Jahre 1908
steht fest am deutschen Rhein die Wacht.
Die Gründerzeit ist sanft verschieden
nach 37 Jahren Frieden.
Im Schiffbau ist nicht sehr viel los.
Auf manchen Helgen wächst schon Moos.
Der Stapellauf des Kreuzers EMDEN
kann die Statistik auch nicht wenden.

Man baut noch sehr viel nach Gefühl,
und ist ein Schiff mal nicht stabil,
wie es CAP FINISTERRE passiert,
dann wird die Sache korrigiert
durch formstabilen Seitenwulst.
Ja, Schiffbau ist noch eine Kunst,
die ziemlich kräftig protegirt
vom Kaiser, der das Reich regiert.

Die Kunst an sich heißt Jugendstil,
Natur als Vorbild ist ihr Ziel,
und Rankenwerk und viel Getier
nun Häuser und auch Damen ziert,
die man als Evas Ebenbild
fast nicht erkennt, weil sie verhüllt,
und stiegen sie ins Meer zum Baden,
dann waren nackt nur ihre Waden.

Die Herren waren ebenfalls
dann keusch verhüllt von Knie bis Hals.
Und doch - wie die Statistik lehrt -
es hat die Menschheit sich vermehrt,
und ein spezielles Exemplar
war unser werter Jubilar,
der auf den Lebensweg sich machte -
zunächst noch ziemlich unbeachtet.

Nach kurzen unbeschwerten Jahren
muß der Mensch bereits erfahren,
daß es auch böse Menschen gibt,
denn ringsumher beginnt ein Krieg.
Man singt: "Heil Dir im Siegerkranz",
jedoch der Sieg gelingt nicht ganz,
und Deutschlands stolze Hochseeflotte,
sie endet größtenteils im Schrotte,

Des Menschen Kindheit war verflossen,
und er erklimmt die ersten Sprossen
auf der steilen Bildungsleiter,
lernt Lesen, Schreiben und so weiter.
Zwar ist der Abstand zu Max Planck,
der den Nobelpreis g'rad errang,
noch recht erheblich, doch man weiß,
der Mensch verringert ihn durch Fleiß.

Nach Abschluß erster Bildungsstufen
fühlt er zum Schiffbau sich berufen,
der nach dem Kriege neu belebt
und tendenziös nach oben strebt,
so wie der Saum der Damenkleider,
wodurch zu unseres Menschen Freude
die weibliche Anatomie
wird sichtbar bis hinauf zum Knie.

Der Schnürleib kam nun außer Mode,
jedoch die Schnürbodenmethode,
der Schiffe Formen zu gestalten
und auf Latten festzuhalten
mit lebensgroßen Spantenrissen,
die konnte man noch längst nicht missen.
Auch Plani- und Integrometer
verloren ihren Wert erst später.

So konnte man auch ihn erblicken,
wie er auf Knien, mit krummem Rücken
der Sente Schwung modifiziert,
damit sie sanft die Kimm tangiert.
Vor Antritt seiner Schiffbaulehre
befuhr er kurze Zeit die Meere.
Er sorgte, daß auf diesen Reisen
man konnt' von saub'ren Tellern speisen.

Die Passagierfahrt kam in Blüte
durch Schiffe von besonderer Güte.
Statt Sattdampfkolbendampfmaschinen
verwendete man Dampfturbinen
in der Drehzahl untersetzt
für große Fahrgastschiffe jetzt
wie BREMEN oder die EUROPA,
die kreuzten nach den USA.

Der Mensch als junger Ingenieur,
er zeichnete das Interieur
im Generalplan der EUROPA:
mit Akribie die Polstersofa,
Treppen, Kojen und so weiter.
Dies stimmte ihn durchaus nicht heiter.
Toiletten, tausend an der Zahl,
machten ihm diesen Job zur Qual.

Vermutlich hatt' er damals schon
die richtige Intuition,
daß solche strapaziösen Taten
man besser löst mit Automaten.
Doch vorerst ging es mal bergab,
weil' s eine Schiffbaukrise gab,
und unser Mensch, auch er muß wandern
von einer Firma hin zur andern.

Bei Werner Genest lernt er Dämpfen
und Vibrationen zu bekämpfen.
Er freut sich, wenn es ihm gelingt,
daß etwas überkritisch schwingt,
so wie bei Damen unterm Mieder,
es bebt beim Tanzen auf und nieder,
sofern sie noch im zarten Alter –
später dämpft der Büstenhalter.

Dem Chronisten sei'n verzieh'n
die analogen Phantasien.
Wir sehen in der Folgezeit
den Menschen bei der Tätigkeit,
daß er lustlos inspiziert,
wie man Dosen produziert,
und er faßte den Entschluß,
daß weiter er studieren muß.

So etwa anno zweiunddreißig
studiert der Mensch nun wieder fleißig
bei den großen Koniferen,
die in Berlin den Schiffbau lehren.
Es sind nicht nur in unserem Land
auch international bekannt:
Weinblum, Schnadel, Schütte, Horn
sind in der Schiffstechnik ganz vorn.

So fuhren einst Professor Schnadel
und and're aus dem Schiffbauadel
mit SAN FRANZISKO in den Westen,
um Streß und Seegang aufzumessen
und ihre Kenntnis zu vertiefen –
doch ach, voll süßen Weines schliefen
die meisten, als an Golfstroms Quelle
sich aufbaut' die Jahrhundertwelle.

Der Mensch, er war ein Realist,
der auch die Mädchen gern geküßt,
- Wer zählt die Häupter, nennt die Damen,
die freundlich ihm entgegenkamen! –
doch stärker noch zog es ihn an,
zu weisen den Klabaftermann
in des Aberglaubens Schranken,
wenn Schiffe kenterten und sanken.

Denn während beim intakten Schiff
man technisch alles fast begriff,
konnt' man in Seeamtssprüchen lesen,
daß "höhere Gewalt" gewesen,
was Schiffe so weit seitwärts neigte,
bis daß der Kiel zum Himmel zeigte.
Der Mensch erkannte sonnenklar,
daß hier ein Loch im Wissen war.

Warum und wie, das war die Frage,
ergibt sich solche schiefe Lage?
Der Mensch begann das Loch zu
schließen
nicht nur durch Unfallanalysen.
Und heute können wir erwähnen,
daß ungefähr seit drei Jahrzehnten,
was er erforschte übers Kentern,
sich nur noch wenig hat geändert.

Das Phänomen erschließt sich ganz
mit seiner Stabilitätsbilanz,
die alles in Betrachtung zieht,
was linksherum und rechtsrum dreht:
Seegangshebel, Zusatzmasse,
Winddruck, Deckslast voller Wasser,
Trossenzug und Eis an Deck,
Passagiere mit Gepäck.

Auch auf der Karriereleiter
ging es seit Berlin stets weiter:
bei Horn erst Obergeringieur,
in Dessau-Roßlau Konstrukteur
von Booten, die mit Flügelrahmen
dynamisch aus dem Wasser kamen,
zuletzt im Krieg bei Blohm und Voss
im U-Bootsbau Montageboß.

Auch diesmal ging der Endsieg flöten,
doch Schiffbaustudium war vonnöten.
Bald sehen wir den Menschen eilen
- verspätet meist - ,um mitzuteilen
sein Wissen an der Fachhochschule.
Nur selten saß er auf dem Stuhle.
Dozierend ging er auf und nieder
und gab auch Lebensweisheit wieder.

Als positiv sei noch berichtet,
daß er nicht trocken unterrichtet,
sondern stets mit "Weltanschauung"
seine Thesen untermauert.
So mancher, der zu seinen Füßen
konnte diesen Stil genießen,
machte später wohl Karriere
dank des Menschen weiser Lehre.

An dieser Stelle sei erlaubt,
aus einer Festschrift, arg verstaubt,
als Bemerkung einzuschieben,
wie damals der Chronist beschrieben,
was ihn sogleich beeindruckt hat:
Der menschlich wohlgemeinte Rat
und dazu, was heut' noch gilt,
das äußere Erscheinungsbild.

Zitat aus der Beschreibung des ersten
Tages an der Ingenieurschule
("Zirkus Krone"), 15.2.1951:
Als erster Darsteller trat elastisch und
federnd ein Herr ein, der sie mit dem
Programm der Woche bekannt machte
und dann leise und eindringlich auf sie
einsprach. Da der Chronist während-
dessen den tadellosen Sitz des Sakkos
und den lautlosen Gang der Schuhe des
Akteurs bewunderte, vernahm er nichts
weiter als den Satz: "Sie haben sich einen
sehr schönen und interessanten Beruf
erwählt, der aber krisenanfällig ist. Wer
trotzdem darauf besteht, muß entweder
verrückt oder diesem Beruf verfallen sein."

Der Mensch erklimmte die nächste Stufe,
als er folgte einem Rufe
auf den Lehrstuhl nach Hannover.
Dort schlief er nächtens auf dem Sofa
und fuhr nach Hamburg hin und her
mit einem Auto im Verkehr,
was anfangs schlimme Folgen hatte
fürs Kleintier von Hund bis Ratte.

Er lehrte Scharen von Studenten
und förderte die Assistenten.
Daneben hatte er gegründet
die SCHIFFKO, die man heute findet
als weltweit anerkanntes Haus.
Besonders zeichnet sie sich aus
durch intensive Nutzanwendung
der Datentechnik und -Versendung.

Bereits sehr früh hatt' er erkannt,
was für ein Werkzeug dort entstand
für die Forschung, aber auch
für den praktischen Gebrauch.
Darum hat er sie stets gefördert,
mit Konrad Zuse schon erörtert,
wie man könnt' kooperieren
und die Entwicklung weiterführen.

Auch in der Fachliteratur
findet man des Menschen Spur
sowohl auf der Verlegerseite
als auch unter Schreibernleuten.
Er übernahm die Technikleitung
der "Hansa", einer Schifffahrtszeitung,
die er ergänzte ideal
durch das Schiffstechnik-Journal.

Dazu hat er noch editiert,
was man als Neuheit registriert:
Er regte beim Verleger an
den Schiffbau-Fortsetzungsroman,
in dem man stets das Neueste fände;
inzwischen gibt es XVIII Bände
"Handbuch der Werften", weit verbreitet.
Das nächste wird g'rad vorbereitet.

Wenn einer, wie es hier geschildert,
sich durch Jahrzehnte weiterbildet,
drängt schließlich dann zur Offenbarung
sein Schatz an Wissen und Erfahrung,
und er entdeckt im Fachgebiet,
was außer ihm kein anderer sieht,
so wie in unsern Klimazonen
im Herbst erst reifen die Melonen.

So dreißig Jahre ist es her,
da schickte in den Hafen er
vier Diplomanden mit der Weisung,
zu prüfen, ob die Umschlagsleistung
konstruktiv zu steigern wäre,
weil die Schiffe auf dem Meere
man erheblich seltener träfe
als an den Schuppen in den Häfen.

Es wurde der Beweis erbracht
dafür, was er wohl schon gedacht:
Die kleinen Luken, die man baute,
verhinderten, daß man gleich staute
die Ladung senkrecht nur von oben.
Sie wurd' von Stauern noch verschoben.
Darum plädiert' er für den Bau
des "Offenen Schiffs" ohn' Unterstau.

Er war jedoch - es ist ein Graus -
mit der Idee der Zeit voraus.
Erst später, beim Containerschiff
fand man verwirklicht den Begriff.
Die Luken geh'n von Bord zu Bord,
Container staut man gleich am Ort.
Doch leider gibt es - das ist wahr -
für dieses Werk kein Honorar.

Als dieses Thema war beendet,
hat er sogleich sich zugewendet
der "Sicherheit durch Unterteilung",
und er veröffentlicht die Meinung,
mit Hilfe der Wahrscheinlichkeit
zu prüfen die Unsinkbarkeit.
Die IMCO hat - man hört und staunt -
dies in die Vorschrift eingebaut.

Dem Menschen wird es schmerzlich klar:
Auch diesmal gibt's kein Honorar.
Der Ruhm jedoch, er stimmt ihn heiter,
und er erfindet eifrig weiter.
Zur nächsten Freibordkonferenz
erläutert er mit Eloquenz:
"Die Kraft des Wassers auf dem Deck
ist ein dynamischer Effekt."

Ein Wunder wär's, wenn man sich
wundert,
daß weltweit Schiffe - an die hundert -
mit Bordcomputern seewärts fahren,
für die vor über dreißig Jahren
der geistige Grundstein ward gelegt
von ihm, dem "Seine Stabilität"
als Titel einst verliehen worden
vom Lattenvolk - nebst manchem Orden.

Er hat mal - dies sei auch geschildert -
in anderem Revier gewildert.
Er hatte eifrig nachgedacht
wie man es wohl möglich macht,
durch Nachstromumleitung mit Röhren
die Antriebsgüte zu erhöhen.
Den Umschlag dieser Wendelhosen
baut Schneekluth an als Nachstromösen.



Der Mensch ist nun ein Emerit,
doch lebt er nicht als Eremit.
Mit Leidenschaft er programmiert
und Datenmengen regressiert,
um der Romantik letzten Schimmer
zu treiben aus dem Arbeitszimmer
der Ingenieure, die noch glauben,
zum Schiffsentwurf genügt ihr Daumen.

Man sagt, der allerflinkste Falter
wird etwas matter mit dem Alter,
doch zweifelt man, ob dies wohl wahr,
betrachtet man den Jubilar.
Zum Abschluß möchte der Chronist,
der seinerseits ermattet ist,
dem Menschen auf den Weg mitgeben:
"Wir wünschen Glück und langes Leben!"

2. Juni 1988

Bruno Arndt



SCHIFFKO – Gründungsgedanken und erreichte Ziele bis heute

Als ich am 2.1.1976 bei SCHIFFKO meinen Dienst antrat, war mir die Firma nicht fremd, denn schon als Student durfte ich einige Wochen die Arbeit des Ingenieurbüros kennenlernen.

Während meines Studiums in Southampton hatte ich auch Programmieren gelernt, und der Einsatz von Computern faszinierte mich. In keinem anderen Konstruktionsbüro in Deutschland wurde die EDV dermaßen breit und vielfältig im Schiffsentwurf angewendet wie bei SCHIFFKO. Es waren für mich glückliche Umstände, dort arbeiten zu dürfen.

An jenem 2. Januar fand auch der alljährliche SCHIFFKO-Neujahrsempfang statt, von dem ich glaubte, er sei mehr öffentlich als intern. Die Plätze bei den jüngeren Kollegen waren bereits vergeben, und voller Schüchternheit fand ich mich schließlich zwischen Prof. Wendel und Frau Prien wieder. Diese Feier war meine erste Begegnung mit dem SCHIFFKO-Firmengründer. Ich war damals 24 Jahre alt, Prof. Wendel bereits 67.

Die SCHIFFKO wurde zu der Zeit von Jürgen Pfennigstorf geführt, und Berend Pruin und Bruno Arndt waren in der Geschäftsführung als Prokuristen tätig. Professor Wendel hatte sein Büro ebenfalls im 5. Stock des Stubbenhuk-Kontorhauses, und durch die Flügelbauweise des Gebäudes konnten wir ihn gut an seinem Schreibtisch sehen. Er lebte quasi an seinem Schreibtisch. Professor Wendel war kein aktives Mitglied bei SCHIFFKO, jedoch immer sehr interessiert an den vielschichtigen Ingenieraufgaben und den Ergebnissen der Schiffsentwürfe der SCHIFFKO. Damals war die Firma ein junges Unternehmen. Geselligkeit war angesagt, und es gab jährlich Betriebsausflüge und Feiern, an denen natürlich auch unsere „externen“ gerne teilnahmen wie die Kollegen der „Hansa“. Meistens waren es Fahrten am Wasser, auf dem Wasser, oder es ging gar ins Wasser. Die Theorie von Archimedes wurde erprobt und bewiesen. Von diesen Stunden der Feiern und Unbeschwertheit gibt es so manches nette Foto. Es zeigt die Zusammengehörigkeit der Mitarbeiter und die große Loyalität zur Firma.

Als ich der SCHIFFKO beitrug, wurden die Räume der SCHIFFKO von einem Rechenzentrum und einem Zeichenzentrum beherrscht. Das Rechenzentrum bestand aus einem riesigen Lochkartenstanzer und einem über Datenfernverarbeitung nach Frankfurt verbundenen Lochkartenlesegerät und einem Nadeldrucker zum Erhalt der Ergebnisse. Das Zeichenzentrum beinhaltete eine große Flachbettzeichenmaschine, und wenn der Tisch in seiner Fläche nicht ausreichte, dann wurde bei VFW in Bremen „in Streifen“ geplottet. Gerechnet wurde mit Softwareprogrammen mit den Namen STRAK und HYDROSTAT, die am Institut für Schiffbau entwickelt worden waren und dort EUKLID und ARCHIMEDES hießen. Gezeichnet wurde damals auf Transparentpapier und Folien mit Rapidographen. Das Radiermesser war ein wichtiges Werkzeug.

Aber 1976 war die SCHIFFKO bereits 21 Jahre jung, und es sollten gerade noch vier weitere interessante Jahre vergehen bis zum 25. Firmenjubiläum!

Die Firmengründung durch Professor Wendel 1955, so wurde mir berichtet, hatte zwei Ziele: Einerseits sollten innovative Ideen, die am Institut geboren wurden, zur Praxisreife entwickelt werden können (damit sie nicht wieder vergessen, sondern technologisch genutzt werden konnten), andererseits war die soziale Sicherheit für die Mitarbeiter seines damaligen Instituts für Schiffbau sicherzustellen.

Die SCHIFFKO hat sich in den über 50 Jahren ihrer Existenz immer technischen Herausforderungen und innovativen Ideen gestellt, wobei neuartige Schiffstypen entwickelt oder die Funktionalität von Schiffen und Ausrüstung verbessert wurden. Eine umfangreiche Dokumentation der besonderen SCHIFFKO-Entwürfe und Konstruktionen haben wir vor drei Jahren zum 50. Firmenjubiläum präsentiert, bei dem viele von Ihnen unsere Gäste waren. Nur einige dieser Besonderheiten möchte ich hier erneut in Erinnerung bringen.

Mit Bezug auf das „Erbe“ von Professor Wendel und seinen damaligen Assistenten sei natürlich nochmals an die Entwicklung der Stabilitätsberechnungen und der Schiffstheorie erinnert. Seitens der SCHIFFKO folgte die Erfindung des mechanischen Neigungsschreibers für Krängungsversuchsanalysen, die ersten Ladungsrechner an Bord von Schiffen sowie die Weiterentwicklung des SCHIFFKO-ShipManagers. 1992 treten erstmals Lecksicherheitsvorschriften für Frachtschiffe in Kraft. Anders als für Passgierschiffe basieren diese auf einem probabilistischen Sicherheitskonzept, maßgeblich entwickelt von Prof. Dr.-Ing. Kurt Wendel am ehemaligen Institut für Schiffbau, dem Vorläufer der schiffbaulichen Institute der TUHH. Derzeit erfolgt die Umstellung der Leckstabilität für Fahrgastschiffe von der „Deterministic-“ zur „Probabalistic-“ Methode.

Diese Theorie der Unterteilung zur Reduzierung der Wahrscheinlichkeit des Untergangs hat auch die SCHIFFKO in Ihrer Struktur stark geprägt. Mitarbeiter mussten immer in mehreren Disziplinen einsetzbar sein, die Auftragssituation musste sich aus Konstruktionstätigkeiten und Beratungsleistungen zusammensetzen, es mussten immer diverse Kunden bedient werden, um Zahlungsverzögerungen zu kompensieren, und statt mögliche Aufträge aus Kapazitätsmangel abzulehnen, mussten temporär Partner gefunden werden.

SCHIFFKO war immer bestrebt, breit aufgestellt zu sein, vom Entwurf bis zur Fertigungsunterlage, mit allen notwendigen Kompetenzen der Entwurfsdisziplinen, und konnte dadurch auch komplexe Gesamtaufträge annehmen. Mit einem Netzwerk von Kooperationspartnern, Individualexperten und Wissenschaftlern wurden die Projektteams für Beratungs- oder Konstruktionsaufgaben erfolgreich erweitert.

Die Entwicklung des „Offenen Schiffes“ von Professor Wendel mit seinen Ansätzen zur Optimierung des Stauvolumens und der Verringerung von Lade- und Löschperioden von Schiffen zur Transportoptimierung finden wir in modernen Container-Schiffen wieder. Berend Pruin hat noch an den Studien und technischen Ausarbeitungen zur Erhöhung der Umschlagseffektivität im Hafen (u. a. mit Frau Dr. Horn zusammen) mitgearbeitet.

Während die SCHIFFKO erfolgreich Container-Feeder-Schiffe für diverse Fahrtgebiete selber entwickelt, agieren wir gleichzeitig auch als Berater von Reedereien für deren Erwerb von 13.000-TEU-Schiffen aus Korea. Natürlich sind die Schiffsfestigkeit, Stapelgewichte, Lukendeckelkonstruktion und Teilung sowie die Laschbrückenausführung für die Schiffsbeladung und Transporteffizienz wichtig, doch Brennstoffkosten, Energierückgewinnung aus Abgaswärme und Schadstoffminimierung für eine bessere Umwelt sind die dominanten Themen.

Technologische Herausforderungen waren immer schon die Forschungsschiffe. Mit POLARSTERN und METEOR hat SCHIFFKO Zeichen setzen können. Über diese Sonderfahrzeuge hat sich SCHIFFKO auch in dem internationalen Markt der Offshore-Fahrzeuge für die Öl- und Gas-Industrie etablieren können. Hier nur ein paar Abbildungen

unserer derzeitigen Aufträge, die sich momentan in der Bauphase befinden. Die Hubplattform dient zur Errichtung von Offshore-Windparks.

Wie Ihnen bestimmt bekannt sein wird, entwirft die SCHIFFKO auch derzeit das neue europäische eisbrechende Polar-Bohr-Forschungsschiff AURORA BOREALIS. Dieses technologisch höchst anspruchsvolle Schiff erfordert Innovationen in allen Bereichen. Es soll in die entlegensten Gegenden der Arktis vordringen können, dort in der Eisdrift dynamisch positionieren, um autark die Bohrposition für wissenschaftliche Bohrungen bis zu 5000 m in das Sediment vornehmen zu können. Multi-disziplinäre Forschungen im Eis sollen durch Moonpools erfolgen. Derzeit laufen die Eisversuche bei den Versuchsanstalten HSVA und Aker Arctic. Das Schiff soll aber auch für den weltweiten Einsatz verwendet werden können und gute Seegangseigenschaften aufweisen.

Das zweite Gründungsziel von Professor Wendel für die SCHIFFKO war, die soziale Sicherheit für die Mitarbeiter seines Instituts für Schiffbau sicherzustellen. Dieses Ziel wurde erfolgreich erreicht. Die damaligen Assistenten sind heute Rentner oder sind bereits verstorben. Die Grundsätze von Professor Wendel wurden kontinuierlich bis zum Verkauf der Geschäftsanteile Ende 2006 an den Wärtsilä Konzern verfolgt. Natürlich gab es Höhen und Tiefen bei der SCHIFFKO wie wohl in jeder Firma, aber unter der Leitung von Berend Pruin konnte das Steuer auch bei stürmischer See immer auf Kurs gehalten werden. Es war der Grundsatz der Gesellschafter während dieses halben Jahrhunderts, das erwirtschaftete Kapital in der Firma zu halten und nicht abzuziehen. Auch der Verkauf der Geschäftsanteile durch die ehemaligen – nun in die Jahre gekommenen Gesellschafter diente zur langfristigen Sicherung der Arbeitsplätze unserer Kollegen. Ab 1.6.2008 ist unsere neue Firmenbezeichnung „Wärtsilä Ship Design Germany“. Den Namen SCHIFFKO werden wir nur noch als Produktnamen unserer Schiffsentwürfe nutzen. Der Focus der Zukunft wird verstärkt im Bereich der Serienschiffe liegen, aber auch bei ihnen gelten die Stabilitäts- und Leckstabilitätskriterien und das Bestreben nach effektiver Zugänglichkeit zur Stauung von Ladung.

Um abschließend nochmals auf die großartigen Verdienste von Prof. Dr.-Ing. Kurt Wendel einzugehen, möchte auch ich den Aufbau des „Handbuch der Werften“ und seine jahrzehntelange Arbeit als Schriftleiter erwähnen. Diese Handbücher sind als Nachschlagewerke bestimmt im Besitz eines jeden von uns.

Die gute und zahlreiche Ausbildung von Schiffbau-Ingenieuren ist eine unabdingbare Notwendigkeit. Die maritime Industrie benötigt diesen Nachwuchs. Auch die SCHIFFKO sucht intensiv nach neuen Mitarbeitern und bietet, wie Sie aus meiner kurzen Präsentation sehen konnten, interessante Aufgaben, und wie Sie meinem eigenen Werdegang entnehmen können, auch hervorragende Berufschancen.

Professor Wendel wurde am 2. Juni 1908 geboren und verstarb am 6. Juni 2003. Diese ersten Tage im Juni haben eine große Bedeutung – auch für die ehemalige SCHIFFKO.

Albrecht Delius, Director Operations, Wärtsilä Ship Design Germany GmbH

Stabilität, Schwimmfähigkeit und Wahrscheinlichkeit

Dipl.-Ing. Hartmut Hormann

ehemals Germanischer Lloyd

Einem hervorragenden Hochschullehrer posthum seine Referenz zu erweisen, ist eine Ehre und eine Freude. Allerdings bin ich dankbar, daß ich nicht das ganze Wirken Professor Wendels würdigen soll; die Vielfältigkeit seiner wissenschaftlichen und lehrenden Aktivitäten machte eine solche Aufgabe sehr schwierig. Ich will mich auf einen zentralen Aspekt des Schiffsentwurfs und des Schiffsbetriebs beschränken: die Qualität des Schiffes, im intakten und im lecken Zustand schwimmfähig zu bleiben.

Beide Themen sind in sich umfassend und werden heute noch von anderen Referenten angesprochen. Ich möchte nur einiges Grundsätzliches sagen und mich im übrigen auf die Perspektive des Regelsetzenden beschränken; diese Sicht entspricht meiner beruflichen Tätigkeit und Erfahrung.

Der Beginn meines Studiums lag in der Zeit, wo sich hinsichtlich der Intaktstabilität der Schwerpunkt langsam verschob: von der Frage, wie berechne ich die Stabilität, hin zur Frage, wie beurteile ich das Ergebnis dieser Berechnung, also: was ist ausreichende Stabilität? Man musste ja große Mühe auf die korrekte Ermittlung der Pantokarenen verwenden, – im übrigen hatte man aus den 30er Jahren das Rahola-Kriterium, ein empirisch entwickeltes Glattwasser-Kriterium, das allerdings in seiner Einfachheit Erstaunliches leistete. Man bedenke: ein Glattwasserhebelarm von 20cm bei 30°, und der deckte dieses komplexe System Schiff in unregelmäßigem Seegang pauschal ab!

Natürlich war dieser Zustand nicht befriedigend, man wollte zumindest wissen, warum das so war. Man hatte alle möglichen krängenden Momente und das mit dem Seegang variable aufrichtende Moment; vieles konnte man, wenn auch meist nur überschlägig, berechnen. So lag der Gedanke eigentlich nahe: Stabilitätsbilanz. Professor Wendel hat mit seinem Stab viel gedanklich entwickelt, gerechnet, im Modellversuch dargestellt und hat auf den verschiedenen Ebenen der Praxis die Ergebnisse angeboten – ein nicht einfaches Unterfangen, besonders deshalb, weil sich die Ergebnisse dieser Bilanzen als durchaus beunruhigend herausstellen konnten. Es wurden nämlich in einer solchen Bilanz die jeweiligen Summen der krängenden Momente nicht nur den aufrichtenden in Glattwasser gegenübergestellt, sondern auch denen auf Wellenberg und im Wellental. Eine quasi-statische Betrachtung auf Wellenberg führte dabei oft zu theoretischem Kentern. Wie man aus Erfahrung mit den untersuchten Schiffen wusste, trat Kentern aber beileibe nicht häufig auf. Natürlich war die Erklärung richtig, daß der Vorgang eben nicht statisch ist sondern, daß sich die Situation Schiff auf Wellenberg vergleichsweise schnell ändert, so daß mit der Trägheit des Systems die theoretisch kritische Phase sich nicht auswirken kann. – Daraus wurde aber nebenbei klar: langes Verweilen des Schiffes auf Wellenberg war gefährlich, wenn der Beladungszustand an die Grenze des traditionellen Stabilitätskriteriums ging, d.h. Schiff in nachlaufender See mit Wellenlänge etwa gleich der Schiffslänge muß vermieden werden. Uns kommt diese Aussage heute fast banal vor, damals war sie es jedoch nicht – wir sprechen von der Zeit Ende der 50er, Anfang der 60er Jahre!

Der Wendelsche Gedanke, die Stabilitätsbilanz in eine Vorschrift umzusetzen, hatte nur teilweise Erfolg. Die Bundesmarine übernahm die Methode in ihre Bauvorschrift. In der Handelsschifffahrt waren die internationalen Aktivitäten noch so in den Anfängen auf diesem Gebiet, daß an eine Einführung dort nicht zu denken war. Und national, d.h. für Schiffe unter deutscher Flagge, verbot sich eine zwingende Anwendung natürlich wegen des „Wettbewerbsnachteils“ anderen Flaggen gegenüber.

Auch wenn hier formal die Wendelsche Tätigkeit auf dem Regel setzenden Gebiet für den Aspekt der Intaktstabilität abbricht, will ich eines hinzufügen: ich habe seit Mitte der 60er Jahre bei der IMCO, heute IMO, die Entwicklung international empfohlener, später bindender Stabilitätskriterien mitgemacht bis hin zum umfassenden Intakt-Stabilitäts-Code. Über die mehr als dreißig Jahre sind dort von vielen Seiten immer wieder kleinere und größere Vorschläge unterbreitet worden; und es ist mir in den ersten Jahren häufig, aber auch viel später noch passiert, daß ich bei der Vorstellung eines solchen Papiers dachte: ach ja, das habe ich bei Professor Wendel vor langer Zeit schon gehört oder, das baut doch auf einem Wendelschen Ansatz auf.

Jetzt zu dem anderen großen Komplex des Wirkens Professor Wendels, den ich betrachten will und der nach meinem Dafürhalten so herausragend ist, daß er allein Nachruhm begründen kann: Die Anwendung der Prinzipien der Wahrscheinlichkeitsrechnung auf die Lecksicherheit von Schiffen. Hier hat er den notorischen ersten Schritt getan, nach dem alle weiteren um so vieles einfacher werden; etwas präziser ausgedrückt: der Schritt von 0 auf 1 ist der innovative, inhaltlich große, die folgenden von 1 auf 1+n sind weiterentwickelnde, umsetzende, mehr oder weniger kleine Etappen. Allerdings sind die ebenso nötig, wie die Idee; eine Idee für sich allein kann nicht beweisen, daß sie gut ist, zu etwas nütze ist. Erst die Umsetzung in die Praxis bringt diesen Beweis – oder gibt die Idee der Vergessenheit anheim. Dieser Weg in die praktische Anwendung war lang und schwierig.

Ich will hier keinen chronologischen Abriß von den Anfängen bis zum heutigen Stand geben, und ich werde ganz bewusst auch auf eine anspruchsvolle Darlegung der Grundlagen verzichten.

Um mit dem „Schluß“ zu beginnen: heute ist die Methode, die Wahrscheinlichkeit des Überlebens eines Schiffes nach einer Kollision oder nach Beschädigung durch Grundberührung zu berechnen, ein zentraler Bestandteil der internationalen Vorschriften zum Nachweis hinreichender Sicherheit – so verankert vor allem in der SOLAS-Konvention.

Der Weg dahin war weit, und ich werde mich auf den Platz der Außenstehenden, im Wesentlichen der Zweifler, stellen, um einige Stationen der Entwicklung zu schildern, so wie ich sie vor allem bei der IMO in den verschiedenen Gremien und in vielen Gesprächen am Rande erlebt habe.

Betrachten wir also die Kollision zweier Schiffe, das getroffene sei ein Fahrgastschiff; das aktive bleibe draußen vor - eine Kollisionsbeschädigung am Bug hat wohl nur äußerst selten zum Untergang geführt, schließlich gibt es das „Kollisionsschott“. Das Eintreten einer Kollision ist der Wahrscheinlichkeit unterworfen und ein entsprechender Wert könnte berechnet werden. Das wird nicht getan. Anliegen einer derartigen Vorschrift ist es sinnvoller Weise, die negativen Auswirkungen des Ereignisses erträglich zu halten – so selten es auch vorkommen mag. Nun, das Ereignis, die Kollision selbst hat auch mehrere zufällige Parameter, nämlich (im wesentlichen): wo wird das Schiff getroffen, wie groß ist das Leck, in

welchem Betriebszustand wird das Schiff getroffen, d.h. welche Intaktstabilität steht zur Verfügung und damit, welche Seegangsverhältnisse kann das Schiff danach noch überstehen. Es gehört Übersicht und Weitblick dazu, sich auf die wesentlichen Parameter zu beschränken; es gibt eine Reihe weiterer Faktoren, die ebenso dem Zufall unterliegen. Aber man muß ja bedenken: um mit dem mathematischen Werkzeug der Wahrscheinlichkeitstheorie beurteilbare Ergebnisse zu erzielen, bedarf es der Kalibrierung, d.h. der Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses muß ein konkreter Zahlenwert zugeordnet werden. Der wird im allgemeinen aus statistischem Material gewonnen. Das sind in diesem Fall nachträglich (meistens zu spät) erhobene Daten von Kollisionsschäden. Es ist leicht nachvollziehbar, daß solche Daten in einigermaßen ausreichender Menge und Qualität nur für ganz wenige Parameter zu gewinnen sind.

Ich habe diese wenigen Einzelwahrscheinlichkeiten genannt. Aus ihnen entsteht die Basisformel

Summe $a p s$

Ohne in die Details gehen zu wollen, bedeutet dies: ich berechne die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Leck bestimmter Länge an einer bestimmten Stelle des Schiffes auftritt und die Wahrscheinlichkeit, mit welcher das Schiff diese konkrete Beschädigung übersteht. Das Ergebnis ist eine Teilwahrscheinlichkeit für das Überleben des Schiffes. Die Summe aus allen möglichen Lecks an allen möglichen Positionen über die Länge des Schiffes ergibt dann einen Wert, der je nach Entwurf (z.B. Hauptabmessungen, Stellung der Querschotte) unterschiedlich ausfällt. Jetzt muß nur noch der so errechnete Zahlenwert einem zu erreichenden gegenübergestellt werden, um sagen zu können: Vorschrift erfüllt – oder nicht. Nur noch! Das Prinzip ist einfach und klar, die Schwierigkeiten sind mannigfaltig. Um nur eine zu nennen: welchen Zahlenwert soll die Vorschrift fordern? nahe liegend der Weg: ich betrachte eine Vielzahl existierender Schiffe, die den bisherigen Vorschriften genügen und definiere damit über Mittelwertbetrachtungen das neue Niveau, je nach Situation ein im Mittel gleiches oder ein höheres. Auch das erscheint einfach, zumindest logisch.

Daß das logisch ist, haben weder die Skeptiker noch die Opponenten bestritten, aber...

Ich führe nur die beiden wesentlichen Widerstände an:

Der Skeptiker sagt, die bisherige Vorschrift sah vor, daß z. B. ein Leck „vereinbarter“ Größe an jeder Stelle des getroffenen Schiffes ertragbar sein musste; jetzt sollte man seine Anteile

$a p s$ irgendwo sammeln können, was bedeutete, daß eine Achillesferse bleiben konnte. Mein erster Chef in den 60er Jahren, bei aller Sympathie, die er für diesen neuen Ansatz hatte, pflegte zu sagen: wie unwahrscheinlich auch immer, die Erfahrung lehrt, gerade dort knallt es! Wie kann ich einen Schiffsuntergang erklären und rechtfertigen mit dem Argument, dieser Treffer war hinreichend unwahrscheinlich? – Dieser Einwand kann mit einem Kompromiss aus der Welt geschafft werden, indem man die wahrscheinlichkeitsbasierte Vorschrift mit einem deterministischen Gerippe kombiniert, z. B. das Schiff muß 2-Abteilungs-Status haben. So ist es dann auch gemacht worden.

Schwieriger als mit diesen Skeptikern hatte man es mit den Opponenten, die mit vielerlei anders gelagerten Argumenten kamen. Um nur das wichtigste zu nennen: das geforderte Niveau dieser Summe $a p s$ mag dem gemittelten Sicherheitsniveau der existierenden Schiffe entsprechen – nachgewiesen durch eine Vielzahl von Nachrechnungen von

Beispielschiffen. Aber mein Schiff erfüllt dies Niveau eben nicht. Warum soll ich jetzt einen gravierenden Nachteil in Kauf nehmen durch ein früheres oder späteres Eingeständnis, daß mein Schiff den neuen Anforderungen nicht entspricht? Dieses Argument war statistisch immerhin für genau die Hälfte aller existierenden Schiffe gültig! Man kann sich leicht vorstellen, daß diese Opposition zu den internationalen Bemühungen nur schwer zu überwinden war. Allerdings ist eine im Kern gleiche Situation in der IMO bei jeder wichtigen Zäsur in den Vorschriften gegeben.

Daß der ganze Prozeß so lange gedauert hat, kann man natürlich Professor Wendel nicht anlasten. Immerhin hat er aber die Genugtuung gehabt, daß seine Methode in Vorschriftenform umgesetzt schon relativ schnell, nämlich Ende der 60er Jahre als so genanntes Äquivalent in den SOLAS-Komplex aufgenommen wurde. Der Entwurfsingenieur hatte die Wahl, den Lecksicherheitsnachweis für ein Fahrgastschiff konventionell nach dem SOLAS-Buchstaben oder über das Äquivalent zu führen. Dieses Angebot schlummerte dann aber über gut zwei Jahrzehnte, auch wenn der Schiffbauer durchaus die Vorteile sah, vor allem die erheblich größeren Variationsmöglichkeiten bei der inneren Unterteilung.

Den Durchbruch bewirkte schließlich eine davon völlig unabhängige Weiterentwicklung der SOLAS-Vorschriften. Lecknachweise waren traditionell nur für Fahrgastschiffe gefordert. Ethisch war das natürlich immer fragwürdig; man teilte damit die Menschen auf See in zwei Gruppen, Passagiere und weniger „wertvolle“ Besatzungsmitglieder. Pikanterweise musste erst der Schutz der maritimen Umwelt als Ziel dazukommen, um diese Beschränkung aufzubrechen. Davor lag noch eine Sonderentwicklung: 1966 hat man für bestimmte Frachtschiffstypen in die Freibord-Konvention eine Regelung eingeführt, die eine Reduktion des Freibords auf Grund eines formalisierten Lecknachweises zuließ. (Dieser Vorgang ist mehr als kritikwürdig! was soll der Nachweis bestimmter Qualitäten des Schiffes im hoffentlich nie vorkommenden Leckfall, wenn es um das Seeverhalten im Intaktfall, beeinflusst durch den Freibord, geht?) Das war klar eine Fehlentwicklung. – Unabhängig davon wurden aber, wenig später beginnend, Lecksicherheitsansprüche an Tankschiffe zunächst, dann auch an Trockenfrachtschiffe gestellt, zuerst für große, nach und nach für kleinere. Auch bei den Trockenfrachtern war diese Initiative nicht zuletzt motiviert durch die steigende Bedeutung des Umweltschutzes. Mich hat es sehr gewundert, daß diesen umfangreichen und zusätzlichen Teilen des internationalen Regelwerkes nicht mehr Widerstand entgegengesetzt wurde.

Bei den Unterteilungsvorschriften für Trockenfrachtschiffe nun realisierte man endlich die immensen Vorteile, die die Wahrscheinlichkeitsberechnungen für die innere Unterteilung brachten; als ein Stichwort nenne ich nur die Bewertungsmöglichkeiten für Längsunterteilungen. Jetzt waren diese Vorschriften von vornherein die einzigen, nicht mehr nur das Äquivalent zur Deterministik. Mit einer Vorschrift deterministischer Art, z.B. jede Hauptabteilung muß flutbar sein, hätte man ein Schiff zum Transport überlanger Bauteile, wie etwa Raketenstufen nicht mehr ökonomisch sinnvoll bauen können.

Das alles klingt klar, logisch und in der Entwicklung weitgehend folgerichtig. Wenn man aber bedenkt, wie sich ein IMO-Gremium, das solche Vorschriften aufstellen und verabschieden muß, zusammensetzt, so wird deutlich, warum so etwas „Gutes“ so lange gedauert hat. Da sitzen Delegationen aus 40 oder 50 Staaten zusammen, die natürlich alle gleiches Gewicht im formalen Sinne haben. Häufig werden Redebeiträge geliefert, die – vorsichtig formuliert – nicht zweckdienlich sind. Leitend in allen Delegationen sind Ministerialbeamte, die nur im Ausnahmefall selbst Ingenieure sind, beraten werden sie innerhalb der Delegationen zwar

von Fachleuten, die aber oft auch eigene Interessen vertreten , durchaus berechtigterweise z.B. als Repräsentanten von Industrieverbänden oder Reedereien. Hin und wieder sind Wissenschaftler in den Delegationen, die dann immer wieder einmal daran verzweifeln, daß ihre Einlassungen praktisch ins Leere laufen – einfach weil sie von der Mehrzahl nicht verstanden werden. Das Ganze wird erschwert durch die Simultanübersetzung in vier, neuerdings sechs Sprachen. Bei aller Bewunderung für die Dolmetscher bleibt es problematisch, eine überzeugende Argumentation eines Fachmannes durch einen Unbeteiligten übersetzen zu lassen und die gleiche Wirkung zu erreichen. Professor Wendel wusste, warum er sich bei allem Engagement für seine Idee nur ganz selten in diese Niederungen begeben hat!

Ein unbestreitbarer Vorteil dieser IMO-Prozedur ist es aber, daß praktisch alles im Konsens verabschiedet wird; nur ganz selten, eigentlich nur bei „politischen“ Punkten, muß einmal abgestimmt werden. (Das beruhigt den Ingenieur! wie könnte ein technischer Sachverhalt hinsichtlich seiner Richtigkeit von einer Stimmenanzahl abhängig sein?)

Der inzwischen erreichte Stand der Lecksicherheitsvorschriften könnte Professor Wendel aber mit Stolz erfüllen. Die vielen kleinen Schritte von 1 auf 1+n sind getan; seine Idee ist zum selbstverständlichen Gemeingut des komplexen Systems internationaler maritimer Vorschriften geworden..

Zum Schluß einige persönliche Worte: Professor Wendel war für mich als Studenten ein Professor par excellence, wie es nur wenige gegeben hat; eine absolute Autorität, sicher nicht nur für mich – und dabei ein Mensch mit Ecken und Kanten bis hin zu Extravaganzen, der all dies nicht vor uns verbarg. Ich habe zu ihm aufgeschaut – und tue es noch (auch heute kommt es mir nicht in den Sinn, nur von „Wendel“ oder gar „Kurt Wendel“ zu sprechen. Für mich gehört der Titel Professor einfach dazu – und das gerade nicht als Bezeichnung eines Amtes oder einer Besoldungsgruppe. - Ich bin sehr froh, sein Schüler zu sein, wenn auch nur einer der durchaus vielen ohne Anspruch auf Erwähnung durch die Nachkommenden unseres Faches.

Wäre ich nicht sein Schüler, ich würde die beneiden, die von ihm gelernt, die ihn erlebt haben.

**Kolloquium zum 100. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. Kurt Wendel
am 6. Juni 2008 in der Technischen Universität Hamburg-Harburg**

Einführung des Seegangs in die Stabilitätsbilanz nach Wendel

Prof. Dr. Ing. Sigismund Kastner, Hochschule Bremen

Die Stabilitätsbilanz

In seinem VDI-Aufsatz "Sicherheit gegen Kentern" 1958 führte Wendel zur "Bemessung der Stabilität" folgendes aus, Zitat: "**Die Aufgabe besteht darin, die aufrichtenden Momente so groß zu machen, dass sie die kippenden überwiegen.**" Und weiter:

"Sobald das Schiff in seinen wesentlichen Teilen entworfen ist, sollten die kippenden Momente den aufrichtenden gegenüber gestellt werden.

Eine Stabilitätsbilanz eines Schiffes müsste folgende Angaben enthalten:

Hebelarme der kippenden Momente durch

1. nicht voll gefüllte Tanks
2. unbeabsichtigte Verschiebung der Ladung und anderer Gewichte
3. zusätzliche Gewichte: Wasser auf Deck, Wasser in lecken Räumen, Vereisung
4. Winddruck
5. Zentrifugalkraft im Drehkreis
6. bis 8. besondere Beanspruchungen, z. B. Grundberührung, hängende Lasten, Trossenzug (Schlepper)

9. Berichtigung des aufrichtenden Moments wegen Seegangs

10. Sicherheit (Saldo) (Diese Unterstreichungen nicht im Originalaufsatz)

Hebelarme der aufrichtenden Momente:

11. für den betrachteten Beladungszustand einschließlich Korrekturen
12. von mit tragenden Aufbauten, Decksladungen usw." Ende des Zitates.

Alle auftretenden Momente zur Beurteilung der Kentersicherheit schon beim Entwurf zu berücksichtigen, war ein wegweisender Ansatz für die Entwicklung von Stabilitätskriterien. Bis dahin war die Verwendung der 1939 aus Schiffsunglücken abgeleiteten Kriterien von Rahola für die Hebelkurve in Glattwasser üblich. Die Wendelbilanz bedeutet eine Hinwendung zur Berechnung aller wirkenden Momente am Schiff und gab damit der Forschung und Praxis zur Erhöhung der Schiffssicherheit wesentliche Impulse.

Wendel schreibt auch /VDI 1958/, Zitat: "*Mit der kaufmännischen Bilanz teilt diese Gegenüberstellung die Eigenschaft, dass einige Posten unsicher sind*", Ende des Zitates. Das trifft vermutlich heute, genau 50 Jahre später, noch immer zu, obwohl wir seitdem eine dramatische Entwicklung der Berechnungsmethoden und auch der Darstellung der Ergebnisse zu verzeichnen haben (siehe z. B. die von Kuo 1975 begründeten internationalen STAB Konferenzen und die IMO Workshops). Die Entwicklung geht in Richtung "Performance – Based Criteria", d.h. das Seeverhalten des Schiffes soll direkt in die Sicherheitsvorschriften zur Intaktstabilität eingehen /Krüger et al 2007 und Belenky et al 2008/.

Die Segelschulschiffe "Pamir" und "Gorch Fock"

Wendel hatte die Stabilitätsbilanz zuerst zur Klärung von Schiffsverlusten auf See herangezogen, so 1954 für das MS "Irene Oldendorff", dann zur Analyse des Untergangs der Viermastbark "Pamir" am 21. Sept. 1957 südwestlich der Azoren. Von den 86 Mann Besatzung des Segelschulschiffes der deutschen Handelsschiffahrt wurden nur sechs gerettet.

Bild 1 zeigt die Stabilitätsbilanz der "Pamir" gemäß dem Seeamtsgutachten von Wendel /VDI 1958/. Wir erkennen den beträchtlichen Anteil (c) am krängenden Moment aus Winddruck, (d) aus übergehender Getreideladung, und schließlich den Einfluss des Seegangs (e) als Reduktion des aufrichtenden Momentes (a). Die Bilanz aus (a-b) ist bis 35 Grad Neigung negativ, das Kentern mit Verlust der "Pamir" findet eine rechnerische Erklärung.

So war es nur folgerichtig, dass das 1958 bei Blohm und Voss in Hamburg gebaute Segelschulschiff "Gorch Fock" der jungen deutschen Bundesmarine von vornherein mit höchstmöglicher Sicherheit gebaut werden musste. Professor Wendel erhielt vom Bundesministerium für Verteidigung den Auftrag, die Sicherheit gegen Kentern und Sinken detailliert zu untersuchen, sowie Bau und Inbetriebnahme des Schiffes zu begleiten.

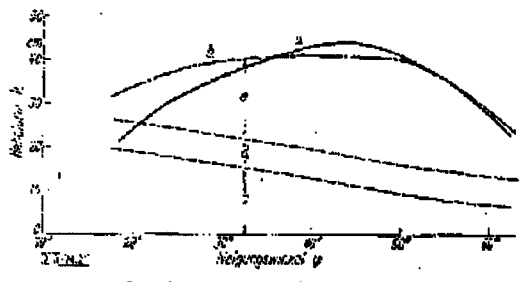


Bild 1: Hebelarmkurven nach der Stabilitätsberechnung für ein Segelschulschiff (Pamir).

- a aufrichtende Momente
- b krängende Momente
- c Winddruck
- d übergehende Ladung
- e Seegang

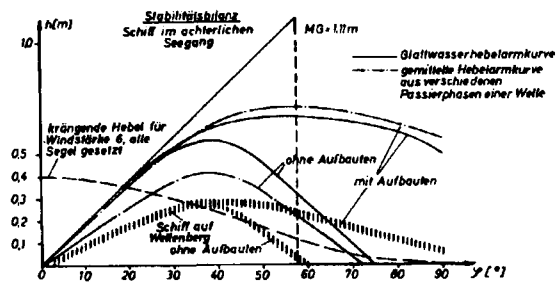


Bild 2: Momentenbilanz: Schiff im achterlichen Seegang, Wind B 6 querein. Zustand wie Bild 23

Bild 1: Bilanz SSS "Pamir"

Bild 2: Bilanz SSS "Gorch Fock"

So wurden Bilanzen für unterschiedliche Betriebszustände der Gorch Fock aufgestellt /1960/. Hier ist schon die Struktur der Hebelbilanz zu erkennen, wie sie sich dann in der von Wendel und Mitarbeitern entwickelten Bauvorschrift der Bundesmarine herauskristallisierte, der sog. BV1031. Bild 2 zeigt den krängenden Hebel (Moment bezogen auf Displacement) bei Windstärke 6 und allen Segeln gesetzt. Der Hebel des aufrichtenden Momentes GZ ist dargestellt für Glattwasser (mit und ohne Aufbauten), für das Schiff in regelmäßiger achterlicher See im Wellenberg sowie gemittelt über die Passierphase, Wellenlänge gleich Schiffslänge, Wellenhöhe nach einer Formel, die auf der 0,1% Häufigkeit der Wellen im Nordatlantik beruht, wobei die Steilheit mit der Länge abnimmt.

Die Hebelarmkurve im Seegang

Modellmessungen im Tank zeigten, dass in längs (und in schräg) laufender See das aufrichtende Moment große Schwankungen erfährt /Grim 1951, Arndt und Roden 1958, Paulling 1961/. In der Regel ist das Rückstellmoment im Berg verringert und im Tal vergrößert, abhängig von Schiffsform, Freibord, Aufbauten und Proportionen der Hauptabmessungen. Der Mittelwert der Schwankungen während einer Passierperiode liegt oft unterhalb des Hebels in Glattwasser. Vereinfacht wird das Mittel aus Berg und Tal betrachtet.

Bild 3 zeigt ein typisches Beispiel für ein schnelles Schiff. Gerechnet wird trotz der Dynamik eines Schiffes im Seegang rein hydrostatisch. So werden die Orbitalbewegung der Wasserteilchen und der Einfluss der Schiffsbewegungen vernachlässigt. Auch Trimmgleichgewicht wird nicht gerechnet. Die Welle ist regelmäßig und hat die Kontur einer Trochoide, eine recht gute Annäherung einer Wellengruppe in unregelmäßiger See. Es handelt sich gewissermaßen um eine hydrostatische Ersatzberechnung der Veränderung des aufrichtenden Momentes in längs laufender See. Im Gegensatz zum Glattwasser erfasst

die Wellenkontur die jeweilige Unterwasserform in Berg und Tal. Insbesondere geht der effektive Freibord stark in das Ergebnis ein.

Kenterversuche an Schiffsmodellen in Plön und Eckernförde 1961 bis 1968

Es fehlt noch die Sicherheitsreserve, der "Saldo" gemäß Punkt 10 der Wendelbilanz. In anderen Worten, welche Mindestwerte an Hebelarmen auch im Seegang sind zu fordern?

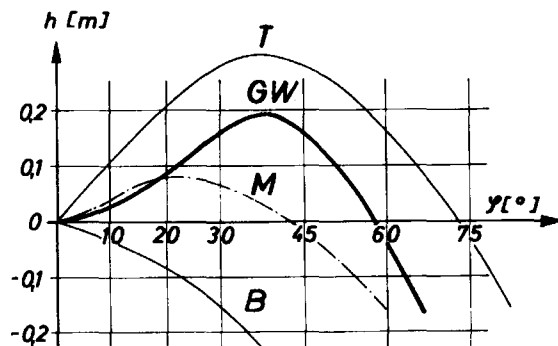


Bild 3: Aufrichtende Hebel in Seegang und in Glattwasser GM 23cm

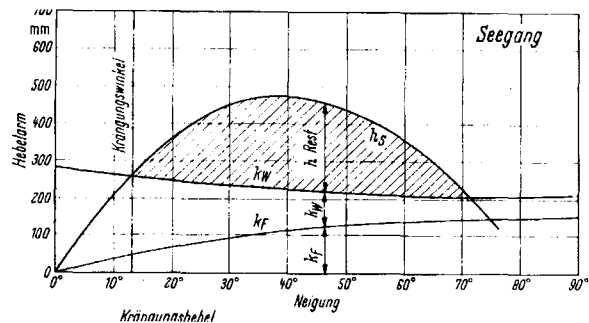


Bild 4: Bilanz für Mittelkurve im Seegang mit frei bewegl. Flüssigkeiten und Wind

Gemäß der Idee von Siegmund Roden 1958 entwickelte eine Forschungsgruppe bei Prof. Wendel Kenterversuche mit frei fahrenden Schiffsmodellen in natürlicher Windsee, die sog. "Plöner Versuche". Der Gewichtsschwerpunkt wurde so hoch gelegt, dass die Fahrzeiten bis zum Kentern nicht zu lang waren. Es wurde also ein unsicheres Schiff untersucht. Wegen des willkürlichen Versuchsbeginns bezogen auf die Wellenfolge und der Unregelmäßigkeit des Seegangs ergaben sich völlig unterschiedlich lange Fahrzeiten des Modells bis zum Kentern, und es war nie vor auszusehen, wann und ob das Modell überhaupt kentern würde. Daher wurde die gleiche Versuchsvariante für eine statistische Auswertung bis etwa zehnmal wiederholt, um nicht irrtümlich eine dem richtigen Wert benachbarte Wahrscheinlichkeit des Kenterns als Ergebnis anzusehen (Gütefunktion zur Erfassung sog. Fehler zweiter Art).

Die relative Häufigkeit des Kenterns nahm über der Zeit exponentiell ab. Kentern trat durch den Abbau des aufrichtenden Momentes in längs- und schräg laufender See ein, sowohl bei See von achtern als auch von vorn. Auch das Aufschaukeln der Rollbewegung in einer Wellengruppe bis zum Kentern, die sog. Mathieusche Resonanz, konnte über die Ausbildung von Wellengruppen in unregelmäßiger See sehr gut beobachtet werden, siehe Bild 5. In seitlicher See trat bei gleicher Stabilität kein Kentern auf, entgegen landläufiger Ansicht.

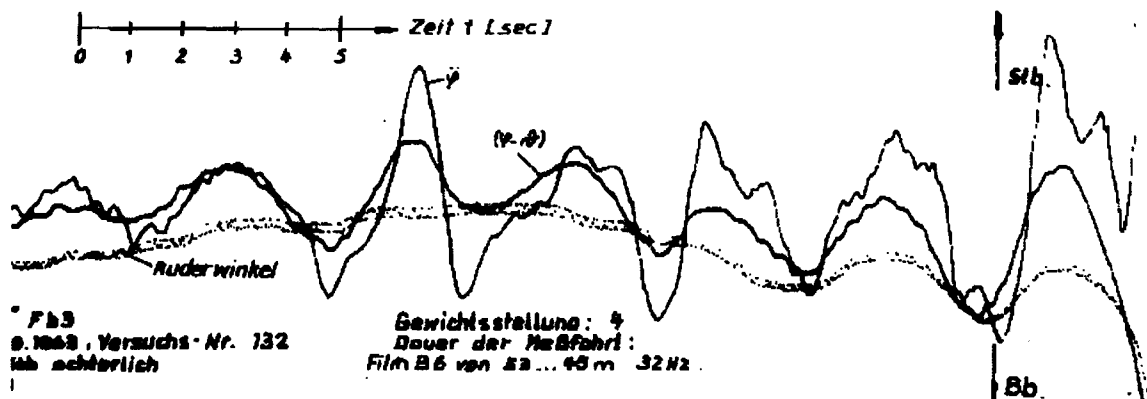


Bild 5: Messschrieb Plön 1963: 45Grad schräg achterliche See mit Kentern nach Steuerbord

Die erforderlichen Stabilitätswerte wurden über eine Extrapolation der Grenzwellenhöhe des Kenterzustandes ermittelt. Das Verhältnis Begegnungsperiode zu mittlerer Kenterzeit als die relative Häufigkeit ergibt die Grenzwellenhöhe H_k , berechnet nach einer Formel von Longuet-Higgins /1952/. Aus der Exponentialverteilung der Kenterzeiten wird die größere und damit seltenere noch zu überstehende Wellensteilheit berechnet, die in dem 95% aller gemessenen Kenterfälle umfassenden Zeitraum nur noch 5% Kentern erwarten lässt. Das GM der Messreihe wird im Verhältnis beider Wellensteilheiten vergrößert, und man erhält das Mindest - GM bzw. die zugeordneten Mindesthebel für Sicherheit gegen Kentern. Das damals angewendete Verfahren für die Bauvorschrift BV1031 wurde in der Untersuchung zum Kentern des Kümo "Lohengrin" beschrieben /Boie und Kastner, mit Vorwort Prof. Wendel 1963, auch ausführlich in Kastner NATO 1967/.

Der "Saldo" der Hebelarmbilanz für das intakte Schiff ergab sich in Auswertung der umfangreichen Kenterversuche. So wurde in der Stabilitätsvorschrift der Bundesmarine folgendes festgelegt /Wendel et al 1965/:

Die krängenden Hebel aus frei beweglichen Flüssigkeiten und aus Drehkreis werden mit dem aufrichtenden Hebel in Glattwasser bilanziert. Hinzu kommt die Bilanz der Hebel aus Flüssigkeit und Wind mit den Hebeln im Seegang, hydrostatisch als Mittel aus der Lage in Berg und Tal einer Trochoidenwelle von Schiffslänge. Für beide Fälle werden statische Krängung auf 15 Grad und Resthebel auf 10 cm begrenzt (bzw. 25 Grad mit 20 cm Saldo unterhalb von 55 Grad). Als zusätzliche Absicherung musste der Saldo im Wellenberg im Maximum größer als 5cm sein, mit einem Umfang von mindestens 10 Grad.

Zur Vereinfachung wurden Resthebel und Winkelumfang gewählt, dabei aber darauf geachtet, dass damit eine gewisse Restfläche implizit definiert ist. Die Berechnung der Hebel im Seegang ist zwar rein hydrostatisch, erlaubt jedoch auf einfache Weise die Erfassung der extremen Veränderung der vom Wasser benetzten Schiffsförmigkeit im Seegang. Das Rollverhalten wird über die Kenterversuche und den zu fordernden Saldo berücksichtigt.

Vorbild in Wissenschaft und Praxis

Ergebnisse mit bis heute wirkendem Einfluss in Schiffsentwurf und Schiffssicherheit wurden möglich durch zahlreiche neuartige, ja seinerzeit revolutionäre Ansätze von Professor Wendel. Hinzu kam seine Fähigkeit, junge Forscher anzuregen und ihnen Freiraum für selbständiges Arbeiten zu geben. Seine persönlichen Hinweise beschränkten sich auf knappe, scheinbar belanglose Bemerkungen, deren diffiziler Kern sich erst nach längerem Nachdenken erschloss.

Schon zu Lebzeiten war Professor Kurt Wendel hoch verehrt. Typisch für ihn waren eine hanseatisch ruhige und gediegene Art, unkonventionelles Denken, ein immer elegantes Äußeres, die betonte Pflege der Fachsprache und eine absolute Fairness.

Für seine Schüler und Mitarbeiter war er Vorbild in wissenschaftlichem Denken, in seiner Offenheit für Neues, der Freude an schwierigen Aufgaben, dem Sinn für praktische Aufgabenstellungen in Schiffsentwurf und Theorie.

Schrifttum

Wendel, K.: Rollschwingungen und Hebelarmkurve. "Schiffbau 1940

Wendel, K.: Wann kentert ein Schiff? *Hansa* 87, S. 972-974, Hamburg 1950

Wendel, K.: "Stabilitätseinbußen im Seegang und durch Koksdeckslast", Untersuchungen an einem mittelgroßen Seeschiff (Irene Oldendorff), *Hansa* 91, S. 2000-2002, Hamburg 1954

Wendel, K., Platzoeder, W.: Der Untergang des Segelschulschiffes "Pamir". *Hansa* 95, S. 367ff, Hamburg 1958

Wendel, K.: "Sicherheit gegen Kentern". *VDI-Zeitschrift*, Band 100, 1958, Nr. 32, S. 1523/33

- Wendel, K.: "Safety from Capsizing". *Fishing Boats of the World*, No. 2, London 1960
- Wendel K.: Bemessung und Überwachung der Stabilität. *Jahrbuch STG*, Vol. 59, Hamburg 1965
- Wendel, K., Roden S., Kastner S.: "Studium der Bewegungen der Seeschiffe unter dem Einfluss von Seegang und Wind". *XXI. Int. Schiffahrtskongress*, 2/II, Stockholm 1965
- Rahola, J.: The Judging of the Stability of Ships and the Determination of the Minimum Amount of Stability. Helsinki 1939
- Grim, O., Das Schiff in von achtern auflaufender See. *Jahrbuch STG*, Vol. 45, 1951, S. 264-287
- Grim, O.: Rollschwingungen, Stabilität und Sicherheit im Seegang. *Schiffstechnik*, Band 1, Heft 1, 1952
- Longuet-Higgins, M.S.: On the Statistical Distribution of the Heights of Sea Waves. *Marine Research* 11/1952
- Arndt, B., Roden S., "Stabilität bei vor- und achterlichem Seegang". *Schiffstechnik*, Band 5, Heft 29, 1958
- Arndt, B., Kastner, S., Roden S.: Die Stabilitätsprüfung des Segelschulschiffes "Gorch Fock". *Schiffstechnik*, Bd. 7, Hamburg 1960
- Paulling, J., R.: The Transverse Stability of a Ship in a Longitudinal Seaway. *Ship Research*, Vol. 4, No. 4, 1961
- Roden, S., "Welche Ergebnisse liefern Kenterversuche mit Modellen?" *Schiffstechnik*, Vol. 9, No. 48, Hamburg 1962a, S. 165-169
- Roden, S., "Modellversuche in natürlichem Seegang". *Jahrbuch STG*, Vol. 56, Hamburg, 1962b
- Kastner, S.: "Kenterversuche mit einem Modell in natürlichem Seegang". *Schiffstechnik*, Bd. 9, No. 48, Hamburg 1962, S. 161-164
- Boie, K., Kastner, S., Vorwort von K. Wendel: Das Kentern des Motorschiffes "Lohengrin". *Hansa*, Vol. 101, No. 12, Hamburg 1964
- Kastner, S.: "Kenterversuche mit frei fahrenden Schiffsmodellen in natürlichem Seegang". *Bericht Bundesmarine*, No. T13-81-105-K502, Hamburg 1964
- Krappinger, O. und Sharma, S. D.: Sicherheit in der Schiffstechnik. *Jahrbuch STG*, Vol. 58, 1964
- Boie C., Seefisch F., Arndt B., Wendel K.: Vortragsgruppe Stabilität. *Jahrbuch STG*, Band 59, Hamburg 1965
- Kastner, S., Roden, S.: A new method at model scale for the study of the behaviour of ships. *IMO, STAB/INF*. 25, London 1965
- Kastner, S.: Bau eines frei fahrenden Schiffsmodells für Kenterversuche. *Institut für Schiffbau*, Schrift 2116, DFG-Bericht, Hamburg 1966
- Kastner, S.: Statistical analysis of the capsizing of ships in a natural seaway. NATO symposium "Engineering applications of statistical extremes", Faro, Portugal, Report *Institut für Schiffbau*, No. B-222, Hamburg 1967
- Kastner, S.: Analyse von natürlichem Modellseegang. *Schiffstechnik*, Vol. 15, No. 75, Hamburg 1968
- Kobylinski, L., Dudziak, J.: Model tests of ship stability and seakeeping qualities in open water. *Ship Research Institute*, Publication No. 21, Technical University, Gdansk 1969
- Kastner, S.: Das Kentern von Schiffen in unregelm. längslaufender See. *Schiffstechnik*. Hamburg 1969/1970
- Abicht, W.: Die Sicherheit der Schiffe im nachlaufenden unregelm. Seegang. *Schiffstechnik*, Hamburg 1972
- Paulling, J.R., Kastner, S., Schaffran S.: Exp. Studies of Capsizing of Intact Ships in Heavy Seas. Naval Architecture Dept., Univ. of California, Berkeley, Techn. Report for U.S. Coast Guard, Nov. 1972
- Horn G., Söding H., Kastner S., Abicht W., Isensee J.: Entwerfen von Schiffen und Schiffstheorie. Kolloquium an der TU Hannover zum 65. Geburtstag von Prof. Wendel, *Hansa*, Jg. 110, Nr. 15/16, Hamburg 1973
- Kastner, S.: On the statistical precision of determining the probability of capsizing in random seas. *STAB Conference*. Glasgow 1975
- Paulling, J.R., Oakley, O.H.; Wood, P.D.: Ship capsizing in heavy seas. *First STAB Conf.*, Glasgow 1975
- Takaishi, Y.: Experimental technique for studying stability of ships achieved in the ship research institute. *STAB Conf.*, Glasgow 1975
- Arndt, B., Brandl, H., Vogt, K.: 20 Years of Experience – Stability Regulations of the West-German Navy. *STAB82*, Tokyo 1982
- Krappinger, O. und Hormann, H.: Problemstellung und Lösungsansätze. *Jahrbuch STG*, 78/ 1984
- Blume, P. und Hattendorff, H.G.: Ergebnisse von syst. Modellversuchen zur Kenersicherheit. *STG* 78/1984
- Umeda, N., Matsuda, A., Hamamoto, M., Suzuki, S.: Stability assessment in the light of model experiments. *J Mar Sci Technol*, 1999
- Cramer, H., Krüger S.: Numerical capsize simulations and consequences for ship design. *STG*, Gdansk 2001
- Kobylinski, L., Kastner S.: Stability and Safety of Ships. *Elsevier Ocean Engg. Book Series*, Vol. 9, Oxford 2003
- Belenky, V., Sevastianoff, N.: Risk of Capsizing. *Elsevier Ocean Engg. Book Series*, Vol. 10, Oxford 2003
- Kobylinski, L.: Capsizing Scenarios and Hazard Identification. Madrid, *STAB Conference*, Madrid 2003
- Hennig, J.: Generierung und Analyse extremer Seegangsbedingungen. *Trans. STG*, Vol. 99, Berlin 2005
- Kastner, S.: A Historical Review on Ship Model Testing in Open Waters, Symposium der TU Danzig. "50 Jahre Messlabor", Ilawa 2006
- Krüger, S., Kluwe, F.: Dynamic Stability Criteria Based on the Simulation of Full Scale Accidents. *PRADS*, Houston 2007
- Belenky V., de Kat J.O., Umeda N.: Toward Performance-Based Criteria for Intact Stability. *Marine Technology*, Vol. 45, No. 2, 2008

Wendel und Computer

von Heinrich Söding

Zur Halbzeit des heutigen Jubiläums, vor 50 Jahren, wurde ich Hilfsassistent am Lehrstuhl von Professor Wendel in Hannover. Das war für mich ein Glücksfall, denn ich konnte nicht nur das in dieser Tätigkeit verdiente Geld gut gebrauchen; vielmehr erlaubte mir diese Position, Professor Wendel gelegentlich zu fragen, ob er mich bei seinen wöchentlichen Fahrten zwischen Hamburg und Hannover mitnehmen könne, was er niemals ablehnte. So brauchte ich für Fahrten zu meinen Eltern weder die teure Eisenbahn zu benutzen, noch musste ich die Fahrt als Beifahrer auf der Vespa meines Freundes Hubertus Zunker machen. Allerdings waren die Fahrten mit Prof. Wendel, der schnelles Fahren schätzte, nicht immer ganz ungefährlich. Ich zitiere hierzu aus einem Gedicht, das Bruno Arndt, ein Mitarbeiter Wendels am hamburgener Lehrstuhl und später in der Schiffko, zu Wendels 80. Geburtstag gemacht hat:

Der Mensch erklomm die nächste Stufe,
als er folgte einem Rufe
auf den Lehrstuhl nach Hannover.
Dort schlief er nächtens auf dem Sofa
und fuhr nach Hamburg hin und her
mit einem Auto im Verkehr,
was anfangs schlimme Folgen hatte
fürs Kleingetier von Hund bis Ratte.

Wichtig für den hannoverschen Lehrstuhl von Professor Wendel ebenso wie für meine eigene berufliche Laufbahn wurde Wendels Assistent, Herr Knüpfper. Er arbeitete an einer Dissertation, deren Ziel es war, Leckrechnungen statt durch langwierige und fehleranfällige Berechnungen mit Nomogrammen durchzuführen. Abb. 1 zeigt einen Typ dieser von Knüpfper entwickelten Nomogramme. Abhängig von diversen dimensionslosen Parametern, konnte man mit einem solchen Nomogramm durch Ziehen einiger Linien (Pfeile) die dimensionslose Tiefertauchung und Vertrimmung bestimmen, die ein Schiff erfuhr, wenn eine Abteilung voll Wasser lief. Die dimensionslosen Parameter waren z.B. verschiedene Völligkeitsgrade des ganzen Schiffes und von Schiffsteilen, die Lage und Länge der getauerten Abteilung, die Doppelbodenhöhe (falls der Doppelboden intakt blieb) etc. Für die Aufstellung eines solchen Nomogramms mussten einige tausend Leckfälle durchgerechnet werden. Knüpfper benutzte dazu den programmgesteuerten Rechenautomaten (der Ausdruck Computer war noch nicht üblich) der Technischen Hochschule Hannover, für den er die meines Wissens weltweit ersten Leckstabilitätsprogramme machte. Später zeigte sich, dass die Nomogramme wenig genutzt wurden, dass aber das Hilfsmittel zu ihrer Aufstellung, Knüpfpers Rechenprogramme, für die Werftindustrie enorm wichtig wurden. Die Programme berechneten nicht nur die Tiefertauchung und Vertrimmung, sondern auch die Krängung, die im Fall unsymmetrischer Flutung einer Schiffsabteilung auftrat. Leckräume wurden dazu aus Teilräumen zusammengesetzt (Abb. 2). Für jeden Teilraum wurden diverse Fälle unterschieden (Abb. 3). Neben dem genauen Programm L II, das Schnitte der Wasserlinie mit der oberen und unteren Begrenzung des Leckraums beachtete, gab es ein ungenaueres, dafür aber schnelleres Programm LI, das diese Schnitte vernachlässigte. Abb. 4 zeigt, in welcher Form der Rechner die Ergebnisse ausgab, und Abb. 5 zeigt die auf Papier ausgedruckten und durch manuelle Eintragungen ergänzten Ergebnisse. Wie man sieht rechnete man auf der IBM 650 mit ganzen Zahlen; auch das Komma wurde in die Ergebnisse von Hand eingetragen.

Ich selbst war zu der Zeit noch Student. Die Schiffbau-Studenten mussten damals einen Linienriss zeichnen und für die entworfene Form ein Formkurvenblatt und die Pantokarenen berechnen. Ich hatte mir gedacht, ich könnte die öde Rechnerei vielleicht vermeiden, indem ich das 'Elektronengehirn' der Technischen Hochschule Hannover benutzte, und hatte deshalb einen Kurs 'Einführung in die

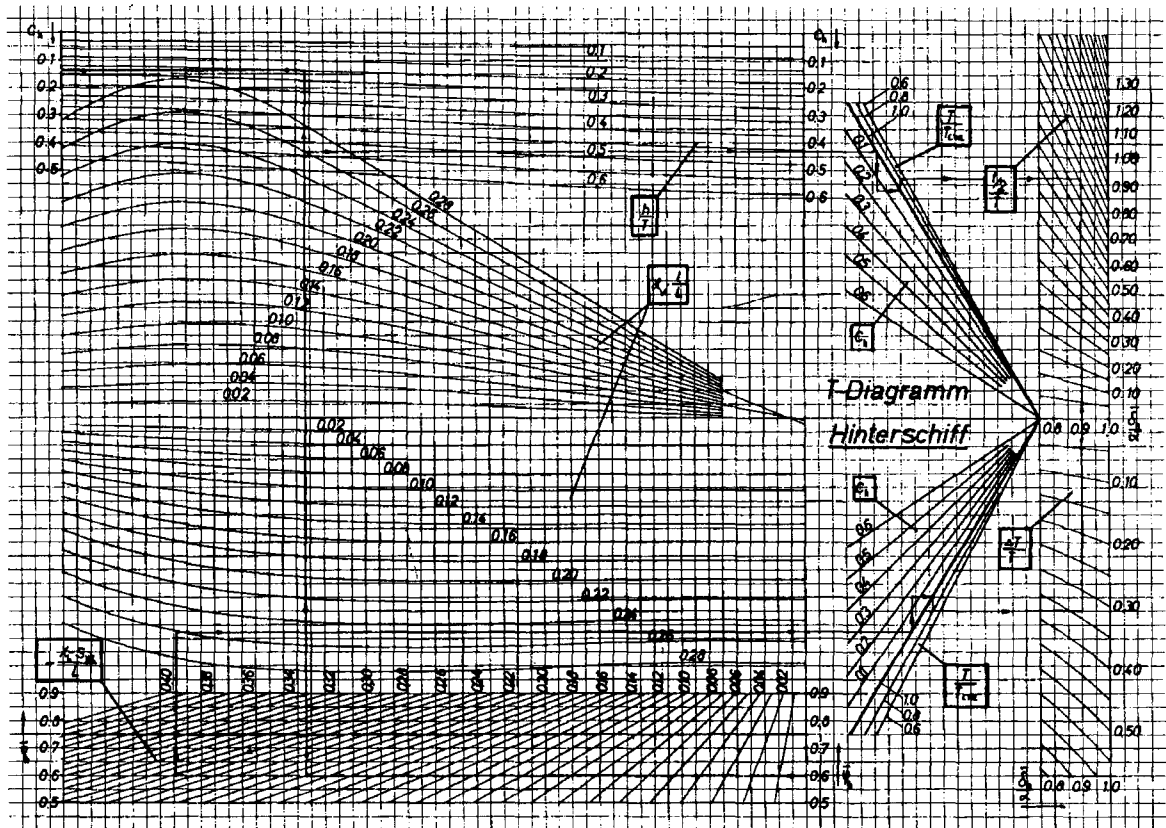


Abb. 1. Knüpfers-Nomogramm zur Bestimmung von Tiefertauchung und Vertrimmung eines Schiffes bei Flutung einer wasserdichten Abteilung. Aus *Söding* (1968)

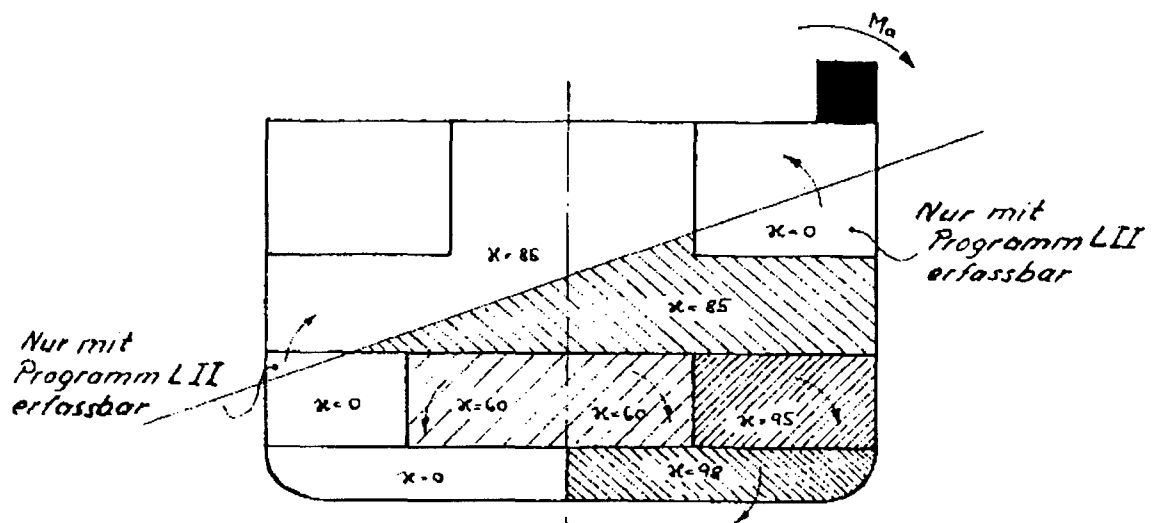


Abb. 2. Zusammensetzung eines Leckraums aus Teilräumen. Aus *Knüpfers* (1961)

Bedienung des Rechenautomaten IBM 650' belegt, an dem sonst nur Assistenten und wissenschaftliche Mitarbeiter teilnahmen. Als ich meinem Chef, Herrn Knüpffer, mitteilte, dass ich mit der Maschine umzugehen gelernt hatte, stellte er mir die Aufgabe, eine Pantokarenrechnung zu programmieren, sowohl für intakte als auch für leckere Schiffe. (Pantokaren sind Kurven, aus denen sich die aufrichtenden Momente infolge des Wasserdrucks auf ein geneigtes Schiff bestimmen lassen.)

Ich ergänzte also die Knüpffersche Programmserie um die Pantokaren-Berechnung, wobei ich die Knüpffersche Teilraumdefinition erweiterte (Abb. 6 und 7), um die damals aufkommende Bauart von Massengutschiffen mit Wingtanks behandeln zu können. Seit 1959 oder 1960 wurden die Programme auch im Auftrag von Werften eingesetzt. 1961 fand eine STG-Fachausschusssitzung statt, bei der der Rechner gezeigt und die vorhandenen Programme erläutert und vorgeführt wurden. Seitdem nahmen die Aufträge durch die Werftindustrie stark zu. Diplomingenieure und Hilfsassistenten waren am Lehrstuhl Prof. Wendels in Hannover damit beschäftigt, diese Berechnungen durchzuführen.

Als ich 1963 mein Diplomexamen bestanden hatte, zeichnete sich ab, dass neue Programme notwendig wurden, denn der IBM-Rechner sollte in absehbarer Zeit außer Dienst gehen, und die Programme waren im Maschinencode geschrieben, d.h. sie bestanden aus rund 1500 10-stelligen Zahlen und waren nur für den jeweiligen Rechnertyp geeignet. Natürlich durfte keine Unterbrechung des Rechen-Service auftreten, an den sich viele Werften inzwischen gewöhnt hatten. Deshalb hatte Prof. Wendel bereits einen Mitarbeiter eingesetzt, der entsprechende Programme für den inzwischen angeschafften zweiten Rechner der TH Hannover von der Firma Zuse erstellte.

Professor Wendel befürchtete (wie sich später herausstellte, zu Recht), dass die Programme für den Zuse-Rechner nicht rechtzeitig bis zum Betriebsende der IBM 650 fertig werden würden. Deshalb stellte er mir die Aufgabe, neue Programme zu machen. Ich hatte inzwischen erkannt, dass die Lebensdauer von Programmen länger als die von Rechnern ist, und entschied mich deshalb, eine für verschiedene Rechner

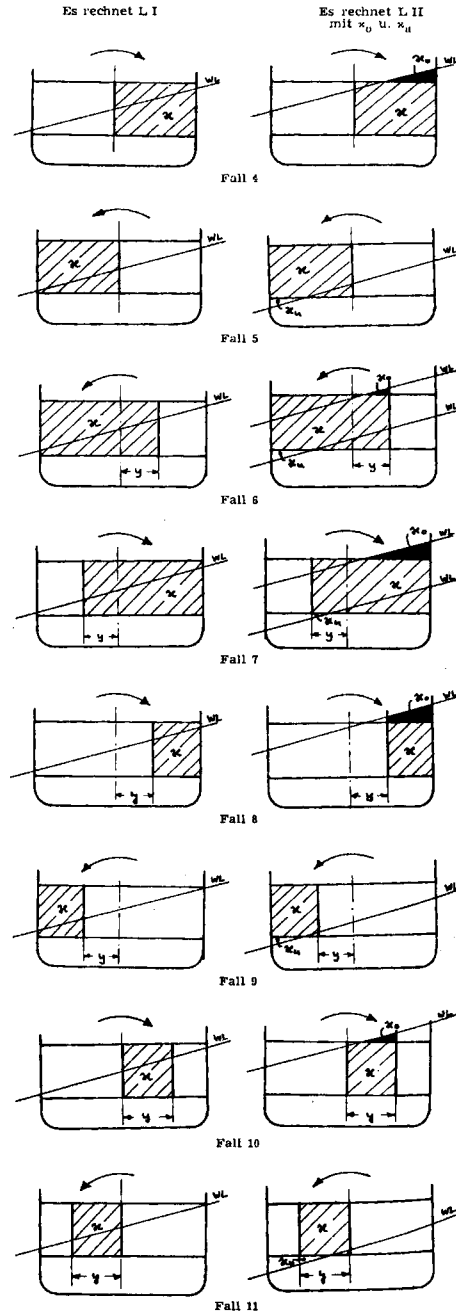


Abb. 3. Erfassung von verschiedenen hoch geteteten Teilräumen durch Knüpffers Programme L I (links) und L II (rechts)

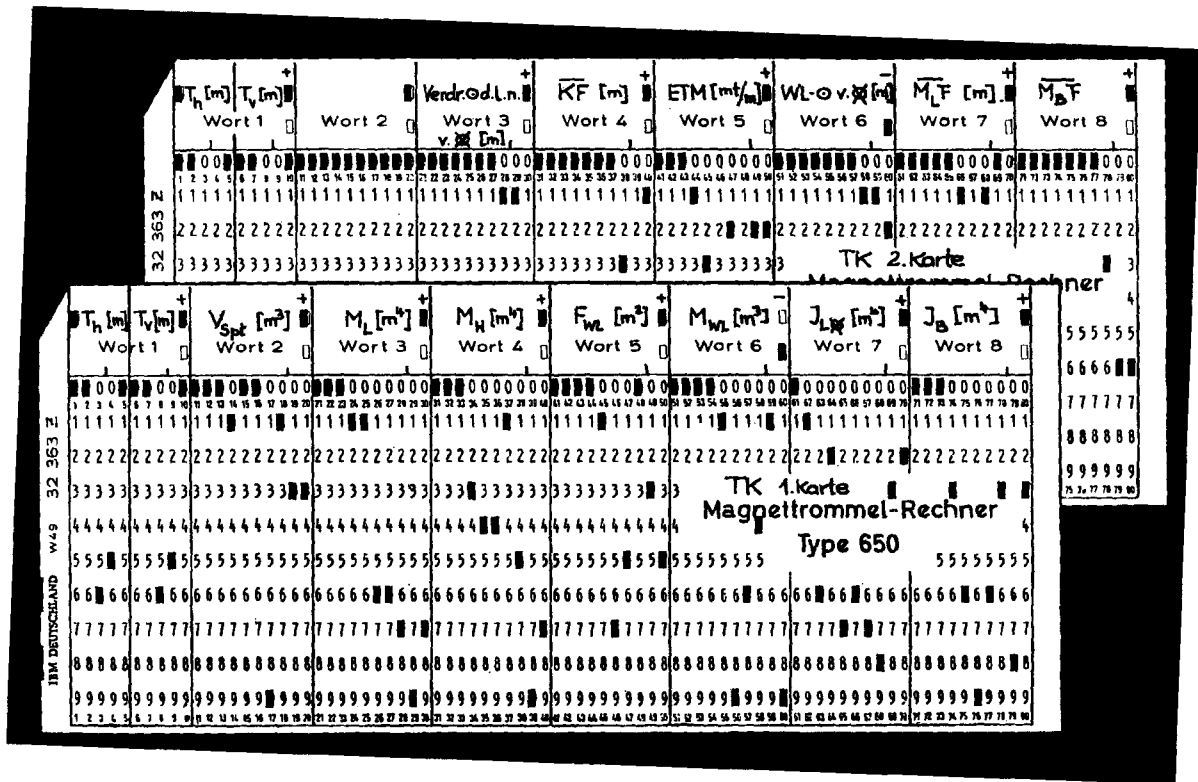


Abb. 4. Beispiel-Ergebnis des Kurvenblatt-Programms. Aus Knüpfner (1961)

	T_h [m]	T_v [m]	V_{spt} [m ³]	M_L [m ³]	M_H [m ³]	F_{WL} [m ³]	M_{WL} [m ³]	J_L [m ³]	J_B [m ³]
1. Ausgangsschwimmlage									
1.	5,50	5,50	8373,79	125411,1	24105,53	1686,41	161,77	14567,2770	35521,93
2.	5,50	5,50	7855,49	27257,70	22131,99	1534,46	4482,47	133169,51	32419,82
	6,55	5,19	9032,77	-50561,9M	27953,90	1734,82	-2583,53	159390,80	36440,73
	6,55	5,19	8408,98	12689,54	25384,65	1582,13	1762,47	146814,230	33280,84
	Endschwimmlage: 6,55 m 5,15 m		$\Delta M_G = 0,08$ m (%F = %)	$\Delta M_G = 0,11$ m (%F = 100)	$M_{G_1} = 1,88$ m	$M_{G_2} = 1,09$ m	$M_{G_3} = 0,60$ m	102040506	
2. Ausgangsschwimmlage									
1.	6,50	6,50	10091,35	116666,9	344161,0	1750,38	-1979,00	162862,209	36963,83
2.	6,50	6,50	9420,64	30720,94	31547,66	1597,62	2375,67	150251,235	35783,15
3.	7,75	6,13	10931,12	-12887,68M	40230,59	1805,65	-5211,68	179199,364	38312,14
	7,75	6,13	10114,49	10363,45	36350,35	1595,11	776,70	161854,790	32927,94
	7,71	6,15	10911,60	-11871,40M	4082,80	1804,12	-5107,66	1787269,79	38270,95
	7,71	6,15	10102,18	11169,83	34253,51	1593,80	880,38	161383,819	32887,53
	Endschwimmlage: 7,70 m 6,14 m		$\Delta M_G = 0,19$ m (%F = %)	$\Delta M_G = 0,22$ m (%F = 100)	$M_{G_1} = 2,01$ m	$M_{G_2} = 1,21$ m	$M_{G_3} = 0,73$ m	102040506	

Abb. 5. Auf Papier übertragenes und manuell aufbereitetes Ergebnis des Kurvenblatt-Programms. Aus Knüpfner (1961)

geeignete Programmiersprache, nämlich Algol 60, zu wählen, obwohl dies die Rechenzeit vervielfachte. Die Verwendung einer komfortablen Programmiersprache war auch notwendig, um innerhalb der Zeitspanne bis zum Betriebsende des ersten Rechners die vielen inzwischen eingeführten Programme zu ersetzen. Auf dem Zuse-Rechner lief bereits ein Algol-Compiler, mit dem die Programmentwicklung begonnen werden konnte. Für die kommerziellen Berechnungen wäre die Maschine mit Algol-Programmen zu langsam gewesen, um alle Aufträge in der beschränkten Zeit durchzuführen, die uns die Maschine zur Verfügung stand. Aber etwa gleichzeitig mit dem Abschalten des IBM-Rechners wurde ein wesentlich schnellerer Rechner von Contol Data in Betrieb genommen. So gelang es, den Rechenservice nach dem Abschalten des IBM-Rechners ohne Unterbrechung fortzusetzen. Im Lauf der nächsten Jahre wurden dann mehrere hundert Schiffe durchgerechnet. Ich selbst war etwa 3 Jahre lang mit der Durchführung solcher Berechnungen betraut; mein Vorgänger war Elmar Fritzsche, meine Nachfolger in dieser Tätigkeit waren vor allem Neithard Heinecke und Ingvar Poulsen. Einige Auftraggeber wandten sich direkt an den Lehrstuhl Prof. Wendels in Hannover; andere beauftragten die Schiffko, das von Wendel gegründete hantiger Ingenieurbüro. Dieses ließ die Berechnungen dann am Lehrstuhl in Hannover durchführen; später schaffte es sich dann eigene Rechner an, um die Aufträge

allein abwickeln zu können.

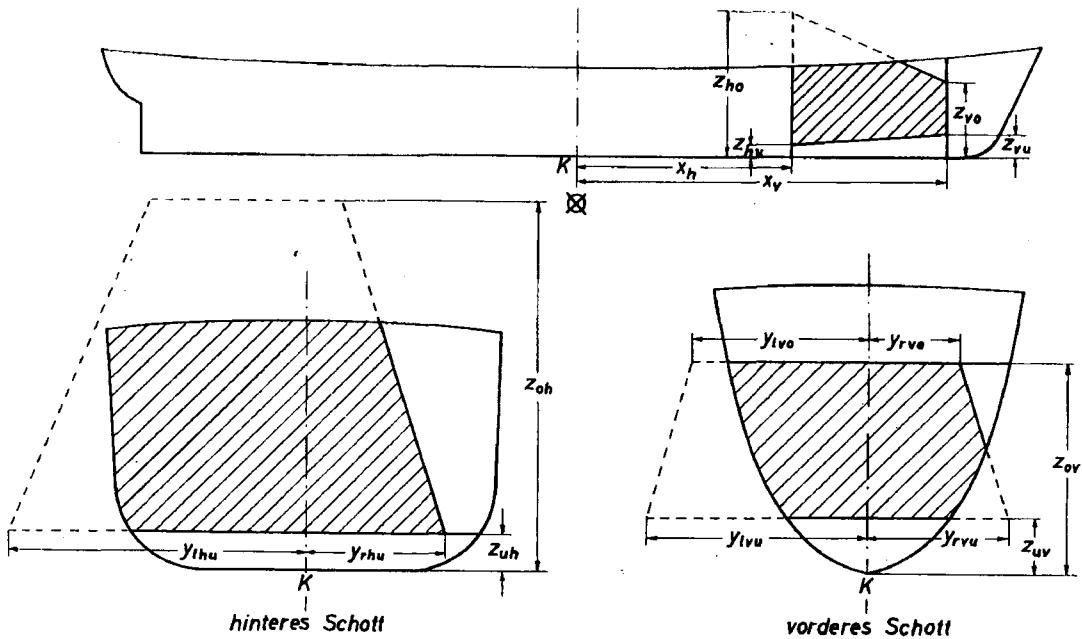


Abb. 6. Teilräume des Leckpantokarenenprogramms LH . Aus Knüpfper (1961)

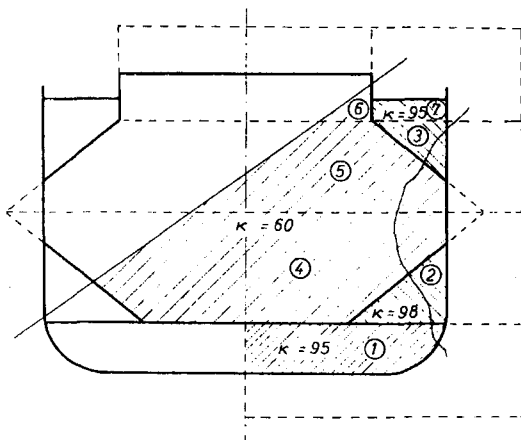


Abb. 7. Zusammensetzung eines Leckbereichs aus Teilräumen beim Programm LH. Aus Knüpfper (1961)

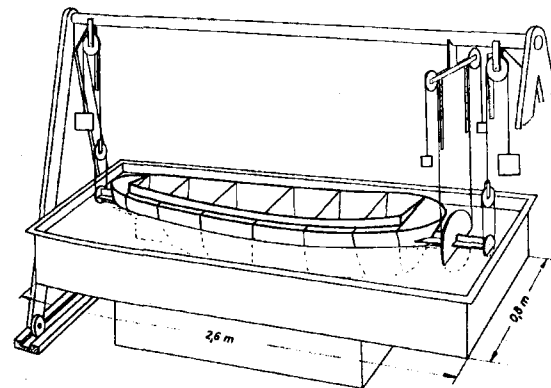


Abb. 8. Bestimmung des Leckverhaltens durch Modellversuche nach der Bratspießmethode. Aus Völker (1961)

Statt unterschiedlicher Programme für die verschiedenen Arten von schiffshydrostatischen Berechnungen hatte ich für die CDC-Maschine ein einziges Programm gemacht und es Archimedes genannt. Es wurde später von Ingvar Poulsen in Fortran übertragen und wurde in dieser Fassung noch jahrzehntelang an vielen Stellen eingesetzt. Die häufigsten Anwendungen betrafen:

- Kurvenblätter; diese stellen geometrische Daten aller Art für den getauchten Teil des Schiffsrumpfes abhängig von der Tauchtiefe dar.
- Pantokarenen und Hebelarme der aufrichtenden Momente in glattem Wasser und in Wellen
- Querkräfte und Biegemomente in Spantschnitten durch den Rumpf
- Peiltafeln; sie geben das Tankvolumen abhängig von der Füllhöhe oder der Benetzungslänge eines Peilstabs an, der in einem Rohr in den Tank geschoben wurde.

- Kräfte und Momente beim Längs-Stapellauf von Schiffen.

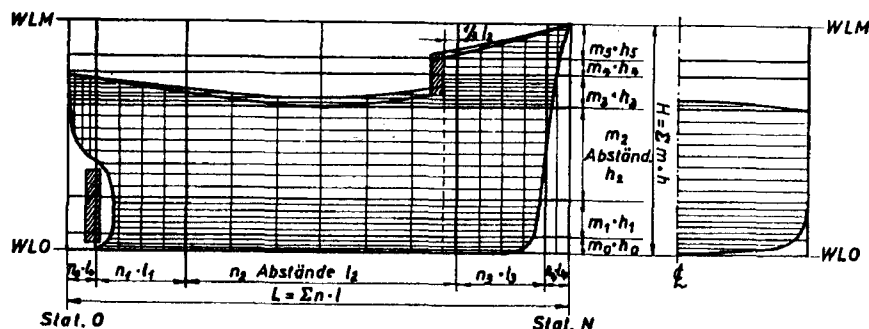


Abb. 9. Anordnung von Aufmaßpunkten zur Beschreibung der Schiffsförm nach der Methode von Kantorowitz. Aus Prohaska (1959)

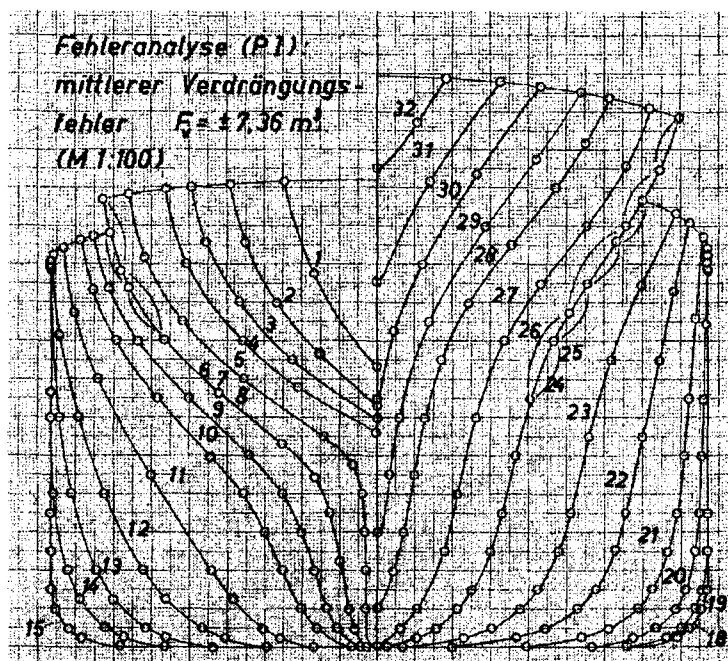


Abb. 10. Anordnung von Aufmaßpunkten zur Beschreibung der Schiffsförm nach der Methode von Knüpfner. Aus Knüpfner (1961)

Leckrechnungen wurden in dieser Zeit in großer Zahl durchgeführt, u.a. wegen der neuen Leckvorschriften 'SOLAS 60' für Fahrgastschiffe und wegen neuer Freibordvorschriften, die bei Massengutschiffen einen größeren Tiefgang erlaubten, wenn diese Schiffe bestimmte Lecksicherheitskriterien erfüllten (B-60%-Regel). Die Regel wurde nicht nur auf Neubauten, sondern auch auf schon fahrende Schiffe angewendet; so ergab sich der Bedarf für sehr viele Berechnungen.

Eine anderes Thema war das von Wendel propagierte Wahrscheinlichkeits-Konzept der Lecksicherheit. Es erforderte ein für viele schwieriges Umdenken. Bei einem Besuch, den Elmar Fritzsche und ich im Rahmen unserer Rechen-Tätigkeit bei einem Werft-Vorstand machten, sagte dieser sinngemäß: In der Theorie mag die Wahrscheinlichkeitsrechnung ja stimmen, aber in der Praxis tritt immer das Ereignis ein, mit dem man am wenigsten rechnet. Ich hielt das für eine witzige Bemerkung, aber Elmar Fritzsche, der eine bessere Menschenkenntnis besaß, sagte hinterher: Das meint der wirklich! Jedenfalls musste Prof. Wendel sein Wahrscheinlichkeitskonzept vielfach gegen solche und ähnliche Argumente verteidigen. Er schlug deshalb vor, man solle die Entstehung von Löchern in der Schiffsf-Außenhaut, die an zufälligen Stellen und in zufälliger Größe infolge von Kollisionen entstehen, auf einem Rechner simu-

lieren, um die Lecksicherheitsexperten vom Wert der Wahrscheinlichkeitsbetrachtung zu überzeugen. Herr Knüpfner besprach das mit mir und vertrat die Meinung: Den Zufall kann man auf einem Rechner nicht simulieren, denn der Rechner macht nichts Zufälliges, sondern genau das, was ich ihm sage. Ich schlug vor: Man kann eine große krumme Zahl immer wieder mit 7 malnehmen, und wenn sie zu groß wird, um sie in einer Speicherzelle unterzubringen, lässt man die vorderste Ziffer weg. Dann ist die entstehende Zahlenfolge zwar nicht zufällig, aber sie wirkt auf Menschen, die die Rechenvorschrift nicht kennen, wie zufällig. Dies war das Konzept der Pseudo-Zufallszahlen. Vermutlich gab es das Konzept bereits, aber wir hatten noch nichts davon gehört. Viele andere offenbar auch nicht, denn *Prohaska (1959)* schreibt über den dänischen Dask-Rechner: "Eine Einheit mit 'Willkür-Zahlen' zum Anschluß an den Dask für Wahrscheinlichkeitsberechnungen ist in dem Laboratorium für Telefonie und Telegrafie in Kopenhagen entstanden." – Wendels Idee der, wie wir heute sagen, Monte-Carlo-Simulation von Kollisionsschäden wurde damals nicht verwirklicht, aber wir werden heute Nachmittag etwas darüber hören.

In Deutschland waren die von Wendels Mitarbeitern durchgeführten schiffstechnischen Berechnungen in den 60er Jahren des vorigen Jahrhunderts konkurrenzlos. In vielen anderen Ländern, insbesondere im Ostblock, standen Rechner erst viel später zur Verfügung. Alternativen wurden propagiert; ich nenne hier nur die in Wien von *Völcker (1961)* entwickelte 'Bratspießmethode', bei der Stabilitäts- und Leckrechnungen durch Modellversuche ersetzt wurden (Abb. 8). Eine ernsthafte Konkurrenz in Europa war nur das 'Schlüsselungsbüro für Schiffbauingenieure', das von dem dänischen Schiffbau-Professor C.W. Prohaska geleitet wurde. (Heute ist Prohaska vor allem bekannt als Mitautor der 'Hughes-Prohaska-Methode' zur Auswertung von Widerstands-Modellversuchen.) An der Technischen Hochschule Kopenhagen in Lyngby, wo Prohaska lehrte, waren seit 1955 etwa 100 'schlüsselungskundige Ingenieure' ausgebildet worden. Zwar fehlte ihnen, wie *Prohaska (1959)* schreibt, zunächst die notwendige Praxis, denn der erste, nach schwedischen Plänen gebaute Rechner 'Dask' ging erst 1956 in Betrieb. Aber durch diese frühe Vorbereitung konnte der teure Rechner seinen Betrieb sehr schnell aufnehmen, und das erste Büro für seine kommerzielle Nutzung hatten die dänischen Schiffbauer schon 1956 gebildet. Sie waren uns damit zeitlich voraus. Auch deutsche Werften nutzten den dänischen Service. Aus der Sicht der Nutzer war der Hauptunterschied zwischen beiden Systemen: Für die Dänen mussten die Auftraggeber die Schiffsform durch tabellarische Aufmasse beschreiben, die dann nur noch gelocht und nach allerlei Prüfungen für die eigentlichen Berechnungen benutzt wurden. Dagegen reichten bei Prof. Wendels Service die Werften Zeichnungen, insbesondere Linienriss und Generalplan, ein. Das Aufmaße-Nehmen gehörte zum Rechenservice dazu. Das war sinnvoll, denn die größere Freiheit, die Knüpfner für die Position der Aufmasse auf der Schiffsoberfläche und für die Definition von Teilräumen vorgesehen hatte, erlaubte es, gleiche Genauigkeit mit viel weniger Daten zu erreichen. Andererseits erforderte die Nutzung dieses freieren Aufmaß-Systems mehr Kenntnisse und Rücksicht auf die Art, in der die Aufmaße vom Programm verarbeitet wurden. Abb. 9 zeigt das dänische, Abb. 10 das deutsche System der Anordnung von Aufmaßpunkten auf der Außenhaut. Bei beiden Büros bekamen die Auftraggeber die Ergebnisse nach etwa einer Woche geliefert; nachträgliche Ergänzungen gingen meist erheblich schneller, insbesondere wenn sie telefonisch übermittelt wurden.

In der zweiten Hälfte der 60er Jahre wurden die Rechner allmählich billiger. Neue Hersteller traten auf, in Deutschland vor allem Siemens, und versuchten, Rechner an Werften zu verkaufen. Die deutsche Schiffbau-Industrie hatte damals einen viel größeren Anteil an der gesamten Wirtschaftsleistung als heute. Um Rechner an Werften verkaufen zu können, musste Siemens für Werften interessante Software mitliefern. Also trat Siemens an Prof. Wendel heran mit dem Vorschlag, dass sein Lehrstuhl schiffstechnische Programme für den Siemens-Rechner entwickeln sollte. Die Verhandlungen darüber zogen sich hin. Ich vermute, der Grund dafür war, dass Prof. Wendel fürchtete, damit das Kerngeschäft seiner Schiffko zu beschädigen. Schließlich sah er aber wohl ein, dass eine Ablehnung des Siemens-Vorschlags die Entwicklung nicht lange aufgehalten hätte, und schloss den Vertrag mit Siemens ab. Die Programme wurden dann vor allem von dem hannoverschen Lehrstuhl-Mitarbeiter Neithard Heinecke erstellt und pünktlich abgeliefert. Aber es scheint, dass viele Werften zwar Siemens-Rechner kauften, diese aber fast nur für nicht-technische Aufgaben benutzten. Jedenfalls fanden die schiffstechnischen

Siemens-Programme nie breite Anwendung.

Ein zentrales Problem für die Werften war damals die Erfassung der Schiffsform mit dem Computer mit einer Qualität, wie sie für die Fertigung der Bauteile erforderlich ist. Für die vorher genannten hydrostatischen Berechnungen reicht eine viel gröbere Formbeschreibung. Insbesondere die Formdetails an den Schiffsenden machten Schwierigkeiten. Viele Methoden wurden ersonnen und publiziert, aber fast alle waren für die Werftpraxis nicht geeignet, oder man konnte damit nicht die gesamte Schiffsoberfläche ausreichend gut erfassen. Auch in den Büros von Prof. Wendel und Prof. Prohaska wurde an diesem Problem gearbeitet. Etwa gleichzeitig, im Jahre 1967, promovierten bei Prohaska Herr Eliezer Kantorowitz, heute Informatik-Professor am Technion in Haifa, und ich bei Prof. Wendel über dieses Thema. Während die Chefs, Prof. Prohaska und Prof. Wendel, Probleme beim Umgang miteinander hatten, die offenbar auf die Besetzung Dänemarks während des zweiten Weltkriegs durch Deutschland zurückgingen, schätzten wir Doktoranden uns sehr. Wir hatten uns kennengelernt während und nach der öffentlichen Doktorprüfung von Kantorowitz, zu der er mich zusammen mit meinem Kollegen Neithard Heinecke eingeladen hatte.

Natürlich wurde am Lehrstuhl von Prof. Wendel in Hannover mit der Service-Tätigkeit Geld verdient. Ein Teil dieser Mittel wurde benutzt, um die ein bis zwei Mitarbeiter und etlichen Hilfsassistenten zu bezahlen, die die Arbeiten ausführten. Danach blieb aber noch Geld übrig. Insgesamt waren für Prof. Wendel an der Universität Hamburg und der TH Hannover in der zweiten Hälfte der 60er Jahre etwa 25 Wissenschaftler tätig. Die heute übliche Beschränkung der Dauer, die wissenschaftliche Mitarbeiter an der Universität verbringen dürfen, gab es noch nicht. So waren etliche Mitarbeiter seit dem Beginn von Wendels Professorentätigkeit dabei. Oft fehlte das Geld, um alle bezahlen zu können, weil Drittmittel-Vorhaben nicht in ausreichender Zahl beantragt oder nicht genehmigt worden waren. Einige Mitarbeiter arbeiteten auch an Projekten, die sie sich selbst ausgedacht hatten und für die es keine Finanzierung gab. Als Beispiel für ein solches Projekt nenne ich die Entwicklung eines Geräts, das die Fläche und die Lage des Schwerpunkts von aus Papier ausgeschnittenen Schiffsquerschnitten bestimmen sollte, um daraus durch anschließende numerische Berechnungen z.B. Hebelarmkurven zu ermitteln. Der Papierschnitt wurde in eine durchsichtige Trommel gelegt und von innen beleuchtet. Während sich die Trommel drehte, tastete eine Photozelle Licht und Schatten streifenweise ab. Das Gerät sollte daraus die Fläche und deren Schwerpunktlage bestimmen. Selbst wenn das Gerät funktioniert hätte, wäre seine Benutzung sehr wahrscheinlich umständlicher gewesen als die damals üblichen mechanischen Planimeter und Integratoren, die dieselbe Aufgabe lösten, ohne dass man die Flächen dazu ausschneiden musste; erst recht konnte es nicht mit programmgesteuerten Rechenmaschinen konkurrieren.

Sollten die mit der Service-Tätigkeit verdienten Mittel dazu benutzt werden, um durch solche Arbeiten entstandene Finanz-Lücken zu stopfen? Oder sollte das verdiente Geld benutzt werden, um an alle Mitarbeiter einen Bonus zu zahlen? Oder nur an die Mitarbeiter, die an dem Erwerb der Mittel beteiligt waren? Solche Fragen wurden kontrovers diskutiert. Natürlich hatte Prof. Wendel das Sagen, aber zunächst hörte er sich die Diskussionen an, griff nur hin und wieder ein, und entschied zum Schluss, wie es gemacht wurde. Zunächst setzten sich die Verfechter des Lückenstopfens durch, aber zusätzlich wurde ein Bonus an alle Beschäftigten bezahlt, dessen Höhe von Wendel festgesetzt wurde und – wie sollte es anders sein – von etlichen Mitarbeitern als ungerecht angesehen wurde. Die Zahlung war nur möglich, weil es die heute vorgeschriebene strikte Trennung von staatlichen Gebühreneinnahmen und privaten Einkünften damals noch nicht gab. Wenn sich auch zunächst vor allem die ‘Lückenstopfer’ durchgesetzt hatten, kam Prof. Wendel auf Dauer doch zu der Einsicht, dass die nicht finanzierten Aufgaben beendet werden sollten, und dass ältere Wissenschaftler den Lehrstuhl verlassen sollten, um Platz für neue Doktoranden zu schaffen. Dies war ein schmerzlicher aber notwendiger Prozess, der im Laufe von einigen Jahren die Zahl der wissenschaftlichen Mitarbeiter beinahe halbierte.

Im Jahre 1970 bekam Prof. Wendel eine zusätzliche Stelle für einen ‘Abteilungsvorsteher und Professor’, d.i. das, was heute ein W2-Professor ist. Der zusätzliche Professor sollte zu seinem hannoverschen Lehrstuhl gehören und Prof. Wendel entlasten. Dies war auch dringend notwendig, denn Wendel mus-

ste je einen Lehrstuhl in Hamburg und Hannover ausfüllen. Ich vermeide hier das Wort 'leiten', denn natürlich gehörten dazu auch Vorlesungen, Prüfungen und akademische Ämter. Außerdem war Wendel mitverantwortlich für das Ingenieurbüro 'Schiffko', das ihm gehörte, und er hatte ein Büro mit mehreren Redakteuren und einer Sekretärin für die Herausgabe von zwei schiffstechnischen Zeitschriften, die von ihm gegründet wurden und die bis heute weiterleben: Hansa und Schiffstechnik. Die heute üblichen umständlichen Berufungsverfahren und Stellenwidmungen gab es damals für solche 'Unterprofessoren' noch nicht; Professor Wendel durfte sich einfach jemanden aussuchen. So rief er mich eines Tages im Germanischen Lloyd, wo ich zu der Zeit arbeitete, an und bat mich, ihn nach Feierabend zu besuchen. Dort machte er mir das Angebot, die neue Stelle in Hannover zu besetzen. Nachdem ich ihm eine vorläufige Zusage gegeben hatte, fragte er mich, wie wir die Stelle widmen sollten. Ich schlug ihm 'Rechnergestützter Schiffsentwurf' vor, veranlasst durch eine entsprechend gewidmete Stelle, die Prof. Nowacki in Ann Arbor an der University of Michigan innehatte. Wendel akzeptierte sofort, veranlasste alles Notwendige in Hannover, und nach etwa 3 Monaten konnte ich meine Arbeit im hannoverschen Lehrstuhl von Prof. Wendel beginnen. Prof. Wendel förderte meine Arbeit nach Kräften, ohne sich einzumischen; einen angenehmeren Chef konnte ich mir nicht wünschen.

Es dauerte dann noch etwa 6 Jahre, bis Prof. Wendel emeritiert wurde. Nun hatte er erstmals Zeit für ein neues Hobby: Er kaufte sich einen Rechner (wie alles bei ihm: vom Feinsten), lernte programmieren und machte Programme für die Abschätzung des Widerstands von Schiffen. Seine damalige Sekretärin und heutige Witwe, Frau Prien-Wendel, war ihm dabei eine unübertreffliche Hilfe, wie er immer wieder betonte. Dem Stand der Technik entsprechend beruhten einige dieser Programme auf der Interpolation zwischen systematisch variierten Modellformen, wie sie z.B. in dem viel benutzten Buch von Taylor/Gertler dokumentiert sind. Auch spätere Ergänzungen dieser Versuchsserie wurden von ihm eingearbeitet. Andere Verfahren beruhten auf Regressionsanalysen, die auf den Versuchsergebnissen aufbauten, welche in der täglichen Arbeit von Schiffbau-Versuchsanstalten anfielen. Prof. Flessner, der Prof. Wendels Mitarbeiter in den 60er Jahren den Zugang zu dem genannten Zuse-Rechner ermöglicht hatte und inzwischen Informatik-Professor an der Universität Hamburg war, beriet ihm beim Kauf neuer Rechner und zur Verwendung der geeignetsten Programmiersprache. Ich selbst erbte seinen letzten, von Prof. Flessner zusammengestellten und eingerichteten Rechner, und das von ihm empfohlene Programmiersystem Mathematica. Lange habe ich mit diesem Rechner in meinem Büro gearbeitet; inzwischen ist er allerdings aus dem Institut ausgemustert und hat eine Verwendung in meinem Privathaus gefunden.

Ich schließe mit einem weiteren Zitat aus dem Gedicht von Bruno Arndt zu Wendels 80. Geburtstag, das Wendels Leben nach der Emeritierung beschreibt:

Der Mensch ist nun ein Emerit,
doch lebt er nicht als Eremit.
Mit Leidenschaft er programmiert
und Datenmengen regressiert,
um der Romantik letzten Schimmer
zu treiben aus dem Arbeitszimmer
der Ingenieure, die noch glauben,
zum Schiffsentwurf genügt ihr Daumen.

1 Literatur

Arndt, B. (1988), *1908 – Professor Wendel – 1988*, unveröffentlicht

Knüpfner, K. (1961), *Vorführung schiffbaulicher Berechnungen auf dem Elektronenrechner IBM 650 an der Technischen Hochschule Hannover*, Hansa 98/10, S. 961-967

Prohaska, C.W. (1959), *Das elektronische Rechenverfahren im Schiffbau*, Schiff und Hafen 1959/11, S. 957-960

Söding, H. (1968), *Das Leckverhalten von Frachtschiffen*, Hansa 105 S. 571-574

Völcker, H. (1961), *Berechnung oder Modellmessung der Sinksicherheit von Schiffen*, Hansa 98/23, S. 2418-2420

Development of an Intact Stability Criterion for Avoidance of Capsizing in Following Seas

Florian Kluwe

Hamburg University of Technology (TUHH), Institute of Ship Design and Ship Safety

Hamburg, Germany

Abstract

It has become obvious that modern ships suffer from problems related to their seakeeping-behavior, which is mainly related to large amplitude roll motion in head and following seas. As these effects are not covered by the existing intact stability criteria, an additional concept is developed. This new concept allows to quantify the risk of the occurrence of large roll angles by calculating a capsizing index based on the results of numerical simulations. This paper presents the ideas and concepts behind the new approach. Additionally to the simulation based approach a simplified criterion is developed which addresses the same hazards but without the need to carry out numerical simulations. For validation and the determination of suitable threshold values a number of capsizing accidents, which occurred during the last 50 years were analysed. An example of this work will be presented in this paper.

Introduction

As a consequence of accidents a number of capsizing criteria have been proposed in the last decades, either based on model tests and simulations or on empirical observations. A brief introduction to a selection of these criteria, introduced by German research groups is given in the first section of this paper. All presented criteria intend to reduce the capsize-risk of ships in heavy weather. Most of these criteria do not take into account dynamic effects of ships traveling in a rough seaway directly.

New techniques such as numerical motion simulations in the time domain have improved our knowledge on the phenomena and the situations in which ships are endangered with respect to large roll angles. Today this allows us to address exactly those dynamic aspects, which most of the older criteria are lacking. This seems to be necessary as modern hull designs seem to be even more endangered by phenomena like parametric roll than traditional designs. Moreover the mean ship size and speed has increased in the last decades, which also contributes to the fact that the current intact stability rules are not able to guarantee a sufficient safety level for all ships.

Based on the experience gained in a number of research projects with respect to the applicability of numerical simulations on the evaluation of ship motions in waves, a new concept for a stability criterion was developed, called Insufficient Stability Event Index (ISEI). This approach follows the idea of goal based standards, which according to the International Maritime Organization (IMO) shall be the preferred basis for future regulations (Hoppe).

For the calibration and the statistical evaluation of the new criterion an database of 176 ships in total is available. Each of these ships has been investigate in at least three different loadcases. One equals the intact stability limit set by the actual requirements according to the

IMO Res. A.749, the code on intact stability. The two other loadcases have 0.5 meters and 1.0 meters larger GM-values, respectively.

For the validation and the determination of a threshold value, the new index has been tested with a number of real capsizing accidents, which were re-investigated from the original data available from the accident investigation. The loading condition the ship had at the time of the accident, which always can be clearly identified as “not safe”, was analysed with a set of intact stability criteria, including the new index. Finally an attempt was made to identify the stability increase necessary to omit the individual accidents. An example is presented in the third part of this document.

Finally a simplified approach, following the same concept as the simulation based approach, but omitting the necessity of performing numerical simulations is derived from the results obtained from the simulations.

Assessing Ship Safety against Capsizing by Numerical Simulations

Evaluation of Ship Motions by Numerical Simulations

At the end of the last decade, after some incidents with container vessels have become known that were related to parametric rolling, a German research group was established to develop dynamic stability criteria, which should be based on numerical simulations. The simulation code ROLLS, originally developed by Kroeger (1987) and Petey (1988), was chosen to serve as basis for the evaluation of seakeeping related problems. The code was validated and further enhanced by Cramer and Krueger (2005) and subsequently integrated into the ship design system E4, why this enhanced version of the original code is known as E4-ROLLS today. Research programs, funded by the German Ministry for Education and Research (BMBF), were established. Within this framework, a large number of model tests for different modern hull forms were carried out in tailored wave sequences to validate the simulation code. It was concluded that the ROLLS-approach was able to predict the most relevant phenomena related to the problem of insufficient stability in waves with sufficient accuracy. Based on these findings it was decided to develop a concept for minimum stability, based exclusively on numerical motion simulations. Summing up the most important results from the research work of the past years following conclusions can be drawn:

- Both model tests and simulations confirmed that critical situations endangering the ship with respect to large roll amplitudes are observed in head as well as following seas.
- No capsizing events were found in beam seas at zero speed.
- The most dangerous scenarios appeared to be those where the ship was traveling in following seas.
- In head seas, large rolling angles were observed, but capsizing usually did not occur. This is due to the fact that critical resonances are connected to relatively low values of GM in following seas, and to high GM values in head seas. The model tests were conducted close to potentially critical resonances.

Other than expected by previous authors, wavelengths significantly shorter than the ship length also could endanger the vessel whereas wavelengths significantly larger than ship length did not initiate large roll amplitudes.

Evaluation Strategy – The Insufficient Stability Event Index (ISEI)

In contradiction to previous criteria, it was decided to determine all possible scenarios that may lead to a dangerous situation, but not to quantify how dangerous a specific situation actually is. When defining limiting stability values, it is of importance to assess the probability of a specific loading condition being dangerous for the vessel, or not. For this application it is not of practical interest to get the exact capsizing rate during the simulation but it is important to know only if the ship did fail. For this the concept requires a methodology to distinguish

between being safe or unsafe for a ship in a specific situation without counting the actual up-crossing rates.

Given such a methodology is available the total long term probability for a dangerous situation happening in a specific loading condition can be defined then by the insufficient stability event index (ISEI), which is defined by the following equation (see also Krueger and Kluwe (2006)):

$$ISEI = \int_{T_1=0}^{\infty} \int_{H_{1/3}=0}^{\infty} \int_{\mu=0}^{2\pi} \int_{v_s=v_{min}}^{v_{max}} p_{sea}(H_{1/3}, T_1) \cdot p_{risk}(H_{1/3}, T_1, \mu, v_s) dv_s d\mu dH_{1/3} dT_1 \quad [1]$$

Here p_{sea} denotes the probability density of occurrence for a specific seastate defined by the significant wave height $H_{1/3}$ and the characteristic (peak) period T_1 , whereas p_{risk} represents the probability density for the actual loading condition leading to a dangerous situation under the condition of a specific seastate. The two-dimensional probability density for the seastate is calculated from a scatter table presented by Soeding (2001).

The probability that the actual loading condition leads to a dangerous situation in the seastate given by $H_{1/3}$ and T_1 then can be written as follows:

$$p_{risk}(H_{1/3}, T_1, \mu, v_s) = p_{fail}(H_{1/3}, T_1, \mu, v_s) \cdot p_{\mu}(\mu) \cdot p_v(v_s | H_{1/3}, T_1, \mu) \quad [2]$$

In this equation, $p_{\mu}(\mu)$ denotes the probability density that the ship is traveling at a course of μ -degrees relative to the dominating wave propagation. It is assumed that $p_{\mu}(\mu)$ is independent from the actual values of $H_{1/3}$ and T_1 . $p_{\mu}(\mu)$ can be taken from full scale observations (see Krueger, Hinrichs, Kluwe and Billerbeck (2006)). Then $p_v(H_{1/3}, T_1, \mu, v_s)$ denotes the probability density that the ship is traveling at a speed of v_s knots. As $p_{\mu}(\mu)$ is selected independently from the seastate, $p_v(v_s | H_{1/3}, T_1, \mu)$ is a conditional probability depending on all four parameters, as not all speeds are physically possible in a specific situation. Krueger, Hinrichs, Kluwe and Billerbeck (2006) determine the maximum possible ship speed in the given environmental conditions at full engine output and the minimum speed at engine idle speed from systematic propulsion calculations. Within the range of possible speeds $[v_{min}, v_{max}]$ the probability of occurrence is assumed to be linearly distributed, based on the experience that masters tend to maintain the speed as high a possible and justifiable.

The failure probability density $p_{fail}(H_{1/3}, T_1, \mu, v_s)$ in general terms can be calculated in different ways. From numerical motion simulations in the time domain, in principle, it is possible to obtain the value by just counting the capsizing events. This approach has two major drawbacks. Firstly capsizing usually is a very rare event. To get reliable values the simulation time had to be extraordinary long. For example, if the expected mean value would be a capsizing rate of of 1/100 years the simulation would have to cover a duration of 500 years real time to register 5 capsizing events in average, which seems to be a reasonable number in order to obtain reliable results. One approach to overcome this problem is, for example, the extrapolation scheme introduced by Soeding and Tonguc (1986), which is described above. What remains unclear in this concept is how to choose the extrapolation factor. Most likely the method is only valid for moderate extrapolation factors and for very remote events, as otherwise the simplifications made in this approach might lead to larger in-accuracies. Another unknown point is, whether this concept can be applied to phenomena like parametric rolling at all, as the capsizing rate might have a non-continuous characteristic in some regions. From the practical point of view another problem is, that usually capsizing is not a purely wave driven exceedance of certain threshold angles. Normally a complex event chain

leads to the final capsizing of a ship, including water on deck, water ingress through non-weather-tight openings and cargo shift. Thus, from our point of view, it is more reasonable not to ask how often a ship fails in a given situation, which naturally inherits large uncertainties, but to ask whether a certain situation is dangerous for a ship with a set of operational parameters. That is the reason why we replace the failure probability $p_{fail}(H_{1/3}, T_1, \mu, v_s)$ by the failure coefficient C_{fail} , a saltus function which takes the value 0 for all situations considered to be safe and 1 for all un-safe situations. It is determined from the time series of the numerical simulation by applying the Blume-criterion which is described separately in *The Blume Criterion* at page 36.

In some cases where the Blume-criterion does not deliver suitable results, typically due to large angles of vanishing stability, the occurrence of a certain maximum roll angle may be taken into account simultaneously. The more conservative value is taken for the decision between “safe” and “unsafe”. The results may be plotted in form of polar diagrams as presented in Fig. 1. Each polardiagram presents the limiting wave heights for a specific significant period (or the related significant deep water wave length), giving an overview about critical situations (see Cramer and Krueger (2005) and Krueger (2002)).

All situations where the failure criterion is set to 1 contribute to the overall index with the overall probability of occurrence of the individual operational cells. A operational cell in this context always is defined by loading condition, speed, heading, wave length and wave height.

From the experience with a lot of model tests and more than hundred ships tested in numerical simulations we expect only a very small contribution from beam sea situations. Larger ships in general can be considered as being not endangered by waves encountering from abeam. Therefore we restrict the contributing courses to a 45-degree sector of encounter angles, port and starboard in head and following seas. Consequently, it is then useful to split the ISEI in a head sea and a following sea index. A further step is to discretise Equation [1] as the probability of occurrence of a specific sea state as well as the failure coefficient C_{fail} are available as discrete values for the individual operational cells. The insufficient stability event index ISEI then can be written as follows:

$$ISEI = \sum \sum \sum \sum \delta P_{sea} \left(H^{(j)}, T_1^{(i)} \right) \cdot \delta P_{risk}^C \left(H^{(j)}, T_1^{(i)}, \mu^{(k)}, v_s^{(l)} \right) \quad [3]$$

Here, the δP denote the cumulated probability for the individual discrete range of values.

The index C expresses that P_{risk} is calculated with the failure coefficient C_{fail} . The encounter angles run from $\mu = -\pi/4$ to $\mu = +\pi/4$ for the following sea cases and from $\mu = 3/4 \pi$ to $\mu = 5/4 \pi$ for head seas. The speed summation runs from the minimum speed possible in that condition to the maximum speed possible. The indices h and f indicate head and following seas, respectively.

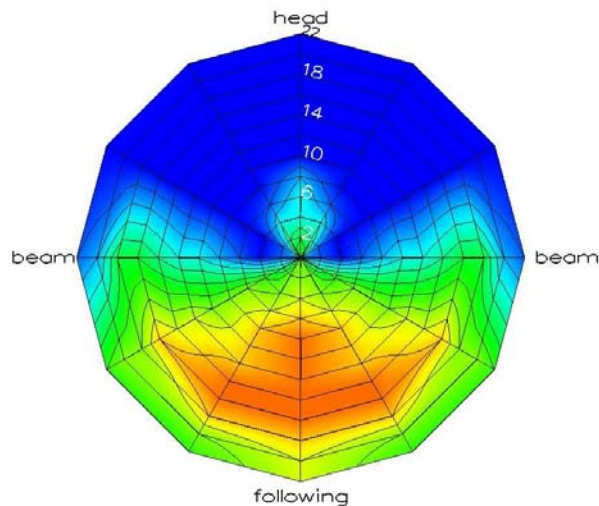


Fig. 1: Graphical visualization of dangerous scenarios by the limiting significant wave height according to the Blume-criterion

Fig. 2 Shows a flow chart of the principal way the ISEI is determined. In the top row all necessary data sources and input data are listed. There are three categories of data relevant to determine the actual operating condition and the main properties of the actual vessel.

The environmental data contain information on the seastate, typically represented by $H_{1/3}$ and T_1 , but also the probabilities of occurrence for the individual seastates. The second category contains all ship fixed data, like hull form, lightship weight. These data are to be considered constant for the lifetime of the ship and thus do not contain any probabilistic components. The third category contains data which define the current operating condition by loading condition, ship speed and course. Here only speed and course are considered as variable data for the calculation of the ISEI value and thus have to be connected to a probability density function. The loading condition is taken as fixed value, as an individual index is determined for each loadcase. In fact one of the core targets of the stability index is to distinguish between safe and un-safe loading conditions.

From the input data all possible and relevant operational cells are identified, each defined by a certain seastate, speed and course.

The calculation then is performed for all operational cells. The ISEI contribution of each cell is summed up to the overall index at the end. The calculation itself starts with the determination of the ship responses by time domain simulations. Typically the simulation is carried out in five different realisations of a specific seastate, each run representing 10000 seconds real time.

The analysis of the resulting time series by the Blume criterion, denoted as "Risk Assessment" in the flow chart, delivers the failure coefficient C_s . Depending on its value the contribution of the actual situation to the overall index amounts either 0 or the value calculated from the probabilities of the contributing variables. At the end the sum over all operational cells delivers the overall ISEI. Alternatively to the simulated approach a simplified, deterministic failure criterion can be applied, delivering similar results as the simulations. This approach, which has been developed on the basis of the simulation results, is presented below in this document.

The ISEI-concept allows the identification of ship designs and ship types, which are

vulnerable for insufficient stability events in following or head seas. At this the ISEI-concept takes into account all relevant phenomena occurring in head and following seas that may endanger the vessel with respect to minimum stability.

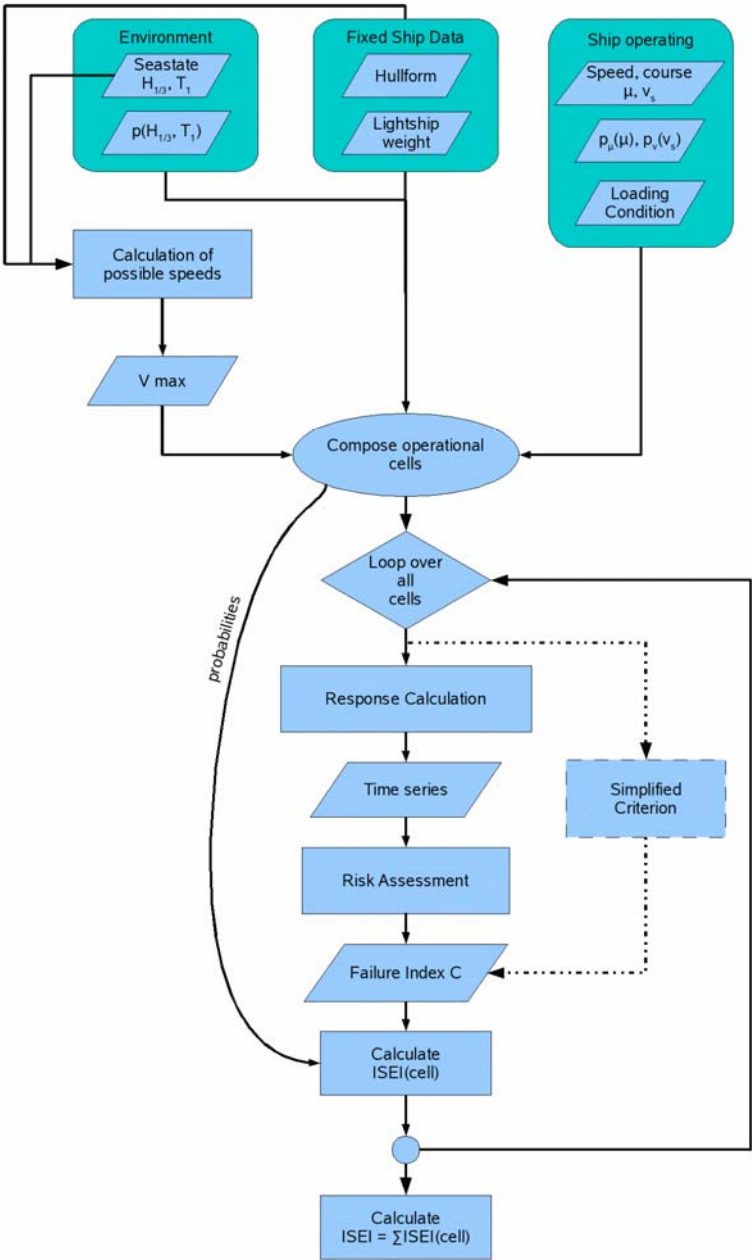


Fig. 2: ISEI - Evaluation Concept

Validation of the Concept with Real Capsizing Accidents

Motivation and Procedures

During the validation phase the new stability criterion has to show that it is able to identify all un-safe situations as well as safe situations by delivering clearly different index values. To assure a uniform safety level for all ships the criterion additionally shall deliver similar index

values for ships with similar main properties in similar situations.

Finally it has to be assured that the criterion is sufficiently conservative to deliver reliable decisions taking into account the uncertainties in the calculation. On the other hand the criterion must not be too conservative as it then reduces the usability of safe ships unnecessarily.

The most realistic benchmark-scenarios are real accidents, why several of them have been investigated during the development of the new criterion, where the focus was laid on ships which did capsize in heavy weather without any further damage by collision or grounding.

One very recent example for this work is the capsizing and subsequent sinking of the RoRo-vessel FINNBIRCH in the year 2006, which is presented below.

In order to assess the above mentioned tasks the following procedure was applied:

- Identification of the accident conditions (environmental data, loading condition)
- Application of the stability criteria as described below on this situation, including the new ISEI
- Estimation of a probably safe condition and application of the capsizing criteria to this second situation.

The results of our investigations show that in almost cases the stability criteria give a common statement whether a ship can be considered as safe or un-safe in a certain situation. The new stability index always rated the accident situations as un-safe. The results from these investigations were used also to determine acceptable threshold values for the index, which will be derived later in this document.

Overview on Selected Capsizing Criteria

The criteria presented briefly in the next sub-sections aim to ensure sufficient safety of ships in heavy weather by identifying significant, stability related characteristics of the ships' lever arm curves. They were used to calibrate and to validate the new criterion by applying them to situations where ships were lost by capsizing.

Wendels's concept of Balancing Righting and Heeling Levers:

Wendel and his group developed a concept where the stability of ships should be evaluated on the basis of an individual balance of righting and heeling levers (Arndt (1960)). The dynamic effects of capsizing as such are disregarded in this concept, but the stability reduction is taken into account by using the mean value of the crest and trough condition lever arms instead of the stillwater righting lever, which is questionable from today's point of knowledge. The theoretical background of Wendel's concept is described in Arndt (1960) The German Navy's stability standard BV1033 is based on this criterion.

The C-Factor Concept for Container Vessels Larger than 100m in Length:

With the introduction of container vessels the average beam-to-depth-ratio of the world merchant fleet grew significantly from ca. 1.60 in 1960 to ca. 1.9 in 1980. An increased beam-to-depth ratio leads to larger initial stability, whereas added form stability is significantly reduced. Therefore Blume and Wagner carried out a number of model tests for container vessels. Based on the results Blume (Blume and Hattendorf (1987a)

) tried to establish a criterion for the minimum stability of vessels in rough weather. The findings lead to the development of the C-factor concept, which enhances the original Rahola-criteria.

This is done, for example, by replacing the static requirement for the area below the lever arm curve being larger or equal 0.2 m according to Rahola by the constant value divided by C, where C is calculated as follows (Blume (1987)):

$$C = \frac{T \cdot D}{B^2} \cdot \sqrt{\frac{T}{KG}} \cdot \frac{C_B}{C_{WP}} \cdot \sqrt{\frac{100}{L}} \quad [4]$$

Here, T denotes the draft, D a modified depth including hatches, KG is the center of gravity above base line. C_B and C_{WP} denote the block- and the waterline-coefficient, respectively.

The C-factor today is part of the IMO Code on Intact Stability for certain types of vessels above 100m in length, but as the overall code, it is not mandatory. Finally the problem still remains that the C-factor is related to the still water righting lever curve, which is not sufficiently representative for seakeeping problems.

The Kastner/Roden Criterion for a Minimum GM to Prevent Pure Loss Failures:

Based on model tests carried out on the inland lake Ploen in Germany by Kastner (1962) a method was developed to determine a minimum GM required to prevent the vessel from capsizing in rough weather. The author observed the interesting phenomenon that a clear limiting GM seemed to exist, distinguishing between ships being save or un-save with respect to capsizing. The criterion is based on the probability density function for the time to capsize determined during the model tests. The authors then ask for a cumulated probability of 95% for the event “ship does not capsize” in a certain period of time, which is determined on the basis of the time until a capsizing event is observed during model test (or numerical simulations). This time interval T_k is then enlarged by a factor according to the assumed exponential probability distribution. Assuming that the ship always capsizes in the largest wave a_k occurring during T_k the capsizing probability is linked to the probability of occurrence of that wave.

Now a maximum wave height a_k can be determined which has lead to the capsize in a specific situation, e.g. during a model test. Now, assuming a probability for a non-capsizing, a related wave height a_{nk} the ship needs to survive to be sufficiently safe can be determined in the same way. The author then concludes that the GM- value of the vessel must be increased by the ratio which is defined by the these two wave heights:

$$\frac{GM_k}{GM_{nk}} = \frac{a_k}{a_{nk}} \quad [5]$$

This is somewhat doubtful from today’s point of knowledge as the assumptions made, clearly fail in case the GM gets close to zero.

Soeding’s Concept of Simulating Rare Events by Artificially Amplified Wave Heights:

In principle event probabilities can be determined simply by counting them during model tests or numerical simulations. But, as extreme events (e.g. capsizing) are rare, it is difficult to determine significant values for capsizing probabilities during model tests and numerical simulations due to the limited duration and the resulting small number of occurrences.

Therefore Soeding and Tonguc (1986) suggest the simulations being run in artificially high waves. Assuming Rayleigh-distributed amplitudes the capsizing probability can be extrapolated to the actual wave height of interest by the following relationship:

$$\frac{H_{sim}^2}{H_{act}^2} = \frac{\ln(p_{sim}) + 1.25}{\ln(p_{act}) + 1.25} \quad [6]$$

Here H denotes the actual (*act*) or the simulated (*sim*) wave height, respectively. P denotes the capsizing probability, using the same indices. However, the proposed criterion does not provide a procedure to determine the enlargement factor for the wave height. Additionally the concept does not include any threshold values for the capsizing probability.

The Blume-Criterion

Blume developed this criterion to evaluate the ship safety with respect to capsizing in following and stern quartering seas by model tests. For each run during the model test the maximum roll angle is registered. Then the residual area E_R below the still water lever arm is calculated, limited by the maximum roll angle and the point of vanishing stability (see Fig. 3). If the ship capsizes during the run, E_R is set to zero. Finally a ship is regarded as safe against capsizing if it fulfills the following requirement:

$$\bar{E}_R - 3s > 0 \quad [7]$$

Here \bar{E}_R denotes the residual area averaged by all runs, s represents the standard deviation of E_R . By this a stability limit, represented by either a minimum GM or by a limiting maximum wave height can be determined.

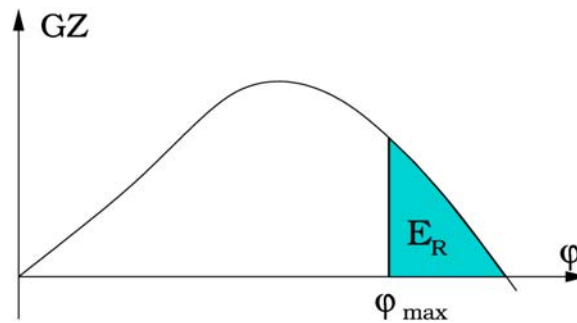


Fig. 3: Residual area below the righting leer curve

Although developed originally for the evaluation of model tests, Blumes approach has proven to be also a suitable measure for ship safety in connection with numerical simulations. The statistical reliability of the criterion is expected to be even higher in this case, as the time series obtained from simulations usually are much longer than model test runs. The Blume-criterion is also an important component of our newly developed evaluation index for ships based on numerical motion simulations, as described before.

The Capsizing of MV FINNBIRCH (2006)

On Wednesday, 1st of November 2006, the 8500 dwt RoRo-Ferry M/V FINNBIRCH (call sign SLNK) capsized in heavy weather in the Baltic Sea between the islands Gothland and Oland. At the time of the accident, the vessel was traveling south at an estimated course of about 190- 200 Degree. The vessel was loaded with trailers, of which a significant amount was stowed on the top deck (see Fig. 4). At the time of the accident, the weather wind was about 20-25m/s or BF9-10. The sea was rough with significant wave heights of abt. 5-6m, significant period about 8-8.5s. These data are obtained from hindcast sources.

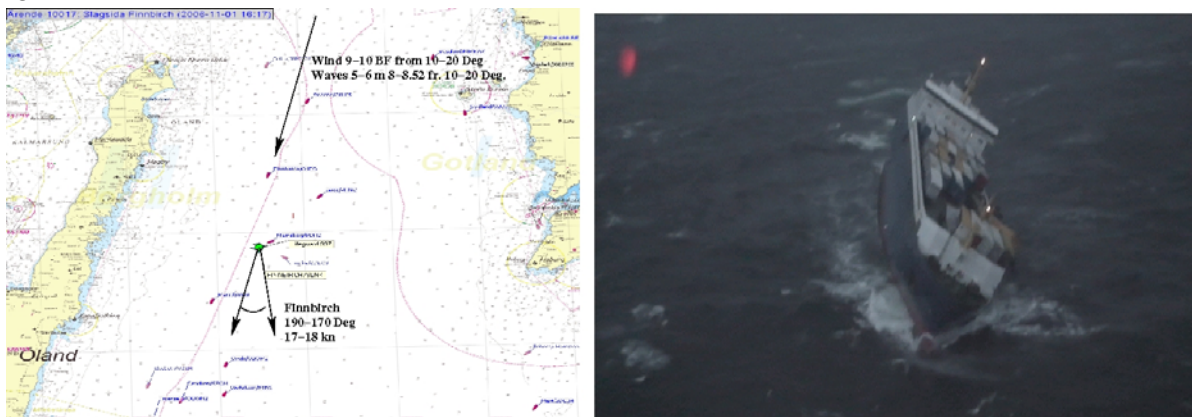


Fig. 4: Left hand side: Position, wave encounter and course of MV Finnbirch at the time of the accident. Right hand side: MV Finnbirch in intermediate floating condition

According to the observations of the master of M/V MARNEBORG, the vessel closest to the MV FINNBIRCH, who later coordinated the rescue operations the vessel was rolling significantly. At about 16:15 she heeled to about 50 degree. The vessel remained in that intermediate equilibrium floating condition for a while (see Fig. 4), until she finally capsized at about 19:37.

M/V FINNBIRCH was built in 1978. In 1979 the vessel was additionally equipped with side sponsons and in 1986 an additional weather deck was added. Both conversions have significantly affected the stability of the vessel. The official accident investigation has not been finished yet, why no investigation report is available so far. Therefore, some assumptions have to be made with respect to the loading condition prior to the accident:

- The additional steel weight of the retrofitted top deck is ca. 250 tons.
- The top deck was fully loaded with 36 trailers according to Fig. 4. From this fact we conclude that also the other decks were almost fully loaded.
- The average trailer weight is assumed to be ca. 23.5 tons.

When M/V FINNBIRCH was delivered in 1979, no damage stability regulations were in force, which means that the stability of the vessel was governed by the relevant intact criteria.

The limiting intact stability criterion is most likely $h_{\min}(30^\circ) \geq 0.20m$ for the vessel including the sponsons and the top deck. Our investigations show that, in case the top deck is fully loaded, the ship operates close to the intact stability limit. Taking all assumptions into account we obtain the following floating condition:

Table 1: Intact floating condition

Total Weight :	13686.000 t
Draft at A.P (moulded) :	6.843 m
Trim (pos. fwd) :	-0.078 m
Metacentric Height :	1.704 m

The computed righting levers in waves show practically no stability on the wave crest for a wave which comes close to the accident seastate (see Fig. 5). It is also important to underline the fact that the alterations of the initial GM in the sea state are substantial, which means that a lot of energy is introduced into the vessel by the sea state.

The speed of the vessel is assumed with 16 knots at an encounter angle of 30 degree. The results of the numerical simulation show that roll angles up to 40 Degree occur for situations when the wave height exceeds some threshold value and is at the same time in phase with the roll motion (Fig. 6). Fig. 4 shows a intermediate equilibrium floating condition of abt. 45-50 degree, which is only possible in case cargo has significantly shifted. Introducing this cargo shift into the simulation results in an intermediate equilibrium there as well (Fig. 6, 7350s onwards). In this phase, an additional cargo shift may have taken place or water may have entered the vessel, which has then lead to the final loss.

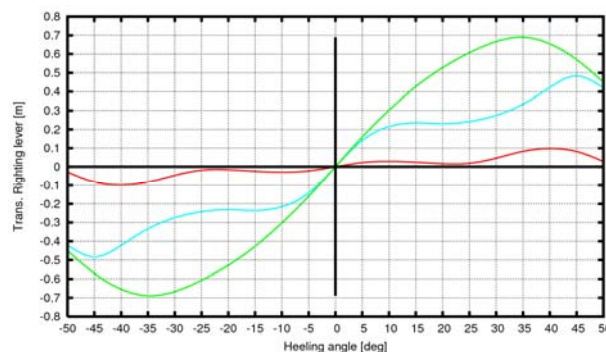


Fig. 5: Lever arm curve of M/V Finnbirch

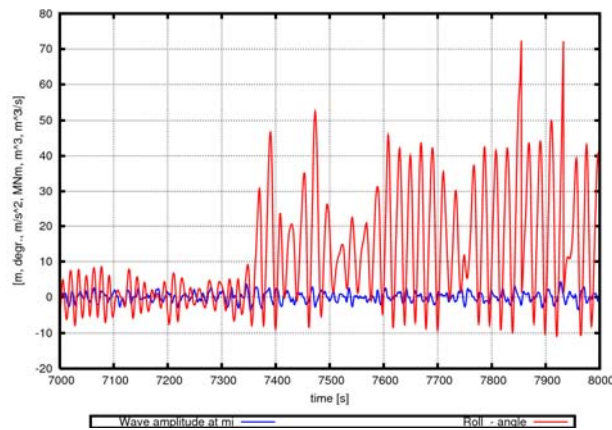


Fig. 6: Simulated time series of the accident

Our analysis indicates that the vessel was most probably traveling close to a 1:1 resonance condition at the time of the accident. In this context, it is interesting to note that the actual scenarios which lead to critical resonances could not be determined from the stillwater rolling period for small roll angles as the non-linearity of the lever arm curve shifts the natural roll period significantly.

Criterion	GM=1.69 m	GM=1.89 m
Kastner/Roden, Capsizing time	not applicable	not applicable
Soeding Capsize Probability	0.2E-3/Roll Cycle	0.2 E-6/Roll Cycle
Blume (Modified), E_R - 3 S	E_R = S = 0	115.099 mrad
ISEI (direct)	0.01	4.5E-4
Empirical Criteria		
Crest lever	No positive	> 0.1m
Crest range	none	>30 Deg.
Blume C-factor	not applicable	not applicable

Table 2: Results for different capsizing criteria

From the comparison, it can clearly be seen that all criteria which can be applied consider the case where the vessel did actually capsize as dangerous, whereas all criteria show a significant

improvement for the case with increased GM. As the accident case has fulfilled all prescribed IMO intact stability criteria, it can be concluded that the safety level of these criteria is not sufficient. Additionally, it can be stated that a direct ISEI of 0.01 represents a condition which has clearly proven to be unsafe, whereas an ISEI of 4.5e-4 represents a condition which is considered to be safe by all criteria.

Concluded, it can be stated that the dynamic analysis has clearly shown that the reason for the loss of MV FINNBIRCH was most probably insufficient stability in a following sea scenario.

Threshold Values for the Insufficient Stability Event Index

A general problem occurring when assessing safety by probabilistic methods is the definition of threshold probabilities. As it is not possible to achieve a residual failure probability of 0, certain levels have to be accepted. The acceptance criteria usually consist of economic components, which contain the overall costs caused by a certain accident, components related to the probability of crew, passengers and third parties being injured or killed and also components related to environmental pollution. The accepted probability related to injuries and fatalities is split into an individual point of view, which is the probability for an individual person and thus is always related to one injury or fatality and a societal one, which describes the accepted residual probability in dependency of the number of expected injuries or fatalities. That the accepted safety level differs significantly with the point of view can be illustrated by the following example. Given a capsizing probability of 10^{-3} /year a crew member faces a probability to be killed during the total loss of his ship once in 1000 years. Most likely he is willing to accept this probability as from his individual point of view this seems to be very remote. From a societies point of view this failure probability might be unacceptably high if the total merchant fleet consists of 1000 ships and in each year one of them is lost. All this illustrates the difficulties in assigning a threshold value to a certain criterion.

To address the problem of quantifying failure probabilities and to define acceptable safety levels the International Maritime Organization has introduced the so called „Formal Safety Assessment“ (FSA) which is published in IMO(2002) and IMO(2007). Here the safety level is connected to the term risk which is the product of the probability of occurrence times the consequence to be expected from a certain hazard. According to the published matrices an extremely remote accident would be associated with an annual frequency of 10^{-5} whilst the severity index, which is a dimensionless measure for consequence, associates a value of 10 for catastrophic consequences, like total loss. This would then result in an annual risk $R=10^{-4}$ for such type of accident. The maximum tolerable risk according to IMO(2007) lies between 10^{-5} and 10^{-3} depending on which type of person (crew, passenger, third party) is addressed.

The question now being addressed is, at which ISEI values an acceptably high safety level is reached. While the boundary of the safe domain remains unknown, the ISEI values which are associated to clearly un-safe situations can be clearly identified by the application of the criterion to ships which were lost by capsizing. A selection of the accidents re-investigated for this purpose is shown in the previous chapter. The ISEI values calculated for the accident loading condition all have the order of magnitude of 10^{-1} . It can be concluded that such ISEI values clearly represent situations in which ships are considered to be un-safe on a not acceptable level. In a second step the stability of the capsized ships is increased to a level where a selection of other stability criteria is fulfilled. For this second loading condition the ISEI values typically lie below 10^{-2} . Fig. 7 shows the ISEI values calculated for a selection of ships in different loading conditions, including the ships from the investigated accidents.

The ISEI criterion was further evaluated for a large number of modern ships. Each ship is tested in three loading conditions, whereas the first equals the intact stability limit according to the IMO Res. A.749. The second and the third loadcase have GMs increased by 0.5 meters and 1.0 meters, respectively. The second loadcase roughly lies in the region where modern ship types have their stability limit according to the damage stability regulations.

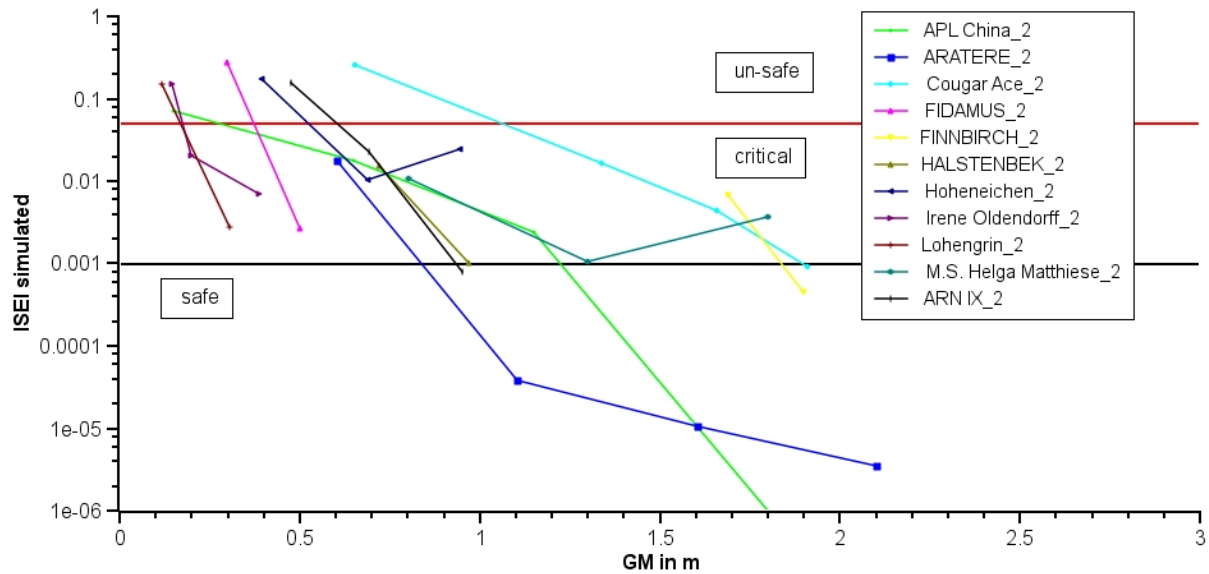


Fig. 7: ISEI for selected ships in different loadcases

Typically the first loadcase delivers ISEI values in the un-safe region (10^{-1}), while the second one typically delivers values in the range between 10^{-3} and 10^{-2} . The third one mostly is below 10^{-3} . Accidents related to large amplitude roll motions with modern ships traveling with permissible stability, which means at or above the damage stability limit, are not very frequent, but they do occur more than once per year. On this basis we define the region around ISEI values of 10^{-2} as "critical" region.

Finally, an assumption for the safe boundary can be made from more theoretical considerations based on the aforementioned FSA according to IMO. The ISEI value represents the long term probability that a ship encounters certain situations which are considered to be dangerous for this particular vessel. If we assume that the statement made by the failure coefficient C_s is valid for the ship's lifetime, which is set to 30 years according to IMO goal based standards, the annual frequency for a total loss is $3.3E-5$ for an ISEI value of 10^{-3} . Assuming that we address catastrophic events only the annual frequency has to be multiplied by a severity index of 10, which delivers an overall risk of $3.3E-4$. This lies slightly above of the threshold values for risk published by the IMO. Taking into account that the failure index assumes that capsizing in an unsafe situation is a certain event and that the real capsizing probability is much smaller than 1, we can conclude that an ISEI value of 10^{-3} represents an acceptable safety level.

Therefore the following threshold values for the ISEI are proposed:

- Values above $5.0E-2$ are considered to be un-safe for all types of ships.
- Values between $1.0E-3$ and $5.0E-2$ are considered to be potentially dangerous. This values might be acceptable for small ships and for ships operating in restricted areas of operation.
- Values below $1.0E-3$ are considered to be generally safe.

The Simplified Insufficient Stability Event Index (ISEIs)

The use of seakeeping simulations requires substantial knowledge in the field of numerical fluid dynamics. Significant effort is required for setting up, evaluating and validating the numerical simulations. Neither this special knowledge nor the required time-effort for the detailed analysis of ships by means of direct simulation can be presumed to be available for all institutions involved in calculating and approving ships' intact stability.

Besides these problems related to the limited access to principally existing technology, there

is another problem related to lacking standardisation of seakeeping simulations. Currently, there is neither an international standard defining minimum requirements for numerical seakeeping codes employed for the assessment of dynamic ship stability, nor any standardised procedure for the set up of environmental conditions to be used for the simulations. For the practical application of a simulation-based criterion this would mean that first a basic standard for numerical seakeeping simulations had to be established.

Taking all this into account, a regulation directly and solely depending on numerical seakeeping simulations today will hardly be accepted as a standard procedure for the assessment of the intact stability of ships. This results in the need for introducing an alternative approach additionally to the simulation based ISEI-approach. The simplified approach shall be able to address the same phenomena as the direct one with comparable reliability and with consistent results, employing the experiences and findings made during the simulations.

A simplified, deterministic criterion always addresses only a clearly specified and limited set of phenomena or failure mechanisms. Thus, its applicability must be always limited to a certain set of operating conditions in which the ship is endangered by exactly those phenomena covered by the criterion. Failure mechanisms in head and following seas are quite different. Although they are related to the dynamic change of righting levers in waves, the failure scenarios are quite different. In head seas the ship can be excited in a certain range of encounter periods. This results in large roll amplitudes, often leading to severe damage to the ship and the cargo on board. As the encounter frequency in head seas is larger than in following seas, the resonance conditions are usually met at larger GM values than in following seas. Additionally the time, the ship faces low stability while sitting on the wave crest position is much shorter than in following seas. Thus, simplified criteria for head- and following sea situations must assess different failure scenarios. Our simplified insufficient stability event index (ISEIs) targets following and stern quartering sea cases only, as these scenarios more often lead to the total loss of a ship as head sea incidents and thus have the highest priority to be covered by a suitable criterion. This is supported clearly by the charts in Fig. 3, which contain statistical data on intact stability accidents sorted by wave encounter direction.

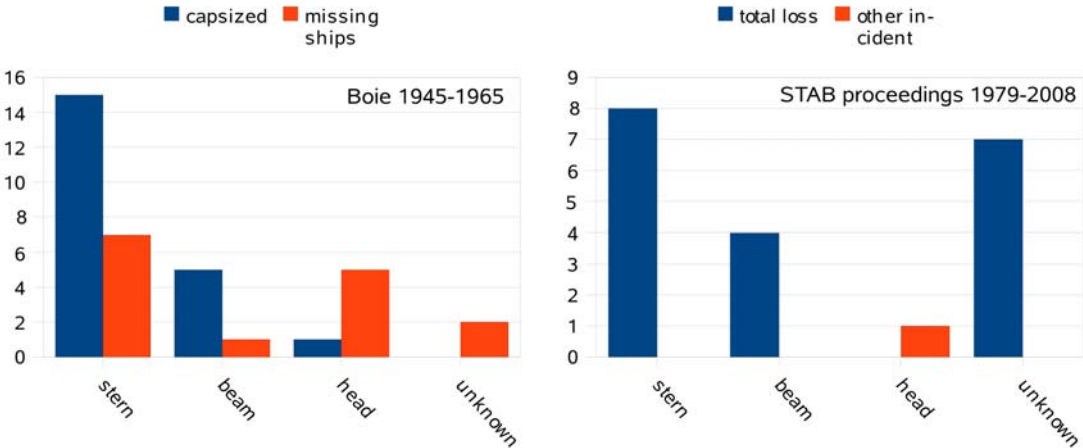


Fig 8: Statistical distribution of capsizing accidents after encounter angle of waves

One important requirement for the simplified criterion is that it has to be consistent with the simulated approach. This means that the simulated values for the $ISEI_{following}$ shall be directly comparable with those obtained by the ISEIs approach. For this reason the simplified approach is based on the same formulas as the simulated one. The only difference can be found in the way δP_{risk} is calculated. Again we use the failure coefficient C instead of the P_{fail} . As for the simulated approach this failure coefficient takes the value 1 for all wave heights exceeding a certain limiting wave height. Here the significant limiting wave height $H_{1/3}$ is replaced by a regular wave of the same height, denoted as "equivalent significant wave height" (H).

One important observation made from the simulated limiting wave heights is that the limiting wave height changes only little for a given speed over the full range of encounter angles in the following seas – sector (-45° to 45°). This allows us to introduce another simplification, by determining only a mean limiting wave height, independently from the encounter angle.

Then the simplified criterion yields:

$$ISEI_s = \sum \sum \sum \delta P_{sea} (H^{(j)}, T_l^{(i)}) \cdot \frac{1}{3} \delta P_{risk}^{Cs} (H^{(j)}, T_l^{(i)}, v_s^{(l)}) \quad [8]$$

Here the factor 1/3 was introduced to account for the overall course probability of the following seas-sector.

The equivalent limiting wave height is calculated from a deterministic approach taking into account two major parameters influencing the behavior of the ship in following and stern quartering waves. One parameter is the lever arm alteration the ship has in the given wave, the second one is the ratio between the encounter frequency and the natural roll frequency of the ship to account for resonance conditions. Then the limiting wave height for the equivalent wave can be calculated as follows:

$$H_{lim} = f \left(\frac{\omega_e}{\omega_s}, C_i \right) \cdot C_{10} (\zeta_{A0})^{C_{11}} \cdot \lambda \quad [9]$$

Here ζ_{A0} denotes the wave steepness factor obtained from a lever arm balance described in the following. It is calculated from the limiting wave height by dividing it through the wave length. The function f addresses the influence of the frequency ratio ω_e / ω_s . C_i , C_{10} and C_{11} are correlation factors.

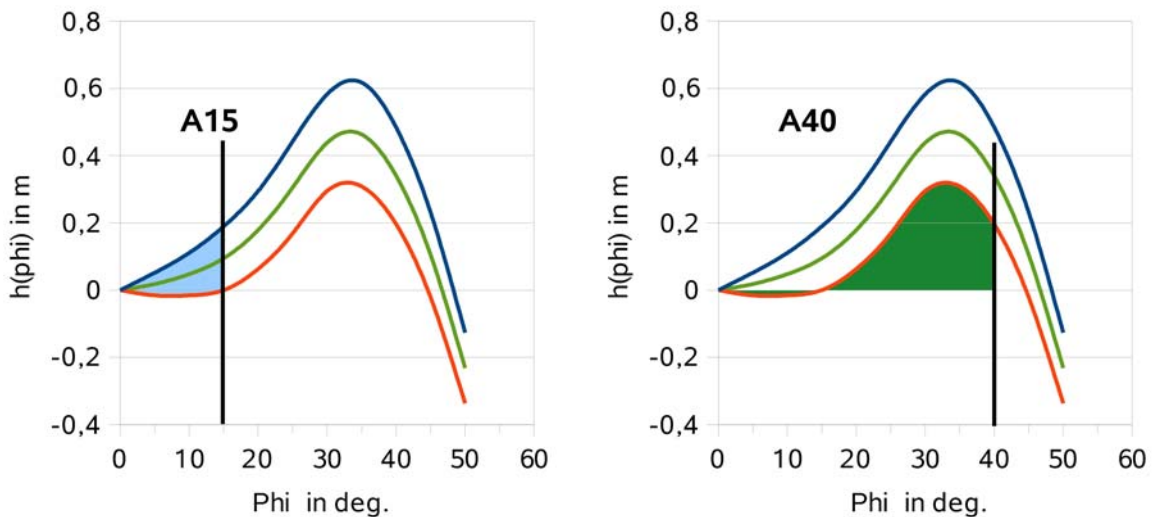


Fig 9: Lever arm balance in waves

Fig 9 shows the principal elements of the lever arm balance which is used to determine the mean limiting wave height. The first step is to calculate the lever arms in still water conditions and in the given wave for the situations wave crest amidships and wave trough amidships. All situations in which the area under the smallest lever arm curve integrated up to an angle of 40 degrees (A_{40}) is larger than the area between the smallest and the largest righting arm curve integrated up to 15 degrees heel (A_{15}). The idea behind this scenario is that the lever arm alterations caused by the passing wave lead to a certain amount of energy being introduced into the ship. In order to prevent capsizing, the ship has to be able to compensate this amount of energy even with the smallest righting moments occurring, when traveling in waves. This minimum stability usually is associated with the wave crest position. To take into account that the ship usually travels in irregular and short crested waves we introduce

another energy component which is added to the A_{15} -contribution representing direct heeling moments introduced by beam wave components (A_{ext}). Then the mean, speed independent, limiting wave height is calculated by:

$$H_{A0} := \left\{ H \in H \mid A_{40min} - (A_{15diff} + A_{ext}) \stackrel{!}{=} 0 \right\} \quad [10]$$

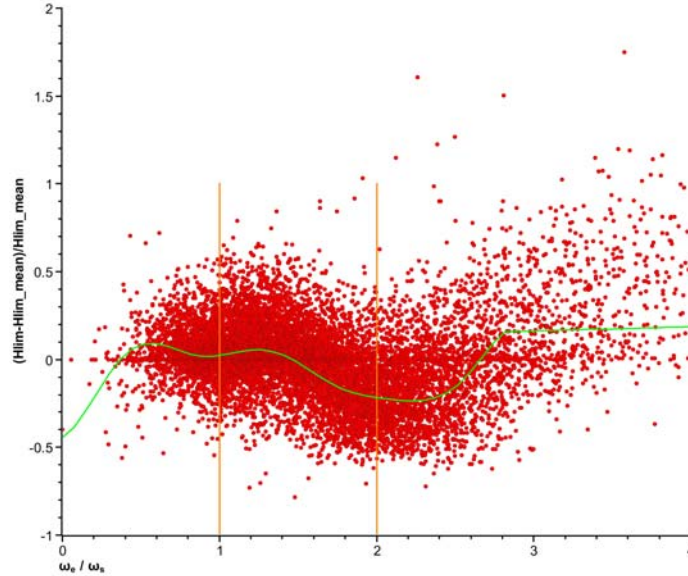


Fig. 10: Frequency dependency of the limiting wave

To account for the dependency between limiting wave height and the encounter frequency the function f is determined by regression from simulated results. For this purpose the mean limiting wave height from the simulations over all speeds is calculated. Then, the difference between the actual limiting wave height at a certain speed and the mean value is determined. Fig. 10 shows the results for all cases in our database. Although the results are scattered significantly the 1:1 and 2:1 resonance conditions are clearly imprinted in the data set. The regression function, shown in Fig. 10 as green curve is calculated with the following approach:

$$f(\omega_e / \omega_s, C_i) = \begin{cases} f_0(\omega_e / \omega_s, C_i) & \text{for } \omega_e / \omega_s < 2.8 \\ f_0(2.8, C_i) + C_9 \cdot \omega_e / \omega_s & \text{for } \omega_e / \omega_s \geq 2.8 \end{cases} \quad [11]$$

The function f_0 is a combination of three sine-functions and reads as follows:

$$\begin{aligned} f_0(\omega_e / \omega_s, C_i) = & C_1 \cdot \sin(2\pi\omega_e / \omega_s - C_2 \cdot \pi / 2) \\ & C_3 \cdot \sin(\pi\omega_e / \omega_s - C_4 \cdot \pi / 2) \\ & C_5 \cdot \sin(C_6\pi\omega_e / \omega_s - C_7 \cdot \pi / 2) + C_8 \end{aligned} \quad [12]$$

The regression coefficients C_1 through C_{11} are determined at the following values:

C1	-4.257E-01
C2	9.311E-01
C3	-1.807E-01
C4	1.511E+00
C5	4.578E-01
C6	1.912E+00
C7	7.773E-01
C8	-6.200E-02
C9	2.318E-02
C10	1.1308
C11	0.9251

Table 3: Correlation Coefficients

The determination of the resonance conditions requires the natural roll frequency of the ships. The common way to estimate the natural roll frequency by using the initial metacentric height in still water conditions as measure for the uprighting moments is not suitable here, as the stability changes significantly in waves and, moreover, as the lever arm characteristics of modern ship types are highly non-linear. Usually the estimates obtained from this procedure are rather pure. Due to this reason a mean effective stability is used here for the calculation of the natural roll frequency. For this concept an average mean righting lever curve is calculated from the the two extreme lever arm curves in wave trough and wave crest conditions. We then define an effective linear stability coefficient, denoted as GM_{eff} , which is determined such that the value of the linearized stability, integrated over the heeling angle up to 40 degrees, equals the area under the mean lever arm curve up to 40 degrees. Fig. 11 illustrates the concept.

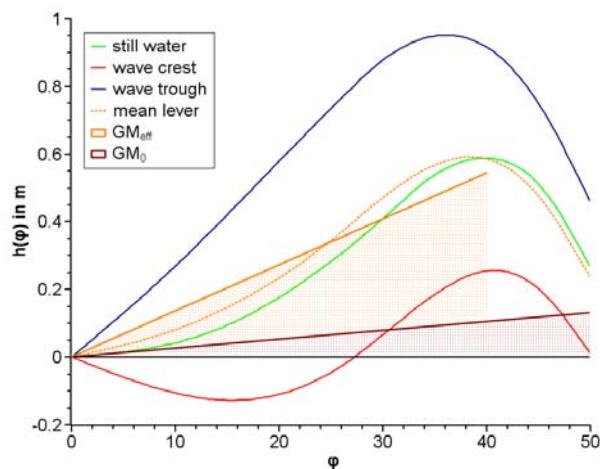


Fig. 11: Effective linearized stability

The correlation between the simplified criterion and the simulated index values has been tested for all 176 ships in our database. Each ship is investigated in three generic loading conditions, of which the first one equals the intact stability limit according to the IMO regulations in the IMO Res. A.749. The second and third loadcase have GM values increased by 0.5 and 1.0 meters with respect to the intact limit.

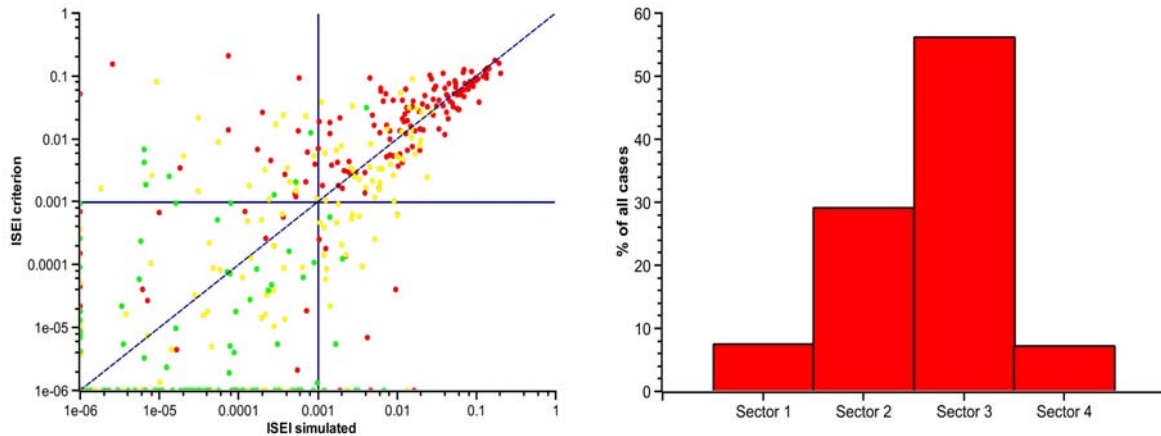


Fig. 12: Results for the ISEIs compared to $ISEI_{following}$

Fig. 12 shows the results for all ships, sorted by loadcase. The red bullets indicate the first loadcase equaling the intact stability limit. It becomes clear that both approaches, the simulated and the simplified, consider most of these cases as clearly un-safe as they have index values significantly above $1.e-3$, which is considered to be the future threshold value of the criterion (see below). The loadcase with a GM increased by 0.5 meters is shown in yellow and the third loadcase in green. It becomes clear that the index values of both approaches decrease significantly and in the same order of magnitude with increasing stability. The bar-plot on the right hand side of Fig. 12 shows the distribution of the investigated cases over the four sectors the chart on the left hand side is divided into. Sector 1 is situated on the top left side, whereas Sector 4 is located on the bottom right. For all cases in the sectors 2 and 3, both approaches deliver the same statement, whereas cases in sector 1 are considered to be safe by the simulation while the simplified approach considers them as being un-safe. The critical sector is number 4. In this case the simplified approach judges the situation to be safe, while the simulation, which is considered to be more accurate, makes a contrary statement. This affects about 7% of all investigated cases, which seems to be acceptable for the simplified criterion, as it addresses only a subset of the phenomena potentially leading to capsizing.

Conclusions

In the recent years a large number of ships was investigated with respect to their dynamic behavior in waves by means of numerical simulations in the time domain. Based on this database a new intact stability concept was developed, called Insufficient Stability Event Index (ISEI).

The new concept is based on long-term probabilities, taking into account the probability of occurrence for seastate, course and ship-speed. The actual failure criterion for the ship in a specific operating condition is implemented via a “safe”/“unsafe”-decision based on the Blume-criterion and the maximum roll angle observed during the simulation.

The concept has been validated by applying it to a number of intact stability accidents. Here it could be shown that the criterion is able to distinguish clearly between safe and un-safe loading conditions.

Additionally a simplified criterion, omitting the need to perform numerical simulations, has been developed on the basis of the findings made with the simulated approach. The approach has been validated against the results from the simulated criterion and shows reasonable agreement.

Based on the accidents investigated and based on theoretical considerations taking into account the concept of formal safety assessment issued by IMO, threshold values were determined, whereas $5.0E-2$ was found to be the border between very un-safe and critical situations. Ships with loading conditions which reach ISEI values below $1.0E-3$ are

considered to be sufficiently safe on lifetime basis.

References

- Arndt, B. (1960). "Ermittlung von Mindestwerten für die Stabilität", Schiffstechnik pp.35.
- Blume, P (1987). "Development of New Stability Criteria for Modern Dry Cargo Vessels", Proceedings PRADS'87 Conference
- Blume, P. and Hattendorf, H. G. (1987a). "Ergebnisse von systematischen Modellversuchen zur Kentersicherheit", Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, p 219
- Blume, P. and Hattendorff, H. G. (1987b). "Stabilität und Kentersicherheit moderner Handelsschiffe", HSWA Report S 165/83 and S 184/84
- Cramer, H. and Krueger S. (2005). "Numerical capsizing simulations and consequences for ship design", Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft 2001, Springer, 2005
- Hoppe, H., Goal-Based Standards - A New Approach to the International Regulation of Ship Construction, Maritime Safety Division, International Maritime Organization
- IMO(2002), International Maritime Organization. "Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for use in the IMO Rule-Making Process", MSC/Circ.1023
- IMO(2007), International Maritime Organization. "FORMAL SAFETY ASSESSMENT- Consolidated text of the Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process (MSC/Circ.1023-MEPC/Circ.392)", MSC83 / Inf.2
- Die deutsche Handelsflotte (1962). "Pläne der Frachtschiffe über 300 BRT" Seehafen-Verlag
- Kastner, S. (1962). "Kenterversuche mit einem Modell im natürlichen Seegang", Schiffstechnik 1962 p. 161
- Kroeger, P. (1987). "Simulation der Rollbewegung von Schiffen", Bericht, Nr.: 473, Institut für Schiffbau der Universität Hamburg
- Krueger, S. (2002). "Performance Based Stability", DCAMM 2002, Lyngby
- Krueger, S. and Kluwe, F. (2006). "Development of Dynamic Stability Criteria from Seakeeping Simulation.", International Marine Design Conference (IMDC2006), Ann Arbor, Michigan, USA
- Krueger, S. , Hinrichs, R., Kluwe F. and Billerbeck, H. (2006). "Towards the Development of Dynamic Stability Criteria" HANSA Maritime Journal, 10/2006, p.204 Germanischer Lloyd
- (1967). "Ergebnisniederschrift Stabilität MS TRIER v. 8. 5.1967", Germanischer Lloyd /SeebG 1967.
- Petey, F (1988). "Ermittlung der Kentersicherheit leerer Schiffe im Seegang aus Bewegungssimulationen", Bericht Nr.: 487, Institut für Schiffbau der Universität Hamburg
- Soeding, H. (2001). "Global Seaway Statistics", TU Hamburg-Harburg, Schriftenreihe Schiffbau, Report Nr. 610
- Soeding, H. and Tonguc, E. (1986). "Computing capsizing frequencies in a seaway", Proc. of Stab., Gdansk, Vol II. Add 1, p. 52
- Wagner, D. (1987). "Kentersicherheit intakter Schiffe", 23. Fortbildungskurs, Inst. f. Schiffbau Univ. Hamburg
- Wendel, K. (1954): "Stabilitätseinbußen im Seegang und durch Koksdeckslast.", HANSA 1954, P. 2009.

1 Introduction

1.1 The *MV Estonia* Accident

The Estonian-flagged Ro-Ro passenger ferry *MV Estonia*, shown in Figure 1, departed from Tallinn on 27 September 1994 approximately at 19:15 for a scheduled voyage to Stockholm. The route is shown in Figure 2. Officially she carried 989 people, 803 of whom were passengers.

The ship left harbor with all four main engines running. When she was clear of the harbor area full service speed was set. The engine setting was maintained up to the accident. The wind was southerly, 8-10 m/s. Visibility was good, with rain showers.

The voyage proceeded normally. Sea conditions along the Estonian coast were moderate, but became more rough when the ship left the sheltered waters. The ship had a slight starboard list due to a combination of athwart-ships ship weight disposition, cargo disposition and wind pressure on the port side.

As the voyage continued the wind velocity increased gradually and the wind veered to southwest. Visibility was generally more than 10 nautical miles. At midnight the wind was southwesterly 15-20 m/s with a significant wave height of 3-4 m. The rolling and pitching of the vessel increased gradually, and some passengers became seasick.

At about 00:25 the *MV ESTONIA* reached a waypoint at position 59°20' N, 22°00' E and from there headed true course 287°. The speed was about 15 knots and the vessel encountered the seas on her port bow. Due to increasing rolling, the fin stabilizers were extended, but it is not absolutely certain, whether the starboard stabilizer really became extended.

During his scheduled round on the vehicle deck the seaman of the watch (C16)¹ heard around 00:46 a heavy crash from the bow area, something like metal hitting against metal.



Fig. 1 The Ro-Ro passenger ferry *MV Estonia* (JAIC, 1997).



Fig. 2 The route and accident site of the *MV Estonia* (JAIC, 1997).

¹ The code refers to the confidential list Witness Key.xls shared by the two consortia.

He informed the Second Officer B (C47) about what he had heard and was ordered to try to find out what had caused the crash. He did so and according to his several testimonies everything seemed to be normal. His call with a walkie-talkie to the bridge was overheard: According to the testimonies of two crew members (C6, C15) the seaman of the watch had said to the bridge that there was quite a lot of water on the vehicle deck. Perhaps this was normal.

Further observations of unusual noise, 2-3 heavy bangs from the ship bow, were made by passengers at about 00:55-01:00. Obviously the loose bow visor was hammering against the forepeak deck and the bow ramp. The Third Engineer in the ECR heard the bangs. Shortly afterwards he felt that the ship was developing a list and went to look at the monitor showing the bow ramp. He saw that water was forcing in at the sides of the ramp. The ramp was in a closed or almost closed position.

When the seaman of the watch returned from his round, he caught up the master and entered the bridge just behind him at 00:58. The heavy blows at the bow were being reported to the bridge by telephone just when he entered the bridge. The captain asked how many engines were running and commented that they were already one hour late. Shortly afterwards the seaman of the watch was sent down by the Second Officer A (C48) to the car deck to find out the cause of the sounds reported to the bridge. After leaving the bridge he went to the information desk on the Deck 5. There he experienced the sudden large heeling (at 01:02) and did not anymore manage to reach the vehicle deck.

According to JAIC (1997) at 01:00 the watch on the bridge was taken over by the Second Officer A (C48) and the Fourth Officer (C49). After being relieved the Second Officer B (C47) and Third Officer (C50) left the bridge, but may have returned later.

At around 01:00-01:02 the ship heeled suddenly and heavily to starboard. Bottles and glasses were falling off from shelves in the bars. Originally fixed heavy pieces of furniture broke loose, started to slide toward starboard and crashed somewhere. Bags were sliding against the cabins doors, and the alarm clock of passenger P92, dropped from a cabin table, the battery got out, and the clock stopped at 00:02 Swedish time, that is, 01:02 on the ship's time.

At an early phase of the accident, perhaps around 00:55-01:05, the bow visor separated from the ship and tilted over the stem. The ramp was probably pulled fully open, allowing large amounts of water to enter the vehicle deck and to flow onto both sides of the center casing. Very rapidly the ship took on a heavy starboard list due to the water flowing on to the vehicle deck and due to the ship starting to turn to port. As a consequence the water sloshed on the vehicle deck towards starboard against the port side wall of the center casing and against the starboard side plating of the ship. Some water splashed or leaked into the staircases in the center casing and flowed down to the cabin areas on Deck 1. This caused further concern among the passengers already alarmed by the noises from the bow and the sudden large heeling motions of the ship.

Passengers started to rush up the staircases and panic developed at many places. Some passengers got showers in the staircases inside the center casing, when they started upwards from Deck 1, as the staircase was constructed so that water from the staircase platform on level Deck 2 could flow down as a water curtain on the persons in the stairs below. Many passengers were trapped in their cabins and had little or no chance of getting out in time. About 237-310 persons onboard succeeded in abandoning the ship. An overwhelming majority of them headed to the higher port side of the vessel.

Lifejackets were distributed by some individual crew members to those passengers, who managed to reach the boat deck. Persons, who got out of the ship, jumped or were washed into the sea. Some managed to climb into life rafts, which had been released from the vessel. No lifeboats could be launched due to the heavy list. As most people went to the higher port

side, the life saving equipment on the starboard side was rendered useless. About half of the persons, who succeeded in abandoning the ship, survived the elements on the rafts or in the sea having a water temperature of 10°-11° centigrade and about 4 m high waves.

Perhaps at about 01:20 a weak female voice called “Häire, häire, laeval on häire” the Estonian words for “Alarm, alarm, there is alarm on the ship”, over the public address system. Just a moment later an internal alarm for the crew was transmitted over the public address system.

A first Mayday call of the *MV Estonia* was received at 01:22, about 37 minutes after the seaman of the watch had reported a heavy crash behind the closed bow ramp on the vehicle deck. A second Mayday call was transmitted shortly afterwards and by 01:24 14 ship- and shore-based radio stations, including the Maritime Rescue Co-ordination Centre (MRCC) in Turku, had received the Mayday calls (JAIC, 1997).

At about this time all four main engines had already stopped. Also the main generators had stopped somewhat later and the emergency generator had started automatically, supplying power to essential equipment and to limited lights in public areas and on deck. The ship was now drifting more or less in beam seas.

The list to starboard increased further and water had started to enter the accommodation decks. Flooding of the accommodation continued progressively as more windows broke under the water pressure and the starboard side of the ship was completely submerged at about 01:30. During the final stage of flooding the list was more than 90 degrees. The ship sank with a stern trim, and disappeared from the radar screens of ships in the area at about 01:50.

During the night and early morning, helicopters and assisting ships rescued 138 people, of whom one later died in hospital. During the day and on the two following days 92 bodies were recovered. Most of the missing persons accompanied the vessel to the seabed.

The wreck was found in international waters within Finland’s Search and Rescue Region, resting on the seabed at a water depth of about 80 m with a heading of 95° and a starboard list of about 120°. The visor was missing and the ramp was partly open.

The position of the wreck is 59°22,9’ N, 21°41,0’ E. The visor, which has been recovered, was located at 59°23,0’ N, 21°39,2’ E, about one nautical mile west of the wreck.

This description of the course of events is partly based on the JAIC Final Report (1997). It is modified to fit in some individual testimonies and it of course reflects the HSVA-Consortium view of the course of events.

2 Conclusions

2.1 Introduction

The ship list as a function of time was first determined by TUHH based on the survivors’ testimonies. This curve as such is plausible and good for comparison with the hydrostatic analysis of the ship behavior. For comparison with the simulations with the HSVA ROLLS, the initial sudden heel described by many survivors was included in the HSVA-curve together with the somewhat higher heeling angle at the end based on the photograph of passenger P92. See the curves in Figure 78.

The numerical modeling of the sinking sequence was done in two parts. The early phase was modeled with the program HSV A ROLLS capable of modeling the ship motions while turning together with the dynamic flooding and sloshing of the water on the vehicle deck. After the heeling angle of about 50°-60° this modeling gets out the domain, where it is still accurate. The later phase of the sinking sequence was modeled hydrostatically by the TUHH using the program ARCHIMEDES II. The use of hydrostatic modeling for the later phase should be sufficiently accurate as the dynamics effects play a minor role in the later phase of the sinking process.

As one can see in Figure 78 the curves computed with the HSV A ROLLS and the

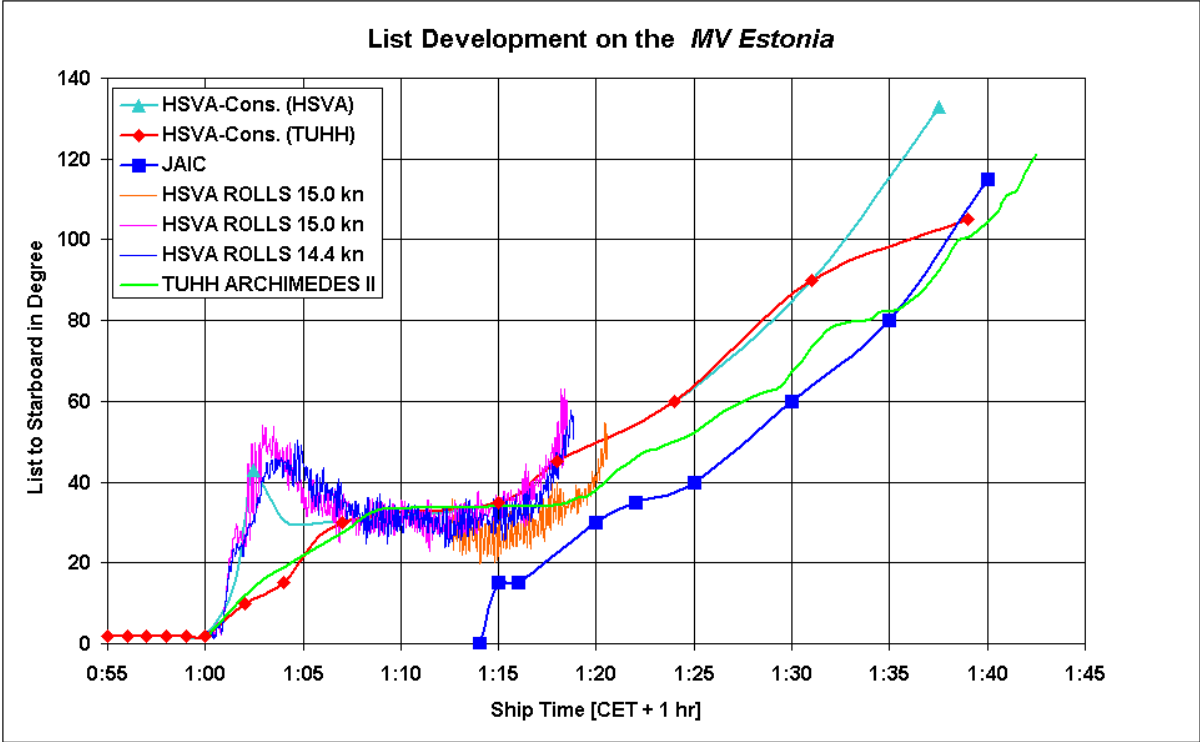


Fig. 78 The development of list on the *MV Estonia* reconstructed from the survivors’ testimonies and computed with numerical models.

ARCHIMEDES II cover the whole sinking sequence, and correlate satisfactorily with the two empirical curves established by the HSV A-Consortium.

One of the curves computed with the HSV A ROLLS was used as input in the evacuation simulation program AENEAS. As this first result was too optimistic with about 530 persons abandoning the ship, the roll motion curve was elevated with 2.5°, that is, about 8 percent. After this elevation in the input data the evacuation simulation gives about 280 persons abandoning the ship, which correlates well with the known facts of the accident. These numerical models together with other known facts on the accident were used to give best available information on the course of the accident. In the following paragraphs the main results and conclusions are listed.

The HSV A-Consortium investigation was limited to the ship sinking sequence and evacuation process. Structural failure processes related to the *MV Estonia* during the accident were not part of this investigation.

2.2 The Way to the *MV Estonia* Accident

The ship did not fulfill all SOLAS requirements regarding the extension of the collision bulkhead above the bulkhead deck, that is, the vehicle deck. According to JAIC it was common amongst the Finnish and Swedish maritime administrations to accept the ramp as an extension of the collision bulkhead, even when the ramp was located too much forward in the bow and not as required by SOLAS. This was a practical solution for the ferries traveling in the coastal waters between Finland and Sweden. According to Luhmann (2008) this exemption, however, should have been withdrawn by the authorities for the new trade Stockholm-Tallinn, as part of the route was located outside coastal waters.

A much more relevant point in the course of the accident is the interlocking between the bow visor and ramp, which was common in the Baltic ferries in the 1970s and 1980s. In a Ro-Ro passenger ferry like *MV Estonia* the ramp can be interpreted as the extension of the collision bulkhead. The collision bulkhead is a watertight transverse bulkhead in the fore part of the ship extending to the bulkhead deck. Its purpose is to prevent ingress of sea water in case of breach or rupture on the ship shell at the bow. Thus the collision bulkhead together with its extension is meant to be a second barrier against ingress of sea water.

Approval of such a bow arrangement by the maritime authorities, in which the failure of the bow visor leads to damage to, or the failure of, the extension of the collision bulkhead (i.e. ramp) exposing the vehicle deck to open sea, is not only in conflict with the purpose of the SOLAS regulations, but shows also limited understanding of issues related to ship stability. Technically the interlocking of the ramp with the bow visor may be regarded as an unfavorable design detail with respect to ship safety, in particular if the ship and the system of bow visor and ramp are or were in a poor maintenance condition.

Such designs were, however, common in the Baltic ferries in the 1970s and 1980s until the *MV Estonia* accident. The SOLAS requirements accepted in 1995 after the accident explicitly require the extension of the collision bulkhead to be so arranged as to preclude the possibility of the bow door causing damage to it in case of damage to, or detachment of, a bow door.

Also the requirements of the different classification society rules concerning bow visor strength were very unspecific at the time of the *MV Estonia*'s design and construction. This reflects also the state of knowledge on the magnitude of the wave loads at the time the *MV Viking Sally*, that is, later the *MV Estonia*, was built. The design load criteria applicable and used in construction of the bow visor structures of the *MV Estonia* were thus not adequate, with the knowledge of today.

The hull form of the *MV Estonia* was not very good in view of sea loads. It had an extreme bow flare just (0-2 m) above the waterline at the bow. Above the knuckle line the flare is not extreme, but it is still considerable. This bow form certainly contributed to the high wave impact loads the vessel experienced in heavy seas. The bow visor extends also somewhat below the knuckle line.

The *MV Estonia* running on the more exposed Tallinn–Stockholm route was subject to higher wave loads than most other Baltic ferries running between Finland and Sweden. It may also have run slightly faster in trying to keep its schedule in bad weather. The nautical officers on the bridge did not reduce speed when they got the information on the strange noises or the heavy metallic blows from the bow. The reduction of speed would have radically reduced the wave loads on the bow and, if the ramp was already open, also reduced the inflow of water on to the vehicle deck. Had the crew acted otherwise, the accident would probably not have been fully prevented, but it is very likely that the number of lives lost would have been reduced. Due to the incorrect loading in Tallinn the port side heeling tank was full. As the

sudden heeling took place, the list could not be compensated even partially with the heeling tanks. The consequences are known.

The JAIC Final Report lists altogether 16 bow visor damages, which occurred during the years 1973-1994 in the Baltic Sea on vessels built by various European shipyards. These individual damages were in general not reported to authorities and collected and thus no conclusions were drawn. Thus the *MV Estonia* case was not a separate failure, but a rather culmination point for the safety problems in the Baltic ferry traffic. If this information would have been collected and analyzed, preventive measures could have been taken before the *MV Estonia* accident and not after it.

2.3 The Accident Scenario

The accident can be considered to have started already around 01:00 with the loss of the bow visor. It is very likely that already before, the ramp was leaking, letting water onto the vehicle deck, not least because the bow visor and ramp structures were slowly breaking. The location of the visor, those of the debris from the vessel and that of the wreck on the seabed, together with the survivors' testimonies clearly show that the vessel made a turn to port. Most likely already before the turn the vessel had heeled strongly to starboard as a consequence of the massive inflow of water onto the vehicle deck. The heeling of the vessel was at least partly related to the turning of the vessel. As a result of the reducing speed the centrifugal acceleration reduced and the ship righted itself somewhat. The heeling during the turning was so massive that the ventilation ducts ending at the ship side just below the Deck 4 submerged, and water could flow down into several compartments below the vehicle deck. Simultaneously some water was flowing from the vehicle deck into the center casing and further down into the passenger compartments below the vehicle deck. The draught of the ship increased, which further increased the flow onto the vehicle deck through the opening at the bow. At some point the strength of the windows at the ship side was exceeded and the windows started to break causing the heeling further to increase. Little before starting finally to sink the vessel probably had a list of about 125°-140° to starboard. The ventilation ducts on the port side of the vessel, which submerge very late, allowed so much rest air from the watertight spaces below the vehicle deck to escape that the vessel could sink. According to the calculations of the HSVA-Consortium the vessel could sink with closed WT-doors under the vehicle deck.

2.4 The Heeling and Sinking Process

- ⇒ The accident can be considered to have started already around 01:00 with the loss of the bow visor and not at 01:14 as stated by the JAIC.
- ⇒ The bow visor detached from the *MV Estonia* as a result of structural failures in the deck beams and locking systems of the visor.
- ⇒ The structural failures were most likely caused by wave loads, which are normal operational loads. The survivors' testimonies and most other evidence support neither the hypothesis of the visor loss being caused by an explosion, nor by a collision with a submarine.

- ⇒ Due to the interlocking of the visor and the ramp just behind it, it is very likely that the visor pulled the ramp open as it fell down.
- ⇒ Many survivors heard a scraping sound just after the heavy blows from the bow, as the ship run over the visor, which could not sink fast enough not to be hit by the advancing ship bow.
- ⇒ The scenario of the visor and ramp being loose, let's say both about 1 m open, is not likely to be the main flooding scenario for the vehicle deck. The inflow rate appears to be too small for this. This implies that the visor dropped off relatively early and did not hang on the vessel until the ship heeled to near or over 90°.
- ⇒ The three crew members in the ECR were the last persons who saw the bow ramp closed during the initial phase of the accident. Therefore their testimonies are important for re-constructing the course of events. Based on the survivors' testimonies, the results of the evacuation simulations, and the approximate casualty rates of passengers on each deck it is concluded here that the crew members must have left the ECR earlier than reported by themselves and also by the JAIC. The events they describe in their testimonies thus took place earlier than reported by the JAIC. With this interpretation of the testimonies from the ECR the conflict between them and on the other hand the testimonies of other survivors and the results of the analysis carried out in this study could be to great extent removed.
- ⇒ The Third Engineer C36 saw in a monitor in the ECR water coming in at the sides of the almost closed ramp about two to four minutes after the two heavy blows were generally heard on the ship. It was concluded in Chapter 1.5 that the closed ramp was last time observed by the Third Engineer around 00:58-01:01, which is at a very early phase of the accident. It is very likely that the ramp opened very soon after this time.
- ⇒ After the visor fell the vessel advanced straight ahead approximately 2-3 minutes on its original course until it turned to port. During this time a large amount of water flowed onto the vehicle deck onto both sides of the center casing and the ship heeled to starboard. It is likely that there was water on vehicle deck already before the visor fell off.
- ⇒ When water was sloshing on the vehicle deck, limited amounts of water could flow down on to Deck 1 through the staircases in the front part of the center casing already at early phases of the accident, as reported by the survivors. The sudden heel to starboard probably contributed to this.
- ⇒ In view of this early water flow on to Deck 1 through the center casing, the assumption of damage deeper down on the hull as a cause for the water on Deck 1 appears superfluous.
- ⇒ A relatively high speed is needed to cause a sufficient amount of water to flow onto the vehicle deck in order for the first sudden heel to appear in the simulated ship roll motion. The speed of 14.2 kn or higher was needed in the computations with the program HSVA ROLLS to cause the first sudden heel to appear.

- ⇒ After the mentioned 2-3 minutes the vessel must have turned away from the waves and reduced speed. Otherwise it would most likely have capsized.
- ⇒ The simulations show the high vulnerability of a vessel like *MV Estonia* to a serious damage exposing the ship's vehicle deck to open seas: The difference between a rapid capsize and survival can be as low as about 30 seconds on the initial course and speed with the ramp open.
- ⇒ The sudden heel is probably also related to the start of the turn of the vessel initiated by the officers on the bridge.
- ⇒ The computed time-histories of the heeling angle shown in the figures show a high peak just in the beginning, when the ship speed is high, the vessel starts to turn, and there is already water on the vehicle deck. This high heeling angle is caused by at least three factors: (1) the turning rate of the vessel; (2) the chosen random wave pattern realization; (3) the amount of accumulated water on the vehicle deck.
- ⇒ In the simulations the compartments below the vehicle deck can have a considerable water ingress via the center casing relatively early during the course of the accident. The Engine Room related spaces can be flooded at this phase only via the ventilation ducts on ship sides. The inlets of these ducts are located just below Deck 4 and they submerge below the sea surface only when the ship has a considerable heeling angle. The ingress of water to the Engine Room related spaces is therefore likely to start later and is somewhat slower than to the spaces flooded by water entering from the vehicle deck via the center casing.
- ⇒ The water flow down into the center casing from the vehicle deck and the flow through the side ducts into the spaces below the vehicle deck significantly contributed to the loss of the *MV Estonia*.
- ⇒ The hydrostatic analysis of the TUHH showed that from that moment on, when the side ventilation duct inlets were submerged, the vessel would irreversibly sink.
- ⇒ In his testimony the passenger P76 describes how the window just outside the Karaoke Bar on Deck 5 was partly submerged during the sudden initial heel. The simulations show this, too. This implies that (1) The ventilation duct openings at the ship side just below the Deck 4 had a hydrostatic pressure head of more than 3 m; (2) The large windows on Deck 4 were loaded near to their estimated breaking load.
- ⇒ The absolute breaking load of the windows could be estimated only crudely. Thus the computed moment of time the windows break is not very accurate. As, however, the larger windows are structurally much weaker than the smaller ones, it is very clear that when the vessel heels to the side and the windows submerge, the larger windows break first. As the larger windows are located in the stern and middle of the ship this fact contributes to the vessel sinking stern first.
- ⇒ The location of the visor, those of the various items dropped from the vessel and that of the wreck on the sea bottom define the points, above which the vessel must have passed

or stopped at. Therefore the vessel must have had a track very similar to those shown in Figures 31, 33, 37 and 41.

- ⇒ Items that dropped from the ship distributed along the track of the vessel over a significant distance as shown with the red ellipse in Figure 3 and in all figures showing the ship's track. Therefore it is likely that towards the end of its track the ship, while drifting slowly, did not heel over rapidly dropping many items on one spot, but that the heeling continuously increased as the vessel was drifting.
- ⇒ Shortly before the *MV Estonia* sank, it had a heeling angle of approximately 125-140° to starboard. The stern of the vessel probably pointed approximately in the direction of 300°-325°, which is plausible considering the effect of the SW wind on the drifting ship. The ship sank stern first and was mostly likely turned, pivoting around its stern on the sea bottom, towards port by the current, until it reached its final position on the sea bottom. The wreck of the ship lies in the direction of about 95°, that is, its stern points approximately in the direction of 275°.
- ⇒ The computed results: ship motions, flooding of the vehicle deck, flow of water into compartments below, the time spent on the track, etc. fit quite well to the survivors' testimonies and other known facts on the accident. Therefore it is not very likely that the real *MV Estonia* accident scenario would have been essentially different than the one modeled numerically here.
- ⇒ The behavior of the vessel is crudely similar to that already described in the JAIC Final Report. Our analysis reveals details, which in general support the conclusions made already by the JAIC. There is, however, a certain leeway in the accident scenario: It cannot e.g. be said exactly, how high the speed of the vessel was just before the start of the accident, or what was the turning radius of the vessel during the turn to port. In this respect the real accident scenario cannot be defined as accurately as described in the JAIC Final Report. Slight deviations from the course of events presented by the JAIC, or in this report as well, are possible. A certain uncertainty in details remains, even if the described scenario as a whole is the most likely one presently known.

8.5 Evacuation

- ⇒ There were at least 989 passengers and crew onboard the *MV Estonia*. Of these about 237-310 abandoned the ship, and 137 survived.
- ⇒ The *MV Estonia* got a large list relatively fast. It cannot be excluded that in very similar circumstances the ship could also have capsized. In the ship motion simulations it is very easy to get this result with only small changes in the input data. If the ship had capsized, it can be argued that the casualty rate would have been even higher than the 86 percent, it is now.
- ⇒ No organized evacuation took place. This could have helped many passengers to abandon the ship.

- ⇒ The ship got very rapidly a list over 20°, after which the lifeboats could not be lowered.
- ⇒ The ship list reached angles 25-35° in a short time, after which it was very difficult to get out of the ship.
- ⇒ Persons, who waited for an alarm or instructions by public announcements of what to do, left in general too late.
- ⇒ Of those, who abandoned the ship into life rafts and into water, about 50 percent survived.
- ⇒ It was not possible to lower the life boats due to the large list. Most passengers did not manage to release and make the life rafts to open. The crew assistance was not always available.
- ⇒ Almost all persons on board went to the higher port side of the vessel. This rendered 50 percent of the life saving appliances meaningless. In case of the *MV Estonia* this was probably not a problem, as only about 237-310 persons of the total 989 persons onboard got onto Deck 7 and abandoned the ship. According to the JAIC Final Report the ship had 2298 life vests for adults and 200 for children onboard, which should have been enough for the persons onboard even in a one-sided evacuation.
- ⇒ At least 21 persons are known to have abandoned the ship starting from the Deck 1 below the vehicle deck, which is furthest away from Boat Deck 7. The real number is likely to be somewhat higher. A crude estimate of the number of persons on Deck 1 gives 190, which yields a minimum abandoning rate estimate of 11 percent for the passengers on Deck 1. According to the survivors' testimonies they were pre-warned by the noises, already concerned of their safety and left in a hurry, many of them half-naked, just after the sudden large heeling motion of the ship. Without this pre-warning the abandoning rate from this area would have been even lower than the current 11 percent. The minimum ship average abandoning rate is 24 percent.
- ⇒ The average ages of the persons on different decks were extrapolated from the survivors' ages having cabins on these decks and adjusted to yield correct average ages for the ship passenger and crew populations. Even if these extrapolated results are not totally reliable, they give an indication that there can be significant differences in the age distribution of passengers on different decks. It would be possible to take such features into account in the ship interior design.
- ⇒ The passenger age differences between the different decks can be at least one partially explaining factor to the very low survival rate of the passengers in cabins on Deck 5, where the average age was estimated to be 64 years: Only 4 persons are known to have abandoned their cabins on Deck 5, youngest of them being 49 years old: Based on this we get a minimum abandoning rate estimate of only about 4 percent.

- ⇒ Testimonies of the survivors, the evacuation simulations with AENEAS and the location and number of victims observed by the divers on the wreck clearly show that large open spaces form a serious obstacle for an evacuation in a heavily listed ship.
- ⇒ Transverse stairs in an evacuation route, like the ones next to the cabin compartments in the bow part of the *MV Estonia*, can easily become a dead end in the route when the ship list increases. This is shown by the evacuation simulations and the observations of the divers.
- ⇒ As the ship list increases it becomes increasingly difficult to advance in longitudinal corridors tilted sideways, as one cannot anymore walk in an upright position. The open cabin doors in the lower side wall of the tilted corridor must be jumped over or passed somehow.
- ⇒ Certain differences between the results of the evacuation simulations and the known facts on the accident suggest that it was probably very difficult to get out of the cabins. It is possible that a considerable number of persons in cabins were either injured or trapped permanently inside the cabins as a consequence of the first sudden heel.
- ⇒ In cabins, where the floor was inclined downwards towards the cabin door, loose items, bags etc., slid towards the lowest point and often blocked the cabin door opening inwards.
- ⇒ It is further known that if the cabin area just in front of the door does not have a good hand rail or other support, it is very difficult for a person hold his/her own weight on the inclined floor and simultaneously pull the cabin door open towards him/herself.
- ⇒ In cabins, where the floor was inclined upwards towards the cabin door, the difficulty is to get to the door against the slope. It is known from the survivors' testimonies that this caused overwhelming difficulties to some passengers now missing.
- ⇒ The standard IMO Day- and Night Cases for advanced evacuation simulation are undoubtedly useful in ship design. The difference between the evacuation simulation according to the IMO Night Case, i.e. without ship's list, and the real *MV Estonia* case is, however, considerable. The increasing ship list can significantly slow down or stop the evacuation process. Even if the *MV Estonia* is perhaps an extreme case, it can well be asked whether the IMO evacuation criteria should also deal with situations of non-zero ship list. In view of the *MV Estonia* case this can be seen as particularly important for vessels, like Ro-Ro passenger ferries, which can rapidly develop a large list.

8.6 Discussion – Suggestions - Recommendations

The watertight integrity of the vehicle deck of a Ro-Ro passenger ferry must be assured under all possible design conditions. Krüger and Kehren (2008) recommend to investigate the actual loading scenarios based on first principles together with an analysis of the structural response of the design element in question in order to ensure that under all relevant operational conditions the watertight integrity of the vehicle deck is assured.

It would be possible to provide the crews with diagrams showing the recommended maximum speed in a given sea state in order not to mechanically overload the bow door structures in ferries. It is not self-evident that the crew knows at which ship speed in a certain seaway the sea loads can exceed the design loads of the ship structures.

It was further found that a core safety element of a Ro-Ro passenger ferry in case of a loss of its watertight integrity is in fact a sufficient freeboard from the waterline in that equilibrium floating condition to the vehicle deck. A sufficient freeboard prevents massive water ingress into the ship and, consequently, a rapidly increasing heel. Prevention of the rapidly increasing heel is a necessary condition for a successful evacuation of the passengers and crew. Whenever modifications of the existing damage stability requirements for Ro-Ro passenger ferries are discussed, this technical fact should be kept in mind.

In an ideal case the vehicle deck and ship should be designed so that in a possible damage case the ship's list does not exceed a certain maximum value, above which an orderly evacuation is not anymore possible. All life saving appliances (LSA) should function properly at least until this defined angle of list. There are various ways to achieve this, of which a high freeboard is only one.

A potential water inflow onto the vehicle deck depends very strongly on the ship speed and on the freeboard to the opening or leak. If the bow doors are regarded as potential openings, locating them somewhat higher in the ship structure could improve safety. The freeboard of the vehicle deck opening at the bow of the *MV Estonia* was about 2.8 m. If it had been e.g. one meter more, that is 3.8 m, the amount of water ingress on the vehicle deck would have been radically smaller and the changes of the *MV Estonia* to survive considerably higher. Due to the bow wave a high freeboard on the bow is more important than elsewhere along the waterline.

The evacuation possibilities of passengers in a ship having a heavy list should be significantly improved: It is somewhat concerning that the evacuation or escape of the passengers and crew in a ship with a list of more than 25°-35° is either very slow or impossible. The *MV Estonia* case shows that if the vessel has a large open vehicle deck, such an angle can be reached very rapidly, if there is a massive inflow of water onto the vehicle deck.

When the *MV Estonia's* list exceeded a certain limit the engines shut down automatically, because the lubrication systems did not anymore work properly. Thus the (auxiliary) engines providing electrical power tripped, when they could have been most needed. Without sufficient electrical power the possibilities of the crew to influence the course of accident were rather limited. Engines, which would keep running at higher heeling angles, could provide better changes for the crew to rescue the ship and the passengers to evacuate.

A real evacuation may be one-sided to the higher side only. The number and location of life saving appliances should be such that also in a one-sided evacuation no shortage is faced.

About 50 percent of the persons who got out of the ship survived. If life boats could have been lowered at ship list in excess of 20° the casualty rate could have been considerably lower. Some rafts turned upside down in seaway. The overwhelming reasons for the casualties were drowning, hypothermia and a combination of both. This is not new. Evacuation into water in the Baltic Sea is for most of the year not likely to end well.

According to the best available information the *MV Estonia* had heeling tanks connected with a cross-flooding duct in between. In the duct there was a valve, which could be opened to let water from one tank to another. In addition the ship was equipped with a system that opened this valve automatically, when the WT-doors were centrally closed. It is further known that

this system could be switched off, whereas it is not known, whether this system was in operation in the night of the accident. Therefore it was not taken into account in the HSVA-Consortium analysis.

If the system was in operation, it may have contributed to the *MV Estonia* disaster as follows: The ship was incorrectly loaded, the port side heeling tank was full, the starboard one empty. When the ship got a heavy list to starboard, it can be expected that somebody on the bridge tried to close all WT-doors, with the consequence that the valve in the cross-flooding duct opened. Thus water from the higher port side heeling tank would flow down to the lower starboard side heeling tank and increase the heeling angle of about 8°. This would have had two adverse effects: It would lead to increased difficulties in abandoning the ship and also to earlier tripping of the auxiliary engines generating power. The automatic connection of the opening of the valve in the cross-flooding duct to the closing of the WT-doors is here regarded as a potentially dangerous system.

The purpose of this investigation has been to throw light on the *MV Estonia* accident in September 1994. Some information provided by this investigation is new, but certainly not all, as we have come to similar conclusions than previous researchers. Some recommendations on ship safety were made in this study.

In general some findings of the past *MV Estonia* investigations have already been included in the actual international regulations related to ship safety. According to Luhmann, Meyer Shipyard, (2008) such are, e.g. the “water on deck” requirement of the Stockholm Agreement, the handling of cross-flooding valves, the availability of LSA in severe conditions of list and trim, the location of the collision bulkhead and the height of downflooding points from the vehicle deck.

The regulations have also otherwise been updated since the delivery of the vessel in 1980. In the framework of this study it has not been possible to check, whether similar changes as discussed here have after the accident been included in the actual rules related to ship safety or are under the discussion at IMO level. If so, some of the recommendations or suggestions given may be obsolete from the point of view of updating rules. Their technical validity remains.

Leckstabilitätsberechnungen durch Monte Carlo Simulationen

S. Krüger, H. Dankowski, F.-I. Kehren, TU Hamburg-Harburg

1. Einführung in die Problematik

Etwa 40 Jahre nach Einführung probabilistischer Konzepte in die Frage der Unterteilung von Schiffen durch Wendel kann man heute mit Recht behaupten, dass diese Methodik zum allgemeinen Standard bei der Bewertung der Lecksicherheit von Schiffen geworden ist. Insbesondere die gerade erfolgte Umstellung des Lecksicherheitsnachweises von Passagierschiffen auf ein probabilistisches Konzept bestätigt das. Dabei besteht das Prinzip der probabilistischen Leckrechnung darin, einen Überlebensindex zu bestimmen, der sich aus der statistischen Trefferwahrscheinlichkeit eines Raumes oder einer Raumgruppe sowie der dazu gehörigen Überlebenswahrscheinlichkeit zusammensetzt. Die Trefferwahrscheinlichkeit wird dabei aufgrund von vorliegenden Statistiken der Verteilung von Leckgröße und Lecklage ermittelt. Bezüglich der Wahrscheinlichkeit des Überstehens von Beschädigungen werden bestimmte Forderungen an die Endschwimmlage sowie an die Hebelarmkurve gestellt. Im Einzelfall muss darüber hinaus auch nachgewiesen werden, dass die Endschwimmlage tatsächlich erreicht werden kann. Dabei besteht das Ziel der Leckrechnung darin, für eine als gegeben angenommene Unterteilung den Grenzwert für die Höhe des Gewichtsschwerpunktes festzulegen, für den gerade noch gilt, dass der geforderte Überlebensindex gerade so groß ist wie der mit der gewählten Unterteilung erreichbare Index. Damit ergibt sich als Entwurfsproblem die Aufgabe, eine K_{gmax} - oder G_{mreq} -Kurve festzulegen. Weil die Forderungen der Leckrechnung bei fast allen Schiffen zu höheren Stabilitätsforderungen als die Intaktregeln führen (lediglich bei Schiffen mit extrem großen Windlateralfächern kann das sogenannte Wetter- Kriterium zu höheren Forderungen führen), schlägt damit die Leckrechnung in erheblichem Maße auf den gesamten Schiffsentwurf durch. Von daher liegt es im elementaren Interesse des Schiffsentwurfs, möglichst frühzeitig eine gesicherte Erkenntnis darüber zu erlangen, mit welcher Mindeststabilität ein Entwurf ausgestattet sein muss, um die sich aus der Leckrechnung ergebenden Forderungen zu erfüllen. Erschwerend kommt hinzu, dass die Leckrechnung gleichzeitig an zwei verschiedene (bei den neuen Regeln nach SOLAS 2009 sogar an drei verschiedene) Tiefgänge gekoppelt ist, deren Teilbeiträge dann zum eigentlichen Überlebensindex aufsummiert werden. Für jeden der zwei (oder ab 2009 dann drei) Tiefgänge kann der Entwurfsingenieur die zugrunde liegenden Schwerpunktshöhen frei wählen. Weil jede Schiffsseite abgerechnet werden muss, entsteht dadurch ein erheblicher Rechenaufwand, zumal der Entwurfsingenieur ein Interesse daran hat, möglichst viele Fälle zu identifizieren, die einen Beitrag zum Überleben des Schiffes bringen. Weil nun wegen der Berechnung der zugrundeliegenden Wahrscheinlichkeiten jeder Mehrabteilungsfall mit sich bringt, dass die bereits in dem Mehrabteilungsfall enthaltenen Unterfälle abzuziehen sind, nimmt die Menge an zu betrachtenden Fällen erheblich zu, gleichzeitig wird es für den Entwurfsingenieur immer aufwändiger, noch zu erkennen, wo sein Entwurf vielleicht noch Potential hat. Ferner beruht die tatsächliche Berechnung der Trefferwahrscheinlichkeit nach den sogenannten Explanatory Notes (das sind Erläuterungen zum eigentlichen Vorschriftentext) auf dem Prinzip der Mustererkennung, weshalb es in der Vergangenheit nur schwer möglich war, die Berechnungen komplett zu automatisieren. Erschwerend – und am eigentlichen Problem vorbeigehend – kommt hinzu, dass die Komplexität der Beschädigungsgenerierung mit der Komplexität der inneren Unterteilung stark zunimmt, obwohl die eigentliche Beschädigung als unabhängig von der inneren Unterteilung des Schiffes angenommen werden kann (nicht aber deren Wirkung).

Von daher erscheint es sinnvoll, nach einem alternativen Berechnungskonzept zu suchen, einfach weil die grundsätzliche Aufgabe der Ermittlung des Überlebensindex für eine gegebene Unterteilung aus kombinatorischer Sicht prinzipiell automatisierbar sein muss.

Ferner ist nach der Einführung der neuen Lecksicherheitsvorschriften für RoRo-Fahrgastschiffe ab 2009 die schizophrene Situation entstanden, dass ein RoRo-Fahrgastschiff, welches einen europäischen Hafen anläuft (Port of Call-Prinzip) zusätzlich zu den neuen, probabilistischen Regeln (die auch einen deterministischen Anteil enthalten, um zu verhindern, dass kleine Beschädigungen eine große Wirkung haben) auch noch das sogenannte Stockholmer Zusatzabkommen erfüllen muss, welches nach dem ESTONIA-Unglück eine zusätzlich auf dem RoRo-Deck anzusetzende Wassermenge fordert und auf die existierende SOLAS Reg.8 verweist. Danach muss also ein RoRo-Fahrgastschiff sowohl eine probabilistische als auch zwei deterministische Regelwerke erfüllen, was nur sehr schwer zu bewerkstelligen ist. Abb.1 verdeutlicht diese Situation.

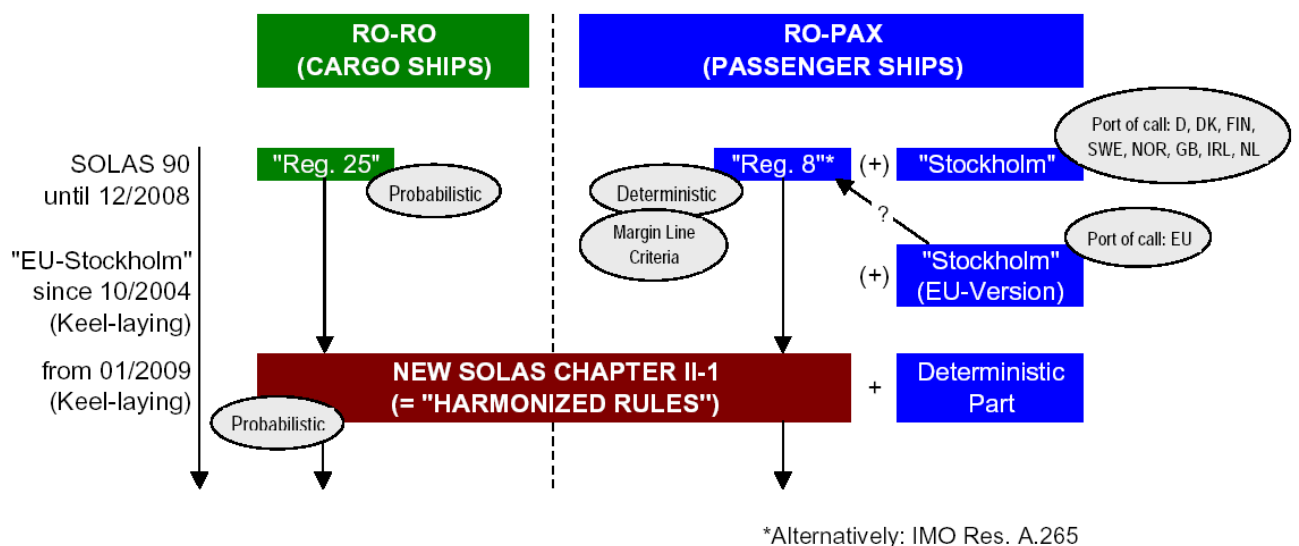


Abb.1: Vorschriftensituation nach Einführung der neuen (=Harmonized) Regeln für RoRo-Passagierschiffe. Quelle: C. Ortloff, FSG, in: Designs 06, ShipPax Information, Göteborg.

Von daher wird zu Recht auf diese problematische Situation hingewiesen, und es wurde mehrfach vorgeschlagen, das Stockholmer Abkommen ersatzlos zu streichen, weil das durch die neue probabilistische Leckrechnung erreichte Sicherheitsniveau ohnehin höher sei. Dies wäre aber nur dann nachweisbar, wenn es tatsächlich gelänge, die den jeweiligen Vorschriften zugrundeliegenden Sicherheitsniveaus quantitativ beurteilen zu können. Weil aber die Vorschriften unterschiedliche Ansätze bezüglich der Leckgröße als auch bezüglich der Berechnung des Überstehens der Beschädigung haben, ist der Nachweis nicht ohne weiteres zu führen.

Aus den oben genannten Gründen erscheint es sinnvoll, ein alternatives Werkzeug zur Lecksicherheitsbewertung zu entwickeln, welches dann folgende Anforderungen erfüllen muss:

- Ermittlung des tatsächlichen Sicherheitsniveaus von Schiffen und Vorschriften
- Voll automatisches Abarbeiten der Beschädigungsgenerierung und der Bewertung
- Anschauliche Visualisierung der Ergebnisse und Aufzeigen von Verbesserungspotential

Im Folgenden wird ein Konzept vorgestellt, welches die Leckrechnung konsequent als statistisches Problem auffasst und mit Hilfe von numerischen Simulationen löst.

2. Grundlagen der Monte-Carlo-Simulation

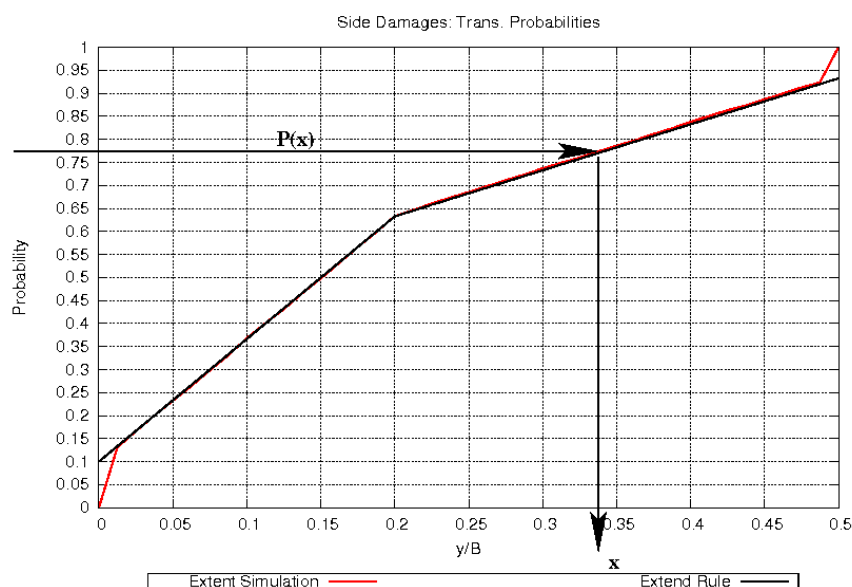


Abb.2: Darstellung eines statistischen Prozesses am Beispiel der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Eindringtiefe von Beschädigungen nach SOLAS 95, B1 für eine Lecklänge $l/L=J=0.2$. Die Abbildung zeigt die Verteilung nach SOLAS 95, B1, sowie deren Simulation.

Jeder statistische Prozess kann durch eine sogenannte Wahrscheinlichkeitsverteilung beschrieben werden. Diese Wahrscheinlichkeitsverteilung wird meist durch Beobachten und Auszählen von tatsächlich aufgetretenen Ereignissen ermittelt. Als Beispiel hierzu diene Abb.2. Dort ist die Wahrscheinlichkeit für die Eindringtiefe eines Seitenlecks für eine dimensionslose Lecklänge von 0.2 nach SOLAS 95, B1 aufgetragen. Mit Hilfe einer solchen Wahrscheinlichkeitsverteilung lässt sich jetzt beispielsweise die Wahrscheinlichkeit dafür angeben, dass ein bei $B/5$ angeordnetes Längsschott durchschlägt. Es ergibt sich aus Abb.2, dass die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Leck bis $0.2B$ eindringt, etwa 0.63 beträgt. Das bedeutet, dass 63% aller Beschädigungen eine $B/5$ Wand nicht durchschlagen würden, weil deren Eindringtiefe geringer als $B/5$ ist. Umgekehrt würden 37% aller Beschädigungen diese Wand durchschlagen.

Die maximal mögliche Wahrscheinlichkeit beträgt 1, dies entspricht der maximal beobachteten Eindringtiefe. Umgekehrt entspricht die Wahrscheinlichkeit von 0 der

kleinsten beobachteten Eindringtiefe. Mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsverteilung lässt sich also an jeder Breitenposition angeben, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine an dieser Stelle angeordnete Längswand durchschlagen werden würde. Nun muss die zugeordnete Wahrscheinlichkeit immer einen Wert zwischen 0 und 1 annehmen, und die Wahrscheinlichkeitsverteilung ordnet diese Wahrscheinlichkeit dann einem Ereignis zu.

Das Prinzip der Monte- Carlo- Simulation besteht nun einfach darin, eine Wahrscheinlichkeit $P(x)$ auszuwählen und mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsverteilung dann das dazu gehörige Ereignis zu ermitteln. Dabei bedient man sich der Hilfe eines Zufallszahlengenerators, der gleichverteilte Zufallszahlen im Intervall $[0,1]$ liefert. Fasst man diese Zufallszahl als Wahrscheinlichkeit auf und sucht aus der Wahrscheinlichkeitsverteilung das zugehörige Ereignis heraus, dann erhält man bei einer ausreichend großen Stichprobe eine Population von Beschädigungen, deren statistische Verteilung dann derjenigen entspricht, welche zum Aufstellen der Wahrscheinlichkeitsverteilung geführt hat. In Abb.2 wurden nach diesem Prinzip 20000 Eindringtiefen gewürfelt, und es wurde für bestimmte diskrete Positionen dann stets die Wahrscheinlichkeit dafür ermittelt, dass eine an dieser Stelle gelegene Wand durchschlagen wird, was durch einfaches Ja/Nein-Auszählen erfolgen kann. Wie man sieht, stimmt das Ergebnis (bis auf die Ränder, dazu unten mehr) praktisch genau mit der Ausgangsverteilung überein. Hierzu kann man das sogenannte Konfidenzintervall bestimmen, das besagt, welche statistische Genauigkeit mit wie vielen Ziehungen erreicht werden kann.

Damit ist die eigentliche Erzeugung von Beschädigungen auf eine einfache Simulation zurückzuführen, die lediglich darauf basiert, eine Reihe von gleichverteilten Zufallszahlen zu erzeugen und damit aus gegebenen Wahrscheinlichkeitsverteilungen für Lecklage und Leckgröße den Beschädigungsquader zu ermitteln. Jeder Leckquader bewirkt, dass eine bestimmte Kombination von Räumen getroffen wird, und die Trefferwahrscheinlichkeit für eine bestimmte Raumkombination ergibt sich dann einfach daraus, dass deren gesamte Treffer gezählt werden und durch die Anzahl aller Lecks (Stichprobengröße) geteilt werden. Die Generierung der Beschädigungen läuft dann wie folgt ab:

- Erwürfeln eines Beschädigungsquaders aufgrund von zugrundeliegenden Wahrscheinlichkeitsverteilungen
- Feststellen der getroffenen Raumkombination
- Aufsummieren der Treffer dieser Kombination
- Wenn ausreichend viele Beschädigungen erzeugt wurden, ergibt sich dann die Trefferwahrscheinlichkeit jeder Raumkombination einfach als Quotient der gezählten Treffer und der Gesamtstichprobenzahl.

Das Verfahren, welches im Rahmen des EU-Forschungsvorhabens NEREUS erstmals von Tellkamp im Rahmen eines Äquivalenznachweises angewendet wurde, ist an sich extrem einfach und hat vor allem bezüglich der manuellen Vorgehensweise eine Reihe von Vorteilen:

- Weil die jeweilige Trefferwahrscheinlichkeit einfach durch Auszählen bestimmt wird, liegt sie auch für komplizierteste Mehrabteilungsfälle sofort vor, ohne dass erst die dazugehörigen Unterabteilungsfälle betrachtet werden müssen. Das macht die Darstellung außerordentlich übersichtlich.

- Weil die Trefferwahrscheinlichkeit letztlich auf der binären Auswertung eines Ja/Nein-Ereignisses beruht (also getroffen oder nicht getroffen), ergibt sich auch für komplizierteste Geometrien eine eindeutige Trefferwahrscheinlichkeit (anders als z.B. bei den Explanatory Notes).
- Weil alle Trefferwahrscheinlichkeiten individuell ermittelt werden, kann man sofort die Ergebnisse nach absteigenden Wahrscheinlichkeiten sortieren, und man erkennt sofort, wie ein Entwurf verbessert werden kann.
- Weil die Simulation automatisch erfolgen kann und die entstehenden Treffer sofort zusammengefasst werden, lassen sich mehr Kombinationen erzeugen als auf die manuelle Weise, so dass man den Grenzwert des maximal möglichen Überlebensindex angeben kann. Dies ist für Prüfzwecke wichtig.

Nach der Generierung der Beschädigungen erhält man also eine Reihe von getroffenen Raumkombinationen mit jeweils zugeordneten Trefferwahrscheinlichkeiten. Nun kann man für diese jeweils die Wahrscheinlichkeiten dafür ermitteln, dass die Beschädigung auch überlebt wird und erhält damit sofort den gesuchten Überlebensindex. Voraussetzung für die Anwendung des Verfahrens ist lediglich, dass die Wahrscheinlichkeitsverteilungen für Lecklage und Leckgröße vorliegen. Ferner wird ein Algorithmus benötigt, der zuverlässig die von einem Leckquader getroffenen Räume ermittelt.

Abb.3 zeigt eine Reihe von solchen Wahrscheinlichkeitsverteilungen für Lecklage, Lecklänge, Eindringtiefe und Leckobergrenze nach verschiedenen Vorschriften. Diese wurden aus der Auswertung tatsächlicher Beschädigungen erstellt. Man erkennt, dass die Darstellung in den einzelnen Vorschriften zum Teil erheblich von dem tatsächlich beobachteten Kollektiv (hier in Abb.3 mit HARDER bezeichnet) abweicht.

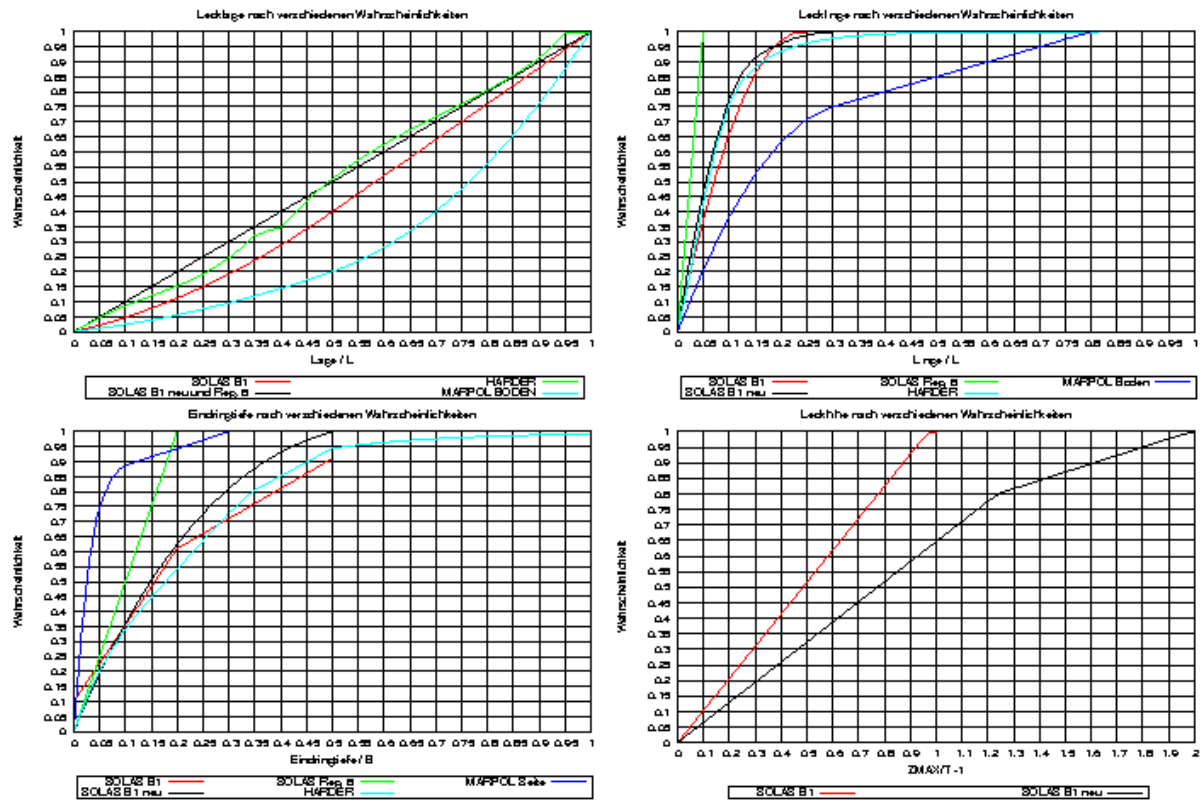


Abb.3: Wahrscheinlichkeitsverteilungen für Lecklage (links oben), Lecklänge (rechts oben), Eindringtiefe für maximale Lecklänge (links unten) sowie Leckobergrenze (rechts unten) nach verschiedenen Vorschriften. HARDER bedeutet dabei die Original- Leckstatistik, SOLAS Reg.8 die deterministische Leckrechnung unter Ansatz einer Gleichverteilung.

Bei der Implementierung des Konzeptes, das an sich schlüssig und einfach handhabbar ist, haben sich aber nun eine Reihe von praktischen Schwierigkeiten bei der vorschriitenkonformen Erzeugung von Beschädigungen ergeben, die sich im Wesentlichen aus einer fehlerhaften Behandlung des statistischen Materials bei den verschiedenen Vorschriften ergeben (die vielleicht auch politische Gründe haben mögen). Daher werden im Folgenden die wesentlichen Schwierigkeiten sowie deren numerische Heilung diskutiert. Daraus folgt ferner die Notwendigkeit, sowohl vorschriitenkonforme als auch tatsächlich beobachtete Beschädigungen generieren zu können.

3. Probleme bei der Umsetzung der jeweiligen Vorschriften

3.1. Allgemeines

Wie aus Abb.3 ersichtlich, liegen die beobachteten statistischen Grunddaten zur Beschädigung aus den sogenannten Damage-Cards vor. Dabei handelt es sich um Daten, die von Klassifikationsgesellschaften bei der Schadensbesichtigung aufgenommen wurden. Eine umfangreiche Übersicht hierzu wurde im europäischen Vorhaben HARDER z.B. von MAINS et. al. gegeben. Dabei wurden für jedes Leck folgende Daten aufgenommen:

- Lecklage
- Lecklänge (in Schiffslängsrichtung)
- Eindringtiefe (von der Außenhaut)
- Höhe der Leckobergrenze über Basis

Diese Grunddaten werden nun zunächst bei der praktischen Ausgestaltung der Vorschriften in eine hintere und vordere Leckgrenze umgewandelt, um die Trefferwahrscheinlichkeit in Längsrichtung (π_i) laut Vorschrift einfach für eine bestimmte Raumgruppe bestimmen zu können. Verschiedene Eindringtiefen (r_i) und Höhenausdehnungen (v_i) des Lecks werden dann laut Vorschrift der Wahrscheinlichkeit des Überstehens der Beschädigung zugeschlagen (im Rahmen dieser Arbeit wird daher im Folgenden der Begriff Trefferwahrscheinlichkeit immer mit dem Produkt $\pi_i \cdot r_i \cdot v_i$ gleichgesetzt, wohingegen der Begriff Überstehens-wahrscheinlichkeit der Beschädigung ausschließlich das Überstehen derselben meint). Dabei sind nun eine Reihe von Problemen entstanden, die zunächst einer direkten Simulation im Wege stehen und die bei der Simulation einer besonderen Behandlung bedürfen, wenn den Vorschriften vergleichbare Ergebnisse erzielt werden sollen (was zunächst das primäre Ziel ist).

3.2. Behandlung der Schiffsenden

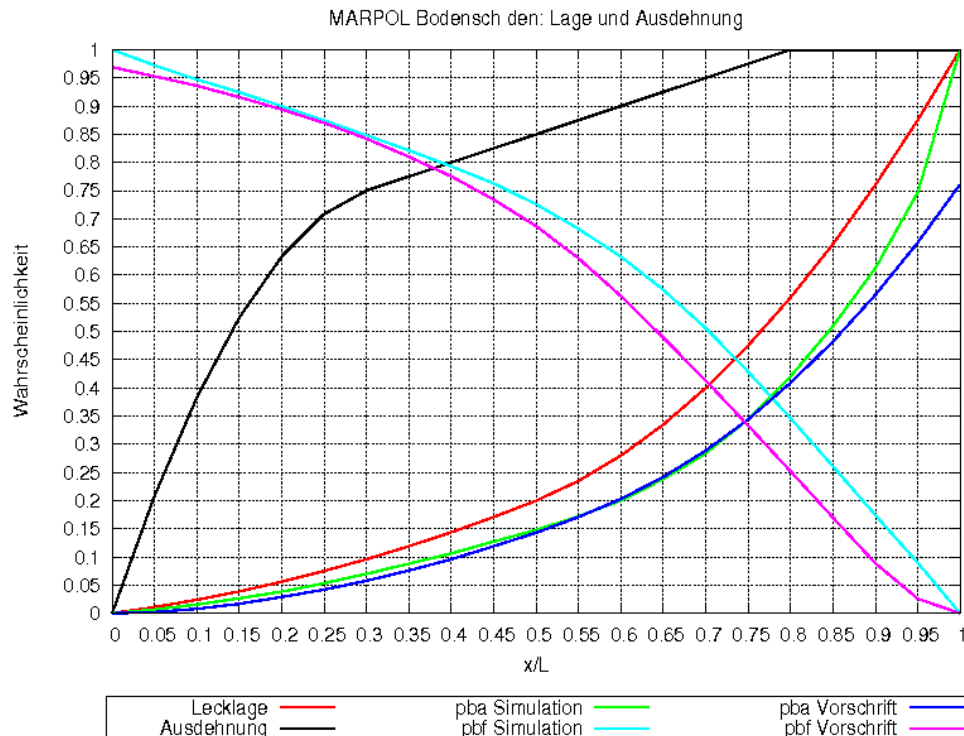


Abb.4: Problem der Behandlung der Schiffsenden am Beispiel der Ölausflussrechnung nach MARPOL ANNEX 2.

Bezüglich der Längsausdehnung des Beschädigung liegen die Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Lecklage (gemessen in der Mitte des Lecks) sowie für dessen Ausdehnung vor (vgl. dazu die Kurven „Lecklage“ und „Ausdehnung“ in Abb.4). Dabei ist offensichtlich, dass zwischen der Lecklage und Leckgröße eine gewisse Abhängigkeit besteht, einfach weil bei gegebener Lecklage nicht mehr alle Leckgrößen möglich sein können, solange sich das Leck vollständig im Intervall [0,1] befinden soll. Nimmt man nun eine Lecklage (loc) an, dann gilt für die maximale Leckgröße (ext) folgender Zusammenhang:

$$\text{Ext, max} = 2 \cdot \min(\text{loc}, 1 - \text{loc}) \quad (1)$$

Daraus folgt, dass bei gegebener Lecklage die Leckgröße aus einer bedingten Wahrscheinlichkeit zu ermitteln ist, weil bestimmte Leckgrößen physikalisch ausgeschlossen sind. Dies wird aber in keiner der untersuchten Vorschriften zur Unterteilung der Schiffe (SOLAS oder MARPOL) beachtet, wobei dies am deutlichsten bei der Berechnung des Ölausflussparameters nach MARPOL ANNEX 2 ist (s. Abb.4). Dort wird für jede Lecklage jede Leckgröße zugelassen, was darauf hinausläuft, beides als von einander unabhängige Ereignisse aufzufassen. Dies führt aber zu falschen Ergebnissen, wie Abb. zeigt: Pba und pbf stellen laut Vorschrift die Wahrscheinlichkeit dar, dass das Leck vollständig hinter (pba) oder vor (pbf) einer betrachteten x-Position liegt. Betrachtet man nun eine x-Position bei 1.0L, dann liegen laut Vorschrift immer noch 24% aller Beschädigungen vor dieser Position (weil pbf (1.0) = 0.76 ist), von denen aber gleichzeitig kein Leck seine hintere Ausdehnung

vor dieser Position hat. Damit werden 24% der Lecks nicht erfasst. Das ist natürlich nicht richtig und führt dazu, dass man die in der Vorschrift angegebenen Wahrscheinlichkeitsverteilungen so nicht für eine Simulation verwenden kann.

Zum Vergleich sind die mit einer Simulation erhaltenen Wahrscheinlichkeitsverteilungen für p_{ba} und p_{bf} in Abb.4 aufgetragen, wobei für eine gegebene Lecklage loc die korrekte abhängige Wahrscheinlichkeit nach Gl. (1) ermittelt wurde. Man erkennt den deutlich unterschiedlichen Verlauf beider Wahrscheinlichkeitsverteilungen und vor allem die Tatsache, dass bei korrekter mathematischer Behandlung des statistischen Grundmaterials die Wahrscheinlichkeiten sowohl für p_{ba} als auch für p_{bf} tatsächlich den Wert 1 erreichen. Es lassen sich ferner exakt die eigentlich falschen Verteilungen der Vorschrift erzeugen, wenn bei der Simulation tatsächlich die Leckgröße als unabhängig von dessen Lage angesetzt wird. Der gleiche Fehler ist prinzipiell auch den Lecksicherheitsvorschriften nach SOLAS, Part B1 (sowohl bei der existierenden als auch bei der neuen) enthalten, er wirkt sich allerdings praktisch nicht so stark aus wie bei dem in Abb.4 gezeigten Beispiel. Das Beispiel zeigt aber, dass für die Simulation beide Fälle implementiert werden müssen. In den Vorschriften bedeutet das praktisch, dass separate Formeln für die Berechnung der Trefferwahrscheinlichkeit vorgehalten werden, wenn die Beschädigung mit einem (oder beiden) der Schiffsenden zusammenfällt.

3.3. Behandlung der Eindringtiefe als abhängige Wahrscheinlichkeit

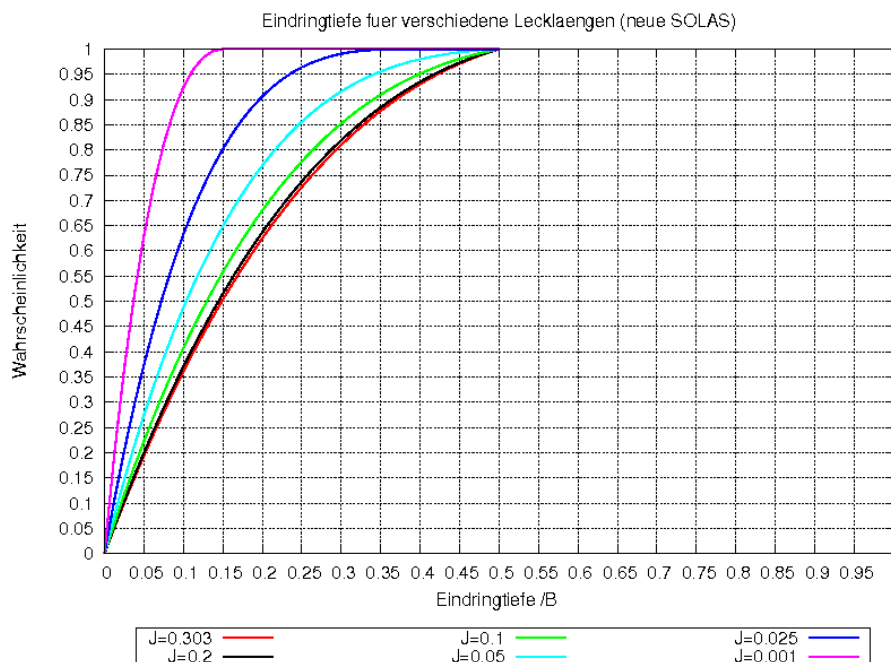


Abb.5: Eindringtiefe für verschiedene Lecklängen nach SOLAS 2009 B1. Anders als bei der derzeit gültigen Vorschrift SOLAS 95 B1 werden alle Wahrscheinlichkeiten für die maximale Eindringtiefe jetzt auch tatsächlich gleich 1.

In SOLAS, B1 wird die Eindringtiefe als von der Lecklänge abhängige Wahrscheinlichkeit angesetzt. Dies erscheint zunächst sinnvoll, und es wurde auch im HARDER – Vorhaben bestätigt, dass ein solcher Zusammenhang statistisch nachweisbar ist. Aus den statistischen Daten wurde dann der in Abb.5 wiedergegebene Zusammenhang zwischen Eindringtiefe für eine gegebene Lecklänge (J) ermittelt. Das ist prinzipiell richtig, jedoch wurde bei der praktischen Ausgestaltung der Vorschrift dann dieser Zusammenhang nicht korrekt in das Regelwerk übernommen, was sowohl für die existierende SOLAS B1 als auch für die neue SOLAS 2009 B1 gilt. Denn dort wird so vorgegangen, dass stets für eine vom Anwender

vorgegebene hintere und vordere Grenze der Beschädigung, die meist mit Raumbegrenzungen zusammenfallen, die jeweilige Eindringtiefe ermittelt wird. Dabei wird dann aber stets die maximal mögliche Lecklänge für die Berechnung der jeweiligen Eindringtiefe zugrundegelegt, obwohl die gewählte Beschädigungslänge auch von Lecks mit geringerer Ausdehnung und dann auch geringerer Eindringtiefe geöffnet werden würde. Bei der Anwendung der Vorschriften geht also der explizite Zusammenhang zwischen gerade betrachteter Beschädigungslänge und zugeordneter Eindringtiefe verloren.

Diese scheinbar unwesentliche Kleinigkeit hat aber durchaus gravierende Konsequenzen, wie das in Abb.6 dargestellte Beispiel zeigt. Dort sind die Ein- und Zweiabteilungsfälle für einen Ponton dargestellt, der insgesamt in 5 Abteilungen der Länge $0.2L$ unterteilt ist. Ferner ist der Ponton mit einer $B/5$ Längswand unterteilt. Betrachtet werden sollen jetzt die Wahrscheinlichkeiten dafür, dass in den Ein- und Zweiabteilungsfällen die Längswand durchschlagen wird, wobei die Formeln der existierenden SOLAS 95, B1 zugrundegelegt werden sollen. Danach ermittelt man für eine relative Lecklänge von 0.2 einen $(1-r)$ -Wert von 0.3673 , das bedeutet, dass etwa 37% aller Beschädigungen die $B/5$ -Wand durchschlagen würden. Für den Zwei-Abteilungsfall ist $J=0.24$ anzusetzen, daraus folgt $(1-r)=0.3785$.

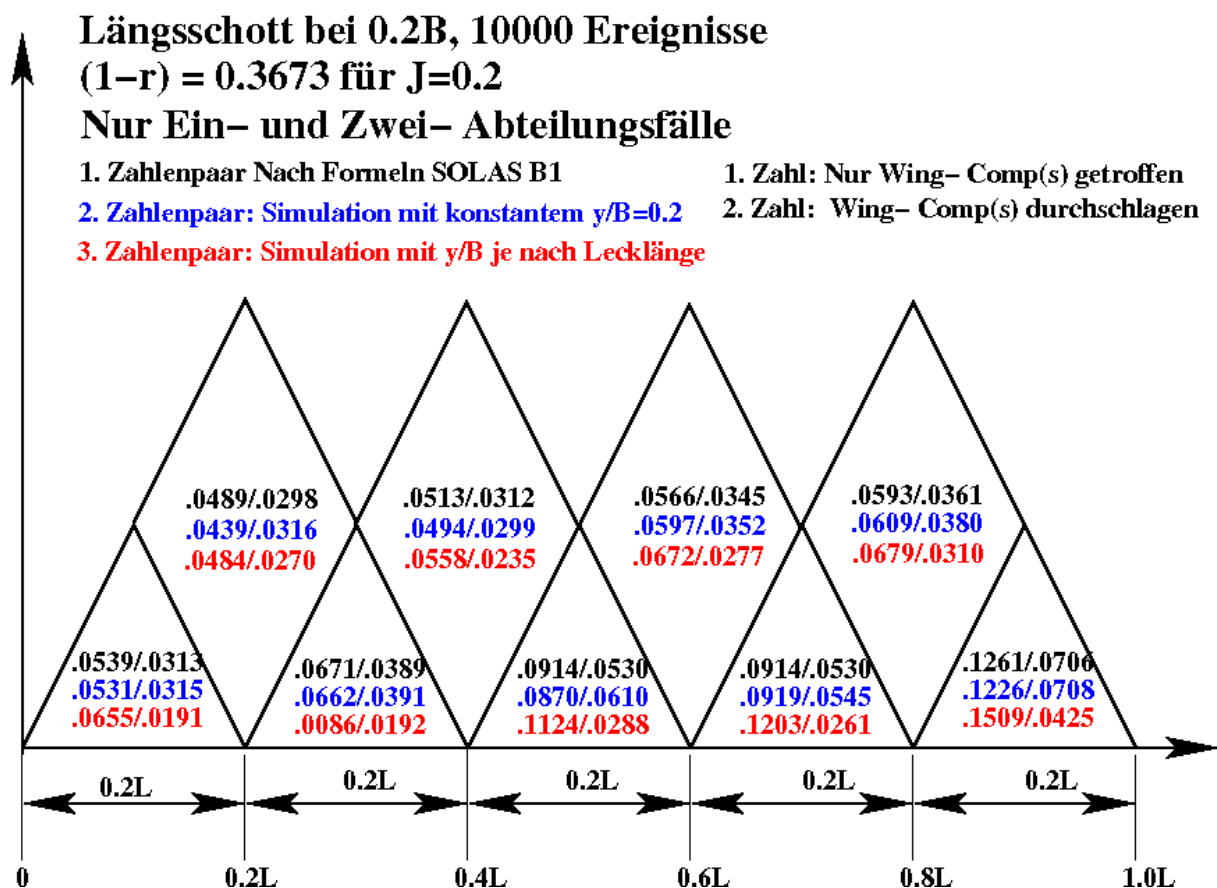


Abb.6: Wahrscheinlichkeiten für das Durchschlagen einer Längswand bei $B/5$ für einen Ponton nach verschiedenen Ansätzen der anhängigen Wahrscheinlichkeiten. Bei der Berechnung nach Vorschrift wurde die „Midpoint-Regel“ nicht implementiert, daher differieren die Werte für das mittlere Compartment etwas.

In den jeweiligen Leckdreiecken liefert das oberste Zahlenpaar gerade die Wahrscheinlichkeiten dafür, dass entweder nur das Wing-Compartment getroffen wird (1. Zahl) oder dass das Leck die $B/5$ -Wand durchschlägt (2. Zahl). So beträgt z. B. die

Trefferwahrscheinlichkeit des vorderen Compartments (nach Vorschrift, d. h. einschließlich obiger fehlerhafter Betrachtung der Schiffsenden) $0.1261 + 0.7076 = 0.1967$. Von diesen Beschädigungen durchschlagen dann 37% das bei B/5 gelegene Längsschott. Die jeweils folgenden Zahlenpaare stellen die Simulationsergebnisse für den Fall nach Vorschrift dar, d. h. die Berechnung der Eindringtiefe-wahrscheinlichkeit erfolgt unter Zugrundelegen von $J=0.2$ für die Einabteilungsfälle bzw. von $J=J_{\max}=0.24$ für die Zweiabteilungsfälle. Man erkennt deutlich, dass Simulation und manuelle Auswertung praktisch gleiche Ergebnisse liefern. Lediglich für das bei L/2 gelegene Compartment differieren die Ergebnisse leicht, was aber damit erklärt werden kann, dass die sogenannte „Mid-Point-Regel“ bei der Berechnung der Wahrscheinlichkeit nach Vorschrift in unserem Testprogramm nicht implementiert wurde (bei $l=0.5$ geht die linear veränderliche Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion in eine Konstante über, weshalb nach Vorschrift die Basis-Wahrscheinlichkeit reduziert werden soll).

Interessant ist jetzt der Vergleich mit der Simulation einer echten Abhängigkeit der Eindringtiefe von der Lecklänge: In der Simulation ist das nämlich sehr einfach zu erreichen, wenn nach jeder Ziehung einer Lecklänge diese auch bei der Berechnung der zugehörigen Eindringtiefe des Quaders beachtet wird. Diese Ergebnisse sind nun jeweils in der dritten Zeile dargestellt. Der Vergleich mit der Vorschrift zeigt, dass die Doppelhülle in Wahrheit bei den Einabteilungsfällen fast 60% wirksamer ist als nach der Modellierung der Vorschrift. Dies liegt daran, dass gerade die Einabteilungsfälle eben auch von deutlich kürzeren Lecks mit dann auch erheblich geringeren Eindringtiefen geöffnet werden als nach Vorschrift angesetzt. Auch bei den Zwei- Abteilungsfällen ist die Doppelhülle noch merklich sicherer als nach Vorschrift, allerdings ist der Unterschied zu den Zweiabteilungsfällen geringer, weil die mittlere Lecklänge für einen Zweiabteilungsfall natürlich größer ist.

Das Beispiel verdeutlicht aber auch, weshalb die nicht korrekte Behandlung der Eindringtiefe in der Vorschrift zu falschen Basis- Wahrscheinlichkeiten bei den Mehrabteilungsfällen führen muss: Während die Einabteilungsfälle ihren $(1-r)$ -Wert auf der Basis von $J=0.2$ bilden, gilt für die Mehrabteilungsfälle der $(1-r)$ -Wert für $J=0.24$. Ermittelt man nun die Wahrscheinlichkeit für den jeweiligen Mehrabteilungsfall nach Vorschrift, dann muss man von der entsprechenden Mehrabteilungsfallwahrscheinlichkeit die beiden Einabteilungsfallwahrscheinlichkeiten abziehen. Dies tut man aber nicht auf der Basis des gleichen $(1-r)$ - oder r -Wertes. Noch problematischer wird das Verfahren, wenn unterschiedliche Längswandpositionen (wie bei echten Unterteilungen) vorliegen. Alle bei der praktischen Anwendung der Vorschriften aufgetretenen Probleme wie negative Teilwahrscheinlichkeitsbeiträge oder an eins fehlende Beiträge haben ihre Ursache letztlich in der fehlerhaften Beschreibung der Eindringtiefe als abhängiger Wahrscheinlichkeit. Dies ist auch der Grund dafür, warum es für den Anwender oft attraktiv ist, eine Beschädigung in mehrere kurze Beschädigungen zu unterteilen und dann mit virtuellen Mehrabteilungsfällen zu jonglieren.

Bei der Simulation der Beschädigungen müssen offensichtlich beide Möglichkeiten vorgehalten werden: Zum einen muss es möglich sein, mathematisch korrekte Beschädigungen erzeugen zu können. Das ist unproblematisch, weil einfach für jede gezogene Leckausdehnung die davon abhängige Eindringtiefe-wahrscheinlichkeitsverteilung ermittelt werden kann, die dann bei der Ziehung verwendet wird. Die vorschriftenkonforme, aber fehlerhafte Ermittlung der Eindringtiefe ist erheblich schwieriger zu simulieren: Man muss dazu zunächst aufgrund der gezogenen Leckgröße die nächstgelegenen Compartmentgrenzen aus der gegebenen Raumaufteilung ermitteln. Diese kann man dann als Eingangswert für die Lecklänge verwenden und zieht dann daraus die Eindringtiefe. Besonderer Behandlung hierbei bedürfen Compartments mit extrem großen Längen wie z. B. RoRo-Laderäume.

Der Vergleich mit praktisch nach den jeweiligen Vorschriften berechneten Indices zeigt aber, dass das Verfahren brauchbar funktioniert. Es ist aber konservativ, weil man dann nicht die

Möglichkeit hat, Beschädigungen weiter zu unterteilen und man die dann daraus resultierende geringere Eindringtiefe nicht zur Anwendung bringen kann.

3.3. Fehlerhafte Betrachtung von so genannten „Lesser-Extent“-Fällen

Grundsätzlich erstreckt sich die Beschädigung in allen Lecksicherheitsvorschriften von der Basis bis zu einer maximalen Höhe. Dabei wird korrekt beachtet, dass man Teilbeiträge erwirtschaften kann, wenn eine Beschädigung bis zur vollen Höhe nicht überlebt wird, wohl aber eine bis zu einer geringeren Beschädigungshöhe. Hierfür werden in den Vorschriften statistische Verteilungen für die obere Begrenzung der Beschädigung angegeben. Das ist an sich richtig und auch plausibel. Weiterhin heißt es in den Vorschriften aber, dass bezüglich der unteren Begrenzung der Beschädigung ein geringeres Beschädigungsausmaß berücksichtigt werden soll, wenn dies zu einem schlechterem Überstehensindex führt. Dieses an sich richtige Konzept führt aber zu falschen Ergebnissen, weil für die geringere Beschädigung logischerweise dann nur ein Teilwahrscheinlichkeitsbeitrag bei der Trefferwahrscheinlichkeit berücksichtigt werden dürfte. Laut Vorschrift wird aber der „Lesser-Extent“-Fall mit der vollen Trefferwahrscheinlichkeit berücksichtigt, was zwar formal konservativ ist, aber praktisch falsch. Diesen Fehler in der Vorschrift kann man berücksichtigen, wenn man für jeden in der Simulation gefundenen Fall parallel alle „Lesser-Extent“-Fälle mit berechnet und den schlechtesten auswählt. Allerdings erhöht sich dadurch die Rechenzeit erheblich, ohne dass dadurch das Ergebnis besser wird. Richtiger wäre es, eine statistische Verteilung für die untere Leckgrenze anzusetzen (das kann ja durchaus eine einfache Gleichverteilung sein) und entsprechend in die Berechnung der Trefferwahrscheinlichkeiten mit einzubeziehen. Dadurch würde sich der Rechenaufwand nicht erhöhen (im Gegenteil), aber die Ergebnisqualität würde besser.

3.4. Gegeneignismodellierung bei MARPOL ANNEX 2

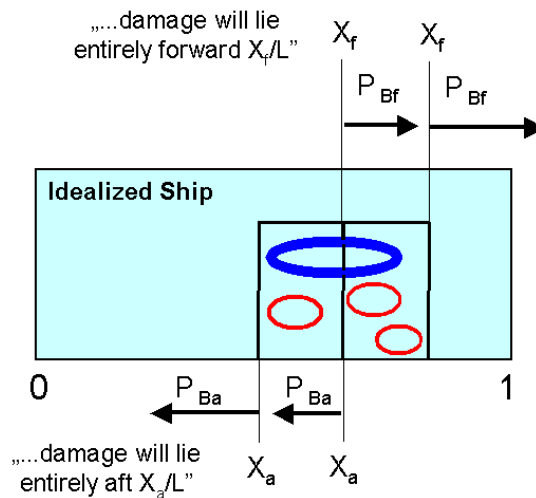


Abb.7: Gegeneignismodellierung bei der Berechnung von Ölaustrittswahrscheinlichkeiten nach MARPOL ANNEX 1.

Das in diesem Abschnitt beschriebene Problem tritt bei Leckrechnungen nicht auf, sondern nur bei der Berechnung der Ölausflusswahrscheinlichkeiten nach MARPOL ANNEX 1. Das liegt an der spezifischen Vorgehensweise dieser Vorschrift, die grundsätzlich anders ist als bei Leckrechnungen: Bei der Berechnung der Beschädigungswahrscheinlichkeit einer Raumgruppe in der Leckrechnung wird stets die Wahrscheinlichkeit betrachtet, dass *nur* diese Raumgruppe getroffen wird (und nichts anderes). Bei der Berechnung nach MARPOL ANNEX 2 wird aber das Ereignis betrachtet, dass *auch* der Raum (oder die Raumgruppe)

getroffen wird. Dies ist in Abb.7 exemplarisch für die Berechnung der Längswahrscheinlichkeit eines Raumes angegeben: Der Raum wird als getroffen angenommen, wenn die Beschädigung nicht vollständig dahinter und nicht vollständig davor liegt. Das bedeutet:

$$P = 1 - p_{ba}(x_a) - p_{bf}(x_f) \quad (2)$$

Dabei bedeutet $p_{ba}(x_a)$ die Wahrscheinlichkeit dafür, dass das Leck *vollständig hinter* x_a liegt; und p_{bf} bedeutet die Wahrscheinlichkeit dafür, dass das Leck *vollständig vor* x_f liegt. p_{ba} und p_{bf} können dann z.B. aus Abb.4 entnommen werden. Damit werden in der Gesamtwahrscheinlichkeit alle möglichen Beschädigungen erfasst, die den in gerade betrachteten Raum öffnen (und gleichzeitig noch beliebige andere Räume). Solange man nun einen einzelnen Raum betrachtet, ist die Wahrscheinlichkeit nach Gl.2 auch richtig. Falsch wird es jetzt, wenn mehrere Räume betrachtet werden, weil die Teilbeiträge aller Beschädigungen, die mehr als nur den in Frage kommenden Raum öffnen, jeweils allen beteiligten Räumen zugeschlagen werden. Damit hängt die Summe aller möglichen Ereignisse von der Anzahl der betrachteten Räume ab, und die Wahrscheinlichkeitssumme kann ein Mehrfaches von 1 betragen. Dieser Fehler liegt darin begründet, dass man die ursprünglich nur für den Laderaumbereich von Tankern (es gibt da nur jeweils einen zusammenhängenden) gedachte Vorschrift einfach auf die Anwendung auf Brennstofftanks übertragen hat, von denen es aber mehrere geben kann. Aus praktischer Sicht ist das lästig, weil man durch Aufteilen von einem in zwei Tanks zwar die Ausflussmenge verringert, aber gleichzeitig die gesamte Trefferwahrscheinlichkeit erhöht.

In der Simulation lässt sich aber dieser Fehler in der Vorschrift problemlos nachbilden, wenn ein Leck genau so oft dupliziert wird, wie es ölführende Räume trifft. Man muss dann nur akzeptieren, dass die Summe aller möglichen Trefferwahrscheinlichkeiten dann deutlich größer sein kann als 1, wenn die innere Unterteilung ausreichend viele Räume aufweist, die ölführend sind. Praktisch dürfte das aber kaum vorkommen.

4. Implementation und Validierungsrechnungen

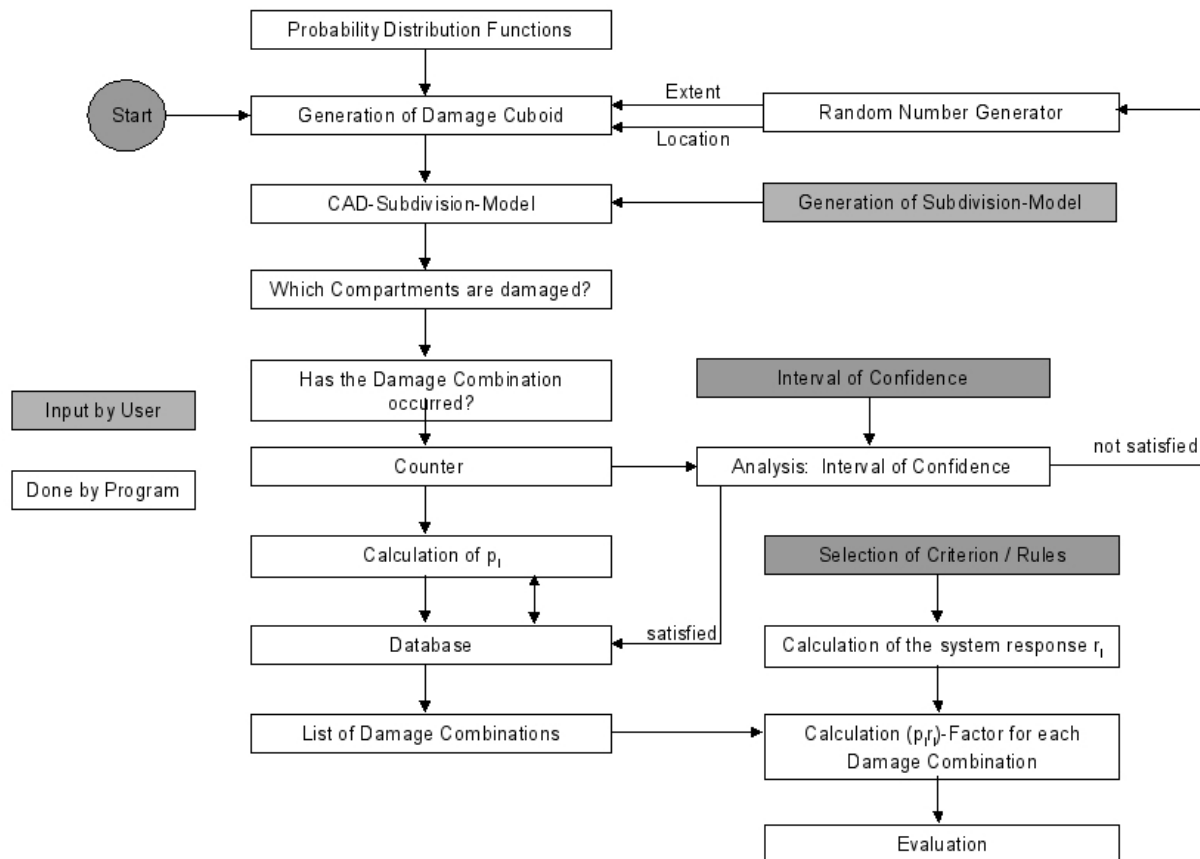


Abb.8: Flussdiagramm der implementierten Methodik innerhalb des schiffbaulichen Entwurfssystems E4.

Wesentliches Ziel der Leckrechnung mit Hilfe von Monte Carlo Simulationen besteht zunächst einmal darin, eine Alternative zur konventionell durchgeführten Leckrechnung anbieten zu können. Dazu muss aber sichergestellt sein, dass vergleichbare Ergebnisse wie mit einer konventionellen Rechnung erzielt werden. Es muss also dazu eine den Vorschriften vergleichbare Generierung der Beschädigungen mit allen oben diskutierten Imponderabilien erfolgen. Die entsprechende Methodik wurde im Rahmen des schiffbaulichen Entwurfssystems E4 implementiert und gegen die dort bereits vorhandenen Methoden der konventionellen Leckrechnung validiert. Dazu wurden verschiedene FSG-Neubauten untersucht, für die exakt die gleichen Original- Rechenmodelle zur Verfügung wie bei der jeweiligen Statutory-Prüfung durch verschiedene Klassifikationsgesellschaften. Damit sind Modellierungsfehler praktisch ausgeschlossen, und eine saubere Validierung wird dadurch möglich.

Im einzelnen wurden folgende Schiffe untersucht, und zwar jeweils nach dem für die Schiffe geltenden Stand der Leckrechnung. Bei NB 726, der nach der neuen Leckrechnung nach SOLAS 2009 (harmonisierte Vorschriften) wurde zusätzlich durch den DNV mit der im Entwurfssystem NAPA integrierten Leckrechnungssoftware detailliert nach SOLAS 2009 B1 gegengerechnet.

FSG Bau- Nr.	Länge	Schiffstyp	Klasse	Vorschrift
NB 690	212	Containerschiff	GL	SOLAS 95 B1
NB 695	155	Mehrzweckfrachter	GL	SOLAS 95 B1
NB 711	196	3 Deck- RoRo	DNV	SOLAS 95 B1
NB 721	199	4 Deck- RoRo	LR	SOLAS 95 B1
NB 731	203	5 Deck- RoRo	DNV	SOLAS 95 B1
NB 738	185	3 Deck- RoRo	LR	SOLAS 09 B1
NB 726	192	4 Deck- RoRo	DNV	SOLAS 09 B1

Tabelle 1: Insgesamt untersuchte Schiffe

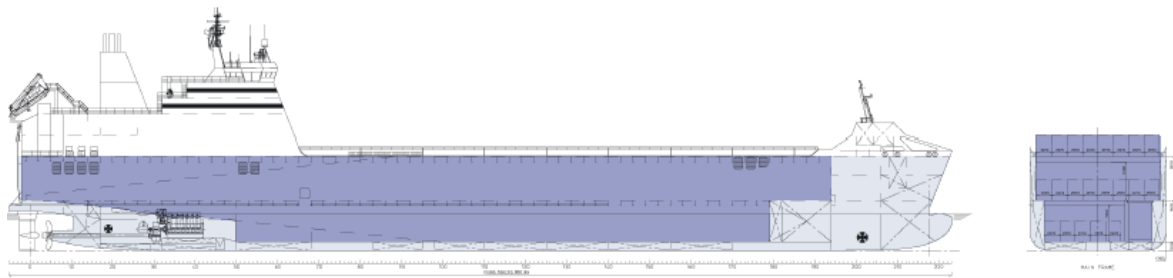


Abb.9: Das im Folgenden betrachtete RoRo-Schiff ConRo200. Quelle: FSG

Die Ergebnisse, welche hier nur in Teilen wiedergegeben werden, haben gezeigt, dass die Berechnung mit Hilfe der Monte-Carlo Simulation praktisch mit der konventionellen Rechnung übereinstimmen, soweit das im Rahmen der Rechengenauigkeit möglich ist. Damit ist gemeint, dass sich auch bei konventioneller Anwendung der Vorschrift implementierungsabhängig gewisse Unterschiede zwischen einzelnen Berechnungssystemen ergeben (z. B. NAPA, FORAN oder E4). Die Unterschiede zwischen Monte-Carlo Simulation und der konventionellen Berechnung lagen dann etwa im Bereich von 1-2%.

Dies zeigt folgendes Beispiel des Neubaus 738 (vgl. Abb.9) Dazu wurden 20000 Ziehungen durchgeführt, und es wurden nur Leckfälle berücksichtigt, deren Trefferanzahl mindestens bei 2 lag (kleinster pi- Beitrag $10E-5$). Dadurch wird die Summe aller möglichen Ereignisse nicht exakt 1, sondern 0.989.

Tiefgang	BB	STB	Bemerkung
Ds	0.456	0.431	Handrechnung
	0.460	0.442	Simulation
Dp	0.792	0.647	Handrechnung
	0.788	0.652	Simulation
DI	0.961	0.899	Handrechnung
	0.951	0.898	Simulation

Tabelle 2: Ergebnisse für den ConRo 200 der FSG, NB 738. 2000 Ziehungen, alle Fälle >1 Treffer berücksichtigt. Teilindices, Treffer- und Überlebens-wahrscheinlichkeiten nach SOLAS B1 2009.

Insgesamt fällt der Vergleich zufriedenstellend aus, die Übereinstimmung kann als sehr gut bezeichnet werden. Auffällig ist jedoch, dass die Simulation im Vergleich zur konventionellen Berechnung teilweise etwas zu kleine Werte liefert, obwohl das der zugrundeliegenden Theorie eigentlich widerspricht. Der Grund ist darin zu sehen, dass es in der Simulation schwierig ist, die laut Vorschrift eigentlich falsche abhängige Wahrscheinlichkeit der Eindringtiefe korrekt (im Sinne der Vorschrift) nachzubilden. Wir gehen bei unserer Simulation davon aus, dass ein Leck im Schiff eine Beschädigungslänge bildet, die von den x-Grenzen der getroffenen Compartments abhängt. Damit haben wir in der Simulation nicht die Möglichkeit, ein längeres Leck in z.B. zwei kürzere Teillecks aufzuteilen, um so Index zu gewinnen. Insgesamt wirkt sich das aber nicht sehr stark aus, die Übereinstimmung ist trotzdem gut.

Interessant ist noch der Vergleich mit der Leckrechnung nach bisherigem Stand. Dabei ist zu beachten, dass sich für RoRo-Schiffe nach der neuen Vorschrift folgendes geändert hat:

- Die statistische Verteilung der Lecks ist jetzt eine andere (vgl. dazu auch Abb. 3). Es können jetzt längere Lecks auftreten, die eine größere Eindringtiefe haben können. Dafür sind aber jetzt Lecks mit geringeren Eindringtiefen deutlich wahrscheinlicher, d.h. eine etwa vorhandene Doppelhülle wird stark honoriert (auch bei „verkehrter“ Berechnung der Eindringtiefen-wahrscheinlichkeit). Dies gilt für alle Frachtschiffe.
- Die Berechnung des s_i wurde geändert: Man muss jetzt nur noch 16 Grad Hebelarmumfang nachweisen (vorher 20), dafür aber einen Hebel von 0.12m (vorher 0.1m). Dies gilt ebenfalls für alle Frachtschiffe.
- Zusätzlich wurden die Vorschriften für RoRo-Schiffe dahingehend verschärft, dass die Flutbarkeit der Laderäume von 0.7 auf 0.9 bzw. 0.95 (für DI) heraufgesetzt wurde.

Die Ergebnisse zeigt folgende Tabelle:

Tiefgang	BB	STB	Bemerkung
Ds	0.497	0.488	SOLAS 95 B1
	0.460	0.442	SOLAS 09 B1
Dp	0.844	0.726	SOLAS 95 B1
	0.788	0.652	SOLAS 09 B1
DI	0.964	0.948	SOLAS 95 B1
	0.951	0.898	SOLAS 09 B1

Tabelle 3 : Vergleich SOLAS 09 B1 mit SOLAS 95 B1.

Die Berechnungen wurden nach der alten SOLAS aber für die Flutbarkeit von 0.9 bzw. 0.95 durchgeführt, um den Einfluss der Änderung der Wahrscheinlichkeiten aufzuzeigen. Man erkennt, dass die neue SOLAS auch dann noch merklich strenger ist, die berechneten Teilindizes liegen sichtbar unter denen der aktuell für Frachtschiffe gültigen Regel. Dies ist zum Teil aber damit begründbar, dass das Schiff noch für die alte Regel entworfen wurde, und sich die Änderungen der Regel empfindlich auf die Trefferwahrscheinlichkeiten der einzelnen Fälle bemerkbar machen. Dies wird deutlich, wenn man sich die jeweils am häufigsten getroffenen Raumkombinationen ansieht (vgl. Abb.9).

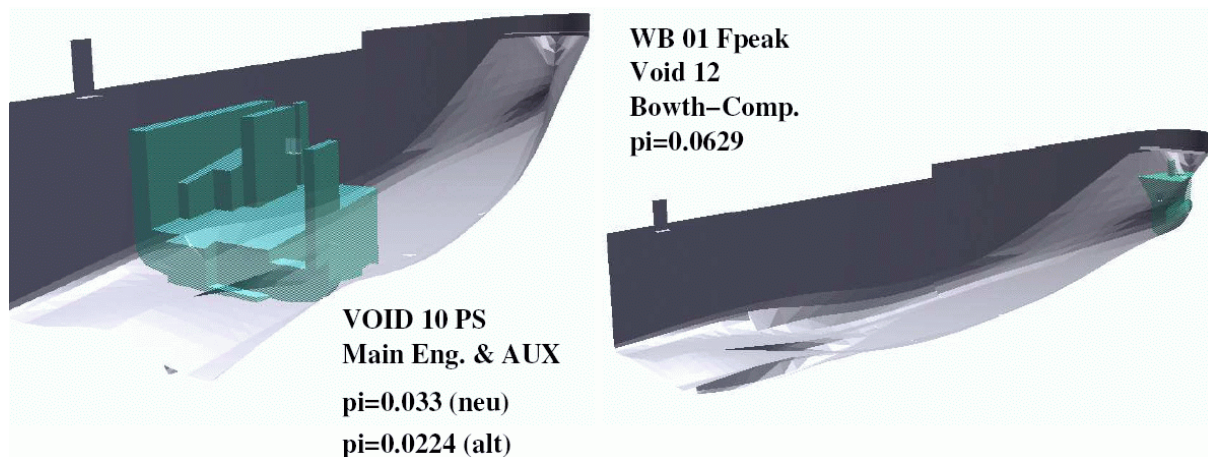


Abb.10: Verschiedene Treffer nach neuer (links) und alter SOLAS (rechts).

Nach der neuen SOLAS ist die Längslage des Lecks jetzt gleichverteilt (s. auch Abb. 3.) Daher kommt es nicht mehr zu einer Häufung der Treffer im Vorschiffsbereich. Nun wird die Raumkombination VOID 10 PS und Main & AUX. Eng. am häufigsten von BB getroffen (mit einer Trefferwahrscheinlichkeit von 0.033). Nach der derzeit gültigen SOLAS ist dies aber eine Kombination im Vorschiff von WB 01, VOID 12 und dem Bugstrahlruderraum, die mit einer Wahrscheinlichkeit von 0.063 getroffen wird. Das bedeutet nach der SOLAS 2009, dass man insgesamt längere Treffer auch hinten im Schiff überleben muss, um den Index erhalten zu können. Weil die Simulation (wie exemplarisch in Abb.10 gezeigt) die Trefferwahrscheinlichkeit direkt für jede Raumkombination ermittelt, sieht der Entwurfsingenieur sehr schnell, an welchen Stellen er noch Punkte sammeln kann und welche Maßnahmen dazu entwurfsseitig getroffen werden müssen. Insgesamt dauert die Leckrechnung mit der Simulation auf einem handelsüblichen Laptop oder PC je Teilindex etwa 5-7 min einschließlich der Beschädigungsgenerierung.

5. Untersuchung des Sicherheitsniveaus von alternativen Unterteilungen

Neben der reinen Abbildung der Rechenvorschrift entsprechend SOLAS lassen sich mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation eine Reihe von weiteren Entwurfsaufgaben lösen, für die es bei reiner Anwendung der existierenden Vorschriften keine Alternative zu geben scheint. Ein sehr schönes Beispiel hierzu ist die Bemessung der erforderlichen Mindest-Doppelbodenhöhe. Bei derzeitigem Stand der Vorschriften wird auf eine explizite Berechnung von Bodenbeschädigungen verzichtet, dafür wird aber eine Mindest-Doppelbodenhöhe gefordert. Diese hängt im Wesentlichen von der Schiffsbreite ab, und zwar etwa linear. Warum das aus Sicht der Leckrechnung so sein soll, ist aber unklar. Fakt ist aber, dass man bei der Festlegung der Mindest- Doppelbodenhöhe davon ausgeht, dass dieser so hoch sein soll, dass ein Durchschlagen des Doppelbodens an sich ausreichend unwahrscheinlich ist. Man geht dann davon aus, dass eine Verletzung des Innenbodens einem Verlust des Schiffes gleichkommt. Dies muss aber nicht zwangsläufig so sein, und deshalb haben wir den Einfluss der Doppelbodenhöhe auf die Lecksicherheit an zwei Beispielen untersucht, in dem wir mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation eine Überlebenswahrscheinlichkeit gegen Bodentreffer ermittelt haben. Die Trefferwahrscheinlichkeit beruht auf der statistischen Verteilung von Bodenschäden nach MARPOL ANNEX2 (allerdings wurden die in Abschnitt 3 diskutierten Fehler hier bei den folgenden Untersuchungen nicht berücksichtigt), die Überlebenswahrscheinlichkeit wird dann wie bei der neuen oder derzeit existierenden SOLAS ermittelt.

Zunächst haben wir den bereits in Abschnitt 4 untersuchten ConRo200 der FSG analysiert. Generell wurde bei Bodenbeschädigungen sofort auffällig, dass im Gegensatz zu den Seitenbeschädigungen erheblich mehr Leckfallkombinationen entstehen (auch wenn das Schiff keinen Rohrtunnel hat), von denen extrem viele nur je einmal oder zweimal getroffen werden. Dadurch wird die Berechnung etwas aufwändiger. Allerdings überlebt der ConRo200 praktisch alle Bodenbeschädigungen, weil er extrem viel Reserveverdrängung oberhalb des Freiborddecks hat. Dadurch ist die tatsächlich vorhandene Sicherheit gegen Bodenbeschädigungen erheblich größer als die gegen eine etwaige Seitenbeschädigung, wie folgende Tabelle zeigt:

Tiefgang	Seitenbeschädigung	Bodenbeschädigung
Ds	0.451	0.897
Dp	0.719	0.901
DI	0.930	0.897

Tabelle 4 : Sicherheit gegen Bodenschäden im Vergleich zu Seitenbeschädigungen.

Die Sicherheit gegen Bodenschäden ist insgesamt erheblich höher als bei Seitenbeschädigung. Der Gesamtindex ergibt sich für Seitenbeschädigung entsprechend der Gewichtung nach Vorschrift zu 0.660, für die Bodenbeschädigung 0.899. Es entspricht eben nicht den Annahmen der zugrundeliegenden Vorschrift, dass das Schiff beim Durchschlagen des Innenbodens kentert oder sinkt. Daher wurde im Folgenden untersucht, wie sich eine Verringerung der Doppelbodenhöhe im Laderaumbereich auf die Gesamtsicherheit bei Boden- und Seitenbeschädigungen auswirkt. Neben der existierenden Doppelbodenhöhe wurde eine Variante mit einer Doppelbodenhöhe von 1200 mm sowie eine (theoretische) Variante ganz ohne Doppelboden (also 0mm) untersucht. Die Ergebnisse werden im Folgenden zusammengestellt:

Doppelbodenhöhe	Index Seite	Index Boden
1650 mm	0.660	0.899
1200 mm	0.648	0.893
0 mm	0.663	0.901

Tabelle 5: Sicherheit gegen Boden- und Seitenbeschädigungen für verschiedene Doppelbodenhöhen für den ConRo 200.

Danach hat der Doppelboden praktisch keine Wirkung auf die Kenter- und Sinksicherheit bei Bodenschäden, und die Wirkung auf die Sicherheit gegen Seitenbeschädigungen ist marginal. Der Index nimmt zunächst etwas ab, und dann aber wieder zu. Dies erklärt sich daraus, dass bei den Seitenbeschädigungen drei Effekte gegeneinander wirken:

- Eine verringerte Doppelbodenhöhe führt generell dazu, dass die Asymmetrie der Flutung verringert wird und ist daher sicherheitstechnisch positiv.
- Eine verringerte Doppelbodenhöhe führt zu größeren Flutungsvolumina in den Fällen, bei denen der Unterraum getroffen wird. Daher verringert sich der Freibord in der Endschwimmlage, was negativ ist.
- Andererseits verringert eine geringere Doppelbodenhöhe den Schwerpunkt der in den Unterraum eingedrungenen Wassermenge, was sich positiv auf die Reststabilität auswirkt.

Dieses zunächst sehr unerwartete Ergebnis wird sofort verständlich, wenn man bedenkt, dass das Schiff auch oberhalb des Freiborddecks voll wasserdicht ausgeführt ist und auch bei vollständig geflutetem Unterraum noch über eine mehr als ausreichende Restschwimmfähigkeit verfügt. Aus Gründen der Kenter- und Sinksicherheit ist ein Doppelboden bei diesem Schiff also kein positives Sicherheitselement, zumal mit niedrigerem Doppelboden der Ladungsschwerpunkt tiefer käme und dadurch mehr Sicherheit gewonnen werden kann. Die prinzipielle Richtigkeit dieser Ergebnisse haben wir an weiteren RoRo-Schiffen bestätigen können: Sobald das Schiff oberhalb des Freiborddecks wasserdicht ist, schützt der Doppelboden nicht mehr gegen Sinken oder Kentern.

Nachdem sich bezüglich der Sicherheit gegen Bodenschäden RoRo-Schiffe als generell sicher erwiesen haben, wurde im Nachgang ein Containerschiff untersucht. Hierzu haben wir den FSG Neubau 690 ausgewählt, der zwar kein echtes Vollcontainerschiff darstellt, aber von allen vorhandenen geprüften Rechenmodellen kam dieser einem Containerschiff am nächsten. Die vorhandene Doppelbodenhöhe betrug 2.04 m bei einer Schiffsbreite von 30 m. Weil das Schiff nach SOLAS 95 klassifiziert worden ist, haben wir die Berechnung der Sicherheit gegen Bodenschäden wiederum nach den der MARPOL Annex 2 zugrundeliegenden Leckstatistik durchgeführt, die Überlebenswahrscheinlichkeiten wurden dann aber entsprechend SOLAS 95 B1 gerechnet. Wiederum wurden drei verschiedene Doppelbodenhöhen untersucht. Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle zusammengestellt:

Doppelbodenhöhe	Index Seite	Index Boden
2040 mm	0.733	0.866
1200 mm	0.757	0.855
0 mm	0.803	0.743

Tabelle 6: Sicherheit gegen Boden- und Seitenbeschädigungen für verschiedene Doppelbodenhöhen für eine ECOBOX 42

Anders als bei dem RoRo-Schiff nimmt hier die Sicherheit gegen Verlust bei der Variante ohne Doppelboden deutlich ab, allerdings von einem hohen Niveau aus. Erst die Variante ohne Doppelboden hat eine vergleichbare Sicherheit gegen Verlust bei Bodenschäden wie die Ausgangsvariante bei Seitenbeschädigungen. Allerdings hat das Schiff ohne Doppelboden jetzt eine deutlich höhere Sicherheit gegen Seitenschäden. Vermutlich wäre etwa bei einer Doppelbodenhöhe zwischen 400 bis 600 mm jeweils die gleiche Sicherheit erreicht. Anders als bei dem vorher betrachteten RoRo-Schiff ist es aber möglich, eine Doppelbodenhöhe zu finden, bei der die Sicherheit gegen Bodenschäden genau so groß ist wie diejenige gegen Seitenbeschädigungen.

Dass insgesamt die Sicherheit bei Bodenschäden, obwohl diese gar nicht betrachtet werden, viel größer ist, als bei Seitenschäden, liegt vermutlich daran, dass man immer noch ein Verletzen des Innenbodens mit dem Verlust des Schiffes gleichsetzt, obwohl bauliche Maßnahmen wie die Einführung der Doppelhülle nach Inkrafttreten der Leckrechnung zu einer erheblichen Verbesserung der Restschwimmfähigkeit des Schiffes geführt haben, so dass heutige Schiffe problemlos die meisten Bodenbeschädigungen überstehen.

Dies konnte mit Hilfe der Simulation leicht gezeigt werden und ist ein gutes Beispiel dafür, wie alternative Unterteilungskonzepte mit Hilfe von direkten Berechnungen bewertet werden können. Natürlich sind hier viele weitere Anwendungen möglich.

6. Untersuchung des Sicherheitsniveaus von Vorschriften an sich

Eine weitere Anwendung der Simulation wird darin gesehen, das generelle Sicherheitsniveau von Vorschriften an sich überprüfen zu können. Dies ist beispielsweise sinnvoll, um eine Aussage darüber treffen zu können, ob ein Schiff nun nach dieser oder jener Vorschrift sicherer ist oder nicht. Konkret geht es dabei um die aktuell diskutierte Frage, ob etwa Passagierschiffe nach der neuen SOLAS 2009 nun ein höheres oder ein niedrigeres Sicherheitsniveau haben als nach der deterministischen SOLAS Reg.8, und welche Rolle dabei zusätzlich das Stockholmer Abkommen spielt: Trifft es zu, dass das Tauchen der MARGIN- Line in SOLAS 2009 tatsächlich das zukünftige Sicherheitsniveau von RoRo-Fahrgastschiffen deutlich absenkt? Und wenn ja, um wie viel?

Der Beweis ist unserer Einschätzung nach ohne eine derartige Simulationstechnik überhaupt nicht zu führen. Vergleicht man die wesentlichen Elemente von SOLAS Reg.8 mit SOLAS 2009 B1, dann wird klar, warum:

Kriterium	SOLAS 1995 Reg. 8	SOLAS 2009 B1
Lecklänge	11m od. 3m+0.03L 1 oder 1 Abteilungen	0.303L für L<200m
Eindringtiefe	0.2B	0.5B
Umfang	15 Grad	16 Grad
Fläche	0.015 mrad	Entfallen
Freibord ML	>0	Entfallen
Wasser an Deck ab FB.	<2m	Entfallen

Tabelle 7: Vergleich von SOLAS Reg.8 einschl. Stockholm mit SOLAS 2009 B1 für RoRo-Fahrgastschiffe

Weil SOLAS Reg.8 deterministisch ist, dreht sich die gesamte Rechnung um den einen Fall, der dann entwurfsbestimmend wird. Auf der anderen Seite bedeutet der Wegfall des MARGIN-Line-Kriteriums schon eine merkliche Reduktion in den Anforderungen an das Überleben des Schiffes. Will man unter diesen Voraussetzungen die Vorschriften miteinander vergleichen, dann muss man das jeweils zugrundeliegende Sicherheitsniveau bestimmen. Dies wiederum wird dadurch erschwert, dass man bei der Festlegung des zu erreichenden Sicherheitsniveaus alle Unzulänglichkeiten der Vorschrift jeweils auf das Ziel mitübertragen hat.

Will man also das tatsächlich durch verschiedene Vorschriften gegebene Sicherheitsniveau quantifizieren, dann muss man zunächst ermitteln, welche Beschädigungen von der jeweiligen Vorschrift tatsächlich erfasst werden. Hier hilft die Überlegung, dass das innerhalb des Projektes HARDER zusammengestellte Material eine realistische Verteilung von Beschädigungen liefert, wenn keine Lecks ausgeschlossen werden und wenn sichergestellt wird, dass die exakten Verteilungen bei der Erzeugung von Beschädigungen auch richtig angewendet werden. Legt man also für die Beschädigungserzeugung das von HARDER vorgelegte Material zugrunde (vgl. dazu z.B. Abb.3) und vermeidet die unter Abschnitt 3 aufgezeigten Fehler, dann erhält man eine realistische Stichprobe von möglichen Beschädigungen. Weil alle Vorschriften (neben den in Abschnitt 3 diskutierten Fehlern) Beschränkungen in der Leckgröße haben, bildet jede einzelne Vorschrift nur eine Teilmenge der insgesamt möglichen Beschädigungen ab. Dies ist anschaulich in Abb.11 gezeigt. Dabei spielt es zunächst keine Rolle, ob die Vorschrift eine deterministische (wie z.B. SOLAS Reg.8) ist oder eine probabilistische.

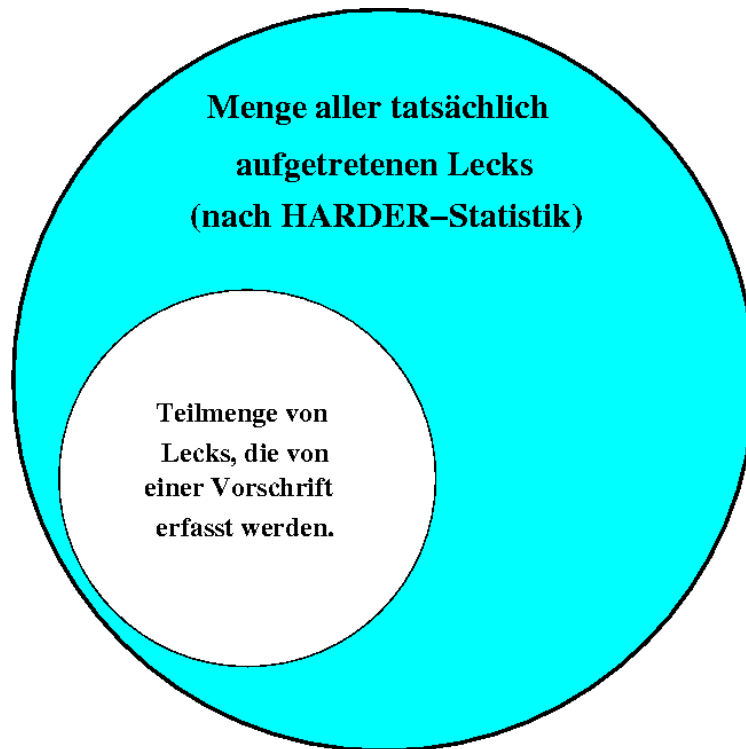


Abb.11: Die von einer Vorschrift erfasste Teilmenge an möglichen Beschädigungen.

Nun kann die statistische Verteilung von Beschädigungen innerhalb der Teilmenge der Vorschrift so ermittelt werden, dass man mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation die Menge aller Lecks erzeugt und davon nur diejenigen berücksichtigt, die von der jeweiligen Vorschrift abgedeckt werden. Das ist eine einfache zusätzliche binäre Frage. Gleichfalls kann man nun auch die Menge aller Beschädigungen sowie deren statistische Verteilung ermitteln, die nicht von der Vorschrift abgedeckt werden. Die Ergebnisse einer solchen Simulation sind in Abb.12 für verschiedene Vorschriften dargestellt:

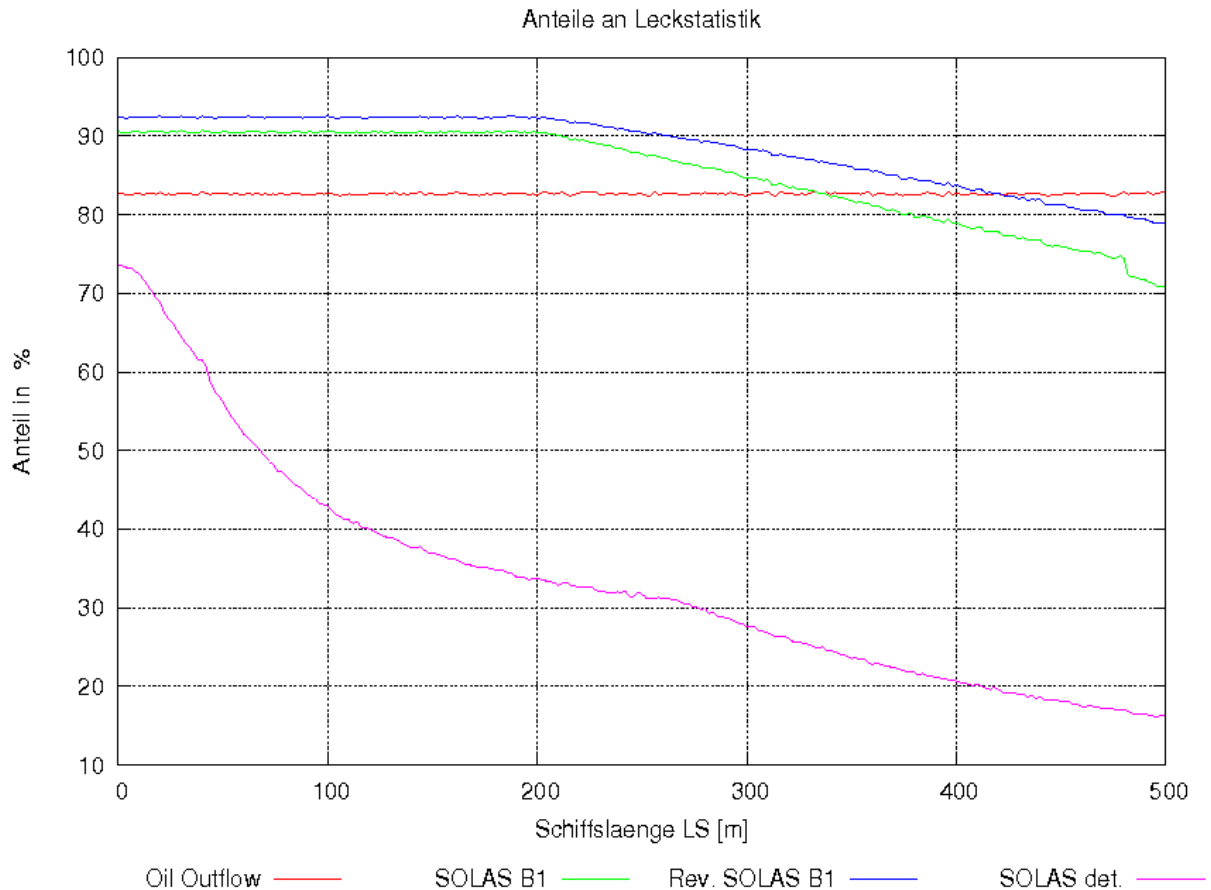


Abb.12: Anteile von Beschädigungen verschiedener Vorschriften an der Menge aller möglichen Beschädigungen.

Dort sind für SOLAS Reg.8 sowie für die derzeitige und neue SOLAS B1 die jeweils durch die Vorschrift abgedeckten Beschädigungen über der Schiffslänge aufgetragen. Dabei wird – wie in den Vorschriften – davon ausgegangen, dass es zulässig ist, die dimensionslose Lecklänge zu verwenden. Weil sowohl in der alten als auch in der revidierten SOLAS B1 die maximale Lecklänge für sehr große Schiffslängen gedeckelt ist, nimmt die tatsächlich von der Vorschrift erfasste Menge an möglichen Lecks für Schiffslängen über etwa 200 m ab. Grundsätzlich werden durch die neue SOLAS etwas mehr Beschädigungen erfasst (weil die maximale Lecklänge von $0.24L$ auf $0.303L$ zunimmt), der Einfluss ist aber gering: Nach der existierenden SOLAS werden etwa 90% aller Beschädigungen berücksichtigt, für die neue SOLAS sind das etwa 94% aller Beschädigungen. Daraus ersieht man sofort, dass die Vergrößerung der Lecklänge gegenüber der existierenden SOLAS nur einen relativ geringen Einfluss auf die Sicherheit des Schiffes haben kann, einfach weil nicht mehr sehr viele Beschädigungen mit dann geringen Auftretenswahrscheinlichkeiten dazukommen. Von daher hat die beim Implementieren der aktuellen SOLAS künstlich vorgenommene Beschneidung der maximal möglichen Lecklänge kaum einen Einfluss auf den tatsächlich erzielbaren Index (im Gegensatz beispielsweise zur falschen Bestimmung der Eindringtiefe).

Anders sieht es aus, wenn man den Übergang von der deterministischen SOLAS Reg.8 zur Probabilistik betrachtet: Selbst bei extrem kleinen Schiffen werden durch die SOLAS Reg.8 nur 74% alle möglichen Beschädigungen abgedeckt (die bei einer Schiffslänge von 0 an 100% fehlenden Lecks sind solche, die weiter als bis B/5 eindringen würden). Ferner ist die Kurve stark degressiv, d. h. schon bei einer kleinen Fähre von etwa 100m Länge werden nur noch 42% aller Beschädigungen tatsächlich durch die SOLAS

Reg.8 abgedeckt. Für ein 400 m langes Schiff wären das dann nur noch etwa 20 %. Damit lässt sich zunächst folgende naheliegende Schlussfolgerung ziehen:

- Wenn das Überleben des Schiffes in der neuen Vorschrift genau so bewertet werden würde wie in der derzeitigen SOLAS Reg.8, dann muss das durch die probabilistische Vorschrift (egal ob neue oder existierende SOLAS) gegebene Sicherheitsniveau höher sein, wenn alle Beschädigungen, die durch SOLAS Reg.8 gegeben sind, dann ebenfalls überlebt werden. Denn bezüglich des Überlebens der nicht von SOLAS Reg.8 abgedeckten Beschädigungen macht diese ja keine Aussage.

Von daher ist es für die Berechnung des Sicherheitsniveaus eines SOLAS Reg.8 Schiffes entscheidend, welcher Sicherheitsanteil aus den Beschädigungen erzielt wird, die nicht durch SOLAS Reg.8 abgedeckt sind.

Nun hat sich aber weiterhin die Bewertung des Überlebens geändert, weil die neue SOLAS explizit das Tauchen der Margin-Line zulässt (das wäre vielleicht noch kein Problem) und weil vor allem die Wasser-an Deck-Zusatzforderung nicht mehr in den neuen Regeln enthalten ist. Dieser Einfluss kann dann nur an konkreten Schiffen weiter untersucht werden, in dem der tatsächliche Überlebensindex berechnet wird. Dieser muss dann jeweils in zwei Teilindices wie folgt aufgeteilt werden:

Man erzeugt eine Population von Beschädigungen und zählt zunächst nur die Beschädigungen, die in eine Vorschrift fallen (z.B. nach SOLAS Reg.8 mit Stockholm). Dafür berechnet man dann den Überlebensbeitrag. Soll das Schiff z.B. Reg.8 erfüllen, dann muss jedes einzelne $s_i=1$ sein ($\sum p_i \cdot s_i=1$). Dann erzeugt man wiederum eine Population von Beschädigungen und zählt jetzt nur die Lecks, die nicht von der Vorschrift abgedeckt werden. Auch hierfür kann man einen Überlebensindex berechnen. Der Gesamtüberlebensindex ergibt sich dann anteilig aus den beiden Teilindices. Solange das Schiff SOLAS Reg. 8 erfüllen soll, muss für den einen Teilindex stets gelten, dass $\sum p_i \cdot s_i=1$ ist. Analog kann man jetzt mit einer anderen Vorschrift verfahren, wobei dann zu beachten ist, dass der geforderte Teilindex a_i durch die betrachteten Lecks erfasst werden muss: $\sum p_i \cdot s_i= a_i$. Auf diese Weise lassen sich an konkreten Beispielen die einzelnen Sicherheitsniveaus bestimmen, und man kann z.B. konkret den Einfluss der Wasser-an-Deck-Regel für RoRo-Fahrgastschiffe quantifizieren. Zum Zeitpunkt der Drucklegung dieser Ausführungen sind diese Arbeiten jedoch noch nicht abgeschlossen.

7 Literatur

[1] BRUHNS, H.; Fuel Tank Protection: Implications for Container Ship Designs. In: Proc. PRADS 2007, Houston, USA.

[2] CHANG, B.C.; BLUME, P.: Survivability of damaged ro-ro passenger vessels. In: J. Ship. Techn. Res. 45/3, 1998

[3] DENMARK, GERMANY, NORWAY and UK: Updated Statistics for Extent of Damage – Report from the research Project HARDER. IMO SLF 44/INF.11. The International Maritime Organization, London.

[4] ELIOPOULOU, E.; PAPANIKOLAOU, A.: Review of Design Features and Stability Characteristics of Pre- and Post SOLAS 90 RoRo-Passenger Ships. In: Proc. STAB 2001, Trieste, Italy.

[5] HARDER: Harmonization of Rules and Design Rationale. U Contract No. GDRB – CT-1998-00028, Final Technical Report, 2003

[6] IMO: AGREEMENT CONCERNING SPECIFIC STABILITY REQUIREMENTS FOR RO-RO PASSENGER SHIPS UNDERTAKING REGULAR SCHEDULED INTERNATIONAL VOYAGES BETWEEN OR TO OR FROM DESIGNATES PORTS IN NORTH WEST EUROPE AND THE BALTIC SEA. MSC/CIRC. 1891. London. International Maritime Organization 1996.

[7] IMO: SOLAS. International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974, and its Protocol of 1988: articles, annexes, and certificates. Consolidated Edition 2004, London. International Maritime Organization, 2004.

[8] IMO: Load Lines: International Convention on Load Lines, 1966 and Protocol of 1988, as amended 2003. Consolidated Edition 2005, London. International Maritime Organization, 2005.

[9] IMO: Interim Guidelines for Evacuation Analyses for New and Existing Passenger Ships. IMO MSC/Circ. 1033, London. International Maritime Organization, 2002.

[10] IMO: Guidelines for the Formal Safety Assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process. IMO MSC/Circ. 1023-MEPC/circ. 392, London. International Maritime Organization, 2005.

[11] IMO: MEPC 54/21 ANNEX 2, RESOLUTION MEPC.141(51) ANNEX, AMENDMENTS TO THE REVISED MARPOL ANNEX1, Regulation 12A- Oil fuel tank protection, London. International Maritime Organization, 2006.

[12] IMO: Guideline on Alternative Design and Arrangements for SOLAS chapter II-1 and III, MSC/Circ.1212, London. International Maritime Organization, 2006.

[13] IMO: Development of revised SOLAS Chapter II-1 Parts A, B, and B-1. SLF 42/3/3, 1993, London. International Maritime Organization, 1993.

[14] IMO: Passenger Ship Safety. Work Plan of assessment of time to-flood-prediction, submitted by International Towing Tank Conference (ITTC), 2006. SLF 49/4/2, London. International Maritime Organization, 2006.

[15] KNÜPFER, K.: Leckrechnung bei einfacher und mehrfacher Beschädigung. In: JSTG 1961, Bd. 55.

[16] KOELMAN, H.J.: Re-Evaluation of the Method to determine the Probability of Damage. In: Proc. IMDC 2006, Ann Arbour, USA

[17] KONOVESSIS, D.; VASSALOS, D.: Design for Damage Survivability – Development and Application of an Optimal Design Procedure. In: Proc. HIPER 01, Hamburg, Germany, 2001.

[18] KRAPPINGER, O.: Einfluß von Tiefgang, Flutbarkeit, Stabilität und Seegang auf die Beurteilung von Unterteilungen. In: JSTG 1961, Bd. 55

[19] KRÜGER, S.; KEHREN, F.-I.: Development of a Probabilistic Methodology for Damage Stability regarding Bottom Damages. In: Proc. PRADS 2007, Houston

- [20] LAUBENSTEIN, L.; MAINS, C.; JOST, A.; TAGG, R.; BJORNEBOE, N.: Updated Probabilistic Extents of damage based on actual Collision Data. In.: Proc. ICCGS 2001, Lyngby, Denmark.
- [21] LÜTZEN, M.: Ship Collision Damages. In: Proc. IMDC 2003, Athens, Greece.
- [22] MAINS, C.: Updated Probabilistic Extents of Damages Based on actual Collision Data. In: Int. Multi. Conf. On Maritime Research and Technology, Crete, Greece, 2001.
- [23] MIKKONEN, I.: EFFECTS OF THE HARMONIZED PROBABILISITIC DAMAGE STABILITY STANDARDS ON A RO-RO-PASSENGER SHIP DESIGN. In: Proc. IMDC 2003, Athens, Greece.
- [24] NEREUS E.C. Project 2003-2005: First Principles Design for Damage Resistance against Capsize. DG XII- BRITE, 2000-2003.
- [25] PAPANIKOLAU, A.; ELIOPOULOU, E.: Impact of the new damage stability regulations on ship design. Proc. Mar. Conf. Design for Safety, Sakai, Japan.
- [26] PAPANIKOLAU, A.; SPANOS, D.; BOLUGOURIS, E.; ELIOPOULOU, E.; ALISSAFAKI, A. : Investigation into the Sinking of the RoRo-Passenger Ferry *Express Samina*. In: Proc. STAB 2003, Madrid.
- [27] PAWLOWSKI, M.: Subdivision and damage stability of ships. Euro- MTEC. Series, Techn. Univ. Gdansk, 2004.
- [28] RAVN, E.S.; JENSEN, J.J.; BAATRUP, J.; PAPANIKOLAU, A.; ZARAPHONITIS, G.; ELIOPOULOU, E., VASSALOS, D., TUSCU, C.; FERREIRA, S.; SOARES, G.C.: Robustness of the probabilistic damage stability concept to the degree of details in the subdivision. In: J. Ship. Techn. Research 49, 2002.
- [29] ROROPROB: Probabilistic Rules-Based Optimal Design of RoRo Passenger Ships. EU GRD1-1999-10819, 2003.
- [30] RUPONEN, P.: Extensions to a Pressure-Correction Method for Simulation of Progressive Flooding. In: Proc. STAB 2007, Hamburg, Germany.
- [31] RUSAS, S.: Stability of ships: Probability of Survival. In.: Proc. DCAMM 2002, Lyngby, Denmark.
- [32] RUSAS, S.: Damage Stability Standards for the Future. In: Proc. IMDC 2003, Athens, Greece.
- [33] SÖDING, H.: Water Ingress, Down- and Cross Flooding. In: Proc. DCAMM 2002, Lyngby, Denmark.
- [34] SSRC: SEM-Static equivalent Method. Background and Application. The Ship Stability Research Centre Strathclyde, Glasgow UK, 2000.
- [35] TAGG, R., BARTZSI, P.; PAPANIKOLAU, A.; SPYROU, K.; LÜTZEN. M.: Updated Vertical Extent of Collision Damage. ICCGS 2001, Lyngby, Denmark.

- [36] SKJONG, R.; VANEM, E.: Damage Stability Evaluation in Collision of Bulk Carriers. In: Provc. ICCGS 2004, Izu, Japan.
- [37] VANEM, E.; ANTAO, P.; DE COMAS, F.; SKJONG R.: Formal Safety Assessment of LNG Tankers. In: Proc. PRADS 2007, Houston, Texas.
- [38] VALANTO, P.: New Research into the MV ESTONIA Disaster. In.: Proc. STAB 2007, Hamburg, Germany.
- [39] VASSALOS, D.: SOLAS 2009 - Raising the Alarm. In: Proc. STAB 2007, Hamburg, Germany.
- [40] VASSALOS, D.: A risk based approach to probabilistic damage stability. In: Proc. STAB 2004, Shanghai, China.
- [41] VASSALOS, D.; TUCZU, C.; TURAN, O. ; BOLE, M. ; YORK, A.; LETIZIA, L.: THE APPLICATION OF ADVANCED NUMERICAL TOOLS IN DESIGN FOR STOCKHOLM AGREEMENT UPGRADING. In: Proc. IMDC 2003, Athens, Greece.
- [42] VASSALOS, D.; PAPANIKOLAU, A.: Impact Assessment of Stockholm Agreement to EU Ro-Ro Passenger Vessels. EC Contract B99-B27020010-SI2.144738. Fin. Tech. Report SU-SSRC/NTUA-SDL, 2001.
- [43] WENDEL, K.: Die Bewertung von Unterteilungen. In: JSTG 1961, Bd. 55
- [44] WENDEL, K.: *Die Wahrscheinlichkeit des Überstehens von Verletzungen*. In: Schiffstechnik, 4, 1960.