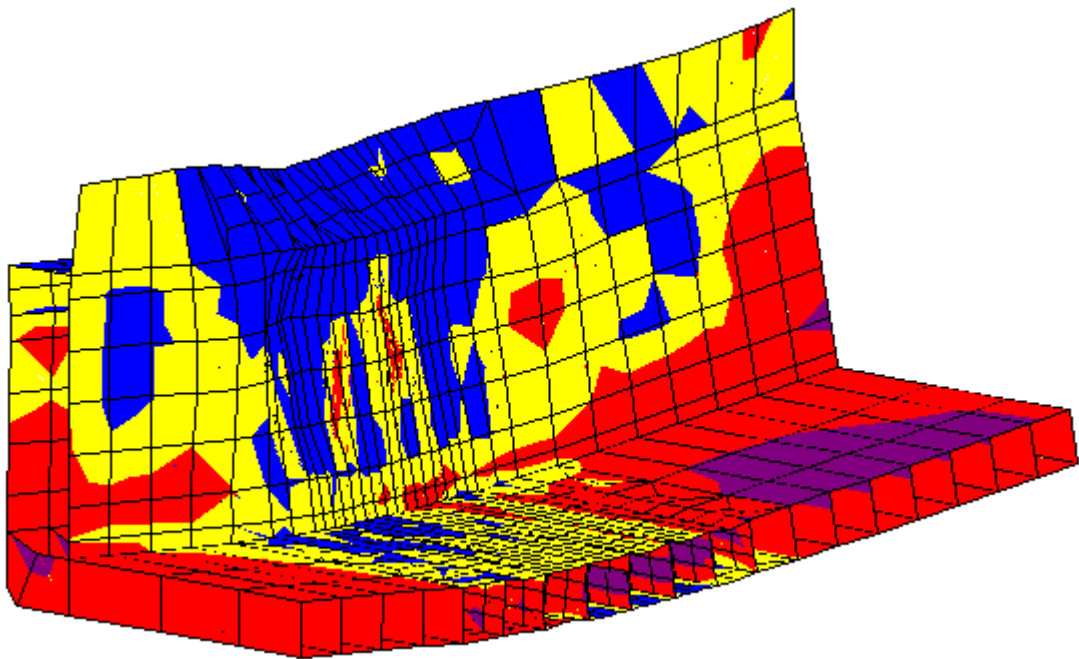


Andreas Meinken

Das Kollapsverhalten moderner Binnengüterschiffe unter Berücksichtigung struktureller Imperfektionen



Das Kollapsverhalten moderner Binnengüter- schiffe unter Berücksichtigung struktureller Imperfektionen

Vom Fachbereich Maschinenbau
der Gerhard-Mercator-Universität -GH- Duisburg

zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR - INGENIEUR

genehmigte Dissertation

von

Andreas Meinken

aus Haltern

Referent: Prof. Dr.-Ing. habil Hans-Joachim Schlüter
Koreferent: Prof. Dr.-Ing. Hansjörg Petershagen (TUHH)

Tag der mündlichen Prüfung: 15.11.1999

für Konny, Alexa und Till

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Schiffstechnik Duisburg (ISD) im Fachbereich Maschinenbau der Gerhard-Mercator-Universität -GH- Duisburg.

Zu Dank verpflichtet bin ich der *Deutschen Forschungsgemeinschaft*, welche diese Arbeit im Rahmen eines Forschungsvorhaben finanziell unterstützte und erst so ermöglichte.

Bei Herrn Professor Dr.-Ing. habil Hans-Joachim *Schlüter* möchte ich mich für die wissenschaftliche Betreuung und die vielen Anregungen recht herzlich bedanken.

Da die Schwerpunkte der Arbeit die Festigkeit und konstruktive Maßnahmen an Schiffen betreffen freut es mich besonders, daß Herr Professor Dr.-Ing. Hansjörg *Petershagen* das Koferat übernommen hat.

Zu dem Gelingen beigetragen haben auch die Mitarbeiter des ISD wie Prof. P. *Hagen* und Prof. K.-W. *Wietasch*. Besonders Herr Dipl. Ing. P. *Pfeifer* half mir die vielen bürokratischen Hürden zu überwinden. Bedanken möchte ich mich auch bei Dipl. Ing. Rüdiger *Plum*, cand. arch. nav. Rasmus *Stute* und cand. arch. nav. Christian *Weißborn* die als wissenschaftliche Hilfskräfte einen wichtigen Anteil zu dieser Arbeit geleistet haben. Natürlich möchte ich auch H. Thomzik und Dipl. Ing. Pluntke nicht vergessen, die mir geholfen haben so manches Problem mit den Rechnern zu beheben.

Vielen Dank auch an die Sachverständigen, Werft- und Reedereivertreter, die mir wertvolle Hinweise aus der Praxis gaben und mir ihre Zeit und Unterlagen zur Verfügung stellten. Namentlich sind dies H. Dipl. Ing. *Bodien* und H. Dipl. Ing. *Meier* (Lehnkering Transport GmbH), H. Dipl. Ing. *Flöter* (Sachverständiger), H. Dipl. Ing. *Hermes* (Germanischer Lloyd), H. Dipl. Ing. *van der Kuil* (Hülskens GmbH), H. Dipl. Ing. *Nerlich* (Neue Ruhrorter Schiffswerft), H. Dipl. Ing. *Petermann* (Wirtz / Petermann & Partner GmbH) und H. Dipl. Ing. *Ropertz* (Haniel Reederei GmbH).

Einen besonderen Dank auch an meine Eltern, die mein Studium gefördert und mich zur späteren Promotion ermutigt haben. Nicht zu vergessen sind natürlich meine Frau Kornelia sowie Alexa und Till, die mich gelegentlich daran erinnerten, daß es nicht nur die finiten Elemente gibt.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG.....	1
1.1	BEISPIELE AUS DER PRAXIS	2
1.1.1	<i>Totalverluste.....</i>	3
1.1.2	<i>Schäden im Innenboden</i>	4
1.1.3	<i>Kollaps eines Leichters</i>	5
1.1.4	<i>Risse und Arbeitsfalten in der Außenwand.....</i>	6
1.1.5	<i>Schäden am Dennebaum.....</i>	6
1.1.6	<i>Schäden durch Korrosion.....</i>	8
1.2	BEISPIELE AUS DER PRESSE	8
2	AUSWERTUNG DER LITERATUR.....	9
3	DAS NEUE BERECHNUNGSKONZEPT.....	13
3.1	SPEZIELLE TECHNIKEN	13
3.1.1	<i>Superelemente</i>	14
3.1.2	<i>Submodelltechnik</i>	21
3.1.3	<i>Adaptive Vernetzung</i>	22
3.2	DIE UNTERSUCHTEN MODELLE.....	23
3.3	DIE KNOTENVERSCHIEBUNGEN UND BELASTUNGEN	23
3.4	DIE BETRACHTETEN LADEFÄLLE	26
3.4.1	<i>Ladefall 1 - Eigengewicht, Bunkerung und Ballastwasser.....</i>	26
3.4.2	<i>Ladefall 2 - gleichmäßig verteilte Ladung</i>	26
3.4.3	<i>Ladefall 3 - Aufbiegung (Hogging).....</i>	28
3.4.4	<i>Ladefall 4 - Durchbiegung (Sagging)</i>	29
3.4.5	<i>Ladefall 5 - Erzladung</i>	30
3.4.6	<i>Ladefall 6 - Kiesladung.....</i>	32
3.4.7	<i>Ladefall 7 - Containerladung.....</i>	32
3.5	WERKSTOFFDATEN.....	35
3.6	ERWÜNSCHTE ERGEBNISSE	36
3.6.1	<i>Eigenwerte.....</i>	36
3.6.2	<i>Verformungen.....</i>	36
3.6.3	<i>Spannungen.....</i>	37
3.7	IMPERFEKTIONEN	37
3.7.1	<i>Fertigungsbedingte Imperfektionen</i>	38
3.7.2	<i>Betriebsbedingte Imperfektionen.....</i>	42
3.7.3	<i>Annahmen für folgende Analysen.....</i>	47
3.8	ANGABEN ZUR IMPLEMENTIERUNG	49
3.8.1	<i>Schnittstellen in MARC</i>	50
3.8.2	<i>Steuerung der Berechnung und Dateibenennung.....</i>	50
4	ANWENDUNG DER FEM ZUR UNTERSUCHUNG DER STRUKTURSTABILITÄT	53
4.1	GRUNDLAGEN DER STRUKTURSTABILITÄT	53
4.2	NICHTLINEARE STRUKTURBERECHNUNGEN MIT DER FEM.....	54
4.3	FEM BEI DER BERECHNUNG DER STRUKTURSTABILITÄT	55
4.4	ANMERKUNGEN ZUR THEORIE.....	55
4.5	BESONDERE PROBLEME.....	56
5	FE-ANALYSE EINER VERSTEIFTEN PLATTE.....	59
5.1	STRUKTURBESCHREIBUNG.....	59
5.2	EXPERIMENTELLE UND NUMERISCHE ERGEBNISSE AUS DER LITERATUR	60
5.3	BESCHREIBUNG DES VERWENDETEN FE-MODELLS	61
5.4	BERECHNUNGSERGEBNISSE.....	63
5.4.1	<i>Eigenwertuntersuchung.....</i>	64
5.4.2	<i>Nachrechnen der Kmiecik Ergebnisse.....</i>	64
5.4.3	<i>Wirkung der Imperfektionen.....</i>	66
5.4.4	<i>Einfluß der Profilform.....</i>	73

5.4.5	<i>Einfluß des Werkstoffes</i>	75
5.5	AUSWERTUNG DER ERGEBNISSE.....	77
6	FE-ANALYSE EINES KASTENTRÄGERS	79
6.1	STRUKTURBESCHREIBUNG.....	79
6.2	EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE.....	79
6.3	BESCHREIBUNG DES FE-MODELLS.....	80
6.4	BERECHNUNGSERGEBNISSE.....	81
6.4.1	<i>Verformungen</i>	81
6.4.2	<i>Spannungen</i>	82
6.5	AUSWERTUNG DER ERGEBNISSE.....	85
7	FE-ANALYSE EINES SCHUBLEICHTERS	87
7.1	STRUKTURBESCHREIBUNG.....	87
7.2	BERECHNUNGSERGEBNISSE FÜR DEN LADEFALL 2.....	89
7.2.1	<i>Ergebnisse der Voruntersuchungen</i>	89
7.2.2	<i>Verformungen</i>	90
7.2.3	<i>Spannungen</i>	94
7.2.4	<i>Auswertung der Ergebnisse</i>	96
7.3	BERECHNUNGSERGEBNISSE FÜR DEN LADEFALL 3.....	97
7.3.1	<i>Berechnungsergebnisse der Voruntersuchungen</i>	98
7.3.2	<i>Verformungen für das kleine Biegemoment</i>	100
7.3.3	<i>Spannungen für das kleine Biegemoment</i>	102
7.3.4	<i>Verformungen für das große Biegemoment</i>	104
7.3.5	<i>Spannungen für das große Biegemoment</i>	107
7.3.6	<i>Auswertung der Ergebnisse</i>	111
7.4	BERECHNUNGSERGEBNISSE FÜR DEN LADEFALL 4.....	113
7.4.1	<i>Berechnungsergebnisse der Voruntersuchungen</i>	113
7.4.2	<i>Verformungen für das gemäßigte Biegemoment</i>	115
7.4.3	<i>Spannungen für das gemäßigte Biegemoment</i>	118
7.4.4	<i>Verformungen für das große Biegemoment</i>	120
7.4.5	<i>Spannungen für das große Biegemoment</i>	122
7.4.6	<i>Auswertung der Ergebnisse</i>	125
7.5	BERECHNUNGSERGEBNISSE FÜR DEN LADEFALL 5.....	128
7.5.1	<i>Verformungen</i>	128
7.5.2	<i>Spannungen</i>	131
7.5.3	<i>Auswertung der Ergebnisse</i>	131
7.6	ZUSAMMENFASSENDE BETRACHTUNG.....	135
8	FE-ANALYSE EINES CONTAINERBINNENSCHIFFES	137
8.1	STRUKTURBESCHREIBUNG.....	137
8.2	MODELLBESCHREIBUNG.....	138
8.3	BERECHNUNGSERGEBNISSE FÜR DEN LADEFALL 3.....	140
8.3.1	<i>Verformungen</i>	140
8.3.2	<i>Spannungen</i>	143
8.3.3	<i>Auswertung der Ergebnisse</i>	145
8.4	BERECHNUNGSERGEBNISSE FÜR DEN LADEFALL 4.....	145
8.4.1	<i>Verformungen</i>	145
8.4.2	<i>Spannungen</i>	148
8.4.3	<i>Auswertung der Ergebnisse</i>	151
8.5	BERECHNUNGSERGEBNISSE FÜR DEN LADEFALL 7.....	151
8.5.1	<i>Verformungen</i>	151
8.5.2	<i>Spannungen</i>	154
8.5.3	<i>Auswertung der Ergebnisse</i>	156
8.6	ZUSAMMENFASSENDE BETRACHTUNG.....	156
9	KONSTRUKTIONSVORSCHLÄGE	157
9.1	KONSTRUKTIONSVORSCHLÄGE FÜR DEN SCHUBLEICHTER.....	157
9.2	KONSTRUKTIONSVORSCHLÄGE FÜR DAS CONTAINERBINNENSCHIFF.....	160
10	ZUSAMMENFASSUNG	163

11	WEITERES VORGEHEN.....	167
11.1	WEITERENTWICKLUNG DER FEM	167
11.1.1	<i>Nutzung von Optimierungsmodulen</i>	<i>167</i>
11.1.2	<i>Verwendung des Parallelrechners</i>	<i>168</i>
11.2	ANDERE SCHIFFSTYPEN	168
11.3	ABSCHLIEßENDE BEMERKUNGEN.....	168
12	LITERATUR	169
12.1	EIGENE PUBLIKATIONEN.....	169
12.2	STUDIEN- / UND DIPLOMARBEITEN ZU DIESEM THEMA.....	170
12.3	INSTITUTSINTERNE BERICHTE.....	171
12.4	SONSTIGE LITERATUR.....	174
13	ANHANG	185
13.1	SCHREIBWEISEN.....	185
13.2	SYMBOLE.....	185

Abbildungsverzeichnis

ABB. 1-1:	TOTALVERLUST EINES SCHUBLEICHTERS	2
ABB. 1-2:	LEICHTER NACH DER BERGUNG.....	3
ABB. 1-3:	CARABELLA BEI DER BERGUNG.....	3
ABB. 1-4:	SCHÄDEN AN DER CARABELLA.....	3
ABB. 1-5:	WELLEN IM INNENBODEN.....	4
ABB. 1-6:	ÖRTLICHE VERFORMUNGEN IM INNENBODEN	4
ABB. 1-7:	AUFBIEGUNG EINES SCHUBLEICHTERS (1).....	5
ABB. 1-8:	AUFBIEGUNG EINES SCHUBLEICHTERS (2).....	5
ABB. 1-9:	SPITZWINKLIGE FALTE IM INNENBODEN	5
ABB. 1-10:	„HUNGERFALTEN“ IN DER KIMMBEPLATTUNG UND KORROSIONSSCHÄDEN	6
ABB. 1-11:	RISSE UND ARBEITSFALTEN IM AUßENBODEN (1)	6
ABB. 1-12:	RISSE UND ARBEITSFALTEN IM AUßENBODEN (2)	6
ABB. 1-13:	RISSE UND ARBEITSFALTEN IM AUßENBODEN (3)	6
ABB. 1-14:	VERFORMUNGEN DES DENNEBAUMS (1)	7
ABB. 1-15:	VERFORMUNGEN DES DENNEBAUMS (2)	7
ABB. 1-16:	VERFORMUNGEN DES DENNEBAUMS (3)	7
ABB. 1-17:	VERFORMUNGEN DES DENNEBAUMS (4)	7
ABB. 1-18:	ABGERISSENE DENNEBAUMSTÜTZEN	7
ABB. 1-19:	KORROSION NACH DEM SANDSTRAHLEN.....	8
ABB. 1-20:	EINFLUß DER KORROSION AUF VERBÄNDE.....	8
ABB. 3-1:	SUBSTRUKTURTECHNIK AM BEISPIEL EINES SCHIFFSKÖRPERS	15
ABB. 3-2:	KOMBINATION VON STANDARD-FE UND SUPERELEMENTEN	18
ABB. 3-3:	SPANNUNGS-VERFORMUNGS-DIAGRAMM DER VERSTEIFTEN PLATTE /B15/.....	19
ABB. 3-4:	GRUNDGEDANKE DER SUBMODELLTECHNIK	22
ABB. 3-5:	KNOTENFESSELUNGEN FÜR DAS HALBMODELL (SYMMETRISCH)	24
ABB. 3-6:	ELASTISCHE BETTUNG	24
ABB. 3-7:	ELASTISCHE BETTUNG AM HAUPTSPANT	25
ABB. 3-8:	BELASTUNGEN AUS DEM LADEFALL 1	26
ABB. 3-9:	BELASTUNGEN AUS DEM LADEFALL 2.....	27
ABB. 3-10:	BELASTUNGEN AUS DEM LADEFALL 3.....	28
ABB. 3-11:	BELADUNG EINES SCHUBLEICHTERS MIT SCHWEREM STÜCKGUT.....	29
ABB. 3-12:	BELASTUNGEN AUS DEM LADEFALL 4.....	30
ABB. 3-13:	BELADUNG EINES SCHUBVERBANDES MIT ERZ.....	31
ABB. 3-14:	BELASTUNGEN AUS DEM LADEFALL 5.....	31
ABB. 3-15:	BELASTUNGEN AUS DEM LADEFALL 6.....	32
ABB. 3-16:	BELADUNG EINES CONTAINERBINNENSCHIFFES MIT CONTAINER.....	33
ABB. 3-17:	CONTAINERLADUNG IN EINEM BINNENSCHIFF UND EINEM SCHUBLEICHTER.....	33
ABB. 3-18:	3 UND 4 CONTAINERSTAPEL AN TYPISCHEN HAUPTSPANTEN	34
ABB. 3-19:	LAGE DER CONTAINER IM LADERAUM	34
ABB. 3-20:	SPANNUNGS-DEHNUNGSKURVE DER VERWENDETEN STÄHLE.....	36
ABB. 3-21:	VERWENDETE ANNAHMEN ZUR EIGENSPANNUNG.....	40
ABB. 3-22:	EIGENSPANNUNGEN DER PLATTE	41
ABB. 3-23:	EIGENSPANNUNGEN IM FE-MODELL	41
ABB. 3-24:	STRUKTURVERFORMUNGEN AM BEISPIEL VON PLATTENFELDERN	43
ABB. 3-25:	GESTALT DER VORVERFORMUNGEN.....	44
ABB. 3-26:	SINUSFÖRMIGE WELLEN IN DEN (VERSTEIFTEN) PLATTEN	45
ABB. 3-27:	LADERAUMSEGMENT MIT VORVERFORMUNGEN	45
ABB. 3-28:	DAS PROGRAMMSYSTEM MARC / MENTAT.....	49
ABB. 3-29:	MARC UND DIE SCHNITTSTELLEN.....	50
ABB. 5-1:	VERSTEIFTE PLATTE MIT DEN GEOMETRIEDATEN	60
ABB. 5-2:	LAST-VERFORMUNGSDIAGRAMM (M3).....	61
ABB. 5-3:	FE-¼ MODELL	62
ABB. 5-4:	DIE ERSTE EIGENFORM DER VERSTEIFTEN PLATTE.....	64
ABB. 5-5:	VERGLEICH DER VERFORMUNGSERGEBNISSE.....	65
ABB. 5-6:	VERGLEICH DER VERFORMUNGSERGEBNISSE MIT UND OHNE SCHWEIßEIGENSPANNUNGEN.....	66
ABB. 5-7:	VERGLEICH DER VERFORMUNGSERGEBNISSE BEI $\nu_L = 0,00175$	67

ABB. 5-8:	VERGLEICH DER VERFORMUNGSERGEBNISSE VERSCHIEDENER VORVERFORMUNGEN (E1, E2, B1, B2)	68
ABB. 5-9:	VERGLEICH DER VERFORMUNGSERGEBNISSE VERSCHIEDENER VORVERFORMUNGEN (F1, F2, L1, L2).....	69
ABB. 5-10:	EINFLUß DER GRÖßE DER IMPERFEKTION (E1)	70
ABB. 5-11:	EINFLUß DER GRÖßE DER IMPERFEKTION (F2)	71
ABB. 5-12:	EINFLUß DER ANGENOMMENEN WERTE FÜR DIE ABROSTUNG (F2).....	72
ABB. 5-13:	MINDERUNG DER TRAGFÄHIGKEIT ($v_L = 0,0022$).....	72
ABB. 5-14:	EINFLUß DER PROFILFORM	73
ABB. 5-15:	MISES-VERGLEICHSSPANNUNG IN DER DECKSCHICHT DER SCHALENELEMENTE BEI EINER RANDVERSCHIEBUNG VON $v_{MAX} = 10$ MM.....	74
ABB. 5-16:	EINFLUß DER STRECKGRENZE UND DER WERKSTOFFVERFESTIGUNG	75
ABB. 5-17:	EINFLUß DER MATERIALFESTIGKEIT.....	76
ABB. 5-18:	ÄNDERUNG DER TRAGFÄHIGKEIT IN ABHÄNGIGKEIT VOM VERWENDETEN WERKSTOFF.....	76
ABB. 6-1:	FE-MODELL DES KASTENTRÄGERS	80
ABB. 6-2:	KRAFT-VERFORMUNGS-DIAGRAMM	82
ABB. 6-3:	VERFORMUNGEN AM PUNKT A.....	83
ABB. 6-4:	VERFORMUNGEN AM PUNKT B.....	83
ABB. 6-5:	VERFORMUNGEN AM PUNKT C.....	84
ABB. 6-6:	FOTO DES EXPERIMENTES	84
ABB. 7-1:	HAUPTMAßE DES SCHUBLEICHTERS	87
ABB. 7-2:	VARIABLEN FÜR ABMESSUNGEN UND GEOMETRIEDATEN	88
ABB. 7-3:	FE-NETZ DES SCHUBLEICHTERS UND GEOMETRIEDATEN	88
ABB. 7-4:	TIEFGANG, TRIMM FÜR DEN LADEFALL 2 ALS STARRER KÖRPER.....	90
ABB. 7-5:	TIEFGANG, TRIMM UND VERFORMUNG DES GLOBALEN MODELLS (LD2: MODELL B).....	91
ABB. 7-6:	EINBIEGUNG DES DENNEBAUMS (LD2: MODELL B).....	92
ABB. 7-7:	TIEFGANG, TRIMM UND VERFORMUNG DES AUßENBODENS (LD2: MODELL B).....	92
ABB. 7-8:	VERGLEICH DER VERFORMUNG DES AUßENBODENS (LD2: MODELL B - E).....	93
ABB. 7-9:	VERGLEICH DER EINBIEGUNG DES DENNEBAUMS (LD2: MODELL B-E)	94
ABB. 7-10:	SPANNUNGEN AM MODELL B (LD2)	95
ABB. 7-11:	SPANNUNGEN AM MODELL E (LD2)	95
ABB. 7-12:	SPANNUNGEN AM MODELL E (LD2) - DETAILANSICHT	96
ABB. 7-13:	BIEGEMOMENTENVERLAUF FÜR DEN LADEFALL 3	98
ABB. 7-14:	EINBIEGUNG DES DENNEBAUMS (LD3) - GROBMODELL	99
ABB. 7-15:	EINBIEGUNG DES DENNEBAUMS (LD3) - FEINMODELL.....	99
ABB. 7-16:	EINBIEGUNG DES DENNEBAUMS (LD3: MODELL B).....	100
ABB. 7-17:	EINBIEGUNG DES DENNEBAUMS (LD3: MODELL B-E).....	101
ABB. 7-18:	TIEFGANG, TRIMM UND VERFORMUNG DES AUßENBODENS (LD3: MODELL B).....	101
ABB. 7-19:	TIEFGANG, TRIMM UND VERFORMUNG DES AUßENBODENS (LD3: MODELL B-E).....	102
ABB. 7-20:	MISES SPANNUNGEN DES GLOBALEN MODELLS (LD3: MODELL B,E)	103
ABB. 7-21:	MISES SPANNUNGEN DES LADERAUMSEGMENTES (LD3: MODELL B-E).....	103
ABB. 7-22:	MISES SPANNUNGEN DES DETAILAUSSCHNITTES (LD3: MODELL B-E)	104
ABB. 7-23:	TIEFGANG, TRIMM UND VERFORMUNG DES GLOBALEN MODELLS (LD3: MODELL B).....	105
ABB. 7-24:	TIEFGANG, TRIMM UND VERFORMUNG DES AUßENBODENS (LD3: MODELL B).....	105
ABB. 7-25:	TIEFGANG, TRIMM UND VERFORMUNG DES AUßENBODENS (LD3: MODELL C).....	106
ABB. 7-26:	TIEFGANG, TRIMM UND VERFORMUNG DES AUßENBODENS (LD3: MODELL B-E).....	107
ABB. 7-27:	MISES SPANNUNGEN DES GLOBALEN MODELLS (LD3: MODELL B,C)	108
ABB. 7-28:	MISES SPANNUNGEN DES GLOBALEN MODELLS (LD3: MODELL D,E)	109
ABB. 7-29:	MISES SPANNUNGEN DES LADERAUMSEGMENTES (LD3: MODELL B-E).....	110
ABB. 7-30:	MISES SPANNUNGEN DES DETAILAUSSCHNITTES (LD3: MODELL B-E)	110
ABB. 7-31:	EINFLUß DER IMPERFEKTIONEN IM PROZENTUALEN VERGLEICH (LD3)	111
ABB. 7-32:	GLOBALE AUFBIEGUNG EINES SCHUBLEICHTERS.....	112
ABB. 7-33:	PLASTISCHES GELENK IM SCHUBLEICHTER	112
ABB. 7-34:	BIEGEMOMENTENVERLAUF FÜR DEN LADEFALL 4	113
ABB. 7-35:	TIEFGANG, TRIMM UND VERFORMUNG DES AUßENBODENS (LD4)	114
ABB. 7-36:	EINBIEGUNG DES DENNEBAUMS (LD4).....	115
ABB. 7-37:	EINBIEGUNG DES DENNEBAUMS (LD4: MODELL B).....	116
ABB. 7-38:	TIEFGANG, TRIMM UND VERFORMUNG DES AUßENBODENS (LD4: MODELL B).....	116
ABB. 7-39:	EINBIEGUNG DES DENNEBAUMS (LD3: MODELL B-E).....	117
ABB. 7-40:	TIEFGANG, TRIMM UND VERFORMUNG DES AUßENBODENS (LD3: MODELL B-E).....	117
ABB. 7-41:	MISES SPANNUNGEN DES GLOBALEN MODELLS (LD4: MODELL B,E)	118
ABB. 7-42:	MISES SPANNUNGEN DES LADERAUMSEGMENTES (LD4: MODELL B-E).....	119

ABB. 7-43:	MISES SPANNUNGEN DES DETAILAUSSCHNITTES (LD4: MODELL B-E)	119
ABB. 7-44:	TIEFGANG, TRIMM UND VERFORMUNG DES GLOBALEN MODELLS (LD4: MODELL B,E)	120
ABB. 7-45:	TIEFGANG, TRIMM UND VERFORMUNG DES AUßENBODENS (LD4: MODELL B).....	121
ABB. 7-46:	TIEFGANG, TRIMM UND VERFORMUNG DES AUßENBODENS (LD4: MODELL E).....	121
ABB. 7-47:	EINBIEGUNG DES DENNEBAUMS (LD4: MODELL B-E).....	122
ABB. 7-48:	MISES SPANNUNGEN DES GLOBALEN MODELLS (LD4: MODELL B,C)	123
ABB. 7-49:	MISES SPANNUNGEN DES GLOBALEN MODELLS (LD4: MODELL D,E)	123
ABB. 7-50:	MISES SPANNUNGEN DES LADERAUMSEGMENTES (LD4: MODELL B-E).....	124
ABB. 7-51:	MISES SPANNUNGEN DES DETAILAUSSCHNITTES (LD4: MODELL B-E)	124
ABB. 7-52:	EINFLUß DER IMPERFEKTIONEN IM PROZENTUALEN VERGLEICH (LD3)	125
ABB. 7-53:	SAGGING KOLLAPS EINES SCHUBLEICHTERS	126
ABB. 7-54:	STRUKTURSCHÄDEN AM DENNEBAUM	126
ABB. 7-55:	STRUKTURSCHÄDEN IM GANGBORD.....	127
ABB. 7-56:	STRUKTURSCHÄDEN IN DER TROGWAND.....	127
ABB. 7-57:	VERTEILUNG DES ERZ AUF DEM INNENBODEN	129
ABB. 7-58:	EINBIEGUNG DES DENNEBAUMS (LD5).....	130
ABB. 7-59:	TIEFGANG, TRIMM UND VERFORMUNG DES AUßENBODENS (LD5: MODELL B).....	130
ABB. 7-60:	TIEFGANG, TRIMM UND VERFORMUNG DES AUßENBODENS (LD5: MODELL D)	131
ABB. 7-61:	GLOBALEN MISES SPANNUNGEN FÜR DEN LADEFALL 5 (3 UND 6 ERZKEGEL).....	132
ABB. 7-62:	GLOBALEN MISES SPANNUNGEN FÜR DEN LADEFALL 5 (9 UND 12 ERZKEGEL).....	133
ABB. 7-63:	BILDUNG EINER ARBEITSFALTE.....	134
ABB. 8-1:	HAUPTDATEN DES CONTAINERSCHIFFES	137
ABB. 8-2:	FE-MODELL DES MASCHINENRAUMES.....	138
ABB. 8-3:	FE-MODELL EINES LADERAUMSEGMENTES	139
ABB. 8-4:	FE-VOLLMODELL DES CONTAINERBINNENSCHIFFES	139
ABB. 8-5:	NEIGUNG DES WALLGANGS NACH INNEN UND AUßEN	141
ABB. 8-6:	EINBIEGUNG DES DENNEBAUMS (LD3: MODELL B).....	141
ABB. 8-7:	TIEFGANG, TRIMM UND VERFORMUNG DES AUßENBODENS (LD3: MODELL B).....	142
ABB. 8-8:	VERGLEICH DES TIEFGANG, TRIMM UND VERFORMUNG DES AUßENBODENS (LD3: MODELL B-E).....	142
ABB. 8-9:	MISES SPANNUNGEN DES GLOBALEN MODELLS (LD3: MODELL B,E)	143
ABB. 8-10:	MISES SPANNUNGEN DES LOKALEN MODELLS (LD3: MODELL B-E)	143
ABB. 8-11:	MISES SPANNUNGEN DES DETAILAUSSCHNITTES (LD3: MODELL B-E)	144
ABB. 8-12:	EINFLUß DER IMPERFEKTIONEN IM PROZENTUALEN VERGLEICH (LD3)	145
ABB. 8-13:	EINBIEGUNG DES DENNEBAUMS (LD4: MODELL B).....	146
ABB. 8-14:	EINBIEGUNG DES DENNEBAUMS (LD4: MODELL B-E).....	146
ABB. 8-15:	TIEFGANG, TRIMM UND VERFORMUNG DES AUßENBODENS (LD4: MODELL B).....	147
ABB. 8-16:	VERGLEICH DES TIEFGANG, TRIMM UND VERFORMUNG DES AUßENBODENS (LD4: MODELL B-E).....	148
ABB. 8-17:	MISES SPANNUNGEN DES GLOBALEN MODELLS (LD4: MODELL B,E)	149
ABB. 8-18:	MISES SPANNUNGEN DES LADERAUMSEGMENTES (LD4: MODELL B-E).....	149
ABB. 8-19:	MISES SPANNUNGEN DES DETAILAUSSCHNITTES (LD4: MODELL B-E)	150
ABB. 8-20:	EINFLUß DER IMPERFEKTIONEN IM PROZENTUALEN VERGLEICH (LD3)	151
ABB. 8-21:	EINBIEGUNG DES DENNEBAUMS (LD7: MODELL B).....	152
ABB. 8-22:	TIEFGANG, TRIMM UND VERFORMUNG DES AUßENBODENS (LD7: MODELL B).....	153
ABB. 8-23:	VERWINDUNG DES SCHIFFSKÖRPERS (LD7: MODELL B).....	153
ABB. 8-24:	MISES SPANNUNGEN DES GLOBALEN MODELLS (LD7: MODELL B).....	154
ABB. 8-25:	MISES SPANNUNGEN DES LADERAUMSEGMENTES (LD7: MODELL B,E).....	154
ABB. 8-26:	MISES SPANNUNGEN DES DETAILAUSSCHNITTES (LD7: MODELL B,E)	155
ABB. 8-27:	MISES SPANNUNGEN AN DER ACHTEREN LUKENECKE (LD7: MODELL E).....	155
ABB. 8-28:	MISES SPANNUNGEN AN DER VORDEREN LUKENECKE (LD7: MODELL E)	156
ABB. 9-1:	VERWENDUNG VON HÖHERFESTEN STÄHLEN	159
ABB. 9-2:	TRAPEZPROFILE UND GESICKTE WÄNDE	159
ABB. 9-3:	EINBAU VON LÄNGSTRÄGERN	160
ABB. 9-4:	HOCHGEZOGENER WALLGANG	161
ABB. 9-5:	UNREGELMÄßIGE ABSTÄNDE FÜR DIE RAHMENSPANTEN	162
ABB. 9-6:	VORKRÜMMUNG DES SCHIFFES	162

Tabellenverzeichnis

TABELLE 2-1: ENTWICKLUNGEN DER FEM IM SCHIFFBAU	11
TABELLE 3-1: FESTIGKEITSKENNWERTE DER VERWENDETEN STÄHLE.....	35
TABELLE 3-2: GEMESSENE PLATTENVERFORMUNGEN /PAYER79/.....	46
TABELLE 3-3: GESCHÄDIGTE BAUTEILE UND DEREN URSACHEN.....	46
TABELLE 3-4: ZAHLENWERTE FÜR DIE VERFORMUNGEN AN DEN BAUTEILEN	48
TABELLE 5-1: VERWENDETE DATEN FÜR DIE ABROSTUNG.....	63
TABELLE 7-1: DIE ERMITTELTEN SPANNUNGEN DES SCHUBLEICHTERS (LD3: MODELL B-E)	111
TABELLE 7-2: DIE ERMITTELTEN SPANNUNGEN DES SCHUBLEICHTERS (LD4: MODELL B-E)	125
TABELLE 8-1: DIE ERMITTELTEN SPANNUNGEN DES CONTAINERBINNENSCHIFFES (LD3: MODELL B-E).....	144
TABELLE 8-2: DIE ERMITTELTEN SPANNUNGEN DES CONTAINERBINNENSCHIFFES (LD4: MODELL B-E).....	150

