

Zur Querschnitts- und Stabtragfähigkeit von Trägern mit profilierten Stegen

Von der Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Stadtplanung der
Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus zur Erlangung des akademischen
Grades eines Doktor-Ingenieurs genehmigten Dissertation

vorgelegt von

Diplom-Ingenieur

Dina Hannebauer

aus Jessen/E.

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. H. Pasternak, BTU Cottbus

Gutachter: Prof. B. Johansson, Lulea University of Technology, Schweden

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. K. Raboldt, BTU Cottbus

Tag der Disputation: 29.04. 2008

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden das Stabilitätsverhalten und dessen Einfluss auf die Querschnitts- und Stabtragfähigkeit von Trägern mit profilierten Stegen umfassend untersucht. Die gewählten Parametergrenzwerte orientieren sich am derzeitigen Anwendungsbereich stegprofilierter Träger. Es werden ausschließlich sinus- und trapezförmige Profilierungen untersucht. Die Arbeit leistet einen Beitrag, dem Anwender das Tragverhalten unterschiedlicher Profilierungen aufzuzeigen und gleichzeitig abzugrenzen. Ein gezielter Einsatz der derzeit auf dem Stahlleichtbaumarkt existierenden Trapez- und Wellstegträger wird ermöglicht. Erhöhte Wettbewerbschancen sind eine Folge.

Die Ergebnisse der experimentellen und numerischen Untersuchungen zum lokalen Stabilitätsverhalten des Stegbleches bei Querkraftbeanspruchung tragen zu einem besseren Verständnis über das Tragverhalten bei und erlauben eine Weiterentwicklung des mehrfach diskutierten Interaktionsmodells zur Querkrafttragfähigkeit. Umfangreiche Parameterstudien zeigen, dass die Profilierungsform (trapez- bzw. sinusförmig) sowie die Parameter Wellenamplitude und –länge die Tragmechanismen bestimmen. Die Interaktion des lokalen und globalen Beulens wird dabei mit einer Beulspannung für zonales Beulen beschrieben. Auf Grundlage dieser Ergebnisse kann die Tragfähigkeit stegprofilierter Träger besser formuliert werden. Die Abminderungskurven, welche das Nachbeulverhalten sowie Imperfektionen berücksichtigen, werden optimiert. Eine wesentliche Verbesserung der Plateaulängen ist für Träger mit profilierten Stegen gelungen.

Des Weiteren wird der Einfluss der lokalen Instabilität des Gurtes biegebeanspruchter Träger untersucht. Im Speziellen werden dabei Einflussparameter des Plattenbeulens untersucht und gezeigt, dass Abweichungen angenommener Beulfeldabmessungen ungünstige Auswirkungen auf das beschriebene Tragverhalten haben. Im Ergebnis der Untersuchungen wird eine Optimierung der anzunehmenden Beulfeldabmessungen für Plattenbeulen vorgeschlagen.

Abschließend ergänzen Untersuchungen zum globalen Stabilitätsverhalten der Wellstegträger die grundlegenden Untersuchungen zum Tragverhalten der Wellstegträger und ordnen diese in die bestehenden europäischen Knickspannungslinien ein.

Summary

The stability behaviour and its influence on bearing capacity of girders with corrugated webs have been investigated comprehensively within the present paper.

The investigated parameters orientate towards current applications of girders with corrugated webs. Only sinusoidal and trapezoidal corrugations are examined. The paper makes a contribution in order to present users differences in load bearing behaviour of corrugated web-girders and distinguish them concurrently. Specific use of presently existing corrugated web-girders becomes possible.

Results of experimental and numerical investigations regarding local stability behaviour of webs, which are shear force-loaded have been established. Extensive parameter studies show, that shape of corrugation (trapezoidal and sinusoidal) as well as amplitude and length of corrugation define the load bearing behaviour. The interaction of local and global buckling is expressed with a critical buckling stress for zonal buckling. Based on these results bearing capacity of girders with corrugated webs can be described more precise. In conclusion, reduction factor curves (considering imperfections and post-buckling behaviour) have been improved. A decisive optimization of plateau length has been succeeding for girders with corrugated webs.

Additional the local stability behaviour of flanges has been investigated due to flexural loading. Especially the influence parameter of plate buckling has been determined. It could be shown, that variances of assumed buckling field dimensions have unfavourable effects due to common-described load bearing behaviour. Results and improved plate buckling field dimensions have been summarized and suggested.

Concluding investigations of the global stability behaviour complete fundamental statements about load bearing behaviour of girders with sinusoidally corrugated webs and integrate them into existing european buckling curves.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis	VIII
Verzeichnis der Symbole	XI
1 Einleitung, Ziel und Umfang	1
1.1 Einleitung.....	1
1.2 Ziel und Umfang.....	2
2 Vorbetrachtungen.....	5
2.1 Stand des Wissens zur Querschnitts- und Stabtragfähigkeit	5
2.2 Zum Stand des Wissen über Träger mit profilierten Stegen.....	7
2.3 Zur Verifikation von Ingenieurmodellen.....	11
2.4 Definitionen	12
2.5 Knickspannungslinien, Biegedrillknick- und Beulkurven.....	16
2.6 Zur Anwendung der Finiten Elemente Methode (FEM)	19
3 Berechnungsmodelle und Normen.....	21
3.1 Berechnungsmodell nach DAST-Ri 015.....	21
3.1.1 Normalkraft- und Momententragfähigkeit.....	21
3.1.2 Querkrafttragfähigkeit	23
3.2 DIN 18800	23
3.3 Wellstegträgerdokumentation.....	24
3.4 EN 1993-1-5 Annex D.....	26
3.4.1 Allgemeines	26
3.4.2 Normalkraft- und Momententragfähigkeit.....	26
3.4.3 Querkrafttragfähigkeit	28
3.5 EN 1993-1-6	29
4 Einfluss der Stegprofilierung auf die Querkrafttragfähigkeit.....	31
4.1 Allgemeines	31
4.2 Versuche	31

4.2.1	Versuchsplanung und -durchführung	31
4.2.2	Versuchsergebnisse	33
4.2.3	Imperfektionen	39
4.2.4	Externe Versuche	39
4.3	Entwicklung des FE Modells	43
4.3.1	Allgemeines.....	43
4.3.2	FE Modell Wellstegträger	43
4.3.3	FE Modell Trapezstegträger.....	52
4.4	Parameter der Studie und Grundlegendes	60
4.4.1	Parameter der Studie	60
4.4.2	Grundlegendes zu den FE-Berechnungen	61
4.5	Ergebnisse der FE Parameterstudie – Beullastberechnung	62
4.5.1	Allgemeines zu den Beulformen	62
4.5.2	Beulformen der Parameterstudie.....	63
4.5.3	Grundlegendes zur Auswertung und Modellbildung	66
4.5.4	Auswertung der Ergebnisse.....	67
4.6	Ergebnisse der FE Parameterstudie – Traglast.....	79
4.6.1	Einfluss der Parameter unterschiedlicher Profilierungsformen	79
4.6.2	Vergleich numerischer Traglastergebnisse	81
4.7	Zusammenfassung Vorschlag EN 1993-1-5 Annex D.....	88
5	Gurtbeulen.....	91
5.1	Allgemeines.....	91
5.2	Großversuche und externe Untersuchungen	91
5.2.1	Allgemeines.....	91
5.2.2	Versuchsträger.....	91
5.2.3	Versuchsdurchführung und -ergebnisse	93
5.2.4	Externe Untersuchungen	95
5.2.5	FE Modellierung der Großversuche.....	100
5.3	Randbedingungen der numerischen und analytischen Untersuchungen	103
5.3.1	Parameter.....	103
5.3.2	FE Modell und Randbedingungen.....	103

5.3.3	Numerische Beulwertberechnung.....	108
5.3.4	Analytische Beulwertberechnung.....	109
5.4	Ergebnisse und Auswertung der Beulwertuntersuchung.....	109
5.4.1	Ergebnisse der numerisch ermittelten Beulwerte und Beulfelder	109
5.4.2	Vergleich numerischer und analytischer Beulwerte.....	113
5.5	Vorschlag zur Beulwertberechnung - plattenähnliches Beulen.....	116
5.5.1	Allgemeines	116
5.5.2	Kategorien.....	116
5.5.3	Kategorie Profilierungen $R < 0,3$	116
5.5.4	Kategorie Profilierungen $R > 0,3$	118
5.5.5	Zusammenfassung	119
6	Biegedrillknicken.....	121
6.1	Allgemeines	121
6.2	Experimentelle Arbeiten.....	121
6.2.1	Versuchsvorbereitung.....	121
6.2.2	Versuchsdurchführung und Versuchsergebnisse.....	123
6.3	Voraussetzungen der Parameterstudie.....	126
6.3.1	Parameter	126
6.3.2	FE Modell	127
6.3.3	Ergebnisse im Vergleich.....	129
6.4	Ergebnisse.....	130
6.4.1	Algorithmus der Berechnung.....	130
6.4.2	Versuche und Parameterstudie.....	132
6.4.3	Abminderungskurven.....	134
7	Zusammenfassung	137
7.1	Schlussfolgerungen.....	137
7.2	Ausblick.....	138
	Literatur	141
	Anlagen.....	147
	Anlage A1 – Messstellenpläne	149
	Anlage A2 – Materialkennwerte Versuch und FE Parameter.....	151

Anlage A3 – Untersuchungen zum Kapitel 4.....	165
Anlage A4 – Untersuchungen zum Kapitel 5.....	187
Anlage A5 – Untersuchungen zum Kapitel 6.....	195

Abbildungsverzeichnis

Bild 3.1:	Querbiegemomente	22
Bild 3.2:	Ersatztrapezform der sinusförmigen Profilierung	24
Bild 3.3:	Abminderungsfaktor in Abhängigkeit zum Schlankheitsgrad [69]	25
Bild 3.4:	Abmessungen der Profilierung	26
Bild 4.1:	Versuchsaufbau und Messtechnik der Versuchsträger	32
Bild 4.2:	Last-Verformungskurven der Versuchsträger	34
Bild 4.3:	Dehnungsverhalten der Versuchsträger im Steg a) V1 b) V2 c) V3	36
Bild 4.4:	Beulen im Lasteinleitungsbereich Reihe V1 (Phase 1)	37
Bild 4.5:	Beulen im gesamten plastizierten Stegblech Reihe V1 (Phase 2)	37
Bild 4.6:	Stegbeulen Reihe V2 (Phase 2)	37
Bild 4.7:	Stegbeulen Reihe V3 (Phase 2)	38
Bild 4.8:	Stegbeulen Reihe V3 (Phase 2)	38
Bild 4.9:	Stegbeulen Reihe V3 (Phase 2)	38
Bild 4.10:	Nachgebildete Randbedingungen	43
Bild 4.11:	Lagerungsbedingung	44
Bild 4.12:	Lasteinleitung	44
Bild 4.13:	Entwicklung FE Modell sinusförmige Stegprofilierung	48
Bild 4.14:	Vergleich FE Modell und Versuch	48
Bild 4.15:	Vergleich FE Modell und Versuch im elastischen Bereich	49
Bild 4.16:	FE WT25_500_40_155_200_15 Mises Spannung Traglast	49
Bild 4.17:	FE WT25_500_40_155_200_15 Deformation Magnitude	50
Bild 4.18:	WT25_500_40_155_200_15 Mises Spannung (Inc 23)	50
Bild 4.19:	WT25_500_40_155_200_15 Deformation Magnitude (Inc 23)	51
Bild 4.20:	Versuchsträger V2_01 Nachbeulbereich	51
Bild 4.21:	Erste Eigenform des Versuchsträger B1 [54]	53
Bild 4.22:	Verformungsplot bei Traglast Versuchsträger B1 [54]	54
Bild 4.23:	Verformungsplot im Nachbeulbereich Versuchsträger B1 [54]	54
Bild 4.24:	Verformungsplot im Nachbeulbereich Versuchsträger B1 [54]	55

Bild 4.25:	Erste Eigenform Versuchsträger B3 [54]	55
Bild 4.26:	Deformationsplot Traglast Versuchsträger B3 [54]	56
Bild 4.27:	Deformationsplot im Nachbeulbereich Versuchsträger B3 [54]	56
Bild 4.28:	Deformationsplot im Nachbeulbereich Versuchsträger B3 [54]	56
Bild 4.29:	Erste Eigenform Versuchsträger M101 [54]	57
Bild 4.30:	Deformationsplot Traglast Versuchsträger M101 [54]	57
Bild 4.31:	Deformationsplot Traglast Versuchsträger M101 [54]	57
Bild 4.32:	Deformationsplot im Nachbeulbereich Versuchsträger M101 [54]	58
Bild 4.33:	erste Eigenform Versuchsträger M103 [54]	58
Bild 4.34:	Deformationsplot Traglast Versuchsträger M103 [54]	58
Bild 4.35:	Deformationsplot im Nachbeulbereich Versuchsträger M103 [54]	59
Bild 4.36:	Beularten nach [58]	63
Bild 4.37:	Lokales Beulen Trapezsteg	64
Bild 4.38:	Zonales Beulen - Trapezsteg	64
Bild 4.39:	Zonales Beulen - Trapezsteg	65
Bild 4.40:	Einfluss der Spreizung auf das Beulverhalten von Trapezstegträgern	68
Bild 4.41:	Einfluss der Spreizung auf das Beulverhalten	69
Bild 4.42:	Abgrenzungskriterium für lokales und zonales Beulen	70
Bild 4.43:	Numerische und analytische Beulspannungen	70
Bild 4.44:	Abgrenzungskriterium für lokales und zonales Beulen	71
Bild 4.45:	Numerische und analytische zonale Beulspannungen	72
Bild 4.46:	Träger mit lokalen Beulerscheinungen Modell EN 1993-1-5	72
Bild 4.47:	Einfluss unterschiedlicher Beulfeldlängen a_1 und a_2	73
Bild 4.48:	Berücksichtigung des Reduktionsfaktors R in EN 1993-1-5	74
Bild 4.49:	Träger mit lokalen Beulerscheinungen Modell NEU	75
Bild 4.50:	Vergleich numerischer und analytischer Beulspannungen EN1993-1-5	76
Bild 4.51:	Vergleich num. und analytischen Beulspannungen EN 1993-1-6	76
Bild 4.52:	Einfluss der Wellenlänge und Stegdicke auf das Beulverhalten	77
Bild 4.53:	Einfluss der Steghöhe auf das Beulverhalten	77
Bild 4.54:	Vergleich numerischer und analytischer Beulspannungen nach [69]	78
Bild 4.55:	Vergleich nach Modell NEU - lokales Beulen	79

Bild 4.56:	Abminderungsfaktoren in Abhängigkeit $\lambda_{c,l}$ (EN 1993-1-5)	82
Bild 4.57:	Abminderungsfaktoren in Abhängigkeit $\lambda_{c,l,new}$ (NEU)	82
Bild 4.58:	Analytische, num. und experimentelle Ergebnisse (EN 1993-1-5)	83
Bild 4.59:	Analytisch, numerische und experimentelle Traglastergebnisse (NEU)	83
Bild 4.60:	Abminderungsfaktoren in Abhängigkeit $\lambda_{c,z}$ (NEU)	84
Bild 4.61:	Analytische, numerische Traglastergebnisse (NEU)	85
Bild 4.62:	Abminderungsfaktoren in Abhängigkeit $\lambda_{c,l,new}$ (NEU1)	86
Bild 4.63:	Abminderungsfaktoren in Abhängigkeit $\lambda_{c,shell}$ (NEU2)	86
Bild 4.64:	Analytische, numerische Traglastergebnisse (EN 1993-1-5 und [69])	87
Bild 4.65:	Analytische, numerische Traglastergebnisse (NEU1)	87
Bild 4.66:	Analytische, numerische Traglastergebnisse (NEU2)	88
Bild 4.67:	Bild D.2 in EN 1993-1-5 Annex D	90
Bild 5.1:	Abmessungen der Versuchsträger BTU Cottbus und Lasteinleitung	92
Bild 5.2:	Versuchseinrichtung BTU Cottbus	93
Bild 5.3:	Gurtbeule bei Traglast und weiterer Laststeigerung	94
Bild 5.4:	Last-Verformungsdiagramm der Versuchsreihe V4a	95
Bild 5.5:	Statisches Modell der Krakauer Versuchsträger [44]	95
Bild 5.6:	Erster Eigenwert des Systems101	
Bild 5.7:	Last-Verformungskurve Versuch und FE-Modell	101
Bild 5.8:	Verformungen (Magnitude) des FE Modells [mm]	102
Bild 5.9:	FE Modell: Spannungen (Mises) im Vergleich zum Versuch V4a	102
Bild 5.10:	Vorhandene Extrempunkte beispielhaft an der Trapezform	104
Bild 5.11:	Konvergenzverhalten des Gurtes	104
Bild 5.12:	Konvergenzverhalten in %	105
Bild 5.13:	Beulform des vereinfachten Gurtmodells (Modell Hannebauer)	106
Bild 5.14:	Beullast TST100B (Modell Hannebauer)	107
Bild 5.15:	Last-Verformungskurve TST100B (Modell Hannebauer)	107
Bild 5.16:	Verformungen (Magnitude) bei maximaler Traglast	108
Bild 5.17:	Spannungen (Mises) bei maximaler Traglast	108
Bild 5.18:	Idealisiertes Beulfeld im Druckgurt	109
Bild 5.19:	Erwartete Beulform „Plattenbeulen“	110

Bild 5.20:	Beulfelder und ihre Abmessungen für Trapezstegträger	111
Bild 5.21:	Beulfelder und ihre Abmessungen für Wellstegträger	112
Bild 5.22:	Numerische Beulwerte im Vergleich zu den Beulwerten nach [18]	114
Bild 5.23:	Numerische Beulwerte im Vergleich [18] (Plattenbeulen)	114
Bild 5.24:	Beulfeldabmessungen beispielhaft an der sinusförmigen Profilierung	116
Bild 5.25:	Vergleich ($k_{\sigma,num}$) und ($k_{\sigma,a}$) Beulwerte $R < 0,3$	117
Bild 5.26:	Vergleich ($k_{\sigma,num}$) und vorgeschlagener ($k_{\sigma,v}$) Beulwerte $R < 0,3$	118
Bild 5.27:	Vergleich ($k_{\sigma,num}$) und analytischer ($k_{\sigma,a}$) Beulwerte $R > 0,3$	119
Bild 6.1:	Lasteinleitung Versuchsreihe V6 [cm]	122
Bild 6.2:	Lasteinleitung Versuchsreihe V5 [cm]	122
Bild 6.3:	beispielhafter Versuchsaufbau	123
Bild 6.4:	Biegedrillknicken des Trägers V6c	125
Bild 6.5:	Ergebnisse Versuchsreihe V6	125
Bild 6.6:	FE Modell	128
Bild 6.7:	Erster Eigenwert	129
Bild 6.8:	Vergleich Versuchsträger V6c und FE-Modell	130
Bild 6.9:	χ_{LT} - $\bar{\lambda}_{LT}$ Diagramm aller untersuchten Parameter	133
Bild 6.10:	Vergleich der Ergebnisse mit europäischen KSL [17]	134

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1:	Abmessungen der Versuchsträger [mm]	31
Tabelle 4-2:	Abmessungen der Profilierung und Materialkennwerte	32
Tabelle 4-3:	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse	34
Tabelle 4-4:	Versuche zur Schubtragfähigkeit Trapezstegträger [32]	40
Tabelle 4-5:	FE Studie Elementvarianten (Dr. Peter Linde)	46
Tabelle 4-6:	Vergleich Versuch Kuchta mit entwickelten FE Modell	52
Tabelle 4-7:	Vergleich maximale Traglast FE und Versuch	53
Tabelle 5-1:	Abmessungen der Versuchsträger [mm]	92
Tabelle 5-2:	Traglastergebnisse der Versuchsreihe V4	94
Tabelle 5-3:	Abmessungen der Krakauer Versuchsträger [44]	96

Tabelle 5-4:	Vergleich der Tragspannungen der Versuchsergebnisse	96
Tabelle 5-5:	Geometrie und Materialwerte der Versuchsträger [34]	97
Tabelle 5-6:	Vergleich der Tragspannungen der Versuchsergebnisse	98
Tabelle 5-7:	Abmessungen der Versuchsträger Lindner	98
Tabelle 5-8:	Vergleich der Tragspannungen der Versuchsergebnisse	99
Tabelle 5-9:	Vergleich Grenzbeulspannungen	100
Tabelle 5-10:	Vergleich der Beulfelder sinus- und trapezförmigen Profilierung	113
Tabelle 5-11:	Vergleich der Beulfelder sinus- und trapezförmigen Profilierung	117
Tabelle 5-12:	nach EN 1993-1-5 und Vorschlag	120
Tabelle 6-1:	Abmessungen der Versuchsträger [mm]	121
Tabelle 6-2:	Ergebnisse Versuchsreihe V6	124
Tabelle 6-3:	Vergleich der experimentellen und numerischen Ergebnisse	133

Verzeichnis der Symbole

Kapitel 3

Lateinische Symbole

a	Projizierte Wellenlänge $a_1 + 2a_4$
a_1	Länge des horizontalen profilierten Blechabschnittes
A_2	Fläche des Zuggurtes
a_2	Länge des diagonalen profilierten Blechabschnittes
a_3	Amplitude der Profilierung
a_4	Projizierte Länge des diagonalen, profilierten Blechabschnittes
A_{efl}	effektive Fläche des Druckgurtes
a_{max}	Maximale Beulfeldlänge (a_1, a_2)
A_z	Auflagerkraft
b	Abstand vom Schweißnahtanschluss des Steges zum Rand des Gurtes
b_a	Maximaler Abstand Stegmitte zum Flanschrand
b_b	Minimaler Abstand Stegmitte zum Flanschrand
b_f	Gurtbreite; 1 ... Druck, 2 ... Zug
C_τ	Abminderungsfaktor Schalenlänge
D_x, D_y, D_{xy}	Blechsteifigkeiten
E	Elastizitätsmodul
f_T	Abminderungsfaktor Querbiegemomente
F_y	Querbiegekraft
$f_{y,d}, f_{yf}, f_{y,k}, f_y, f_{y1d}, f_{y2d}$	Streckgrenze des Gurtes; 1 ... Druckgurt, 2 ... Zuggurt, d ... Design; k ... charakteristisch, f ... Flansch
$f_{yf,r}$	Reduzierte Streckgrenze des Gurtes infolge f_T
f_{yw}	Streckgrenze des Steges
F_{Zd}	Querkraftbeanspruchung
h_w, t_w	Steghöhe, Stegdicke

k_{σ}	Beulwert infolge Normalkraftbeanspruchung
M_1	Querbiegemoment
M_{Rd}	Grenzbiegemoment
M_z	Schnittgröße Biegemoment
N_1, N_2	Schnittgröße Normalkraft in den Gurten 1 ... Druck, 2 ... Zug
N_{Rd}, N_{R1d}, N_{R2d}	Grenznormalkraft, 1...Druckgrut, 2...Zuggurt
N_{Sd}	Bemessungsschnittgröße der Normalkraft
r	Krümmungsradius der Profilierung
s	halbe abgewickelte Wellenlänge
T_1, T_2	Integrierte Schubspannung
t_f	Gurtdicke; 1 ... Druck, 2 ... Zug
V_{Rd}	Grenzquerkraft
V_z	Schnittgröße Querkraft
w	projizierte halbe Wellenlänge
ν	Querdehnzahl

Griechische Symbole

$\bar{\lambda}_p$	Bezogene Beulschlankheit infolge Querkraft nach DASt Ri 015 sowie infolge Normalkraft nach DIN 18800
$\bar{\lambda}_{c,g}$	Plattenschlankheit bei Querkraftbeanspruchung (global) (EN)
$\bar{\lambda}_{c,l}$	Plattenschlankheit bei Querkraftbeanspruchung (lokal) (EN)
α	Spreizung
α_{τ}	Imperfektionsbeiwert
$\gamma_M, \gamma_{M1}, \gamma_{M0}$	Abminderungsfaktoren
κ_1, κ_2	Abminderungsfaktor nach DIN 18800
$\kappa_k, \kappa_{\tau}, \kappa_{\tau,l}, \kappa_{\tau,g}$	Abminderungsfaktoren nach DAST-Richtlinie 015 l...lokal, g...global, k...Normalkraft, τ ...Querkraft
ν	Querdehnzahl

σ_e	Bezugsspannung
$\sigma_{P,Rd,1}, \sigma_{P,Rd,2}$	Grenzbeulspannungen des Gurtes nach DIN18800
σ_{pi}	kritische Beulspannung infolge Normalkraft
σ_x	Normalspannungen in folge M_z
τ	Schubspannung
$\tau_{cr,g}$	globale kritische Schubbeulspannung
$\tau_{cr,l}$	lokale kritische Beulspannung
$\tau_{pi,g}$	globale kritische Beulspannung
$\tau_{x\theta,Rcr}, \tau_{shell}$	Kritische Beulspannung infolge Schubbeanspruchung (Schalen, EN)
χ	Abminderungsfaktoren Biegeknicken, Biegedrillknicken
$\chi_c, \chi_{c,1}, \chi_{c,g}$	Abminderungsfaktor bei Querkraftbeanspruchung
χ_{LT}	
ω	Dimensionsloser Längenparameter

Kapitel 4**Lateinische Symbole**

$2w$	Wellenlänge
A	Fläche der druckbeanspruchten Gurte
a	Beulfeldlänge ($a_1 + a_2 = w$)
a_1	Länge des horizontalen profilierten Blechabschnittes
a_2	Länge des diagonalen profilierten Blechabschnittes
a_3	Amplitude der Profilierung
a_4	Projizierte Länge des diagonalen, profilierten Blechabschnittes
A_{efl}	Effektive Querschnittsfläche des Druckgurtes
$a_{max,}$	Maximale Beulfeldlänge (a_1, a_2) für lokales Beulen
$a_{max,z}$	Maximale Beulfeldlänge ($a_1 + a_2$) für zonales Beulen
$b_f, b_{f1}, b_{f2}, t_f, t_{f1}, t_{f2}$	Gurtbreite und -dicke; 1 ... Druck; 2 Zug
D_x, D_y, D_{xy}	Blechsteifigkeiten
E	Elastizitätsmodul
f_T	Abminderungsfaktor Querbiegemomente
f_{yf}	Charakteristische Streckgrenze Gurt
f_{yw}	Charakteristische Streckgrenze Steg
h_w, t_w	Steghöhe, Stegdicke
L, l	Trägerlänge, Spannweite
R	Flächenverhältnis
s	Halbe abgewinkelte Wellenlänge
t_{f1}, t_{f2}	Gurtdicke 1...Druck, 2...Zug
t_{s1}, t_{s2}, t_{s3}	Blechdicke der Steifen
$V_{Rd}, V_{Rd,1}, V_{Rd,2}, V_{R1}, V_{R2}$	Grenzquerkraft
$V_{Rd,1,new}$	Grenzquerkraft Modell NEU
$V_{Rd,FE}$	Numerische Grenzquerkraft
$V_{Rd,shell}$	Grenzquerkraft mit $\lambda_{shell}, \tau_{shell}$
$V_{Rd,z}$	Grenzquerkraft Modell NEU zonal

V_u	Maximale Querkraft Versuch
V_u, V_{Versuch}	Traglast im Versuch
$V_{u,FE}$	Maximale Querkraft FEM
ν	Querdehnzahl

Griechische Symbole

$\bar{\lambda}_p$	Bezogene Plattenschlankheit (DIN 18800)
$\bar{\lambda}_{c,1}, \lambda_1, \lambda_{1,EN}, \lambda_{c,1,Branka}, \lambda_{c,shell}, \lambda_{c,Branka,new}, \lambda_{c,1,new}$	Plattenschlankheit lokales Schubbeulen
$\bar{\lambda}_{c,g}, \lambda_2, \lambda_{2,EN}$	Plattenschlankheit globales Schubbeulen
α	Spreizung der Profilierung
$\lambda_{c,T}, \lambda_{c,W}$	Schlankheit der Profilierung
$\lambda_{c,z}$	Plattenschlankheit zonales Schubbeulen
ν	Querdehnzahl
$\tau_{cr,1}, \tau_{cr,1,new}, \tau_{cr,Branka}, \tau_{cr,Branka,new}, \tau_{cr,shell}$	Kritische Beulspannung (lokales Beulen)
$\tau_{cr,FE}$	kritische, numerische Beulspannung
$\tau_{cr,g}$	kritische Beulspannung (globales Beulen)
$\tau_{cr,z}$	kritische Beulspannung (zonales Beulen)
$\chi_c, \chi_{c,1}, \chi_{c,g}, \chi_{c,1,new}, \chi_{c,shell}, \chi_{c,z}$	Abminderungsfaktor bei Querkraftbeanspruchung c ... kritisch, l ... lokal; g ... global; z ... zonal
χ_u	Abminderungsfaktor Traglast

Kapitel 5**Lateinische Symbole**

a	Beulfeldlänge
A, A_r	Fläche der druckbeanspruchten Gurte
a_1	Länge des horizontalen profilierten Blechabschnittes
a_2	Länge des diagonalen profilierten Blechabschnittes
a_3	Amplitude der Profilierung
a_4	projizierte Länge des diagonalen, profilierten Blechabschnittes
a_v	vorgeschlagene Beulfeldlänge
A_w	Stegfläche
$b_f, b_1, b_2, b_{f1}, b_{f2}, t_f, t_{f1}, t_{f2}, t_1, t_2$	Gurtbreite und -dicke; 1 ... Druck; 2 Zug Gurtbreite und -dicke; 1 ... Druck; 2 Zug
c_L, c_M, c_S	Maximaler, mittlerer und minimaler Abstand vom Schweißnahtanschluss des Steges zum Rand des Gurtes
E	Elastizitätsmodul
F_u	Beanspruchung im Druckgurt
$f_{y,f}$	Streckgrenze Gurt
$f_{y,s}, f_{y,w}$	Streckgrenze Steg
h_w, t_w	Steghöhe, Stegdicke
$k_\sigma, k_{\sigma,1}, k_{\sigma,2}$	Beulwert infolge Normalkraftbeanspruchung, 1...Plattenbeulen, 2...Torsionsbeulen
$k_{\sigma,a}$	Beulwert infolge Normalkraftbeanspruchung (Plattenbeulen)
$k_{\sigma,num}$	Numerischer Beulwert infolge Normalkraftbeanspruchung
$k_{\sigma,v}, k_{\sigma,v,1}, k_{\sigma,v,2}$	vorgeschlagener Beulwert infolge Normalkraftbeanspruchung 1...Plattenbeulen, 2...Torsionsbeulen
L, l	Trägerlänge, Spannweite
l_1, l_2, l_3	Stützweiten Versuchsträger
N_e	Eulersche Bezugskraft

$N_{Ki,n}$	Kritische Eulerlast, n ... numerisch
N_n	Numerische Druckbeanspruchung
R	Flächenverhältnis
$t_{s1}, t_{s2}, t_{s3}, t_{s4}$	Blechdicke der Streifen
W	Schenkellänge des Steg-Gurt Schweißnahtanschlusses
w	halbe Wellenlänge
v	Querdehnzahl

Griechische Symbole

α	Spreizung der Profilierung
α	Verhältnis der Beulfeldabmessungen a/b
α_a	Verhältnis der Beulfeldabmessungen a/b für Plattenbeulen
α_{num}	Verhältnis der Beulfeldabmessungen a/b aus numerischen Berechnungen
α_v	Vorgeschlagenes Verhältnis der Beulfeldabmessungen a/b für Plattenbeulen
λ	Verzweigungslastfaktor
λ_p	Plattenschlankheit
ρ	Abminderungsfaktor wirksamer Querschnitt
σ_e	Bezugsbeulspannung
$\sigma_{p,Rd,1}, \sigma_{p,Rd,2}$	Grenzbeulspannungen
σ_u	Tragbeulspannung
φ	Randspannungsverhältnis

Kapitel 6**Lateinische Symbole**

a	Beulfeldlänge
a_1	Länge des horizontalen profilierten Blechabschnittes
a_2	Länge des diagonalen profilierten Blechabschnittes
a_3, b_t	Amplitude der Profilierung
a_4	Projizierte Länge des diagonalen, profilierten Blechabschnittes
$b_f, b_{f1}, b_{f2}, t_f, t_{f1}, t_{f2}$	Gurtbreite und -dicke; 1 ... Druck; 2 Zug
c_w	Streckenwölbfeder
E	Elastizitätsmodul
$F_{u,y}$	Traglast
$f_{y,f}, f_y$	Streckgrenze des Gurtes
G	Schubmodul 8100 kN/cm ²
h_m	Steghöhe
h_w, t_w	Steghöhe, Stegdicke
I_T	Torsionsmoment
I_w	Wölbwiderstand, Anteil ebenes Blech
$I_{yf}, I_{y1f}, I_{y2f}, I_{zf}, I_{z1f}, I_{z2f}$	Trägheitsmomente
L	Trägerlänge
l	Spannweite
$L_{\bar{u}}$	Trägerüberstand
$M_{b,Rd}$	Widerstandsgröße der Biegemomentbeanspruchung
$M_{cr,num}$	Numerisch ermittelter, kritischer Moment
$M_{pl,y}$	Plastisches Biegemoment
$M_{u,y}, M_y$	Tragbiegemoment
$M_{y,d}$	Bemessungswert der Biegemomentbeanspruchung
N_{cr}, M_{cr}	Verzweigungslast, -moment infolge Biegedrillknicken

s	Halbe abgewickelte Wellenlänge
t_s	Dicke der Steifen
u_x	Verformungsanteil
W_y	Widerstandsmoment
z	Zusätzlicher Hebelarm
z_1	Statische Höhe
z_p	Abstand Trägerschwerpunkt zum Lastangriffspunkt

Griechische Symbole

$\bar{\lambda}_T, \bar{\lambda}_{LT}$	bezogene Schlankheit, bezogene Biegeschlankheit
γ_{M1}	Sicherheitsfaktor
ζ	Momentenbeiwert
$\sigma_{u,f}$	Grenzspannung
χ, χ_{LT}	Abminderungsfaktoren Biegeknicken, Biegedrillknicken

1 Einleitung, Ziel und Umfang

1.1 Einleitung

Der ständig wachsende Bedarf nach leichten, filigranen und zugleich wirtschaftlichen Konstruktionen im Stahlbau führt zu immer dünner und schlanker werdenden Bauteilen. Für die Bemessung dünnwandiger Bauteile ist in der Regel das Stabilitätsversagen maßgebend. Die Querschnittswahl wird deshalb weniger von der erforderlichen Fläche zur Kraftübertragung beeinflusst, sondern von dem Wunsch, eine genügende Steifigkeit zu erzielen. Zum Beispiel erhöht sich die Biegesteifigkeit, bei gleicher Querschnittsfläche, wenn die Teilflächen möglichst weit vom Schwerpunkt entfernt angeordnet werden. Bei konstanter Querschnittsfläche verringert sich die örtliche Steifigkeit des Steges, was wiederum durch eine Profilierung des Stegbleches ausgeglichen werden kann. Jedoch bewirkt nicht jede Profilierung die gewünschte Steifigkeitserhöhung. Entscheidend ist die Form des profilierten Steges. Wellenamplitude und –länge sind maßgebende Einflussfaktoren auf die Querschnitts- und Stabtragfähigkeit dieser stegprofilieren Träger. Finden die genannten Parameter keine Berücksichtigung, liegen der Bemessung falsch angenommene Tragmechanismen zugrunde. Damit wären die Anforderungen an die Tragwerkssicherheit nicht erfüllt.

Sofern es gelingt, dem Anwender das Tragverhalten unterschiedlicher Stegprofilierungen aufzuzeigen und diese exakt abzugrenzen, können die derzeit auf dem Stahlleichtbaumarkt existierenden Trapez- und Wellstegträger entsprechend ihres Bedarfs gezielter eingesetzt werden. Erhöhte Wettbewerbschancen der Träger mit profilierten Stegen auf dem Stahlleichtbaumarkt sind eine mögliche Folge. Mit diesem Ausgangspunkt ist die vorliegende Arbeit als Beitrag zu sehen, fehlende Aussagen zur Stabtragfähigkeit der Wellstegträger zu ergänzen, Unterschiede zwischen verschiedenartigen Profilierungen (Trapez- und Sinusform) aufzuzeigen sowie das Stabilitätsverhalten und deren Einflüsse auf die Querschnittstragfähigkeit von Trägern mit profilierten Stegen zu erfassen.

1.2 Ziel und Umfang

Die Arbeit vervollständigt die Aussagen zur Querschnitts- und Stabtragfähigkeit von Trägern und Stützen mit profilierten Stegen. Einerseits werden grundlegende Tragfähigkeitsuntersuchungen zu den Wellstegträgern ergänzt. Andererseits werden die Tragmechanismen der Träger mit verschiedenartigen Stegprofilierungen analysiert und Vorschläge für die Ergänzung der Berechnungsverfahren bei der Anwendung der derzeit aktuellen Norm gemacht.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in **drei Abschnitte**.

Der Hauptteil der Arbeit – mit umfassenden Untersuchungen zur Querschnitts- und Stabtragfähigkeit von Trägern mit profilierten Stegen – wird durch theoretische Vorbetrachtungen und eine Normenübersicht eingeleitet.

Die **Vorbetrachtungen** geben einen allgemeinen Überblick zum Stand des Wissens der Querschnitts- und Stabtragfähigkeit. Anschließend werden die derzeit geltenden Normen und Bemessungsrichtlinien für Trapez- und Wellstegträger ([10], [86], [18]) vorgestellt. Diese Normen und Regelwerke dienen der Grundlage für die Auswertung der in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen.

Des Weiteren werden die in dieser Arbeit verwendeten Begriffe zur Querschnitts- und Stabtragfähigkeit definiert. Aufgrund der umfangreichen Betrachtungen zum Stabilitätsverhalten und der Tatsache, dass in der aktuellen Literatur eine Vielzahl unterschiedlicher Begriffe zur globalen und lokalen Stabilität „umherirren“, wird ein historischer Überblick der Begriffsdefinitionen zum Stabilitätsverhalten von stab- und plattenförmigen Bauteilen gegeben.

Ferner wird ein Überblick über die angewandten Rechenmethoden gegeben und die Vorgehensweise bei der Verifikation erzielten Ergebnisse beschrieben.

Die **Untersuchungen** der Arbeit umfassen drei Schwerpunkte.

Zum ersten werden die Querschnittstragfähigkeiten bei Querkraftbeanspruchung verschiedener Profilierungsformen und –abmessungen bestimmt. Durchgeführte Versuche bilden die Grundlage für die Modellbildung. Numerische Beullastberechnungen legen dabei den Grundstein für die Traglastberechnungen der Träger, welche entsprechend ihrer Profilierung verschiedenartige Tragmechanismen aufweisen. Diese Tragmechanismen sind teilweise in der derzeit aktuellen Norm nicht erfasst. Ein Vorschlag zur Verbesserung der derzeit aktuellen Norm unter Berücksichtigung sämtlicher Tragverhalten wird gegeben.

Zum zweiten werden Untersuchungen zum lokalen Stabilitätsverhalten des druckbeanspruchten Gurtes durchgeführt. Die experimentellen Untersuchungen an Wellstegträgern werden durch vorhandene Versuche an Trapezstegträgern ergänzt und für numerische Parameterstudien genutzt. Es werden allgemeingültige Aussagen zum plattenähnlichen Gurtbeulverhalten druckbeanspruchter Gurte, die sich entsprechend

ihrer Profilierungs- und Gurtparameter in zwei Bereiche einordnen lassen, getroffen. Die aktuelle Norm [18], wird durch einen Vorschlag ergänzt.

Zum dritten wird die Stabtragfähigkeit von Wellstegträgern untersucht. Versuche bilden die Grundlage für die FE Modellentwicklung. Die durchgeführte Parameterstudie ordnet das globale Stabilitätsverhalten der Wellstegträger in bestehende Knickspannungslinien ein. Es kann gezeigt werden, dass die Untersuchungen zum globalen Stabilitätsverhalten auch für Wellstegträger zutreffend sind.

Abschließend werden die Ergebnisse der Untersuchungen **zusammengefasst und Anregungen** für weiterführende Untersuchungen gegeben sowie offene Fragestellungen formuliert.

2 Vorbetrachtungen

2.1 Stand des Wissens zur Querschnitts- und Stabtragfähigkeit

Die Querschnitts- und Stabtragfähigkeit der Träger mit profilierten Stegen ist weitestgehend erforscht. Einige Defizite sind in den grundlegenden Untersuchungen zum Tragverhalten der Wellstegträger zu verzeichnen. Im Speziellen betrifft es das lokale Beulverhalten der Gurte sowie Untersuchungen zum globalen Stabilitätsverhalten.

Die Querschnitts- als auch Stabtragfähigkeit von Trägern mit profilierten Stegen ist maßgebend von der Stabilität beeinflusst. Im Rahmen dieser Arbeit führen die durchgeführten Untersuchungen zur Querschnitts- und Stabtragfähigkeit auf Stabilitätsprobleme profilierter Träger zurück. Eine Vielzahl vorangegangener Arbeiten und Schriften legen den Grundstein für die Bearbeitung des Themas „Der Einfluss der Stabilität auf die Querschnitts- und Stabtragfähigkeit von Trägern mit profilierten Stegen“.

Ausführliche Übersichten zur geschichtlichen Entwicklung der Stabilitätstheorie sind in den Arbeiten von Pflüger [75], Kollbrunner [40], Klöppel [39], Kubsch [43] dargestellt. Kaim [36] fasst die geschichtliche Entwicklung der Stabilitätstheorie bis zum heutigen Stand der Forschung sehr ausführlich zusammen und diskutiert die Frage, ob die Bemessung nach EN 1993 für räumliches Biegeknicken und Biegedrillknicken mit einer allgemeinen Gleichung möglich ist. Das Ergebnis seiner Untersuchungen zeigt, dass eine Vereinheitlichung der Nachweise grundsätzlich möglich ist, jedoch für die praktische Anwendung zu sehr komplexen Nachweisformeln führen würde. Kaim zeigt in seiner Arbeit u. a. die Einflüsse auf die Abminderungsfaktoren und den Momentenverlauf für das Biegedrillknicken. Die Stabtragfähigkeit ist maßgebend von Imperfektionen und Stabilisierungslasten beeinflusst. Krahwinkel [41] behandelt die Stabilisierungslasten seitlich gestützter vorverformter Träger nach der Biegetorsionstheorie II. Ordnung. Er gibt ein Ingenieurmodell für die Berechnung der Stabilisierungslasten mit unverschieblicher oder nachgiebiger, kontinuierlicher oder diskreter seitlicher Stützung an.

Für die durchgeführten Untersuchungen waren Studien zu den Eigenformen der Stabilitätsfälle Biegeknicken und Biegedrillknicken notwendig. Laumann [45] befasst sich ausführlich mit der Ermittlung des ersten positiven Eigenwertes und der zugehörigen Eigenform. Muszkiewicz's Arbeit [66] ist als Ergänzung zu Laumann zu sehen. Die Einflüsse und Effekte der Drehbettung auf das Biegedrillknicken und der sich daraus ergebenden Eigenwerte und Eigenformen werden aufgezeigt.

Sämtliche erzielte Ergebnisse beruhen auf Parameterstudien auf Basis der finiten Elemente Berechnungen. Wang [90] beschäftigte sich mit dem Stabilitätsverhalten von dünnwandigen Stabtragwerken unter Berücksichtigung der Profilverformung unter der Verwendung finiter Balken- und Schalenelemente. Diese sowie die Ergebnisse von Kaim [36] legen die Grundlage für die in dieser Arbeit durchgeführten Parameterstudien zum globalen Stabilitätsverhalten auf Basis der finiten Elemente Berechnungen.

Kubo und Fukumoto haben Untersuchungen zum Interaktionsverhalten von lokalem und globalem Beulen durchgeführt. Die Parameter b_f/t_f sowie die Biegeschlankheit um die schwache Achse sind die grundlegenden Beul- bzw. Knickparameter, welche in ihren Untersuchungen [42] berücksichtigt sind. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen zeigen, dass sich eine Interaktionskurve entsprechend der Biegedrillknickkurve $n = 2,5$ annehmen lässt. Auch Lindner und Aschinger [49] vergleichen die Ergebnisse eigener Traglastversuche mit den Ergebnissen von vier Berechnungsverfahren, in denen die gegenseitige Beeinflussung von Biegedrillknicken und örtlichem Beulen erfasst wird.

Einen wesentlichen Beitrag zur Querschnittstragfähigkeit leistet Rusch [82] mit der Entwicklung eines einfachen Nachweisverfahrens beulgefährdeter, normalspannungsbeanspruchter I-Profile mit beliebigen Querschnitten. Abgesichert durch eigene Versuchsreihen und Ergebnisse aus der Literatur wird eine neue, wirtschaftliche Beulkurve für dreiseitig gelagerte Querschnittselemente entwickelt. Auf dieser Grundlage wird die Interaktion zwischen dem örtlichen Beulen und den globalen Stabilitätsfällen – Knicken, Biegeknicken, Biegedrillknicken – näher untersucht. In Abhängigkeit der Werkstoffkennwerte können unterschiedliche Beulverhalten auftreten.

Um das Ausbeulen von dünnwandigen druckbeanspruchten Querschnittselementen vereinfacht zu erfassen, wird schon seit langer Zeit ein anschauliches Ersatzverfahren – die Methode der wirksamen Breiten – verwendet. Zhu und Fischer [21] haben die Methode der wirksamen Breite aufbereitet und den Begriff verformungsorientiert definiert. „Verformungsorientiert“ bedeutet, dass die mit dem wirksamen Querschnitt gerechneten Spannungen keine echten Spannungen sind. Sie sind vielmehr die mit dem Elastizitätsmodul multiplizierten Randdehnungen.

Brune beschäftigt sich ausgiebig mit der korrekten Ermittlung wirksamer Breiten von dreiseitig gelagerten Platten [8]. Sie stellt neue wirksame Breiten im plastischen Zustand vor und belegt deren Güte anhand von Vergleichsrechnungen.

Protte [76] berechnet für die Gurte eines Trapez- und Wellstegträgers die Beulwerte und verglich diese mit bereits bestehenden Beulwerten. Die Ergebnisse zeigen, dass die stabilisierende Wirkung auf die Gurte von der Art der Profilierung gänzlich unabhängig ist.

Die hier aufgeführten Arbeiten legen den Grundstein für die Bearbeitung der Untersuchungen zur Querschnitts- und Stabtragfähigkeit von Trägern mit profilierten Stegen.

2.2 Zum Stand des Wissen über Träger mit profilierten Stegen

Querkrafttragfähigkeit

Nahezu sämtliche Arbeiten zur Tragfähigkeit von Trägern mit profilierten Stegen sind zur Querkrafttragfähigkeit durchgeführt worden. 1975 untersucht Easley [12] profilierte Blechteile und bestimmte Gleichungen zur Ermittlung der geringsten Schubbeullast. Er verglich die Versuchsergebnisse mit theoretischen Annahmen und schlussfolgerte, dass die Beullastgleichungen von Easley-McFarland (1969) und Bergmann-Reissner (1929) bessere Übereinstimmung brachten als die Gleichungen von Hlavacek (1968).

Nachfolgend sind die Gleichungen zur Ermittlung der kritischen Schubbeullast zusammengefasst.

Easley und McFarland

$$N_{cr} = D_y \pi^2 \left(\frac{a^2}{2\alpha n^2 b^4} + \frac{3\alpha}{b^2} + \frac{\alpha^3 n^2}{2a^2} \right) + D_x \pi^2 \frac{n^2}{2\alpha a^2} + D_{xy} \pi^2 \left(\frac{1}{2\alpha b^2} + \frac{\alpha n^2}{2\alpha^2} \right) \quad (2.1)$$

mit

N_{cr} ... kritische Schubbeullast

a ... Blechlänge

b ... Blechbreite

D_x, D_y, D_{xy} ... Blechsteifigkeiten

$$n \dots \text{Faktor } n = \frac{a}{b} \left(\frac{D_y}{\alpha^4 D_y + \alpha^2 D_{xy} + D_x} \right)$$

α ... der kleinste Wurzelwert von:

Bergmann und Reissner

$$N_{cr} = 4\lambda \frac{D_x^{1/4} D_y^{3/4}}{b^2} \quad (2.2)$$

λ ist ein Faktor, welcher von den Parametern $\theta = 2 \frac{(D_x D_y)^{1/2}}{D_{xy}}$ $\phi = \frac{b}{a} \left(\frac{D_x}{D_y} \right)^{1/2}$ abhängt

und in Kurvenform dargestellt ist.

Hlavacek

$$N_{cr} = \kappa \frac{D_x}{b^2} \quad (2.3)$$

mit

$$\kappa = \pi^2 \left(\frac{4D_x \alpha}{D_y} + 4\alpha + \frac{2}{\alpha} + \frac{1}{2\alpha^3} \right)$$

α ... kleinste Wurzelwert von

$$\frac{D_y}{D_x} = \frac{3}{8\alpha^4} + \frac{1}{8\alpha^2} - 1$$

Easley entwickelt eine Gleichung zur Berechnung der elastischen Schubtragfähigkeit profilierter Blechteile, für welche der Versagensfall globales Blechbeulen ist. Easley drückt die Schubbeulspannung wie folgt aus:

$$\tau = 36(D_x^{1/4} D_y^{3/4}) / b^2 \quad (2.4)$$

Hamilton [26] untersuchte 42 Versuche an 21 Versuchsträgern, mit vier unterschiedlichen Profilierungen und zwei Stegblechdicken. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass feingliedrige Profilierungen eher infolge globalen Stegbeulens versagen.

Elgaaly, Hamilton und Seshadri [14] vergleichen die Versuchsergebnisse mit Berechnungen auf der Basis der finiten Elemente Methode und nähern sich den Versuchsergebnissen sehr stark an. Dabei ist die elastische lokale Beulspannung τ_{cre}

$$\tau_{cre} = K_s \left[(\pi^2 E) / 12(1 - \mu^2) (w/t)^2 \right] \quad (2.5)$$

mit

$$K_s \dots \text{Beulwert } K_s = 5,34 + 2,31(w/h) - 3,44(w/h)^2 + 8,39(w/h)^3$$

w ... Plattenbreite

t ... Stegdicke

h ... Steghöhe

W ... Elastizitätsmodul

μ ... Poissonzahl

ermittelt.

Für globales Stegbeulen beträgt der Beulwert

$$\tau_{cre} = K_s \left[\frac{\left[(D_x)^{0,25} (D_y)^{0,75} \right]}{th^2} \right]$$

K_s ist der Beulwert und ist der Mittelwert der Beulwerte für einfach gestützte Blechränder (31,6) und eingespannte Blechränder (59,2).

Übersteigt die kritische Beulspannung τ_{cre} den Wert der Streckgrenze τ_y bei Schubbeanspruchung, so beträgt die kritische Beulspannung τ_{cri}

$$\tau_{\text{cri}} = (0,8\tau_{\text{cre}}\tau_y)0,5 \leq \tau_y$$

Luo und Edlund [57] führen nichtlineare FE-Berechnungen durch und vergleichen die Ergebnisse der geometrischen Parameterstudie mit analytischen Berechnungen sowie Versuchsergebnissen. Innerhalb des untersuchten Parameterbereiches erkennen sie, dass die Grenzschertragfähigkeit proportional mit der Trägerhöhe ansteigt und vom Verhältnis Trägerlänge zu Trägerhöhe abhängt. Ein weiteres Ergebnis der Parameterstudie ist die Erkenntnis, dass die Wellenamplitude keinen nennenswerten Einfluss auf die Grenzschertragfähigkeit hat, jedoch die örtliche Lage des Beulversagens beeinflusst.

Zu erwähnen sind ferner Leiva [46], Höglund [28], Johnson&Cafolla [33], Lindner [53] und Pasternak&Branka [69], die sich bis heute mit der Querkrafttragfähigkeit profilierter Stegbleche befassen. Johansson fasst die entwickelten Modelle im Hintergrundbericht zur EN 1993-1-5 [32] zusammen und beurteilt die Modelle hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit und Wirtschaftlichkeit. Im Folgenden sind die wichtigsten Merkmale der Modelle genannt und die Unterschiede zum verwendeten Modell nach EN 1993-1-5 werden deutlich.

Leiva entwickelt ein Modell, welches die Interaktion zwischen lokalem und globalem Beulen erfasst. Die Interaktion ist über eine kombinierte kritische Beulspannung τ_{cr3} ausgedrückt Gl. (2.6). Die Annahme der kombinierten Beulspannung ist anhand von Versuchen bestätigt. Die kombinierte kritische Beulspannung τ_{cr3} setzt sich aus der lokalen, kritischen Beulspannung τ_{cr1} und der globalen, kritischen Beulspannung τ_{cr2} zusammen. Den Anpassungswert n wählte Leiva mit 1,0.

$$\frac{1}{\tau_{\text{cr3}}^n} = \frac{1}{\tau_{\text{cr1}}^n} + \frac{1}{\tau_{\text{cr2}}^n} \quad (2.6)$$

Angaben zur Tragfähigkeit sind nicht gemacht.

Lindner führt ebenfalls Untersuchungen zu einer kombinierten kritischen Beulspannung entsprechend Gl. (2.6) mit $n = 2$. Er empfiehlt die Interaktion in der Plattenschlankheit λ_2 zu berücksichtigen. Dabei ergibt sich der Abminderungsbeiwert $\chi_{i,L}$ für die Tragfähigkeit entsprechend Gl. (2.7), welcher in der DASt-Richtlinie 015 [10] Anwendung findet.

$$\chi_{i,L} = \frac{0,588}{\lambda_i} \quad (2.7)$$

$$\lambda_i = \sqrt{\frac{f_{yw}}{\tau_{\text{cri}} \cdot \sqrt{3}}} \quad (2.8)$$

λ_i beschreibt die beiden Beularten $i=1$ ist lokal, $i=2$ ist global. Die kritischen Beulspannungen können entsprechend Kapitel 3.4 berechnet werden.

Die Auswertung der Ergebnisse mit dem rechnerischen Modell von Lindner überschätzen zum Teil das Tragverhalten der Träger mit profilierten Stegen [32].

Johnsons Modell führt die drei separaten Nachweise: lokal, global und die Interaktion zwischen lokal und global. Dabei wird der Abminderungsbeiwert χ_{1J} für lokales Beulen nach Gl. (2.9) geführt. λ_1 wird nach EN 1993-1-5 (Kapitel 3.4, [18]) ermittelt.

$$\chi_{1J} = \frac{0,84}{\lambda_1} < 1,0 \quad (2.9)$$

$$\chi_{2J} = \frac{0,61}{\lambda_2^2} \quad (2.10)$$

λ_2 wird ebenfalls nach [18] bestimmt, jedoch wird hier der Koeffizient 36 anstelle 32,4 verwendet und bildet die Grundlage für den Abminderungsbeiwert χ_{2J} . Für die Interaktion von lokalem und globalem Beulen beträgt der Abminderungsbeiwert:

$$\chi_{3J} = \frac{0,74}{\lambda_3^2} \quad (2.11)$$

Dabei ist λ_3 nach Leiva mit $n=1$ definiert Gl. (2.1).

Beim kombinierten Modell entsprechend dem Hintergrundbericht zur EN 1993-1-5 Anhang D [32] wird die Interaktion als separater Nachweis geführt. Dabei wird die kritische Spannung entsprechend Leiva's Modell berechnet. Der Abminderungsbeiwert χ_c ist:

$$\chi_c = \frac{1,2}{0,9 + \lambda_3} < 1,0 \quad (2.12)$$

Lokales und globales Beulen werden bei der Interaktion gleichermaßen behandelt.

Johansson vergleicht diese Modelle mit dem Modell nach EN 1993-1-5, welches zur Bestimmung der Querschnittstragfähigkeit von Trapezstegträgern bei Querkraftbeanspruchung zwei separate Nachweise für lokales und globales Beulen führt (Kapitel 3.4).

Das Modell nach EN 1993-1-5 [18] beschreibt die Querschnitts- und Stabtragfähigkeit der Träger mit profilierten Stegen am besten (siehe Auswertungen von Johansson in [32]). Aus diesem Grund werden sämtliche Ergebnisse der Untersuchungen zur Querkrafttragfähigkeit dieser Arbeit mit dem Modell nach EN 1993-1-5 verglichen.

Im Vergleich zur Querkrafttragfähigkeit werden nicht viele Untersuchungen zur Biegemomenten Tragfähigkeit durchgeführt. Es wird davon ausgegangen, dass das Grenzbiegemoment vom Gurt aufgenommen wird und der Steg nicht beeinflusst ist. Elgaaly, Hamilton und Seshadri [26] führen dazu experimentelle und analytische Studien durch. Anhand von sechs Versuchen werden das Trag- und Fließmoment miteinander verglichen. Es stellt sich heraus, dass der Steg nicht am Lastabtrag mitwirkt. Die durchgeführten numerischen Berechnungen stimmen sehr gut mit den

Traglasten und den Versagensmodi der Versuchsträger überein. Die Auswertung der FE-Berechnungen in Bezug auf die Spannungsverteilung im Steg bestätigt, dass der Steg bei der Ermittlung der Momententragfähigkeit nicht angesetzt werden muss.

Johnson und Cafolla [34] untersuchen experimentell als auch numerisch den Einfluss verschiedenartiger Stegprofilierungen auf das lokale Beulverhalten des Druckgurtes sowie das Biegeverhalten der Träger mit profilierten Stegen. Die Ergebnisse zeigen, dass in Abhängigkeit der Profilierungsart der Abstand Gurtrand-Schweißnahtwurzel b die Biegetragfähigkeit eines Trägers beeinflusst.

In den Bemessungsregeln für die schwedischen Rana-Träger wird b als halbe Gurtbreite abzüglich 30 mm angegeben. Je nach Abmessungen der Träger unterschreitet dieser Wert b den kleinstmöglichen Abstand zwischen Schweißnahtwurzel und freiem Gurtrand. Diese Annahme liegt auf der unsicheren Seite und wird für die Anwendung nicht empfohlen.

Für Wellstegträger wird von Siokola [86] ein Abstand $b = \frac{b_f}{2} - 1 \text{mm}$ vorgeschlagen.

Lindner ([49], [50]) führt eine Vielzahl an Untersuchungen zur Biegemomententragfähigkeit, Beanspruchung der Trapezstegträger durch Normalkraft, Biegung und Torsion durch. Dabei stellt er fest, dass der Schubfluss im profilierten Steg Querbiegemomente erzeugt, die die Momententragfähigkeit beeinflussen ([10] und Kapitel 3.1).

Lindner und Aschinger [2] untersuchen das Biegedrillknickverhalten von Trägern mit profilierten Stegen. Er stellt fest, dass die Schubspannungen im Steg mit genügender Genauigkeit wie bei Trägern mit ebenen Stegen berechnet werden können. D.h. der St. Venantsche Torsionswiderstand I_T stimmt mit den Messwerten für Träger mit ebenem Steg überein. Unterschiede stellt er bei der Ermittlung des Wölbwiderstandes fest. Diese Feststellung untermauert er mit Versuchen. Der Hauptanteil der Unterschiede resultiert aus dem Wölbwiderstand für ebene Bleche I_w . Zusätzlich ergibt sich ein Wölbwiderstand infolge der Stegprofilierung, welcher größtenteils von den Parametern Spreizung des Trapezprofils und Trägerlänge abhängt. Beide haben Anteil am Wölbwiderstand für Träger mit profilierten Stegblechen. (Kapitel 6.4.1).

2.3 Zur Verifikation von Ingenieurmodellen

Die Einstufung der profilierten Träger in Abgrenzungskriterien bzw. maßgebende Abminderungskurven muss unter Berücksichtigung aller Zuverlässigkeitsanforderungen nach EN 1990 [16] erfolgen. Anhang D von EN 1990 liefert Regeln für die versuchsmäßige und rechnerische Verifikation von Ingenieurmodellen. Charakteristische Werte sowie Bemessungswerte können zuverlässig angegeben werden. Dabei werden in [16] die ermittelten Versuchsergebnisse in Abhängigkeit der Versuchsanzahl in drei Hauptkategorien unterteilt.

Zu den durchgeführten Untersuchungen dieser Arbeit liegen keine umfangreichen Versuchsreihen vor. Eine statistische Auswertung mit dem Ziel die Ergebnisse auf Grundlage von experimentellen Untersuchungen abzusichern, ist nicht möglich.

Auf Grund der beschränkten Anzahl der Versuchskörper stellt sich die Frage nach einer Reduzierung der statistischen Unsicherheiten. Nach DIN EN 1990 [16] ist eine statistische Auswertung möglich, um ein Bemessungsmodell mit einer oder mehreren Einflussgrößen zu kalibrieren und anschließend einen Bemessungswert über die charakteristischen Werte zu ermitteln. Auf Grund der beschränkten Versuchskörperanzahl erfolgt die Kalibrierung der Konstanten der Abminderungskurven mit Versuchsergebnissen, die maßgeblich mit rechnerischen Simulationen ergänzt und unterstützt sind.

Des Weiteren können zusätzliche Parameterabhängigkeiten mit Hilfe von Sensitivitätsuntersuchungen eingeführt und vorhandene Kenntnisse über das mechanische Verhalten vergleichbarer experimenteller Untersuchungen genutzt werden. (C. Müller, [65]). Statistische Auswertungen werden möglich und Ingenieurmodelle können exakter abgebildet werden. Anhand dieser Methode werden statistische Unsicherheiten entsprechend [16] reduziert.

Das allgemeine Vorgehen zur Auswertung der Versuche und FE-Parameterstudien nach [16] hat Müller [65] beispielhaft erläutert. Die Beanspruchbarkeiten R_e (die sich aus den Versuchen ergeben) werden den Beanspruchbarkeiten R_t (die sich aus dem Ingenieurmodell ergeben) gegenübergestellt. Mit den Mittelwerten erhält man die Bemessungswerte der Funktion. In dem Bemessungswert R_d ist der in [16] für alle Bauwerke angegebene Wichtungsfaktor $\alpha_R = 0,8$ enthalten. Nach Schleich [84] kann α_R für Stahlbauten auch geringer angesetzt werden.

2.4 Definitionen

Querschnittstragfähigkeit

Die Beanspruchbarkeit eines Querschnittes ist durch dessen Querschnittstragfähigkeit begrenzt. Plastizierung und örtliches Steg- und Gurtbeulen bestimmen den Grenzzustand der Querschnittstragfähigkeit. Der Bemessungswert der Beanspruchung darf in keinem Querschnitt den zugehörigen Bemessungswert der Beanspruchbarkeit überschreiten. Beim gleichzeitigen Auftreten mehrerer Beanspruchungsarten darf deren Kombination die zugehörige Beanspruchbarkeit nicht überschreiten. Zu den Beanspruchungen beulgefährdeter Querschnitte zählen: Zug-, Druck-, Biege-, Querkraft-, Torsionsbeanspruchungen sowie Interaktionen dieser Beanspruchungen.

Stabtragfähigkeit

Die Schnittgrößen eines Stabes sind nicht nur von der Querschnittstragfähigkeit, sondern auch von der Steifigkeit der gesamten Konstruktion beeinflusst. Es treten in Abhängigkeit der Steifigkeit der Konstruktion Verformungen des Systems auf. Diese

Verformungen bewirken zusätzliche Beanspruchungen und zusätzliche Schnittgrößen werden geweckt. Der sogenannte Effekt Theorie 2. Ordnung bewirkt nun, dass nicht nur die Querschnittstragfähigkeit des Stabes ausgenutzt werden kann, sondern die Beanspruchung, die sich aus der vorhandenen und der zusätzlichen Belastung zusammensetzt, den Grenzzustand der Tragfähigkeit bestimmt. Grundsätzlich werden druck- und biegebeanspruchte Bauteile sowie die Versagensarten in ebener und räumlicher Ausweichrichtung (Biegeknicken und Biegedrillknicken) unterschieden.

Traglast

Der Begriff Traglast wird in dieser Arbeit in mehrfacher Hinsicht verwendet.

Die Traglast stellt die größte in experimentellen und numerischen Untersuchungen getragene Last mit Erreichen der Querschnitts- oder Stabtragfähigkeit dar. Das entspricht der größten Last bei Stabilitätsproblemen (Theorie 2. Ordnung) unter Berücksichtigung von Imperfektionen und Materialplastizierung, sowie der größten Last für das „Fließgelenk-Modell“.

Beullast

Stark gedrungene Platten beulen nicht. Sehr schlanke Platten beulen, jedoch ist die Traglast dabei größer als die errechnete Beullast nach der linearisierten Beultheorie. Das bedeutet, dass sämtliche Bleche, welche nach der linearisierten Beultheorie berechnet werden, die Beullast erreichen.

Überkritisches Tragverhalten

Schlanke Bleche, deren Tragfähigkeit größer ist als die kritische Last (Beullast bzw. Verzweigungslast) jedoch deren Querschnittstragfähigkeit noch nicht erreicht ist, weisen überkritische Tragreserven auf. Die Differenz zwischen Beullast und einer höheren Tragfähigkeit ist die überkritische Tragreserve einer Platte. Je näher die ideale Beulspannung an der Streckgrenze liegt, desto geringer kann eine überkritische Tragreserve ausgebildet werden. D. h. gedrungene Platten haben im Vergleich zu schlanken Platten eine wesentlich geringere überkritische Tragreserve.

Gurtbeulen

Grundsätzlich werden Platten mit Normal- und Schubspannungsbeanspruchung unterschieden. Unter Gurtbeulen versteht man das Ausweichen einer ideal ebenen Plattenmittelfläche aus ihrer Ebene unter Normalspannung. Dabei werden zwei Arten unterschieden, das plattenähnliche Beulen (Plattenbeulen) und das Torsionsbeulen. Im Unterschied zum Plattenbeulen beschreibt das Torsionsbeulen eine Rotation um den Stegschwerpunkt.

Stegbeulen

Das Stegbeulen beschreibt das Stabilitätsverhalten der schubbeanspruchten Stege von Trägern. Dabei werden lokale und globale Stegbeulen unterschieden. Beide Beularten

rufen lokale Instabilitäten des Gesamtsystems hervor. Die lokalen Stegbeulen sind örtlich begrenzt. Beim globalen Stegbeulen nimmt das Beulfeld die gesamte Steghöhe ein. Beide Beularten des Stegbeulens beeinflussen die Querschnittstragfähigkeit.

Klassische Elastizitätstheorie [74]

Die Elastizitätstheorie, die sich auf lineare Glieder beschränkt, wird als „klassische Elastizitätstheorie“ bezeichnet. Bei der Berücksichtigung der Glieder mit quadratischem und höherem Grad spricht man von der „Elastizitätstheorie endlicher Verformungen“. In der Stabilitätstheorie darf man sich nicht auf die klassische Elastizitätstheorie beschränken.

Elasto-plastische Knicklast [74]

Belastungen über die elastische Dehngrenze hinaus weisen plastische Verformungen auf. Die kritische Last bei elasto-plastischen Verformungen ergibt sich bei Verwendung des Tangentenmoduls anstelle des Elastizitätsmoduls. Die kritische Last im elasto-plastischen Bereich wird auch als die Shanleysche Knicklast bezeichnet.

Knickung, Kippung, Beulung nach Pflüger [75]

Grundsätzlich werden im Stahlbau historisch drei Anwendungen der Verzweigungsprobleme beschrieben. Hierbei handelt es sich um das Knicken, das Kippen und das Beulen.

Das Knicken beschreibt den Stabilitätsverlust eines ebenen oder gekrümmten Stabes in seiner Ebene. Die Stäbe sind dabei durch Längskräfte beansprucht.

Das Kippen beschreibt die Beanspruchung von Stäben durch Querkkräfte bzw. Biegemomente, als auch Längskräfte mit Außermittigkeiten zum Schwerpunkt. Das Kippen wird als räumliches Knicken gerader Stäbe verstanden.

Biegedrillknicken ist nach Pflüger eine Sonderform des Kippens, da Biegedrillknicken infolge von Druck- bzw. Längskräften entsteht.

Das Ausbeulen als dritte Kategorie tritt bei Platten und Schalen auf. Grundsätzlich wird das Platten- (druck- bzw. schubbeansprucht) und Schalenbeulen unterschieden. Die Druck- und Schubbeanspruchung der Platten kann kontinuierlich, linear, als auch ungleichförmig und bereichsweise erfolgen. Treten Stabilitätsprobleme bei dünnwandigen Querschnittsteilen auf, spricht man vom so genannten Schalenbeulen.

Knicken, Biegedrillknicken, Kippen und Ausbeulen nach Kollbrunner [40]

Das Knicken und Ausbeulen entspricht den Definitionen nach Pflüger [75]. Als Kippen definiert Kollbrunner das Unstabilwerden eines auf Biegung ohne Normalkraft beanspruchten Trägers. Dabei wird der Träger seitlich verschoben und gleichzeitig verdrillt. Kippen mit zusätzlicher Längskraft stellt nach Kollbrunner den allgemeinen Fall des Biegedrillknickens dar. Damit beschreibt das Biegedrillknicken das seitliche

Ausweichen eines Stabes mit gleichzeitiger Verdrehung bei alleiniger Normalkraftbeanspruchung.

Knicken und Beulen nach DIN 18800 [11]

Knicken wird als instabiles Versagen in ebener oder räumlicher Richtung verstanden. Es kann eine Ausbiegung in beliebiger Richtung, eine Verdrehung um die Stablängachse sowie die Kombination von Ausbiegung und Verdrehung auftreten.

Für die Stabilitätsbetrachtung werden drei Fälle unterschieden:

Das Biegedrillknicken als allgemeiner Fall, bei dem eine beliebige Verbiegung und Verdrehung der Stabachse auftritt. Die Belastungsart spielt dabei keine Rolle. Die Stabverdrehung kann durch exzentrische Normalkraft, durch Biegung oder Kombination beider erzeugt werden.

Das Biegeknicken als Sonderfall, bei dem nur eine Verbiegung ohne Verdrehung der Stabachse mit oder ohne Querlast auftritt. Das Biegeknicken ist als eine Abgrenzung zum Biegedrillknicken zu verstehen.

Drillknicken als Sonderfall, bei dem nur eine Verdrehung auftritt, eine eventuell auftretende Verbiegung kann vernachlässigt werden.

Beulen beschreibt das seitliche Ausweichen von Blechen. Vor Erreichen der Traglast (plastische Grenzlast) kann ein Ausbeulen von Querschnittsteilen in Form von Platten- oder Schalenbeulen auftreten.

Knicken, Biegedrillknicken und Beulen nach EN 1993-1-1 [17]

Die im Folgenden verwendeten Begriffsdefinitionen der Verzweigungsprobleme orientieren sich größtenteils an [17] und sind Grundlage für die vorliegende Arbeit.

Grundsätzlich wird die globale Stabilität eines Systems durch:

das Knicken in der Tragwerksebene und

das Knicken aus der Tragwerksebene erfasst.

Das Knicken in der Ebene wird nicht durch Verzweigungslasten sondern durch die zusätzliche Wirkung von geometrischen Ersatzimperfektionen erfasst. Die Ersatzimperfektionen umfassen die geometrischen Abweichungen von der perfekten Sollform und die Unterschiede zu den perfekten strukturellen Annahmen in der Ebene nach Theorie 2. Ordnung (z.B. Stützenschiefstellung, Stabkrümmung).

Der Nachweis der Stabilität quer zur Tragwerksebene umfasst das Ausweichen zwischen seitlichen Abstützungen bzw. das Ausbeulen lokaler Bereiche als auch Kombinationen. Er kann ebenfalls nach Theorie 2. Ordnung unter Berücksichtigung von Ersatzimperfektionen quer zur Tragwerksebene erfolgen. Es werden grundsätzlich die Stabilitätsfälle Knicken und Biegedrillknicken unterschieden. Aufgrund des hohen Rechenaufwandes werden vereinfacht Knick- und Biegedrillknicknachweise mittels europäischer Knickspannungslinien geführt.

Biegeknicken stellt einen Sonderfall des Knickens dar. Es tritt bei Beanspruchungen allein durch Druckkräfte auf. Beim Knicken und Biegeknicken treten keine Verdrehungen um die Längsachse auf.

Biegedrillknicken ist das Stabilitätsversagen eines Systems in räumlicher Richtung. Dabei treten Verschiebungen in und aus der Tragwerksebene mit verbundener Verdrehung um die Stablängsachse des Querschnittes auf. Als Sonderfall des Biegedrillknickens ist das Drillknicken zu beachten, bei dem nur Verdrehungen der Stablängsachse auftreten.

Lokales Beulen (z.B. innerhalb einer profilierten Rippe schubbeanspruchter Bauteile) tritt in Form von lokalen Stegbeulen auf. Neben den lokalen Instabilitäten schubbeanspruchter Träger treten auch lokale Beulen in plattenartigen normalkraftbeanspruchten Bauteilen auf. Das Beulen erfolgt lokal innerhalb eines bestimmten Wellbereiches oder in Form einer Rotation um den Stegschwerpunkt.

Globales Beulen (z.B. schubbeanspruchter Trapezstegträger) stellt den Stabilitätsverlust des als orthotrope Platte aufzufassenden gesamten profilierten Feldes dar.

Neben dem Plattenbeulen kann auch Schalenbeulen bei dünnwandigen Bauteilen auftreten.

Eigenwerte

Sämtliche vereinfachte Annahmen zur Lösung der Stabilitätsprobleme führen zur Gleichgewichtsverzweigung. Analytisch ergeben sich lineare, homogene Differentialgleichungen. Die Lösungen werden als Eigenwerte und die Lösungsfunktionen als Eigenfunktionen bezeichnet. Der unterste Eigenwert ist die kritische Last, die kleinste Verzweigungslast des Systems. Er gibt die Lage des Verzweigungspunktes an, bei dem beispielhaft ein Stab vom stabilen in den labilen Gleichgewichtszustand übergeht. Die zum untersten Eigenwert gehörende Eigenfunktion nennt man Knickbiegeline.

Wellenamplitude und -länge

Unabhängig von der Profilierungsform (sinus- und trapezförmig) werden die Profilierungsbereiche mit der Wellenamplitude und -länge bezeichnet. Die Wellenamplitude entspricht der Höhe der Profilierung, die Wellenlänge entspricht der Länge eines Wellenbereiches.

2.5 Knickspannungslinien, Biegedrillknick- und Beulkurven

Die zur Verfügung stehenden Abminderungskurven verschiedener Stabilitätsprobleme zur Nachweisführung der Querschnitts- und Stabtragfähigkeit wurden von Müller in [65] übersichtlich dargestellt. Dazu gehören: die Abminderung nach Merchant-Rankine [64], die Erweiterung der Merchant-Rankine-Formel [7] für die Tragwerksstabilität in der Ebene, die europäischen Knickspannungslinien [68], [60], die

Biegedrillknickkurven [9], die Beulkurven [17] und die Verallgemeinerung der Beulkurven [54].

Abminderungskurven auf der Basis des Merchant-Rankine-Verfahrens [7]

Das Verfahren wird vorrangig im englischsprachigen Raum für Rahmentragwerke angewandt. Hierbei wird die Größe der wirklichen Traglast P_u über das plastische Rahmenversagen P_{pl} und die Verzweigungslast P_{crit} angenähert, Gl. (2.13).

$$\frac{1}{P_u} = \frac{1}{P_{pl}} + \frac{1}{P_{crit}} \quad (2.13)$$

Mit dem Ansatz der bezogenen Trägerschlankheit $\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{P_{pl}}{P_{crit}}}$ und der Darstellung der Tragfähigkeit $P_u = \chi \cdot P_{pl}$ ergibt sich der Abminderungsbeiwert χ entsprechend:

$$\chi = \frac{1}{1 + \bar{\lambda}^2} \quad (2.14)$$

Die Merchant-Rankine-Formel wird entsprechend einer Vielzahl von Versuchsdurchführungen und rechnerischen Versuchssimulationen erweitert, Gl. (2.15).

$$\left(\frac{1}{P_u}\right)^n = \left(\frac{1}{P_{pl}}\right)^n + \left(\frac{1}{P_{crit}}\right)^n \quad (2.15)$$

n stellt den Anpassungswert an die Versuchsergebnisse dar. Der Abminderungsbeiwert χ wird nach Gl. (2.16) berechnet:

$$\chi = \left(\frac{1}{1 + \bar{\lambda}^{2n}}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (2.16)$$

Europäische Knickspannungslinien

Die europäischen Knickspannungslinien, auch bekannt als Europäische Biegeknickkurven, werden für den Eulerfall 2 – unter Berücksichtigung geometrischer Ersatzimperfektionen in Form einer Stabkrümmung – abgeleitet. Der elastische Querschnittsnachweis in Stabmitte liefert mit dem Ayrton-Perry Ansatz und Lösung quadratischer Gleichungen die allgemeine Abminderungskurve χ :

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_N^2}} \quad (2.17)$$

mit

$$\phi = \frac{1}{2} \left(1 + \alpha (\bar{\lambda}_N - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}_N^2 \right) \quad (2.18)$$

$$\bar{\lambda}_N = \frac{s_{ki}}{i \cdot \pi \sqrt{E/f_{y,k}}} \quad (2.19)$$

Die Größe der geometrischen Ersatzimperfektionen ist durch den Imperfektionsbeiwert α angegeben. Die Plateaulänge beträgt für alle Knickkurven $\bar{\lambda}_0 = 0,2$.

Biegedrillknickkurve

Aus der Biegedrillknickbelastbarkeit eines Biegeträgers mit konstanter Momentenbelastung unter Berücksichtigung einer geometrischen Ersatzimperfektion in Form einer Verdrehung ist eine Abminderungskurve für Biegedrillknicken abgeleitet worden.

Der Imperfektionsbeiwert α sowie die Plateaulänge $\bar{\lambda}_0 = 0,4$ sind durch Anpassungen an Versuchsergebnisse bestimmt.

Der Vergleich der europäischen Knickspannungslinien und der Biegedrillknickkurven zeigt, dass die Biegedrillknickkurven für $\alpha = 0,6$ und $\alpha = 1,2$ mit ausreichender Genauigkeit mit der einfachen Formulierung der Knickspannungslinien erfasst werden können. Jedoch bei Verwendung der Biegedrillknickkurven mit dem Imperfektionsbeiwert $\alpha = 0,4$ treten erhebliche Abweichungen zu den europäischen Knickspannungslinien auf.

Vergleicht man die Abminderungskurven nach Merchant-Rankine mit den derzeit geltenden Abminderungskurven für das Biegedrillknicken nach Eurocode, so stellt die Anwendung der Knickspannungslinien für die Nachweisführung Biegedrillknicken eine sehr konservative Lösungsmöglichkeit dar. Die Knickspannungslinien sind demnach für gedrungene Stäbe keine gute Alternative.

Beulkurven

Die derzeit verwendeten Beulkurven entsprechen modifizierten Karman-Ansätzen oder Linearkombinationen des Euler-Knick-Ansatzes und des Karman-Ansatzes.

Einheitliche Knick- und Beulkurven

Müller stellt ein Nachweisverfahren zur Anwendung einheitlicher Abminderungskurven für stab- und plattenartige Bauteile vor, [65]. Dieses Verfahren findet auch in EN 1993-1-1 [17] Anwendung. Ziel dieses Verfahrens sind Knick- und Beulnachweise am Gesamttragwerk unter Einbeziehung von Stegverformungen und Beulen. Für sämtliche Beanspruchungskomponenten gilt folgendes Nachweisschema:

$$R_{d,i} = \frac{\chi_i \cdot R_{k,i}}{\gamma_M} \quad (2.20)$$

$$\bar{\lambda}_i = \sqrt{\frac{R_{k,i}}{R_{crit,i}}} \quad \text{und} \quad \chi_i = \chi_i(\bar{\lambda}_i) \quad (2.21)$$

Mit

χ_i ist eine von der Schlankheit $\bar{\lambda}_i$ abhängige Abminderungsfunktion, die einer Knick-, Biegedrillknick- oder Beulkurve $\chi_i = \chi_i(\bar{\lambda}_i)$ entnommen wird.

$R_{d,i}$ für N_{Rd} , M_{Rd} , σ_{Rd} , τ_{Rd}

$R_{k,i}$ für N_{Rk} , M_{Rk} , f_y , $f_y/\sqrt{3}$

$R_{crit,i}$ für N_{crit} , M_{crit} , σ_{crit} , τ_{crit}

Zur Vermeidung der mehrsträngigen Nachweise mit verschiedenen Schlankheitswerten für die Belastungskomponenten beim Biege- und Biegedrillknicken und beim Beulen, könnte der Nachweis auf die Gesamtbeanspruchung E_{sd} , die durch die Gesamtbelastung und die Verteilung aller Schnittgrößen am gesamten ebenen Tragwerk gekennzeichnet ist, bezogen werden.

Dabei werden entsprechend den Definitionen von R_k und R_{crit} diese als

$$R_k = \alpha_{ult,k} E_{sd}$$

$$R_{crit} = \alpha_{crit} E_{sd}$$

verstanden, wobei

$\alpha_{ult,k}$ der Lasterhöhungsfaktor für die Beanspruchung E_{sd} bis zum Erreichen der charakteristischen Traglast R_k ohne seitliches Ausweichen und α_{crit} der Lasterhöhungsfaktor für die Beanspruchung E_{sd} bis zum Erreichen der kritischen Verzweigungslast R_{crit} .

Daraus folgt dann:

$$\bar{\lambda}_s = \sqrt{\frac{R_k}{R_{crit}}} = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{crit}}} \quad (2.22)$$

$\bar{\lambda}_s$ stellt eine einzige Systemschlankheit dar, anstelle der verschiedenen Komponentenschlankheiten $\bar{\lambda}_i$.

Die bis zum heutigen Zeitpunkt diskutierte Anwendung richtiger Abminderungsfaktoren zeigt, dass die Bestimmung geeigneter Abminderungskurven entsprechend ihrer Beanspruchung nicht einfach ist.

2.6 Zur Anwendung der Finiten Elemente Methode (FEM)

Viele ingenieurwissenschaftliche Aufgaben führen zu Randwertproblemen, d.h. es sind Differentialgleichungen unter Beachtung vorgeschriebener Randbedingungen zu lösen. In den 60er Jahren des vergangenen Jahrhunderts begann eine stürmische Entwicklung der FEM, welche durch den Flugzeugbau und die Raumfahrt stark vorangetrieben wurde. Die in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse basieren auf numerischen Parameterstudien, denen für Berechnungen die Finite Elemente Methode zugrunde gelegt wurde. Die verwendeten Elemente und Ansatzfunktionen bilden dabei die

Grundlage. Im Folgenden werden die Grundlagen der Berechnung mit finiten Elementen erläutert.

Die untersuchten Träger bzw. Bleche werden bei der Finiten Elemente Methode durch die Elemente repräsentiert. Die Eigenschaften der Elemente richten sich prinzipiell nach der Bauteilart. Unterschieden werden in dieser Arbeit plattenartige und stabförmige Bauteile. Dabei werden Stab-, Scheiben-, Schalen- und Plattenelemente unterschieden. Die jeweiligen Elementtypen stehen für spezielle Eigenschaften und beeinflussen die Qualität der Ergebnisse. Des Weiteren besitzen die Elemente unterschiedliche geometrische Formen und weisen verschiedene Freiheitsgrade in den Knotenpunkten auf. Jede Art von Elementen kann mit geraden oder gekrümmten Rändern ausgebildet werden. Die Elemente gleicher und unterschiedlicher Art können miteinander gekoppelt werden. Dabei ist zu beachten, dass das Tragverhalten der gekoppelten Struktur richtig erfasst wird.

Die Ansatzfunktionen beschreiben den Verlauf einer gesuchten Größe innerhalb eines Elements. Bei der Wahl der jeweiligen Funktion kommen am häufigsten Polynome zur Anwendung. Dabei werden u. a. lineare, quadratische, kubische Funktionen unterschieden. Die Ansatzfunktion eines Elements ist durch die Anzahl und Lage der Knotenpunkte eindeutig bestimmt. Die Ordnung einer Funktion ist ausschlaggebend für die Annäherung an die exakte Lösung. Durch eine Netzverfeinerung (h-Konvergenz) und eine Erhöhung der Ordnung der Ansatzfunktion (p-Konvergenz) kann die Annäherung optimiert werden [61], [4].

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen zu den profilierten Stegen wurden Elemente mit maximalen Größen von 50 mm x 50 mm gewählt. Die dazugehörigen Ansatzfunktionen sind linear.

Die Finiten Elemente Berechnungen der durchgeführten Untersuchungen erfolgten mit dem Programmpaket ABAQUS/STANDARD Version 6.3-1 und Version 6.5 der Fa. Hibitt, Karlsson & Sorensen, Inc., USA. Mit Hilfe des Pre- und Postprozessors MSC PATRAN Version 2003r2 sowie 2005r2 der Fa. MSC Software wurde die Ein- und Ausgabe realisiert.

Es wurden die Elemente S4R (ABAQUS) verwendet:

- S Spannung/Verschiebungselement, welche in dreidimensionalen Berechnungen auf der Grundlage der linearen oder quadratischen Interpolation verwendet werden;
- 4 Anzahl der Knoten des Elements;
- R reduzierte Integration, im Integralausdruck der virtuellen Verschiebungen tritt keine höhere als die erste Ableitung auf (C^0 -Steifigkeit).

3 Berechnungsmodelle und Normen

Kapitel 3 gibt einen Überblick zu den derzeit aktuellen europäischen sowie nationalen Normen, in denen Berechnungsmodelle zur Querschnitts- und Stabtragfähigkeit von Trägern mit profilierten Stegen angewandt werden. Der Überblick erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Es werden ausschließlich die Normen und Berechnungsmodelle vorgestellt, welche für die Auswertung der experimentellen und numerischen Ergebnisse dieser Arbeit zur Evaluierung herangezogen wurden.

3.1 Berechnungsmodell nach DASt-Ri 015

Die DASt-Richtlinie 015 [10] enthält Berechnungsmodelle und Nachweisführungen von Trägern des Stahlleichtbaus mit dünnen und trapezförmig profilierten Stegen. Andere Stegprofilierungen, z.B. sinusförmig, werden nicht erfasst.

Grundsätzlich erfüllen Trapezstegträger die an Stahlleichtbauträger gestellten Anforderungen. Die geometrischen Abmessungen werden den auftretenden Beanspruchungen angepasst. Dabei übernimmt der Steg die Querkräfte. Normalkräfte und Biegemomente werden den Gurten zugewiesen. Für eine optimale Bemessung der Träger, die durch Torsion, Biegemomente und Normalkräfte beansprucht werden, wird das Stegblech extrem dünn ausgebildet. Die Gefahr des Stegbeulens steigt. Eine Stegprofilierung wirkt sich hinsichtlich des Stabilitätsverhaltens des Steges günstig und traglaststeigernd auf den Tragmechanismus aus. Grundlage für die in [10] aufgestellten Bemessungsrichtlinien bilden die vorangegangenen Untersuchungen in Schweden [5]. Jedoch setzte die weltweite Anwendung der Trapezstegträger weitere Untersuchungen voraus. Dafür wurden in den USA [15] und an den Technischen Universitäten Berlin und Braunschweig in Deutschland umfassende und ergänzende Forschungsarbeiten zu den Grenztragfähigkeiten der Trapezstegträger durchgeführt.

3.1.1 Normalkraft- und Momententragfähigkeit

Nach dem zugrunde gelegten Tragmodell, wird die Grenznormalkraft bei Normalkraft- und Biegebeanspruchung durch Erreichen der Streckgrenze in der Schwerachse des Zuggurtes oder durch Erreichen der Grenzspannung in der Schwerachse des Druckgurtes bestimmt.

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} \leq 1,0 \quad (3.1)$$

mit

$$N_{R1d} = \kappa_k \cdot f_T \cdot f_{y1d} \cdot A_{ef1} \quad \text{und} \quad N_{R2d} = f_T \cdot f_{y2d} \cdot A_2$$

Index „1“ beschreibt den Druckgurt und Index „2“ den Zuggurt. Mit dem Abminderungsbeiwert κ_K wird das Stabilitätsverhalten des Druckgurtes erfasst. Der Abminderungsfaktor f_T berücksichtigt die Zusatzbeanspruchung der Gurte infolge der Stegprofilierung, Gl. (3.2) [2].

$$f_T = 1 - 0,4 \sqrt{\frac{\sigma_x(M_z)}{f_{y,d}}} \quad (3.2)$$

Aus den Schubkräften $T_1(x)$ in den längsparallelen Stegblechteilen entstehen Krepelmomente M_1 . Zusätzlich wirken aufgrund der Schubkräfte $T_2(x)$ in den diagonalen Stegblechteilen Querlasten F_y . Aus beiden Anteilen erhält der Gesamtträger Querbiegemomente M_z (Bild 3.1). Die Größe der Querbiegemomente M_z und der daraus resultierende Einfluss auf das Grenzbiegemoment richten sich nach der Formgebung der Stegprofilierung. In den schwedischen und österreichischen Normen wird aber gerade dieser Einfluss – die Reduzierung des Grenzbiegemomentes infolge der Querbiegemomente – nicht berücksichtigt. Für Trapezstegträger haben Lindner und Aschinger ausführlich nachgewiesen, dass sich die Querbiegemomente aus Gründen der Erfüllung des statischen Gleichgewichtes ergeben [2]. Es steht zur Frage, inwieweit die Querbiegemomente einen Einfluss auf die Tragfähigkeit in der Praxis besitzen.

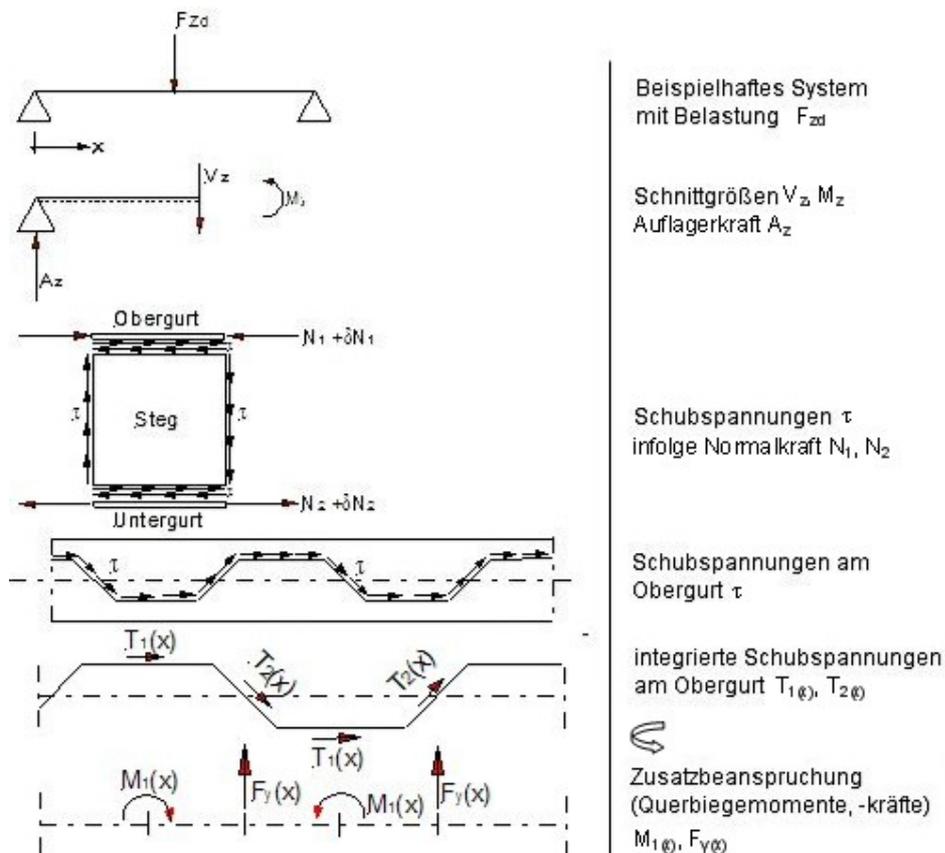


Bild 3.1: Querbiegemomente

3.1.2 Querkrafttragfähigkeit

Die Grenzquerkraft V_{Rd} ist unter der Annahme konstanter Schubspannungsverteilung im Stegquerschnitt nach [10] zu ermitteln. Untersuchungen in Braunschweig [83] haben gezeigt, dass sich die Querkraft bis zum Erreichen der Traglast über das Schubfeld gleichmäßig verteilt.

Der Tragfähigkeitsnachweis umfasst den Nachweis der Querschnittstragfähigkeit und die Stabilitätsnachweise. Die Stabilitätsnachweise für den Steg werden mit den lokalen und globalen Beulwerten und den daraus resultierenden Abminderungsfaktoren κ_τ für lokales ($\kappa_{\tau,l}$) bzw. globales ($\kappa_{\tau,g}$) Beulen bestimmt, Gl. (3.3).

$$V_{Rd} = 0,35\kappa_\tau \frac{f_{y,k}}{\gamma_M \sqrt{3}} h_w \cdot t_w \quad (3.3)$$

$$\text{mit } \kappa_\tau = \frac{0,84}{\bar{\lambda}_p} \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,84$$

$$\text{und } \kappa_\tau = 1,0 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,84$$

Neben den Angaben in [10] werden diverse umfangreiche Untersuchungen zum Tragverhalten der Trapezstegträger geführt, die in verschiedenen Schriften (z. B. [2], [50], [48], [51], [53], [47], [15], [14], [56], [1], [5]) veröffentlicht sind.

3.2 DIN 18800

Dieses Kapitel gibt keinen vollständigen Überblick zur DIN 18800. Im Folgenden sind ausschließlich die in dieser Arbeit verwendeten Berechnungsverfahren und Parameter aufgeführt. Speziell sind Grenzbeulspannungen und Plattenschlankheiten nach DIN 18800 [11] aufgeführt, die zum Vergleich mit den numerischen Gurtbeulberechnungen in Kapitel 5 herangezogen werden.

In DIN 18800 sind für dreiseitig gestützte Rechteckplatten die Abminderungsbeiwerte bei Beanspruchung durch

a) konstante Randverschiebungen Gl. (3.4) und

b) konstante Randspannungen Gl. (3.5)

angegeben.

$$\kappa_1 = \frac{0,7}{\bar{\lambda}_p} \leq 1 \quad (3.4)$$

$$\kappa_2 = \frac{1}{\bar{\lambda}_p^2 + 0,51} \leq 1 \quad (3.5)$$

Die bezogene Plattenschlankheit Gl. (3.6) wird mittels der Beulwerte für eine dreiseitig gelagerte Platte berechnet.

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_{yf}}{\sigma_{pi}}} \quad (3.6)$$

$$\sigma_{pi} = k_\sigma \cdot \sigma_e \quad (3.7)$$

Die Grenzbeulspannungen werden nach Gl. (3.8) unter Annahme konstanter Randverschiebungen und Gl. (3.9) unter Annahme konstanter Randspannungen berechnet.

$$\sigma_{p,Rd,1} = \kappa_1 \cdot f_{yf} \quad (3.8)$$

$$\sigma_{p,Rd,2} = \kappa_2 \cdot f_{yf} \quad (3.9)$$

3.3 Wellstegträgerdokumentation

Die Wellstegträgerdokumentation [86] regelt die Bemessung der Wellstegträger. Sie umfasst neben den Bemessungsregeln auf Grundlage einer Typenstatik, Tabellen zur Ermittlung von Grenzbeanspruchungen in Abhängigkeit der Querschnittswerte und Trägerlänge. Nach der Typenstatik entspricht der Wellstegträger statisch gesehen einem Fachwerkträger, bei dem die Biegemomente und Normalkräfte den Gurten zugewiesen werden und die Querkräfte nur durch den Wellsteg abgetragen werden. Mit der Annahme dieses statischen Modells erfolgt die Bemessung und Nachweisführung der Normalkraft- und Biegemomententragfähigkeit der Wellstegträger nach DIN 18800 [11] und ergänzenden Gutachten, die in der Typenstatik [86] verankert sind. Die Berücksichtigung einer Zusatzbeanspruchung infolge der Stegprofilierung ist bei der sinusförmigen Profilierung mit den vorhandenen Abmessungen nicht erforderlich.

Der Nachweis der Querkrafttragfähigkeit für Träger mit sinusförmig profilierten Stegen kann alternativ nach [10] erfolgen. Für die sinusförmige Profilierung wird eine Ersatztrapezform angenommen (Bild 3.2).

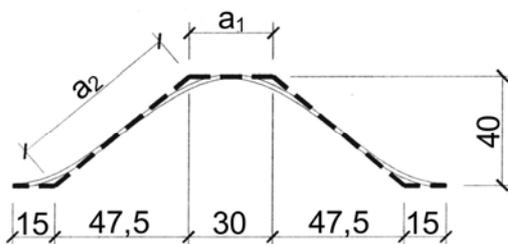


Bild 3.2: Ersatztrapezform der sinusförmigen Profilierung

Dieser alternative Nachweis führt jedoch zu unwirtschaftlichen Ergebnissen, da z. B. Beulformen und Beulfeldabmessungen nicht richtig erfasst werden.

Ein weiterer Grund für unwirtschaftliche Ergebnisse ist, dass eine Interaktion von globalem und lokalem Beulen beim Wellsteg nicht angesetzt werden muss [86]. Aufgrund des gutartigen lokalen Beulverhaltens des Wellstegträgers ist die

Berücksichtigung der Interaktion zwischen lokalem und globalem Beulen des Stegbleches nicht erforderlich.

Gestützt durch Versuche und FE-Berechnungen an den Universitäten in Wien, Karlsruhe, Linz und Cottbus [30], [89], [29], [68] wird von Pasternak und Branka [69] folgendes Bemessungsmodell vorgeschlagen (Bild 3.3):

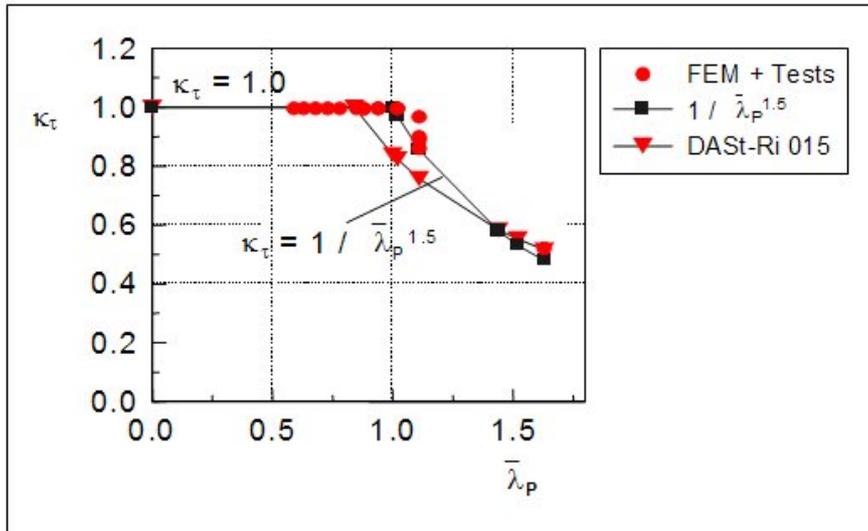


Bild 3.3: Abminderungsfaktor in Abhängigkeit zum bezogenen Schlankheitsgrad [69]

Das modifizierte DASSt-Modell lautet: Gl. (3.10), ([69]), und findet in der Wellstegträgerdokumentation [86] Anwendung:

$$V_{Rd} = \kappa_{\tau} \cdot \frac{f_{y,k}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_M} h_w \cdot t_w \quad (3.10)$$

Für den Abminderungsfaktor κ_{τ} ergibt sich im Vergleich zum Trapezstegträger [10] eine veränderte Abhängigkeit zur bezogenen Plattenbeulenschlankheit:

$$\kappa_{\tau} = \frac{1}{\lambda_p^{1.5}} \quad \text{für } \lambda_p > 1,0 \text{ bzw.}$$

$$\kappa_{\tau} = 1,0 \quad \text{für } \lambda_p \leq 1,0$$

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{f_{y,k}}{\sqrt{3} \cdot \tau_{pi,g}}} \quad (3.11)$$

$$\tau_{pi,g} = \frac{32,4}{t_w \cdot h_w^2} \cdot \sqrt[4]{D_x \cdot D_y^3} \quad (3.12)$$

Sämtliche Untersuchungen und ergänzende Berechnungsverfahren, die derzeit noch nicht in der Wellstegträgerdokumentation berücksichtigt sind, sind in [72] ausführlich zusammengefasst. Die grundlegenden Untersuchungen zu den Wellstegträgern werden größtenteils an der BTU Cottbus durchgeführt und durch weitere Untersuchungen zum

M-V Interaktionsverhalten in Krakau [44], zum Tragverhalten unter dynamischer Beanspruchung in Prag [59] und Wien [77] ergänzt.

3.4 EN 1993-1-5 Annex D

3.4.1 Allgemeines

Die angegebenen Bemessungsgrundlagen der EN 1993-1-5 Annex D [18] gelten für Träger mit trapez- und sinusförmig profilierten Stegen mit den in Bild 3.4 dargestellten Abmessungen. Angelehnt an das Tragmodell der DAST-Richtlinie 015 [10] werden Normalkräfte und Biegemomente den Gurten zugewiesen und Querkräfte vom Steg aufgenommen.

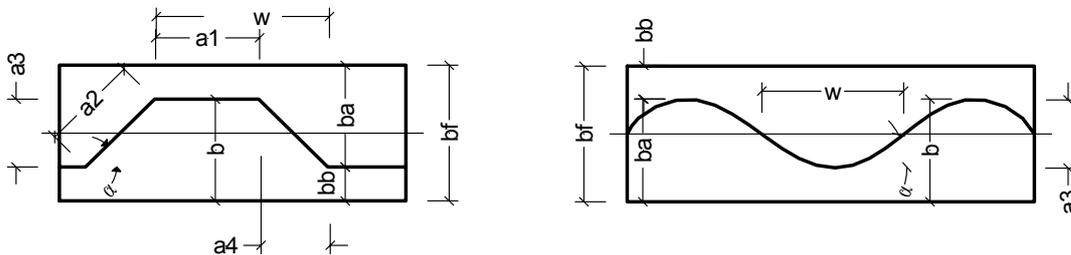


Bild 3.4: Abmessungen der Profilierung

3.4.2 Normalkraft- und Momententragfähigkeit

Die Grenznormalkraft bei Normalkraft- bzw. Biegebeanspruchung wird durch Erreichen der Streckgrenze in der Schwerachse des Zuggurtes bzw. des Druckgurtes oder durch Erreichen der Stabtragfähigkeit in der Schwerachse des Druckgurtes bestimmt. Die Stabtragfähigkeit wird mittels des Abminderungsfaktors χ für die Stabilitätsfälle Biegeknicken und Biegedrillknicken beschrieben.

$$M_{Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{b_{f2} \cdot t_{f2} \cdot f_{yf,r}}{\gamma_{M0}} \cdot \left(h_w + \frac{t_{f1} + t_{f2}}{2} \right) \\ \frac{b_{f1} \cdot t_{f1} \cdot f_{yf,r}}{\gamma_{M0}} \cdot \left(h_w + \frac{t_{f1} + t_{f2}}{2} \right) \\ \frac{b_{f1} \cdot t_{f1} \cdot f_{yf} \cdot \chi}{\gamma_{M1}} \cdot \left(h_w + \frac{t_{f1} + t_{f2}}{2} \right) \end{array} \right\} \quad (3.13)$$

mit

$$f_{yf,r} = f_{yf} \cdot f_T$$

$$f_T = 1 - 0,4 \sqrt{\frac{\sigma_x(M_z)}{f_{yf}}} \cdot \frac{1}{\gamma_{M0}}$$

Das Querbiegemoment M_z (siehe 3.1.1) resultiert aus der Profilierung des Steges ([2] und Kapitel 3.1.1). Untersuchungen [71] zeigen, dass die Beanspruchung der Gurte aus Querbiegemomenten infolge der Stegprofilierung für Wellstegträger vernachlässigt werden kann. Deshalb wurde für sinusförmige Profilierungen der Reduktionsfaktor aufgrund des geringen Einflusses der Querbiegemomente auf das Grenzbiegemoment mit $f_T = 1,0$ festgesetzt.

Grundsätzlich werden beim Gurtbeulen zwei Beularten – das Plattenbeulen und das Torsionsbeulen – unterschieden, dementsprechend sind die Beulfeldgrößen zu bestimmen.

- Plattenbeulen

Die effektive Breite des Druckgurtes berücksichtigt die Effekte des Gurtbeulens. Sie wird für plattenartiges Beulen mit folgendem Beulwert definiert [87]:

$$k_{\sigma} = 0,43 + \left(\frac{b}{a}\right)^2 \quad (3.14)$$

Nach EN 1993-1-5 Annex D ist b als der größte Abstand zwischen der Schweißnahtwurzel und dem freien Gurtrand zu verstehen. Die Beulfeldlänge a ist in Gl. (3.15) definiert.

Das Plattenbeulen stellt das plattenähnliche Beulen der Gurtbereiche mit großen Randabständen b dar. In EN 1993-1-5 wird als Beulfeld eine dreiseitig gestützte, rechteckige Platte mit gelenkiger Lagerung angenommen.

$$a = a_1 + 2a_4 \quad (3.15)$$

- Torsionsbeulen

Zur Berücksichtigung des torsionsartigen Beulverhaltens des Gurtes um den Stegschwerpunkt ist ein weiterer Beulwert in Anlehnung an [87] angegeben. Im Falle kleiner Profilierungen im Verhältnis zur Gurtbreite beult der Gurt in Form einer Rotation um die Stegmittellinie. Der profilierte Steg übt jedoch im Vergleich zu ebenen Stegen eine größere Rotationssteifigkeit aus. Somit kann der Beulwert im Bereich der gelenkig gelagerten Platte ($k_{\sigma} = 0,456$) bis hin zur eingespannten Platte ($k_{\sigma} = 1,3$) variieren. Eine Lösung für eine elastische Rotationssteifigkeit ist in [87] angegeben. Vereinfacht jedoch konservativ ist der Beulwert in EN 1993-1-5 nach Gl. (3.16) angegeben.

$$k_{\sigma} = 0,6 \quad (3.16)$$

Parameter b wird für das torsionsartige Beulen mit der halben Gurtbreite angenommen.

Die Berechnungen sind für beide Beularten zu führen. Der ungünstigere Beulwert von beiden ist für die Nachweisführung maßgebend.

3.4.3 Querkrafttragfähigkeit

Die Grenzkraft V_{Rd} ergibt sich in EN 1993-1-5 unter der Annahme konstanter Schubspannungsverteilungen im Stegquerschnitt nach Gl. (3.17). Der rechnerische Nachweis der Grenzkraft berücksichtigt die Einflüsse des globalen sowie des lokalen Stegbeulens unabhängig von der Art der Profilierung.

$$V_{Rd} = \chi_c \cdot \frac{f_{yw}}{\gamma_{M1} \cdot \sqrt{3}} \cdot h_w \cdot t_w \quad (3.17)$$

χ_c ist der kleinste Abminderungsfaktor für lokales Stegbeulen $\chi_{c,l}$ bzw. globales Stegbeulen $\chi_{c,g}$.

Viele Wissenschaftler wie Leiva, Lindner, Höglund, Johnson haben sich mit der Querkrafttragfähigkeit von Trapezstegträgern beschäftigt (Kapitel 2.2). Die Grundlagen für die Berechnungen der Querkrafttragfähigkeit in EN 1993-1-5 Annex D gehen auf das Modell von Höglund [28] zurück. Somit ergeben sich die Abminderungsfaktoren:

$$\chi_{c,l} = \frac{1,15}{0,9 + \bar{\lambda}_{c,l}} \leq 1,0 \quad (3.18)$$

$$\chi_{c,g} = \frac{1,5}{0,5 + \bar{\lambda}_{c,g}^2} \leq 1,0 \quad (3.19)$$

Die bezogene Beulslankheit $\bar{\lambda}_{c,l}$, Gl. (3.20) wird mit der kritischen Beulspannung $\tau_{cr,l}$ für lange Platten nach Gl. (3.21)

$$\bar{\lambda}_{c,l} = \sqrt{\frac{f_y}{\tau_{cr,l} \cdot \sqrt{3}}} \quad (3.20)$$

$$\tau_{cr,l} = 4,83 \cdot E \cdot \left[\frac{t_w}{a_{\max}} \right]^2 \quad (3.21)$$

mit $a_{\max} = \max(a_1, a_2)$ bestimmt.

In Anlehnung an [69] wird für sinusförmige Profilierungen die Bestimmung der kritischen Beulspannung nach Gl. (3.22) empfohlen.

$$\tau_{cr,l} = \left(5,34 + \frac{a_3 \cdot s}{h_w \cdot t_w} \right) \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12(1-\nu^2)} \cdot \left(\frac{t_w}{s} \right)^2 \quad (3.22)$$

Der Abminderungsfaktor für globales Stegbeulen Gl. (3.19) wird mit der bezogenen Schlankheit Gl. (3.23) und der kritischen Beulspannung für orthotrope Platten nach [12] wie folgt berechnet.

$$\bar{\lambda}_{c,g} = \sqrt{\frac{f_y}{\tau_{cr,g} \cdot \sqrt{3}}} \quad (3.23)$$

$$\tau_{cr,g} = \frac{32,4}{t_w \cdot h_w^2} \cdot \sqrt[4]{D_x \cdot D_y^3} \quad (3.24)$$

3.5 EN 1993-1-6

Dieses Kapitel gibt keinen vollständigen Überblick über verwendete Berechnungsverfahren in EN 1993-1-6 [19]. Im Folgenden sind nur die in dieser Arbeit verwendeten Berechnungsverfahren und Parameter aufgeführt.

Die Berechnung kritischer Beulspannungen von schubbeanspruchten Stegblechen der Wellstegträger wird unter anderem mit dem analytischen Modell der Schalentheorie geführt (Kapitel 4).

Die dazu verwendeten Parameter und Gleichungen sind im Folgenden zusammengefasst.

$\tau_{x\theta,Rcr}$ (3.25) wird in Kapitel 4 vereinfachend mit τ_{shell} bezeichnet.

$$\tau_{x\theta,Rcr} = 0,75 \cdot E \cdot C_\tau \cdot \sqrt{\frac{1}{\varpi}} \cdot \frac{t_w}{r} \cdot \alpha_\tau \quad (3.25)$$

Für mittellange Schalen beträgt der Abminderungsfaktor $C_\tau = 1$.

Die Schale ist als mittellang einzustufen, wenn (3.26) erfüllt ist.

$$10 \leq \varpi \leq 8,7 \frac{r}{t_w} \quad (3.26)$$

ϖ beschreibt dabei den dimensionslosen Längenparameter der Schale (3.27)

$$\varpi = \frac{h_w}{\sqrt{r \cdot t_w}} \quad (3.27)$$

Der Krümmungsradius der Schale wird mit r beschrieben und wird für die Wellstegträger wie folgt angenommen (3.28):

$$r = \frac{0,25w^2}{a_3} + 0,25a_3 - 0,5t_w \quad (3.28)$$

w , a_3 , t_w , h_w ist entsprechend Kapitel 3.4 anzunehmen.

α_τ berücksichtigt den Imperfektionseinfluss infolge Herstellungstoleranzen und wird für die Wellstegträger entsprechend der Klasse C, mit $\alpha_\tau = 0,5$ angenommen.

4 Einfluss der Stegprofilierung auf die Querkrafttragfähigkeit

4.1 Allgemeines

In EN 1993-1-5 [18] findet keine getrennte Nachweisführung der Querkrafttragfähigkeit für Trapez- und Wellstegträger statt. Die Querkraftbemessung in [18] berücksichtigt dabei die lokalen und globalen Beulwerte für sinus- und trapezförmig profilierte Stege. Eine Abgrenzung der Profilierung hinsichtlich des Abminderungsfaktors $\chi_{c,1}$ wird dabei nicht geführt. Grundlegende Untersuchungen zum Tragverhalten profilierter Stegbleche zeigen jedoch Unterschiede im Tragverhalten zwischen den sinus- und trapezförmig profilierten Stegen [69] im lokalen Beulverhalten. Es wird die Frage beantwortet, inwieweit die Nachweisführung nach [18] für stegprofilierete Stege gerechtfertigt ist. Verbesserungsvorschläge werden angegeben.

4.2 Versuche

4.2.1 Versuchsplanung und -durchführung

Es werden vier einseitig geschweißte Wellstegträger und zwei einseitig geschweißte Trapezstegträger untersucht. Die Abmessungen der Versuchskörper sind in Tabelle 4-1 zusammengefasst.

Tabelle 4-1: Abmessungen der Versuchsträger [mm]

	Profil	h_w	t_w	b_1	t_1	b_2	t_2	t_{s1}	t_{s2}	t_{s3}	L
V1a	trapez	500	2,5	200	15,1	200	15,0	20,0	20,0	20,0	2002
V1b	trapez	501	2,5	200	15,0	201	15,0	20,0	20,0	20,1	2004
V2a	sinus	501	2,6	201	15,2	200	15,1	20,1	20,1	20,1	2002
V2b	sinus	501	2,6	200	15,1	200	15,0	20,1	20,1	20,1	2000
V3a	sinus	500	2,6	300	15,0	301	15,1	20,1	20,1	20,3	2001
V3b	sinus	502	2,6	300	15,2	300	15,0	20,1	20,1	20,3	2001

Tabelle 4-2: Abmessungen der Profilierung und Materialkennwerte

	a_1	a_3	a_4	s	$f_{y,w}$	$f_{y,f}$
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
V1a	30,0	40,1	47,4	184,2	270	270
V1b	30,0	40,0	47,5	184,2	270	270
V2a	-	39,3	-	178,3	230	250
V2b	-	39,2	-	178,6	230	250
V3a	-	39,3	-	178,4	230	250
V3b	-	39,1	-	178,4	230	250

Nähere Angaben zur Bestimmung der Materialkennwerte siehe Anlage 2.

Die drei Versuchsreihen mit jeweils zwei Versuchskörpern werden in der Forschungs- und Materialprüfanstalt der BTU Cottbus durchgeführt (Bild 4.1)

Die Belastung der Versuchsträger erfolgt mittig über der Lasteinleitungssteife. Die Auflagersteifen sind vom jeweiligen Trägerrand 150 mm entfernt. Der Träger ist auf einem losen und festen Rollenlager gehalten. Ein mögliches Ausweichen des Trägers in y-Richtung wird durch Winkelprofile verhindert (Bild 4.1).



Bild 4.1: Versuchsaufbau und Messtechnik der Versuchsträger

In der ersten Versuchsreihe werden die Träger V1a und V1b mit trapezförmiger Stegprofilierung untersucht. Die Profilierungsschlankheit dieser Träger beträgt $\lambda_{c,T} = 25,16$. Die Stege der zweiten Versuchsreihe, Versuchsträger V2a, V2b und V3a, V3b sind sinusförmig profiliert ($\lambda_{c,w} = 34,04$). Merkmale der verwendeten trapez- und sinusförmigen Profilierung sind gleiche Abmessungen der Wellenamplitude und -länge (Bild 3.4).

Es werden Wegaufnehmer in horizontaler und vertikaler Richtung zur Beurteilung des Deformationsverhaltens angebracht. Dehnungsmessungen entlang der Gurtlänge mittels linearer Dehnmessstreifen L1 bis L4 sowie verteilt über die Steghöhe und Trägerlänge

mittels Rosetten R1 bis R3 unterstützen die Aussagen zum Versagensverhalten (Anlage A1, Bild A1-1). Die linearen Dehnmessstreifen 1-LY11-10/350 mit einer Dehnrichtung werden in Richtung der Hauptbeanspruchung an der Oberfläche angebracht. Die 0° - 60° - 120° -DMS-Rosetten im Stegbereich beschreiben die Dehnung in drei Richtungen. Aus diesen können die Richtungen der Hauptdehnungen HR1 und HR2 ermittelt werden, [37]. Die Messwerterfassung wird mit der Messtechnik der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik Darmstadt (digitales Messverstärkersystem DMC Lab plus) durchgeführt. Die Belastung wird mittig und über eine Lasteinleitungssteife mittels eines Stempels (Durchmesser: 8 cm) eingetragen. Der Lasteintrag mit einem 1000 kN Hydraulikzylinder MTS Systems Corporation erfolgt weggesteuert und mit einer Geschwindigkeit von 0,4 mm/min.

4.2.2 Versuchsergebnisse

Bild 4.2 zeigt das Last-Verformungsverhalten der untersuchten Träger. Bei den Versuchsträgern V1a und V1b versagt das Messsystem und das Tragverhalten dieser beiden Versuchsträger kann nicht bis zum endgültigen Lastabfall aufgezeichnet werden. In Bild 4.2 sind die vertikale Durchbiegung v_{Versuch} und die Traglast F_{Versuch} im Versagenszustand des Trägers V1b dargestellt. Der Träger V1a erreicht nicht die maximale Traglast, aufgrund eines fehlerhaften Versuchsaufbau.

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Trapezstegträger ein weitaus duktileres Verformungsverhalten aufweisen (Bild 4.2). Der Grund für unterschiedliche Tragverhalten ist in den stark differierenden Materialkennwerten der verwendeten Well- und Trapezstegträger (siehe Anlage A2) zu suchen. Des Weiteren bestätigen die Last-Verformungskurven, dass die Gurtschlankheit keinen Einfluss auf die Größe der Querkrafttragfähigkeit besitzt (Bild 4.2). Aus diesem Grund wird in den weiterführenden Untersuchungen der Einfluss des Gurtes nicht näher untersucht.

Tabelle 4-3: Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

	V_{Versuch} [kN]	v_{Versuch} [mm]	$V_{[18]}$ [kN]	$V_{\text{Versuch}}/V_{[18]}$ [-]	Versagensart
V1a	-	-	184		
V1b	206,5	59,2	184	1,12	Lokales Stegbeulen
V2a	220,5	13,2	173	1,27	Lokale Beulen entwickeln sich hin zu globalen Stegbeulen (Interaktion)
V2b	220,25	11,9	173	1,27	Lokale Beulen entwickeln sich hin zu globalen Stegbeulen (Interaktion)
V3a	222	13,0	173	1,28	Lokale Beulen entwickeln sich hin zu globalen Stegbeulen (Interaktion)
V3b	228,5	12,5	173	1,32	Lokale Beulen entwickeln sich hin zu globalen Stegbeulen (Interaktion)

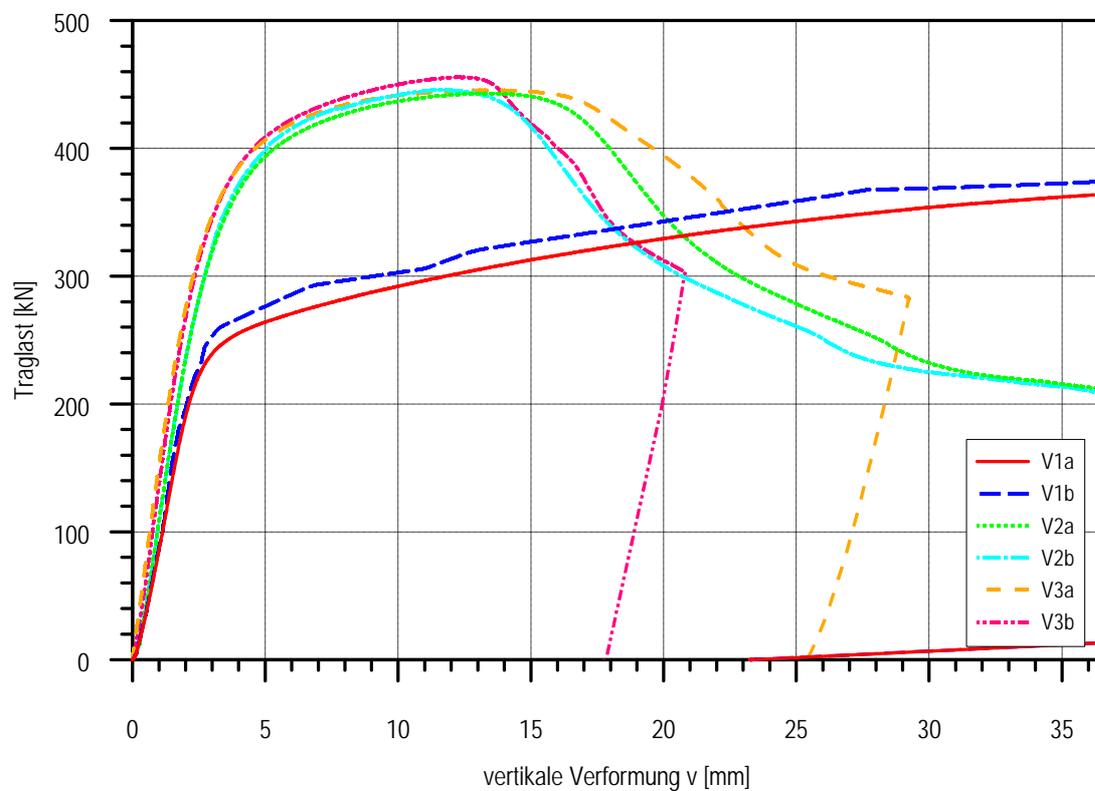
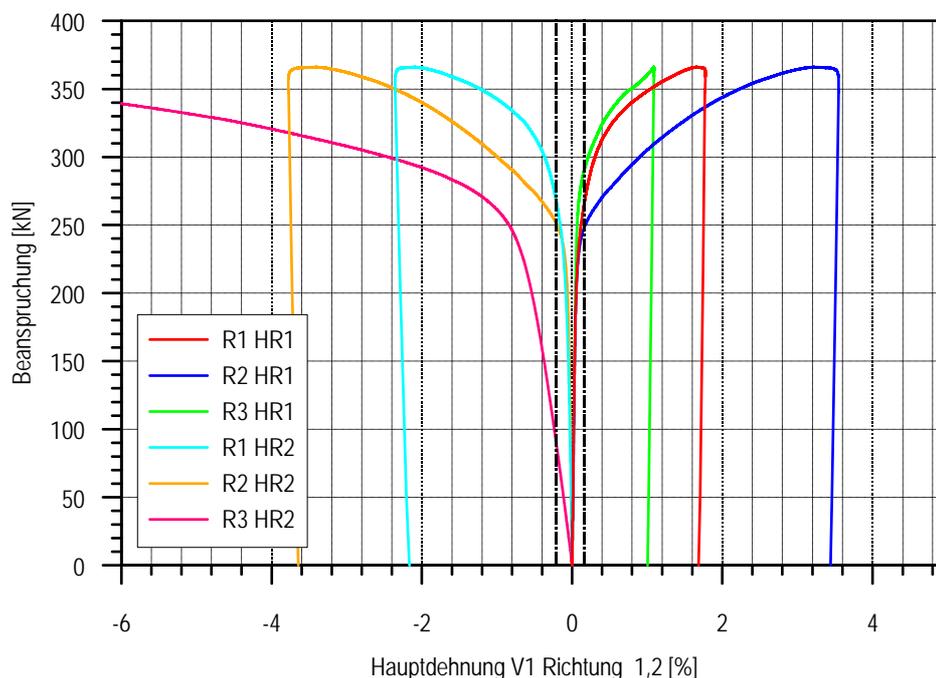


Bild 4.2: Last-Verformungskurven der Versuchsträger

Die Prüfkörper der Versuchsreihe V1 weisen sehr starke Verformungen auf. Der Versuch musste abgebrochen werden, da die gewählte Lasteintragung keine weiteren Verformungen mehr zuließ. Das Ergebnis der Versuchsergebnisse ist jedoch sehr gut zu erkennen. Die Auswertung mittels visueller Beobachtung des Tragverhaltens beider Trägerformen V1 sowie V2, V3 weist auf ein Plastizieren des Stegbleches hin. Schon vor dem Erreichen der Traglast ist ein starker Anstieg der Stegdeformationen zu verzeichnen. Beulen in der Nähe des Lasteinleitungsbereiches traten am Ursprung des horizontalen Astes der Last-Verformungskurve auf (Phase 1). Mit steter, allmählicher Lastaufnahme und folgendem Lastabfall zeichnen sich starke plastische Deformationen ab (Phase 2). Bekräftigt wird diese Aussage mit der Auswertung der Dehnungsmessungen im Steg. In Bild 4.3a-c sind die Auswertungen der Rosetten dargestellt. Die Hauptdehnungen im Steg werden berechnet und prozentual dargestellt. Das Erreichen der oberen Streckgrenze des Materials bei einer 0,2 %-igen Dehnung ist in den Diagrammen markiert. Die Auswertungen der Kraft-Dehnungsbeziehungen bestätigen das Versagen der untersuchten Träger infolge des Plastizierens des Stegbleches bei Querkraftbeanspruchung. Lokale, elastische Instabilitäten in Form von Stegbeulen treten bei den Trägern V2, V3 nicht auf. Die grundlegenden Untersuchungen zum Tragverhalten der Wellstegträger [86] werden bestätigt und liefern die Grundlage für die weiteren Untersuchungen in Form numerischer Parameterstudien.

a)



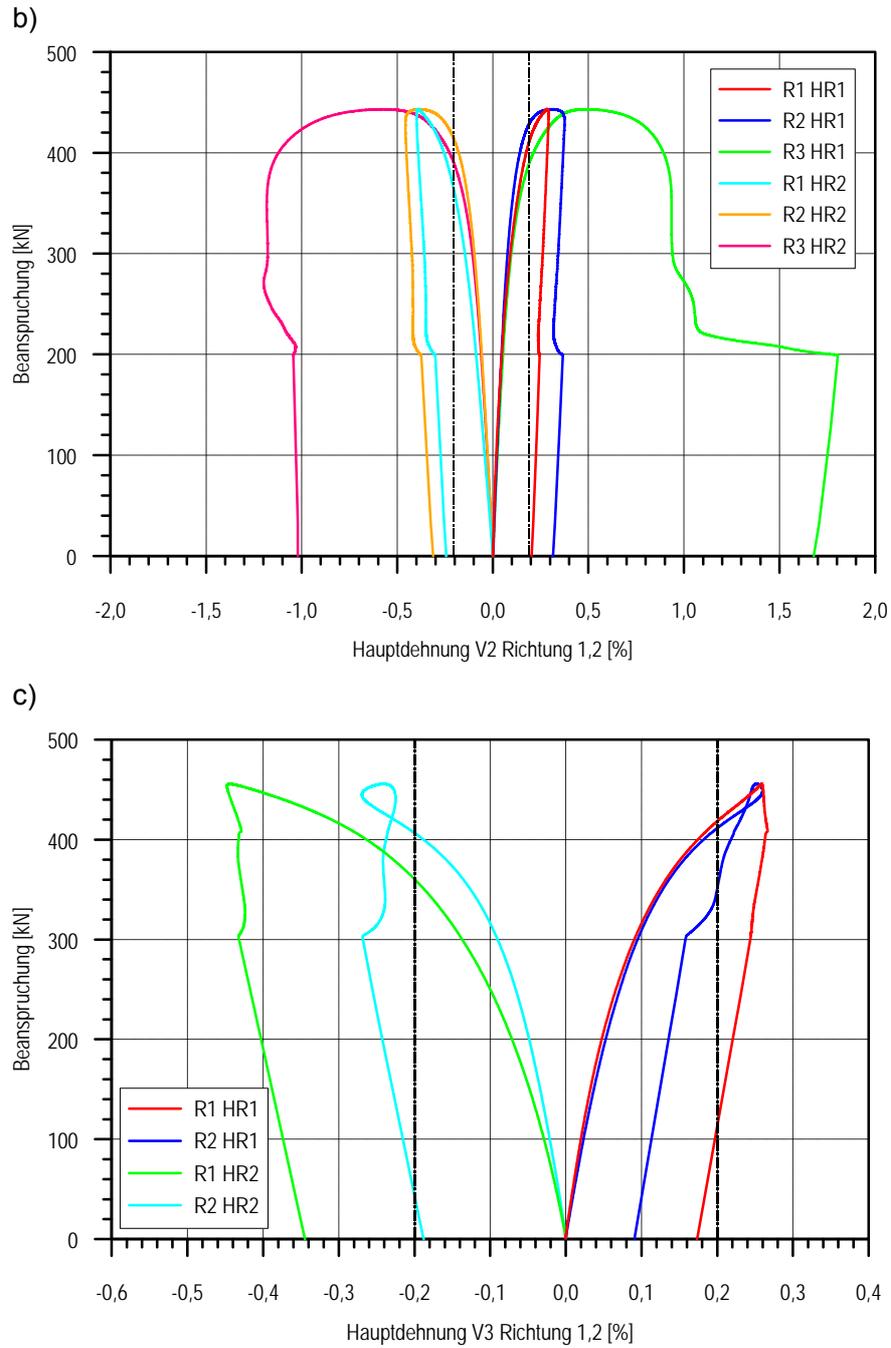


Bild 4.3: Dehnungsverhalten der Versuchsträger im Steg a) V1 b) V2 c) V3



Bild 4.4: Beulen im Lasteinleitungsbereich des plastizierten Steges Reihe V1 (Phase 1)



Bild 4.5: Beulen im gesamten plastizierten Stegblech Reihe V1 (Phase 2)

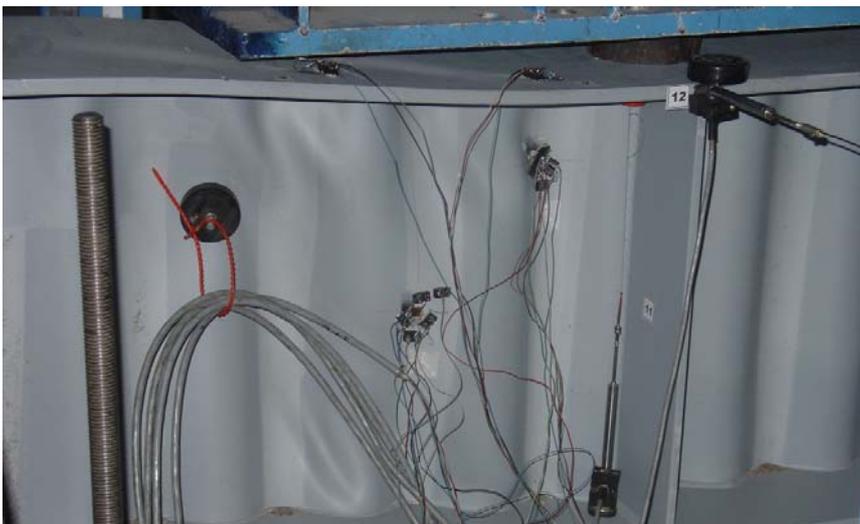


Bild 4.6: Stegbeulen Reihe V2 (Phase 2)



Bild 4.7: Stegbeulen Reihe V3 (Phase 2)



Bild 4.8: Stegbeulen Reihe V3 (Phase 2)

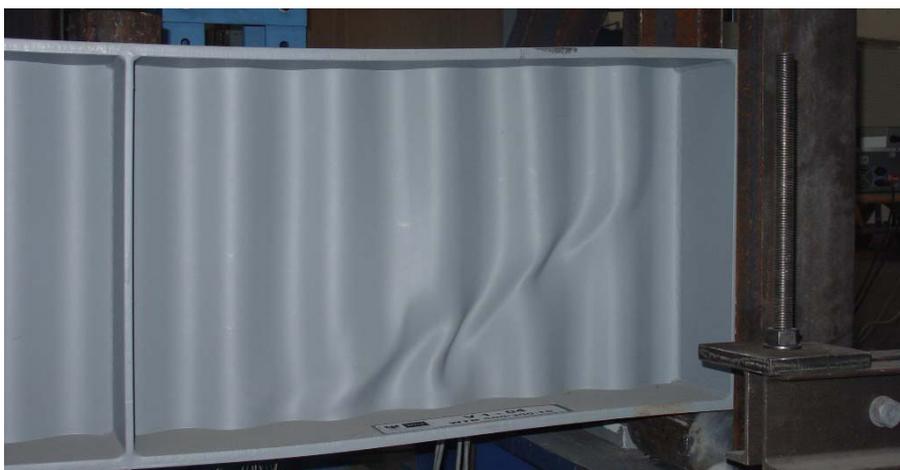


Bild 4.9: Stegbeulen Reihe V3 (Phase 2)

In Bild 4.4 sind lokale Stegbeulen im ebenen Stegblechbereich erkennbar. Da sich jedoch das Beulbild erst im plastischen Bereich einstellt, ist davon auszugehen, dass der

Beginn des Beulens lokal im ebenen Bereich erfolgt und nicht über die Profilkanten hinausgeht. In Bild 4.5 weisen die Beulen starke Deformation eines großen Stegblechbereiches auf. Zu diesem Zeitpunkt befindet sich der Versuchsträger bereits im Nachbeulstadium, die lokalen Beulen haben sich hin zu globalen Beulen entwickelt. Das Beulfeld weitet sich aus und die Faltung ist in der Beulform inbegriffen. Es liegt eine Interaktion zwischen lokalem und globalem Beulen vor, da nicht die gesamte Steghöhe erfasst ist. Bild 4.6 bis Bild 4.9 zeigen das Nachbeulverhalten von Wellstegträgern, es handelt sich zu Beulbeginn eindeutig um lokale Stegbeulen im plastischen Bereich. In Bild 4.6 ist die Anfangsgröße der Beulen (halbe Wellenlänge) zu erkennen. Die lokalen Stegbeulen entwickeln sich mit Zunahme der Deformationen hin zu globalen Stegbeulen. Dabei ist auffällig, dass die globalen Beulen sich nicht immer über die gesamte Steghöhe erstrecken, es handelt sich auch hier um eine Interaktion zwischen lokalem und globalem Beulen.

4.2.3 Imperfektionen

Die Versuchsträger werden vor der Versuchsdurchführung vermessen, um geometrische Imperfektionen zu erfassen. Strukturelle Imperfektionen, welche aus Walz- und Schweißvorgängen, Materialinhomogenitäten und exzentrischen Lasteinleitungen hervorgehen, werden nicht explizit berücksichtigt. Einflüsse der strukturellen und geometrischen Imperfektionen werden bei den numerischen Berechnungen durch Ersatzimperfektionen erfasst. Die Möglichkeiten zur Berücksichtigung von Vorverformungen für weiterführende numerische Studien werden in Kapitel 4.3 ausführlich beschrieben.

4.2.4 Externe Versuche

Die in diesem Kapitel vorgestellten Versuche genügen nicht, um klassifizierte Aussagen zum Schubtragverhalten von Trägern mit unterschiedlich profilierten Stegen zu treffen. Insbesondere traten bei den Trapezstegträgern Probleme bei der Versuchsdurchführung auf. Weiterhin stehen keine genügend genauen Materialkennwerte zur Verfügung.

Aus diesem Grund werden sämtliche durchgeführte Trapez- und Wellstegträgerversuche zusammengetragen. Sie liefern Aussagen zum Schubtragverhalten liefern und untermauern die Ergebnisse.

Trapezstegträger

Im Hintergrundbericht zur EN 1993-1-5 Annex D [32] sind sämtliche Versuche zur Schubtragfähigkeit an Trapezstegträgern zusammengefasst, Tabelle 4-4.

Tabelle 4-4: Versuche zur Schubtragfähigkeit Trapezstegträger [32]

No	Test original ref	h_w mm	t_w mm	f_{yw} Mpa	α	a_1 mm	a_3 mm	V_u kN	χ_u	λ_1	λ_2	V_u/V_{R1}	V_u/V_{R2}
0	L1A [46]	994	1,94	292	45	140	48	280	0,860	0,931	0,558	1,370	0,860
1	L1B [46]	994	2,59	335	45	140	48	502	1,007	0,747	0,556	1,442	1,007
2	L2A [46]	1445	1,94	282	45	140	50	337	0,737	0,915	0,774	1,164	0,737
3	L2B [46]	1445	2,54	317	45	140	50	564	0,839	0,741	0,768	1,197	0,839
4	L3A [46]	2005	2,01	280	45	140	48	450	0,690	0,880	1,092	1,068	0,778
5	L3B [46]	2005	2,53	300	45	140	48	775	0,881	0,724	1,067	1,244	0,962
6	B1 [5]	600	2,1	341	45	140	50	208	0,837	0,929	0,347	1,332	0,837
7	B2 [5]	600	2,62	315	45	140	50	273	0,954	0,716	0,315	1,340	0,954
8	B3 [5]	600	2,62	317	45	140	50	246	0,854	0,718	0,316	1,202	0,854
9	B4b [5]	600	2,11	364	45	140	50	217	0,815	0,956	0,358	1,315	0,815
10	M101 [5]	600	0,99	189	45	70	15	53	0,817	0,734	0,750	1,160	0,817
11	M102 [5]	800	0,99	190	45	70	15	79	0,908	0,736	1,003	1,292	0,912
12	M103 [5]	1000	0,95	213	45	70	15	84	0,718	0,812	1,342	1,069	1,101
13	M104 [5]	1200	0,99	189	45	70	15	101	0,778	0,734	1,501	1,106	1,428
14	L1 [79]	1000	2,1	410	30	106	50	380	0,764	0,772	0,616	1,110	0,764
15	L1 [79]	1000	3	450	30	106	50	610	0,782	0,566	0,590	0,996	0,782
16	L2 [79]	1498	2	376	30	106	50	600	0,921	0,776	0,894	1,343	0,921
17	L2 [79]	1498	3	402	30	106	50	905	0,867	0,535	0,836	1,081	0,867
18	1 [35]	850	2	355	33	102	56	275	0,788	0,731	0,459	1,118	0,788
19	2 [35]	850	2	349	38	91	56	265	0,773	0,642	0,466	1,036	0,773
20	V1/1 [83]	298	2,05	298	45	144	102	68	0,646	0,917	0,099	1,021	0,646
21	V1/2 [83]	298	2,1	283	45	144	102	70	0,684	0,872	0,096	1,054	0,684
22	V1/3 [83]	298	2	298	45	144	102	81	0,789	0,940	0,100	1,262	0,789
23	V2/3 [83]	600	3	279	45	144	102	235	0,810	0,606	0,175	1,060	0,810
24	CW3 [33]	440	3,26	284	45	250	45	171	0,726	0,976	0,218	1,184	0,726
25	CW4 [33]	440	2,97	222	45	250	45	154	0,918	0,947	0,198	1,475	0,918
26	CW5 [33]	440	2,97	222	45	250	63	141	0,841	0,947	0,156	1,350	0,841
27	I/5 [47]	1270	2	331	62	171	24	260	0,535	1,223	1,483	0,987	0,963

No	Test		h_w	t_w	f_{yw}	α	a_1	a_3	V_u	χ_u	λ_1	λ_2	V_w/V_{R1}	V_w/V_{R2}
	original	ref	mm	mm	Mpa	mm	mm	kN						
28	II/11	[47]	1270	2	225	62	171	24	220	0,666	0,974	1,267	1,085	0,935
29	121216A	[15]	305	0,64	676	45	38	25	50	0,656	1,165	0,583	1,177	0,656
30	121221A	[15]	305	0,63	665	55	42	33	46	0,623	1,298	0,501	1,190	0,623
31	121221B	[15]	305	0,78	665	55	42	33	73	0,798	1,048	0,475	1,352	0,798
32	121232A	[15]	305	0,64	665	63	50	51	41	0,546	1,741	0,391	1,255	0,546
33	121232B	[15]	305	0,78	641	63	50	51	61	0,692	1,403	0,365	1,386	0,692
34	121809A	[15]	305	0,71	572	50	20	14	63	0,880	0,509	0,829	1,078	0,880
35	121809C	[15]	305	0,63	669	50	20	14	55	0,740	0,620	0,924	0,978	0,740
36	121832B	[15]	305	0,92	562	63	50	51	53	0,581	1,113	0,328	1,018	0,581
37	122409A	[15]	305	0,71	586	50	20	14	58	0,791	0,515	0,839	0,973	0,791
38	122409C	[15]	305	0,66	621	50	20	14	58	0,803	0,570	0,880	1,026	0,803
39	122421A	[15]	305	0,68	621	55	42	33	43	0,578	1,162	0,475	1,036	0,578
40	122421B	[15]	305	0,78	638	55	42	33	61	0,695	1,027	0,466	1,165	0,695
41	122432B	[15]	305	0,78	634	63	50	51	49	0,562	1,395	0,363	1,122	0,562
42	181209A	[15]	457	0,56	689	50	20	14	81	0,795	0,708	1,446	1,111	1,373
43	181209C	[15]	457	0,61	592	50	20	14	89	0,933	0,602	1,312	1,219	1,382
44	181216C	[15]	457	0,76	679	45	38	25	119	0,873	0,984	0,839	1,430	0,873
45	181221A	[15]	457	0,61	578	55	42	33	62	0,666	1,250	0,706	1,244	0,666
46	181221B	[15]	457	0,76	606	55	42	33	98	0,806	1,027	0,684	1,350	0,806
47	181232A	[15]	457	0,6	552	63	50	51	52	0,594	1,692	0,542	1,340	0,594
48	181232B	[15]	457	0,75	602	63	50	51	80	0,671	1,414	0,535	1,349	0,671
49	181809A	[15]	457	0,61	618	50	20	14	82	0,823	0,615	1,341	1,085	1,262
50	181809C	[15]	457	0,62	559	50	20	14	78	0,852	0,576	1,270	1,093	1,200
51	181816A	[15]	457	0,63	592	45	38	25	75	0,761	1,108	0,821	1,329	0,761
52	181816C	[15]	457	0,74	614	45	38	25	96	0,800	0,961	0,803	1,294	0,800
53	181821A	[15]	457	0,63	552	55	42	33	56	0,610	1,182	0,684	1,104	0,610
54	181821B	[15]	457	0,74	596	55	42	33	93	0,798	1,046	0,683	1,351	0,798
55	181832A	[15]	457	0,61	689	63	50	51	53	0,477	1,859	0,603	1,145	0,477
56	181832B	[15]	457	0,75	580	63	50	51	79	0,687	1,388	0,525	1,368	0,687

No	Test		h_w mm	t_w mm	f_{yw} Mpa	α	a_1 mm	a_3 mm	V_u kN	χ_u	λ_1	λ_2	V_u/V_{R1}	V_u/V_{R2}
	original	ref												
57	241209A	[15]	610	0,62	606	50	20	14	71	0,536	0,599	1,765	0,699	1,292
58	241209C	[15]	610	0,63	621	50	20	14	79	0,573	0,597	1,780	0,746	1,400
59	241216A	[15]	610	0,63	592	45	38	25	76	0,578	1,108	1,096	1,009	0,656
60	241216B	[15]	610	0,79	587	45	38	25	133	0,813	0,880	1,032	1,259	0,848
61	241221A	[15]	610	0,61	610	55	42	33	77	0,587	1,284	0,968	1,114	0,587
62	241221B	[15]	610	0,76	639	55	42	33	127	0,742	1,055	0,938	1,261	0,742
63	241232A	[15]	610	0,62	673	63	50	51	69	0,469	1,808	0,792	1,104	0,469
64	241232B	[15]	610	0,76	584	63	50	51	101	0,645	1,374	0,701	1,276	0,645
65	Gauche	[22]	460	2	254	30,5	0	126	139	1,029	1,494	0,121	2,142	1,029
66	Droit	[22]	550	2	254	30,5	0	126	109	0,675	1,494	0,145	1,405	0,675

Wellstegträger

No	Test		h_w mm	t_w mm	f_{yw} Mpa	α	a_1 mm	a_3 mm	V_u kN	χ_u	λ_1	λ_2	V_u/V_{R1}	V_u/V_{R2}
	original	ref												
1	Sin1	[69]	1502	2,1	225	45	2w=155	40	370	0,9	0,38	1,11	1	1,04
2	Sin2	[69]	1501	2,1	225	45	2w=155	40	365	0,89	0,38	1,11	0,99	1,03
3	Sin3	[69]	1505	2,1	225	45	2w=155	40	353	0,86	0,38	1,11	0,95	1
4	B1	[44]	500	2,1	307	45	2w=155	40	177	0,95	0,3	0,42	1	0,95
5	B2	[44]	500	2,1	314	45	2w=155	40	182	0,96	0,31	0,42	1,01	0,96
6	C1	[44]	500	2	302	45	2w=155	40	171	0,98	0,32	0,42	1,04	0,98
7	C2	[44]	500	2,1	297	45	2w=155	40	172	0,95	0,3	0,41	0,99	0,95
8	V2_01	Ha	500	2,5	230	45	2w=155	40	220	1,33	0,21	0,35	1,33	1,33
9	V3_01	Ha	500	2,5	230	45	2w=155	40	222	1,34	0,21	0,35	1,34	1,34

Die grau hinterlegte Markierung beschreibt das Versagen (lokal bzw. global). Die Versuchsergebnisse werden bei der Auswertung zum Vergleich mit numerischen Studien herangezogen.

4.3 Entwicklung des FE Modells

4.3.1 Allgemeines

Für die Entwicklung eines geeigneten FE Modells der sinusförmigen Profilierungen werden die Versuchsergebnisse (Kapitel 4.2) herangezogen. Allerdings erfolgt wegen der begrenzten Anzahl der Prüfkörper je Versuchsreihe keine statistische Auswertung der durchgeführten Versuche. Vielmehr wird aus den Ergebnissen der Mittelwert gebildet.

Die an der BTU Cottbus durchgeführten Versuche mit trapezförmig profiliertem Steg eignen sich nicht zur Erstellung eines FE Modells. Aus diesem Grund werden extern durchgeführte Versuche [5] zur Modellbildung herangezogen.

4.3.2 FE Modell Wellstegträger

Geometrie und Material

Die Versuchskörper der Reihe V2 und V3 werden mit ihren geometrischen Abmessungen nachgebildet. Die Auflagerpunkte wurden mit den Freiheitsgraden 1 bis 6 fest gelagert. Des Weiteren wird entsprechend der Versuchsdurchführung die seitliche Verschiebung durch Festhalten des Freiheitsgrades 2 (y-Richtung) an den oberen Gurtanschlusspunkten des Steifenbleches behindert (Bild 4.10, Bild 4.11).

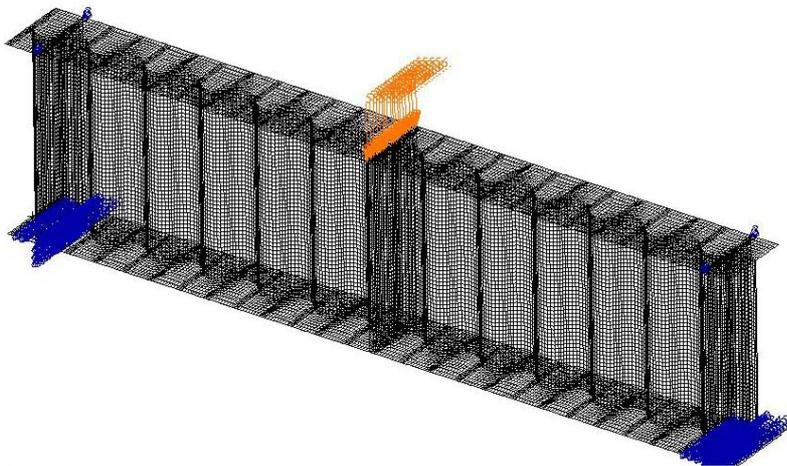


Bild 4.10: Nachgebildete Randbedingungen

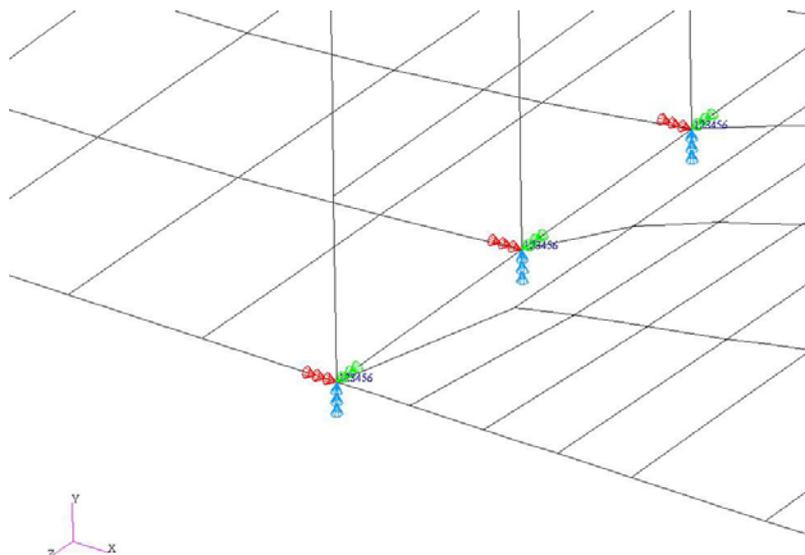


Bild 4.11: Lagerungsbedingung

Die Lasteinleitung erfolgt wie im Versuch über die Lasteinleitungssteife. Dabei wird die gesamte Last auf die Gurtbreite in Länge der Steife aufgebracht.

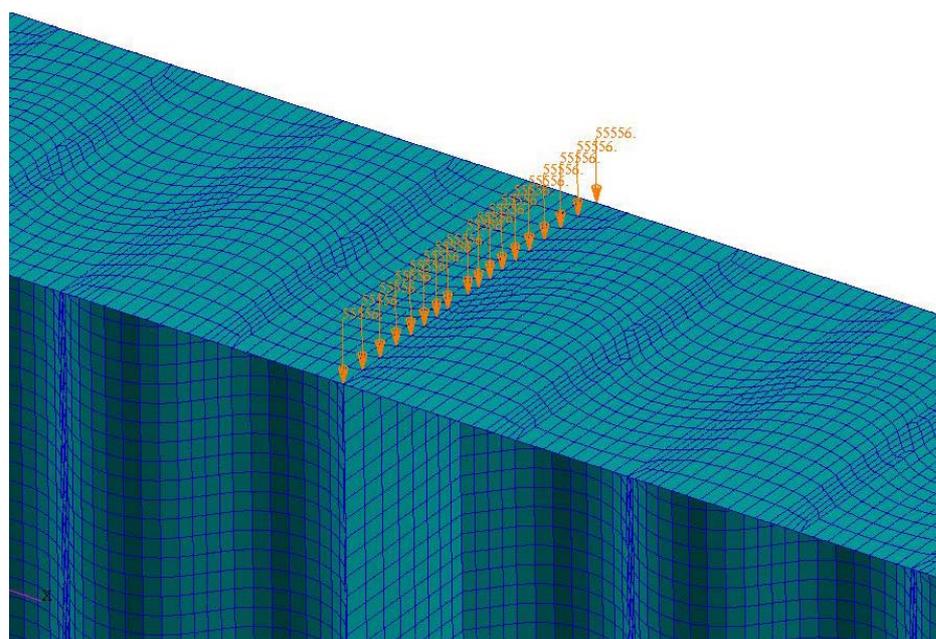


Bild 4.12: Lasteinleitung

Die Materialkennwerte des Steges werden als elastisch-plastisches Materialverhalten mit Verfestigung abgebildet. Dazu werden die Spannungs- Dehnungswerte aus den durchgeführten Zugversuchen verwendet. In Anlage A2 sind die für das FE Modell verwendeten Materialkennwerte zusammengefasst.

Die Materialkennwerte des Gurtes und der Steife hingegen werden als elastisch-plastisches, bilineares Materialverhalten entsprechend der Ergebnisse der Zugversuche abgebildet (Anlage 2).

Vergleichsweise wird das Materialverhalten des Stegbleches auch bilinear nachgebildet (**Modell: bilin**). Für das Modell bilin resultieren Verformungen die mehr als 100% von Versuchswerten abweichen und die maximale Traglast unterschätzen (Bild 4.13). Begründet werden kann dieses Ergebnis mit der Tatsache, dass Stegplastizieren Versagensursache ist und somit das ungenügend genaue Abbilden der Materialkennwerte zu falschen Ergebnissen führt.

Für die Weiterentwicklung des FE Modells werden für den Steg elastisch-plastisches Materialverhalten mit Verfestigung und für Flansche und Steifen ein elastisch-plastisches bilineares Verhalten zu Grunde gelegt.

FE Netz

Zur Vernetzung der erstellten Geometrie wurden S4R Schalenelemente verwendet. In Anlehnung an vorangegangene FE Parameterstudien am Lehrstuhl Stahlbau der BTU Cottbus wird vorerst eine Elementkantenlänge von 50-70mm für die Vernetzung der nachgebildeten Geometrie gewählt (**Modell: Mesh1**). Die Ergebnisse zeigen, dass mit Anwendung dieser Elementgröße lokale Instabilitäten nicht rechtzeitig erkannt werden konnten. Die Folge waren viel zu große Deformationen im Vergleich zu den durchgeführten Versuchen (Bild 4.13).

Grund für den Einfluss der Elementgröße auf die Traglast und die maximale Verformungen ist die Größe der lokalen Beulen. Wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, treten infolge des Plastizierens des Stegbleches lokale Stegbeulen auf, die sich hin zu globalen Stegbeulen entwickeln. Mit dem Entstehen der ersten Beulen ist der horizontale Ast der Traglastkurve erreicht. Das Erfassen der Stegbeulen kann nur mit einem hinreichend feinen Netz erreicht werden. Mit einer Verringerung der Elementkantenlänge auf ca. 16 mm werden annähernd realistische Ergebnisse erzielt (**Modell Mesh2**). Die maximalen Abweichungen der Verformungen betragen nun maximal 8,5%.

Grundlage für alle weiteren Betrachtungen bildet **Modell Mesh2**.

Zudem wurde geprüft, ob weitere Verbesserungen durch die Verwendung anderer Schalenelemente erzielt werden können. Die Schalenelemente S8R besitzen im Vergleich zu den Schalenelementen S4R 4 Integrationspunkte anstelle von einem. Bei der verwendeten Elementkantenlänge von 16 mm kann keine Verbesserung erzielt werden. Im Gegenteil, die Rechenzeit erhöhte sich enorm.

Im Rahmen einer von Dr. Peter Linde durchgeführten Studie zur Verwendung verschiedener Schalen- und Kontinuumselemente wird folgendes Ergebnis erreicht, Tabelle 4-5. Grundlage der Untersuchungen bildet eine FE Studie am Modell einer Schale mit unterschiedlicher Anzahl von Elementen. Leider sind diese Ergebnisse nicht veröffentlicht, sodass keine Referenz angegeben werden kann. Die prozentualen Abweichungen beziehen sich auf eine vergleichende Schale, deren Traglast im Versuch bestimmt wird.

Tabelle 4-5: FE Studie Elementvarianten (Dr. Peter Linde)

Element	2x2	4x4	8x8	16x16
SLS	9,50%	-7,08%	-2,69%	-0,93%
C3D8R	25,46%	1,50%	0,73%	0,04%
C3D8I	-83,65%	-40,43%	-3,79%	-0,31%
SC8R	31,12%	5,10%	1,68%	0,39%
S4R	30,36%	4,12%	0,59%	-0,03%
S8R	-0,67%	0,32%	0,01%	0,01%

Die hier verglichenen Elemente können im Programm ABAQUS zur Vernetzung von Schalen und Platten angewandt werden.

Das Ergebnis zeigt, dass sich die Elemente S8R mit vier Integrationspunkten sehr gut zur Bestimmung von Tragverhalten eignen. Die Verwendung von S4R Schalenelementen setzt ein hinreichend feines FE Netz voraus. Das Ergebnis der Studie zeigt, dass bei Verwendung eines genügend feinen Netzes (in diesem Fall) die Wahl der Elemente zweitrangig ist.

SLS	Solid-Like-Shell element of De Borst, 8 Knoten, 4 Integrationspunkte
C3D8I	Incompatible mode solid element, 8 Knoten, 1 Integrationspunkt
C3D8R	Reduced integration solid element, 8 nodes, 1 Integrationspunkt
SC8R	Continuum shell element, 8 nodes, 4 Integrationspunkte
S4R	Reduced integration shell element, 4 nodes, 1 Integrationspunkt
S8R	Reduced integration shell element, 8 nodes, 4 Integrationspunkte

Imperfektionen

Die Berücksichtigung von Vorverformungen erweist sich dann als sinnvoll, wenn Versuchswerte möglichst rechnerisch genau nachempfunden werden sollen. Sind geometrische und strukturelle Imperfektionen nicht oder nur teilweise bekannt, können diese Vorverformungen durch Ersatzimperfektionen berücksichtigt werden. Ersatzimperfektionen können auf der Grundlage von Ersatzkräften oder Ersatzverformungen affin zur ersten Eigenform in numerischen Berechnungen berücksichtigt werden. Eine weitere Möglichkeit zur Berücksichtigung der Vorverformungen ist die Verwendung von skalierten Versagensverformungen aus der numerischen Traglastrechnung. Beide Methoden werden durchgeführt und sind im Folgenden näher erläutert.

a) Ersatzimperfektion affin zur ersten Eigenform

Der geometrische und strukturelle Imperfektionseinfluss wird über geometrische Ersatzimperfektionen erfasst. Diese Ersatzimperfektionen werden nach DIN 18800 [11] grundsätzlich in die ungünstigste Richtung angesetzt. Dazu wird der niedrigste Eigenwert berechnet. Der ermittelte Eigenwert wird mit der jeweiligen Verformungsart gemäß [11] skaliert und für die Traglastberechnung als Vorverformung angesetzt.

Zur Berechnung der Eigenwerte wird der Solver „Bifurcation Buckle“ des Programms ABAQUS verwendet. Die errechneten Werte sind Multiplikationsfaktoren für die aufgebrachte Beanspruchung, bei welcher die kritische Beulspannung bzw. -last erreicht wird. Um diese Eigenwerte als geometrische Imperfektionen anzusetzen, müssen die dimensionslosen Eigenvektoren und die qualitativ richtigen Verformungsfiguren mit den Amplituden entsprechend DIN 18800 [11] Teil 2 skaliert werden. Der Stich der Amplitude für beulgefährdete Bauteile beträgt nach DIN 18800 Teil 3 $L/250$. Wobei L die Länge des Beulfeldes a für die Versuchsträger V1 –V3 mit 55 mm für lokales Beulen angenommen wird. Die maximale Vorverformung betrug somit 0,22 mm und wurde als Amplitude der Vorverformungen bei der Traglastberechnung angesetzt. Diese Vorverformungen stimmen qualitativ sowie quantitativ mit den real auftretenden Verformungen im Versagenszustand überein. In Anlage 2 ist die Programmierung zusammengefasst. Im Bild 4.13 sind die Traglastberechnungen bei Verwendung verschiedener Eigenwerte als Ersatzimperfektionen dargestellt (**Modelle: EW1 bis EW9**). Es ist deutlich zu sehen, dass die Verwendung des niedrigsten Eigenwertes zu den niedrigsten Traglasten führt. Diese Modelle wurden auf Grundlage des **Modells Mesh2** erstellt.

b) Ersatzimperfektion affin zur Versagensform

Zum Vergleich wurde eine numerische Berechnung durchgeführt und Vorverformungen in Form von skalierten Versagensverformungen verwendet. Dazu werden die bei der Traglastberechnung unmittelbar vor dem Versagen auftretenden Verformungen (Time Increment 61) ermittelt und für die eigentliche (zweite) Traglastberechnung verwendet (**Modell: with Imp**). Die Programmierung ist in Anlage A2 zusammengefasst.

Das **Modell: without Imp** wird auf Grundlage des **Modells Mesh2** erstellt. Es werden keine Imperfektionen berücksichtigt.

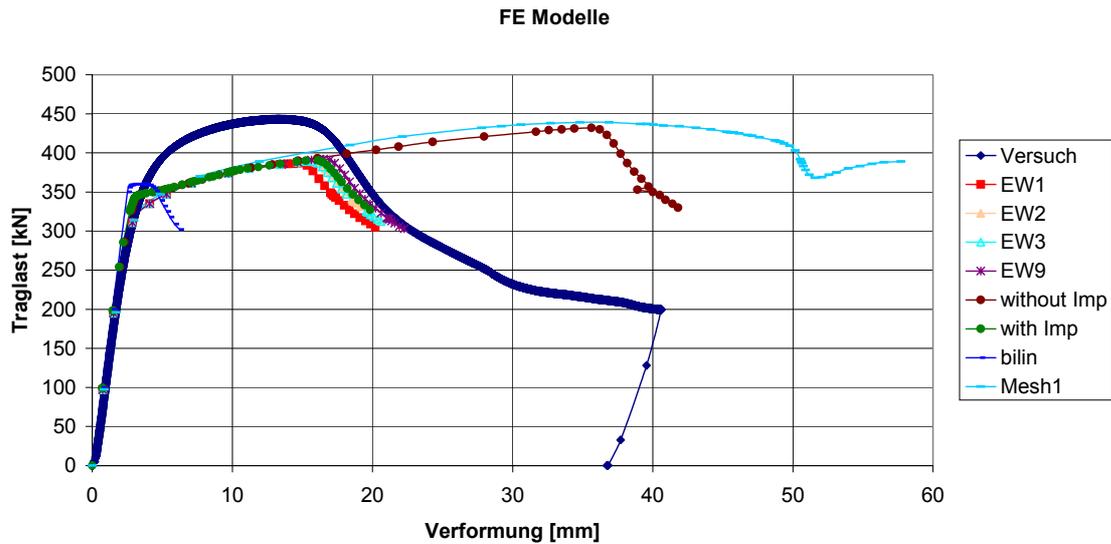


Bild 4.13: Entwicklung FE Modell sinusförmige Stegprofilierung

Zusammenfassend ist zu bemerken, dass die Wahl der Elementgröße und der Aufbau des FE Modells eine entscheidende Rolle spielen. Mit der Größe der Elemente werden die Ergebnisse (Versagensmodi) exakt abgebildet. Die Beulgrößen beeinflussen das Ergebnis ausschlaggebend. Erst mit einer Netzverfeinerung und Reduzierung der Elementkantenlänge von 50 mm auf 16 mm konnten annähernd vergleichbare Ergebnisse erzielt werden.

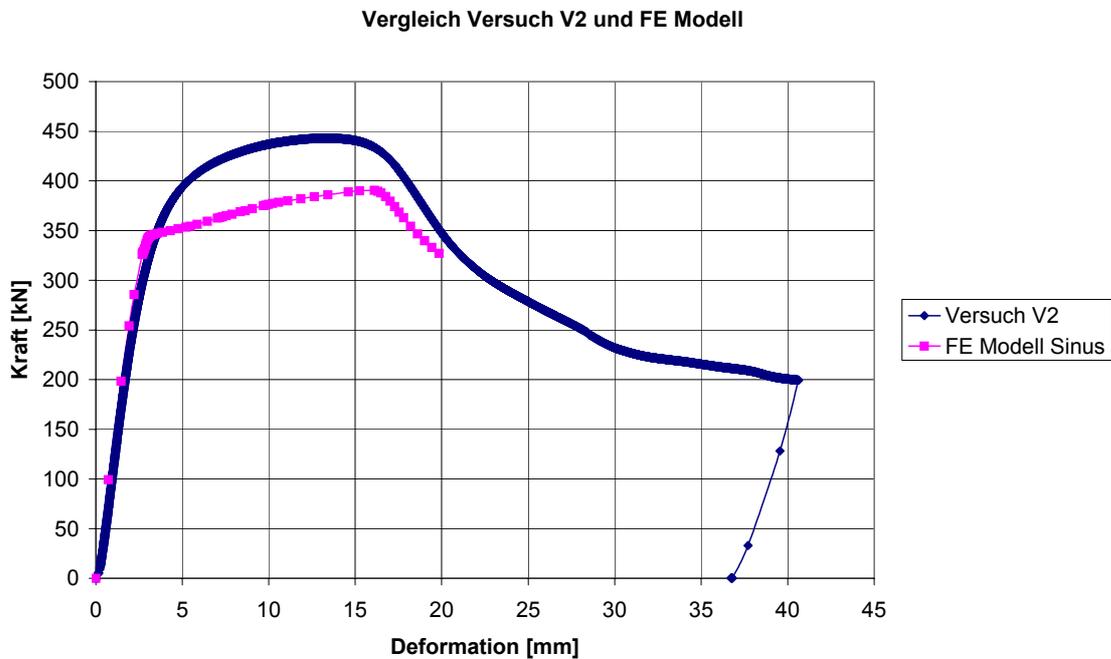


Bild 4.14: Vergleich FE Modell und Versuch

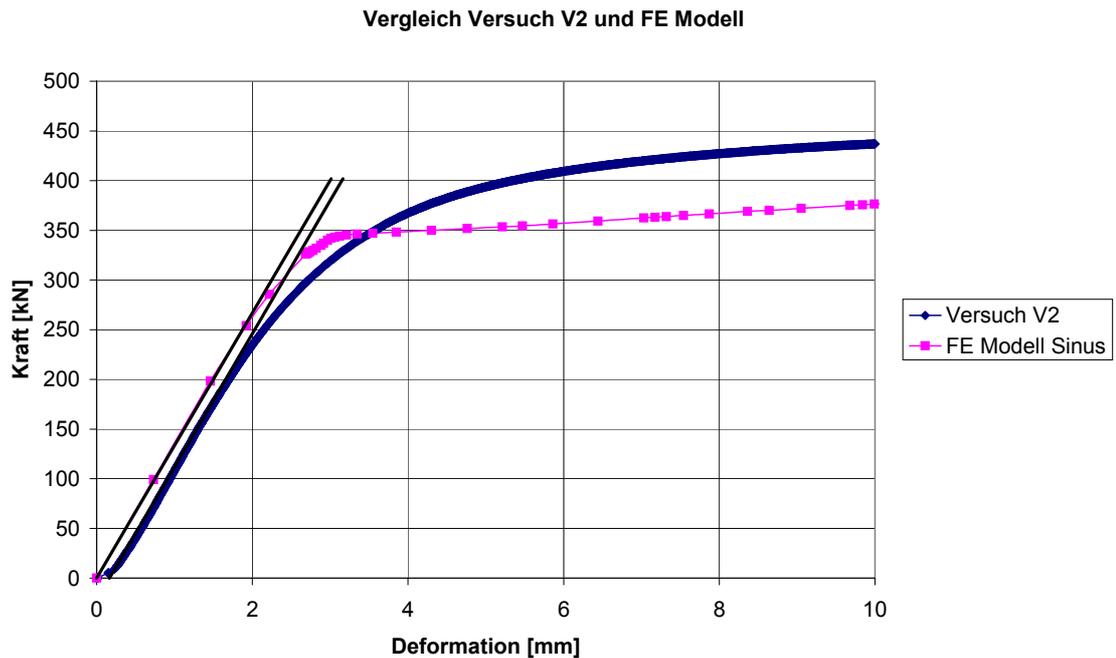


Bild 4.15: Vergleich FE Modell und Versuch im elastischen Bereich

Anhand Bild 4.15 ist sehr gut zu erkennen, dass im Bereich des elastischen Dehnungsanteils Versuch und FE Modell sehr gut übereinstimmen. Der Verschiebungsversatz resultiert aus einem anfänglichen Setzen des Kraftzylinders auf den Versuchskörper beziehungsweise den Lasteinleitungskörper.

Der Vergleich der maximalen Last und Verschiebungen zwischen Versuch und FE Modell weist einen Unterschied von 12% bzw. 8,5% auf. Unter Berücksichtigung des Versatzes ergibt sich eine Abweichung der maximalen Deformationen (Versuch und FE Modell) von 3-4%.

Im Folgenden sind maximale Verformungen und Spannungsplots vergleichend dargestellt.

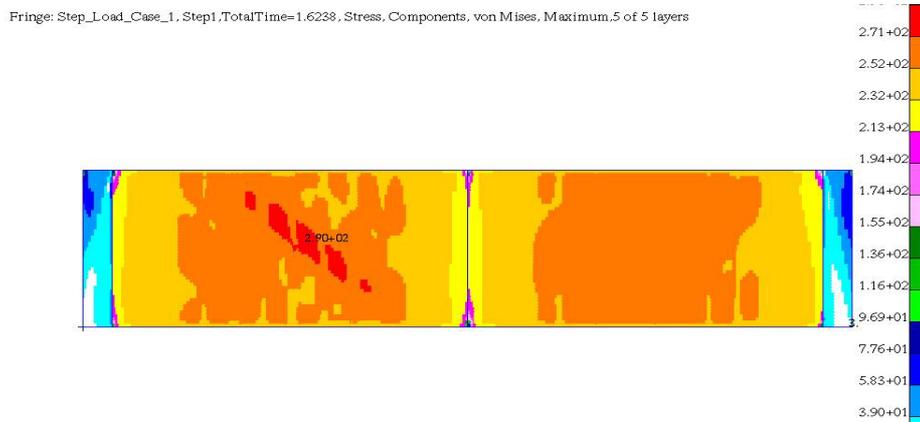


Bild 4.16: FE WT25_500_40_155_200_15 Mises Spannung (Inc 11) Traglast

Deform: Step_Load_Case_1, Step1, TotalTime=1.6238, Deformation, Displacements, , (NON-LAYERED)

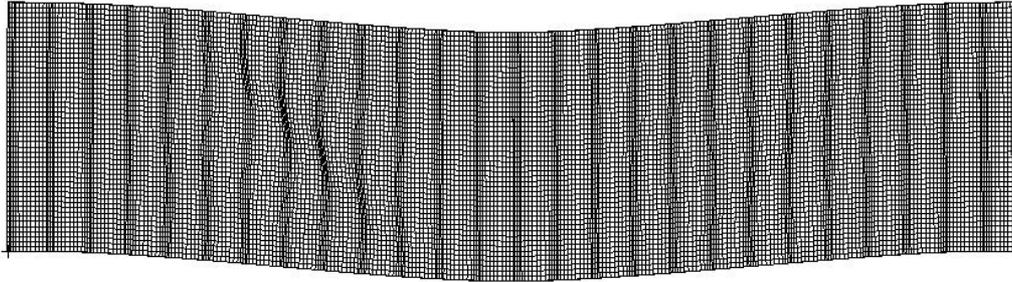


Bild 4.17: FE WT25_500_40_155_200_15 Deformation Magnitude (Inc 11) Traglast

Fringe: Step_Load_Case_1, Step1, TotalTime=2.1934, Stress, Components, von Mises, At SECTION_POINT_1
Deform: Step_Load_Case_1, Step1, TotalTime=1.8137, Deformation, Displacements, , (NON-LAYERED)

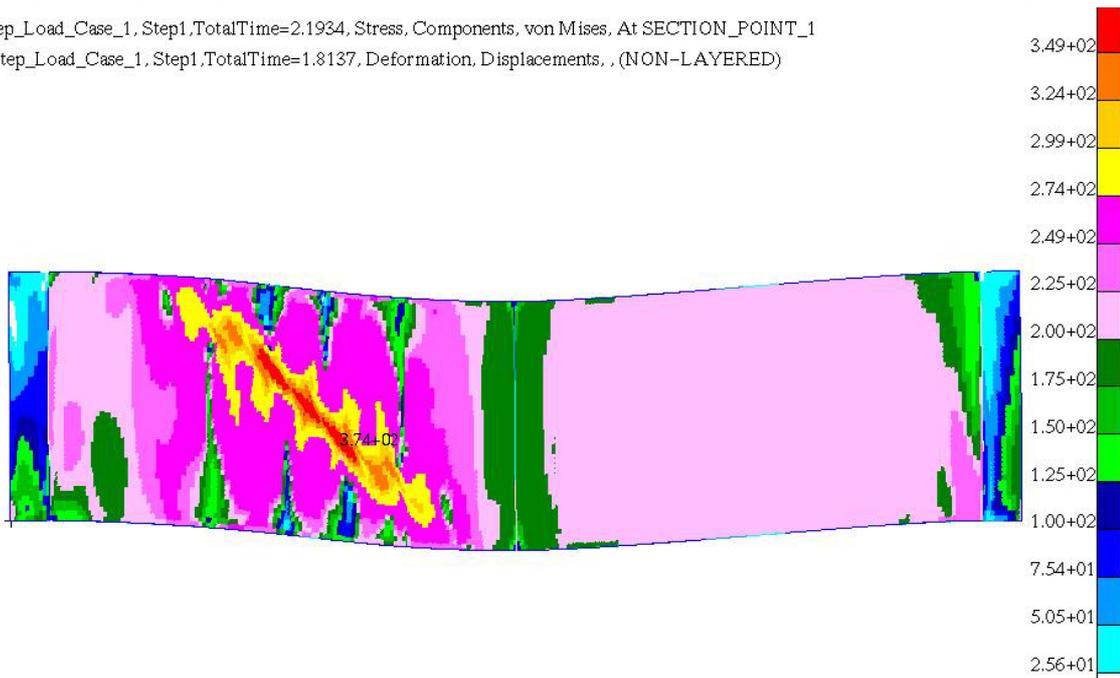


Bild 4.18: WT25_500_40_155_200_15 Mises Spannung (Inc 23) Nachbeulbereich

Deform: Step_Load_Case_1, Step1, TotalTime=2.1934, Deformation, Displacements, , (NON-LAYERED)

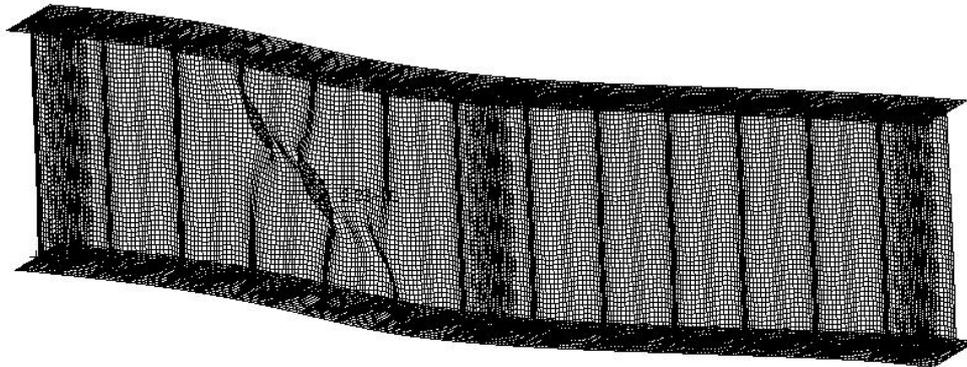


Bild 4.19: WT25_500_40_155_200_15 Deformation Magnitude (Inc 23) Nachbeulbereich



Bild 4.20: Versuchsträger V2_01 Nachbeulbereich

Die maximalen Abweichungen in den Ergebnissen der Traglast für die Prüfkörper betragen trotz der beschriebenen Untersuchungen zum FE Netz und Wahl von Rand- und Übergangsbedingungen 12 %. Das ist noch immer zuviel, die Ursachen liegen jedoch nicht in der FE-Netzgenerierung. Die vorhandenen Unterschiede zwischen Versuch und FE Rechnung können folgendermaßen erklärt werden:

- Beim Betrachten der ermittelten Materialkennwerte aus den Zugversuchen treten im elastischen sowie plastischen Bereich bis zu 5% Unterschiede in den Ergebnissen der einzelnen Proben auf. Diese Streuung beeinflusst die Ergebnisse erheblich.
- Der Schweißvorgang Gurt-Steg-Verbindung verändert den internen Spannungszustand. Die Verfestigung im Anschlussbereich kann sich je nach Beanspruchungsrichtung negativ oder positiv auf das Versagensverhalten des

Trägers auswirken. Dieser Einfluss wird in den numerischen Berechnungen nicht berücksichtigt und ruft ebenfalls Unterschiede in den Ergebnissen zwischen FE Simulation und Versuch hervor.

- Eine weitere Verbesserung kann durch die Anwendung anderer Fließkriterien erzielt werden. Bei den durchgeführten Untersuchungen wird die Querkrafttragfähigkeit der Träger untersucht. Isotropes Materialverhalten wird vorausgesetzt. In den durchgeführten Zugversuchen wird nur das Elastizitätsmodul und nicht das Schubmodul ermittelt. Es lag keine Information über die Walzrichtung des verwendeten Zugprobenmaterials vor. Die Walzrichtung beeinflusst die Materialkennwerte. Bei nicht ordnungsgemäßer Anwendung können Unterschiede bis zu 7-8% auftreten. Diese Aussage kann anhand von Untersuchungen von Dr. Peter Linde untermauert werden. (Anlage 2).
- Des Weiteren wirkt sich die Verfestigung des Materials in Folge des Vorgangs Kaltumformen traglaststeigernd auf die Versuchsträger aus.

Zur Materialkennwertbestimmung werden Zugproben aus Probeblechen der Trägercharge verwendet, dabei sind viele der genannten Einflüsse nicht berücksichtigt. Es wird vermutet, dass bessere Ergebnisse hätten erzielt werden können, wenn die Zugproben, den Versuchskörpern (vor der Versuchsdurchführung) direkt entnommen worden wären.

Aus diesem Grund wird beispielhaft das entwickelte Modell auf die Versuche von Kuchta [44] mit den zugehörigen Materialproben angewandt. Es kann bestätigt werden, dass das entwickelte FE Modell durchaus zufrieden stellende Ergebnisse liefert (Tabelle 4.6).

Tabelle 4.6: Vergleich Versuch Kuchta mit entwickelten FE Modell

	Versuch Kuchta [44]	FEM Kuchta [44]	FEM Hannebauer
WT2_500_40_155_200_15 B1	177,1 kN	177,8 kN	179 kN
WT2_500_40_155_200_15 B2	181,7 kN	181,7 kN	183 kN

4.3.3 FE Modell Trapezstegträger

Zur Validierung des verwendeten FE Modells für Trapezstegträger werden die von Luo/Edlund in [58] dokumentierten Versuche untersucht. Die Versuche selbst werden von Leiva und Bergfelt durchgeführt [5].

Tabelle 4-7: Vergleich maximale Traglast FE und Versuch

Girder	hw	t _w	b _f	t _f	2w	a3	a1	a4	t _{yf}	V _U	E	λ _{1, EN}	λ _{2, EN}	χ _u	V _u /V _{R1}	V _u /V _{R2}
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[N/mm ²]	[kN]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
B3 Test	600	2,62	200	15	380	50	140,00	50	317	246,00	210000	0,72	0,32	0,86	1,20	0,86
B3 FEM	600	2,62	200	15	380	50	140,00	50	317	242,00	210000	0,72	0,32	0,84	1,18	0,84
B1 Test	600	2,10	200	15	380	50	140,00	50	341	208,00	210000	0,93	0,35	0,84	1,33	0,84
B1 FEM	600	2,10	200	15	380	50	140,00	50	341	200,50	210000	0,93	0,35	0,81	1,29	0,81
M101 Test	600	1,00	200	15	170	15	70,00	15	189	53,00	210000	0,73	0,75	0,81	1,14	0,81
M101 FEM	600	1,00	200	15	170	15	70,00	15	189	53,50	210000	0,73	0,75	0,82	1,16	0,82
M103 Test	1000	0,95	200	15	170	15	70,00	15	213	84,00	210000	0,81	1,34	0,72	1,07	1,10
M103 FEM	1000	0,95	200	15	170	15	70,00	15	213	86,00	210000	0,81	1,34	0,74	1,10	1,13

Dabei werden die in [58] angegebenen Materialkennwerte und Randbedingungen berücksichtigt. Lou/Edlund führen ebenfalls numerische Berechnungen zu diesen Trägern durch. Beim Vergleich der FE Ergebnisse zwischen dem Modell Lou/Edlund sowie des hier beschriebenen Modells (welches im Folgenden Modell Hannebauer genannt wird) kann eindeutig festgestellt werden, dass beide numerischen Modelle Stärken und Schwächen aufweisen. Lou/Edlund legen große Aufmerksamkeit auf die Richtigkeit der Ergebnisse im Nachbeulverhalten. Im Vergleich dazu beschreibt das Modell Hannebauer die Traglast bei Traglast sehr genau. Lou/Edlunds numerische Ergebnisse weisen bei Traglast im Vergleich zum Versuch Differenzen von weit mehr als 10% auf [58]. Tabelle 4-7 vergleicht die Versuchsergebnisse und die numerischen Ergebnisse (Modell Hannebauer). Die Unterschiede betragen nur wenige Prozente.

Im Folgenden werden Eigenwerte und Verformungen der simulierten Versuchsträger dargestellt und anschließend mit den Versuchen verglichen.

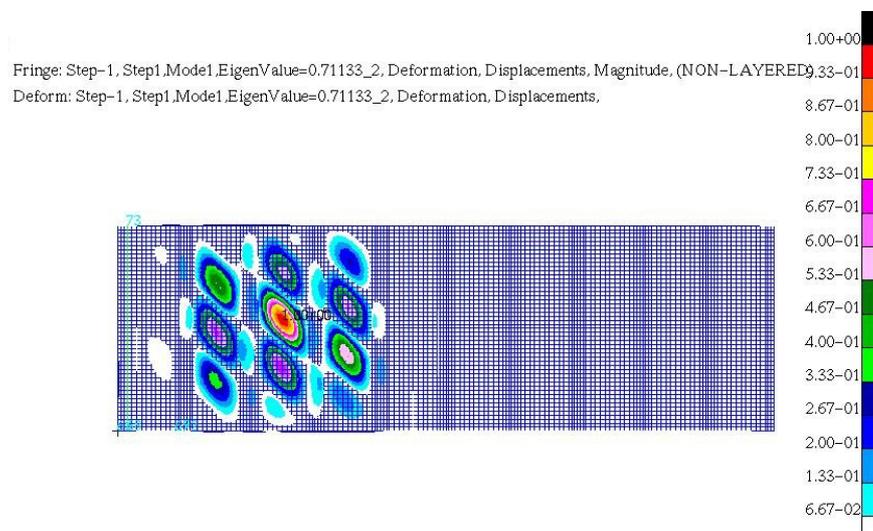


Bild 4.21: Erste Eigenform (FEM Hannebauer) des Versuchsträger B1 [54]

Deform: Step-1, Step1, TotalTime=0.44646, Deformation, Displacements, , (NON-LAYERED)

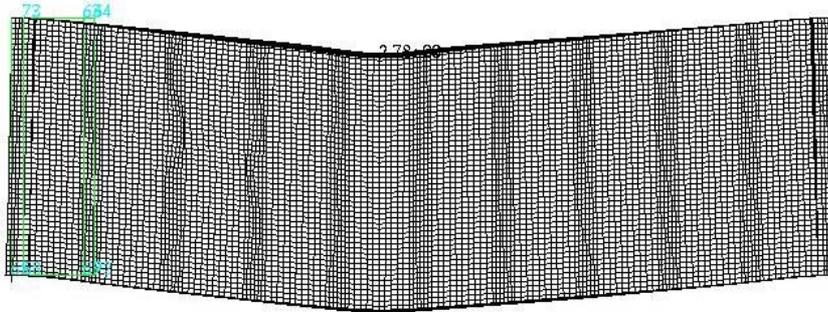


Bild 4.22: Verformungsplot bei Traglast (FEM Hannebauer) Versuchsträger B1 [54]

Deform: Step-1, Step1, TotalTime=0.53545, Deformation, Displacements, , (NON-LAYERED)

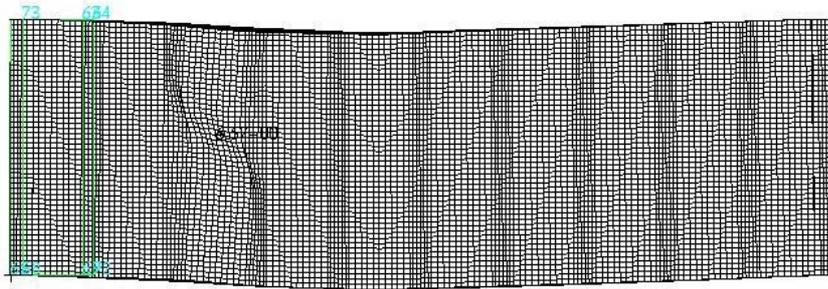


Bild 4.23: Verformungsplot im Nachbeulbereich (FEM Hannebauer) Versuchsträger B1 [54]

Deform: Step-1, Step1, TotalTime=0.79991, Deformation, Displacements, , (NON-LAYERED)

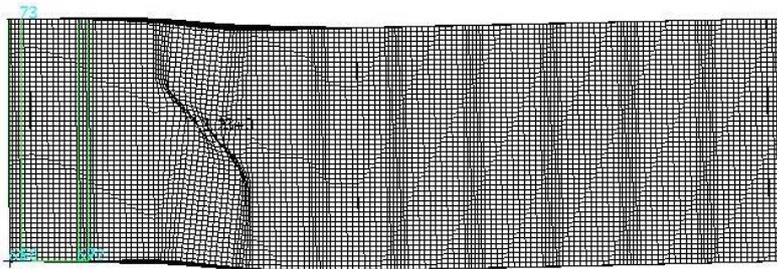


Bild 4.24: Verformungsplot im Nachbeulbereich (FEM Hannebauer) Versuchsträger B1 [54]

Fringe: Step-1, Step1, Model1, EigenValue=1.3194, Deformation, Displacements, Magnitude, (NON-LAYERED)
Deform: Step-1, Step1, Model1, EigenValue=1.3194, Deformation, Displacements,

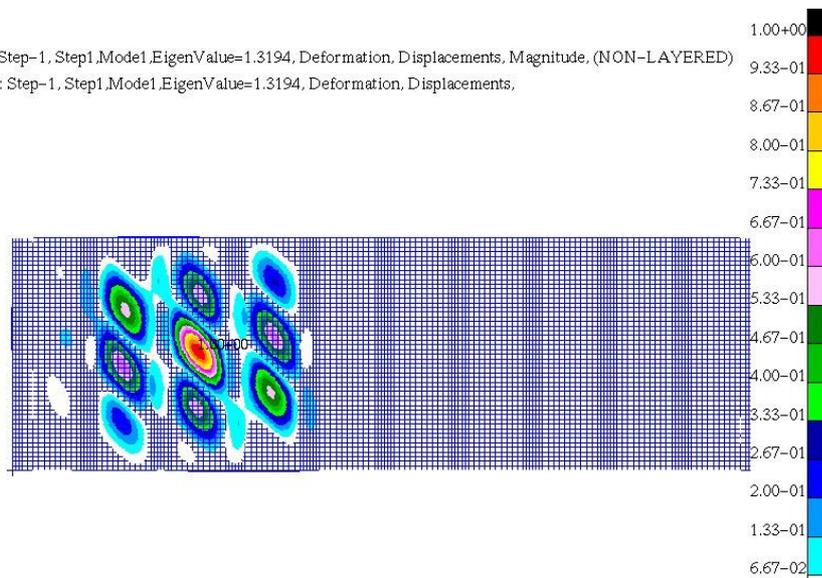


Bild 4.25: Erste Eigenform (FEM Hannebauer) Versuchsträger B3 [54]

Deform: Step-1, Step1, TotalTime=0.43262_2, Deformation, Displacements, , (NON-LAYERED)

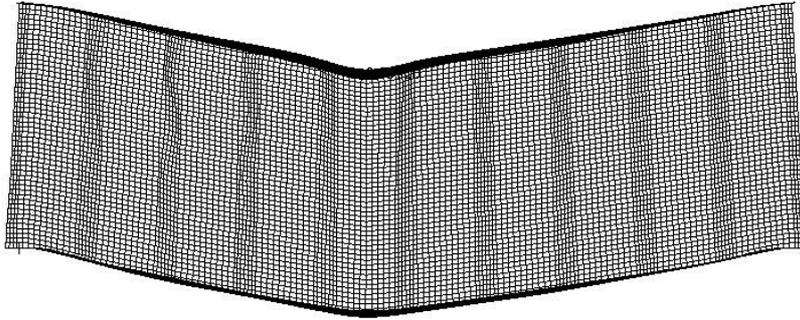


Bild 4.26: Deformationsplot Traglast (FEM Hannebauer) Versuchsträger B3 [54]

Deform: Step-1, Step1, TotalTime=0.45635, Deformation, Displacements, , (NON-LAYERED)

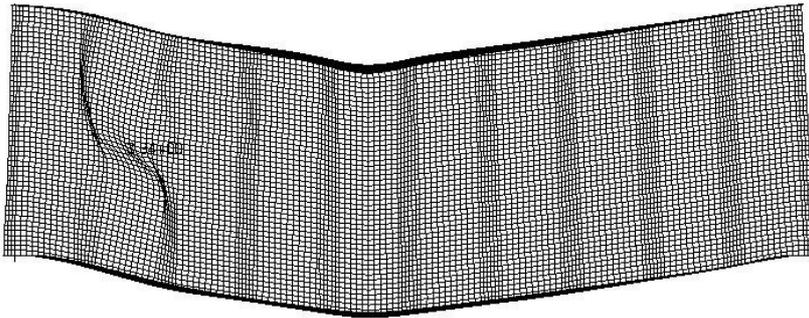


Bild 4.27: Deformationsplot im Nachbeulbereich (FEM Hannebauer) Versuchsträger B3 [54]

Deform: Step-1, Step1, TotalTime=0.66992, Deformation, Displacements, , (NON-LAYERED)

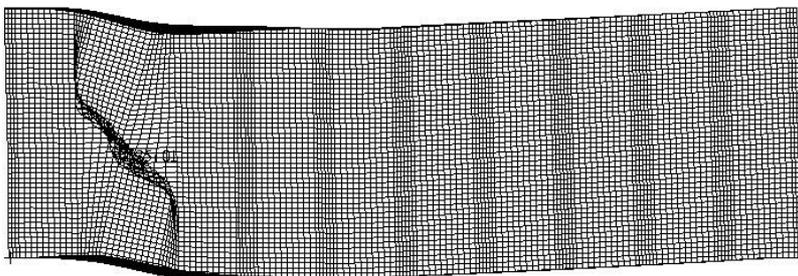


Bild 4.28: Deformationsplot im Nachbeulbereich (FEM Hannebauer) Versuchsträger B3 [54]

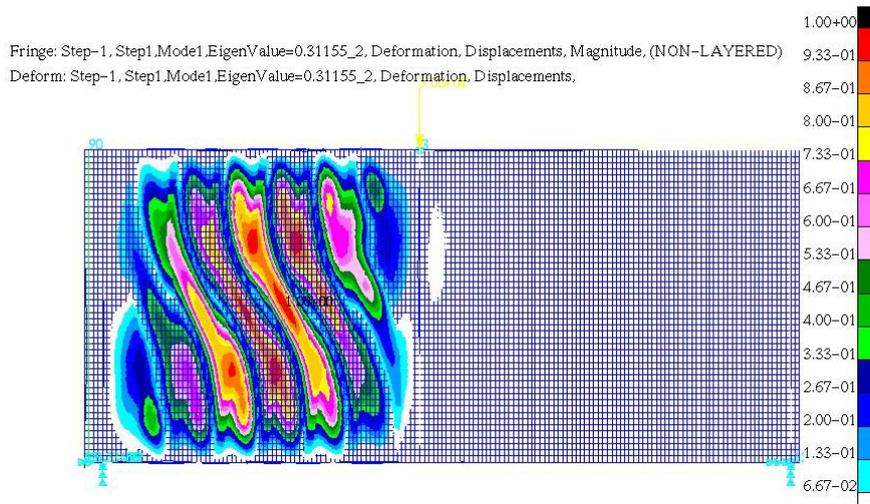


Bild 4.29: Erste Eigenform (FEM Hannebauer) Versuchsträger M101 [54]

Deform: Step-1, Step1, TotalTime=0.14899, Deformation, Displacements, , (NON-LAYERED)

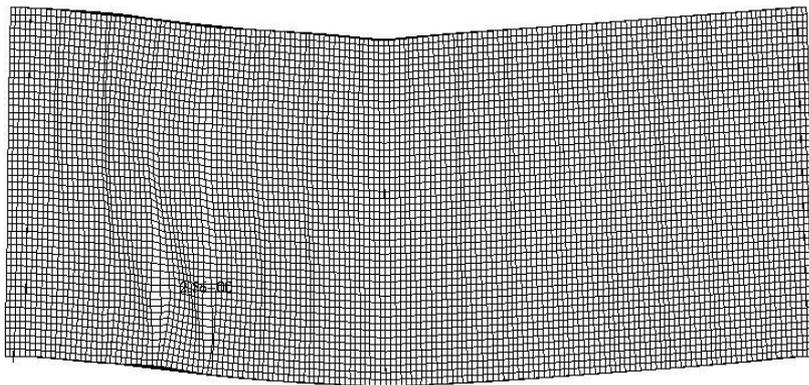


Bild 4.30: Deformationsplot Traglast (FEM Hannebauer) Versuchsträger M101 [54]

Deform: Step-1, Step1, TotalTime=0.3332, Deformation, Displacements, , (NON-LAYERED)

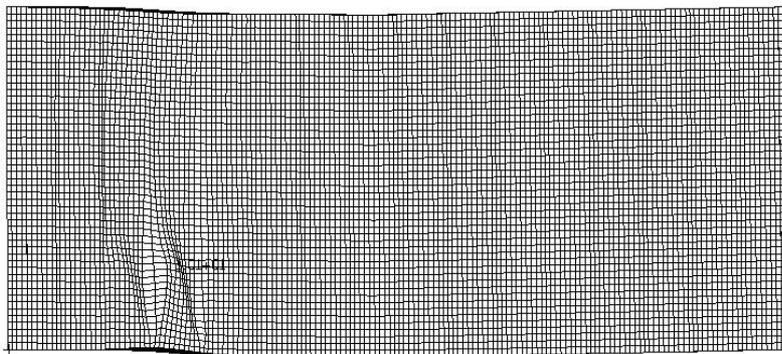


Bild 4.31: Deformationsplot Traglast (FEM Hannebauer) Versuchsträger M101 [54]

Deform: Step-1, Step1, TotalTime=1.1351, Deformation, Displacements, , (NON-LAYERED)

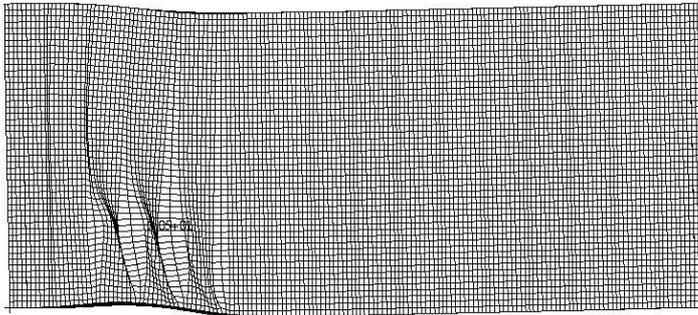


Bild 4.32: Deformationsplot im Nachbeulbereich (FEM Hannebauer) Versuchsträger M101 [54]

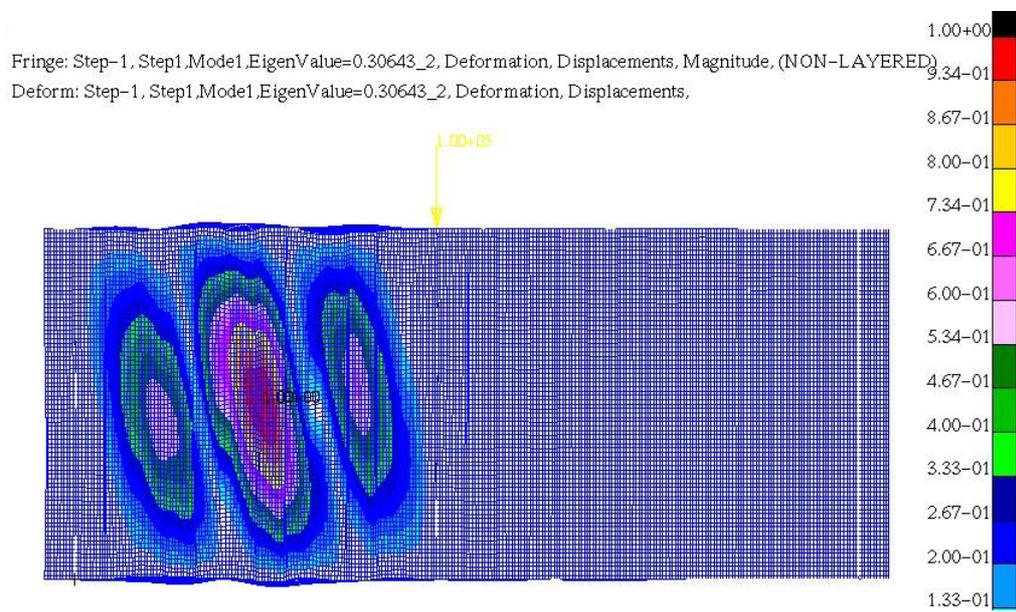


Bild 4.33: erste Eigenform (FEM Hannebauer) Versuchsträger M103 [54]

Deform: Step-1, Step1, TotalTime=0.17246, Deformation, Displacements, , (NON-LAYERED)

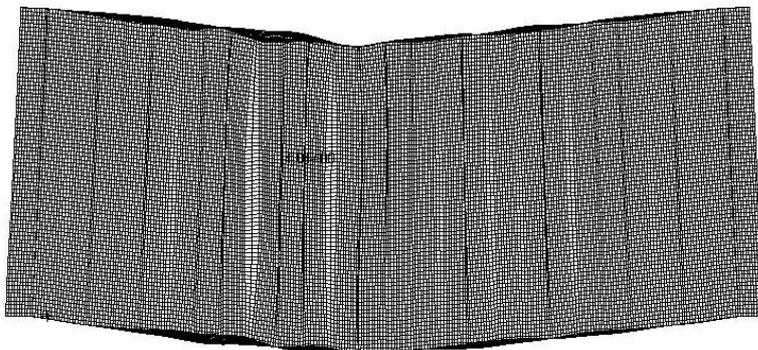


Bild 4.34: Deformationsplot Traglast (FEM Hannebauer) Versuchsträger M103 [54]

Deform: Step=1, Step1, TotalTime=0.18288, Deformation, Displacements, (NON-LAYERED)

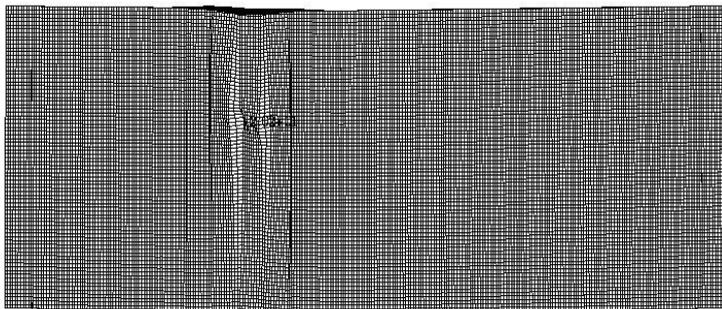


Bild 4.35: Deformationsplot im Nachbeulbereich (FEM Hannebauer) Versuchsträger M103 [54]

Die numerischen Modellierungen der Träger B1, B3 sind durch lokales Stegbeulen bei Traglast gekennzeichnet, die sich im Nachbeulbereich hin zu globalen Beulen entwickeln bis die Resttragfähigkeit gänzlich verloren geht. Dabei ist auffällig, dass sich die globalen Beulen nicht über die gesamte Trägerhöhe erstrecken. Es handelt sich um eine Interaktion zwischen lokalem und globalem Beulen. Die numerischen Ergebnisse der Träger M101 zeigen, dass bei Traglast zunächst lokale Beulen entstehen, die sich hin zu globalen entwickeln. Jedoch auch hier ist auffällig, dass sie sich nicht über die gesamte Steghöhe erstrecken. Es liegt demzufolge eine Interaktion der Beulformen vor. Träger M103 kann als Interaktion zwischen lokalem und globalem Beulen verstanden werden. Bei Traglast sind geringfügige lokale Beulen zu erkennen. Im Nachbeulbereich ist ein eindeutiges globales Schubbeulversagen sichtbar. Die Beulform erstreckt sich über die gesamte Steghöhe.

Vergleichend sind die Beulformen, Traglastverhalten der Versuchsträger B1, B3, M101 und M103 beschrieben.

Die Versuchsträger B1 und B3 versagen infolge lokalen Beulens. Nach Erreichen der Traglast entstehen über das Stegblech verteilt viele lokale Beulen, die das Nachbeulverhalten beschreiben und sich hin zu einer Stegbeule entwickeln, die als Interaktion zwischen lokal und global verstanden wird. Auch hier erstreckt sich die Beulform nur über einen Bereich der Stegblechhöhe. Der Vergleich der Beulformen bei Versuch und FE Modell ähneln sich sehr stark bei Traglast sowie im Nachbeulbereich. Versuchsbilder sind in [58] ersichtlich. Die durchgeführten Versuche von Leiva und Bergfelt [5] (M101 und M103) werden von Lou in [58] mit C1 und C3 bezeichnet. Der Vergleich der Beulformen M101 zeigt grundsätzlich dasselbe Verhalten: lokale Beulen, die sich im Nachbeulbereich hin zu globalen entwickeln. Lediglich der Ort der ersten Beulen variiert. Die ersten Beulen des Versuchsträgers treten in der Nähe des Lasteinleitungsbereiches auf. In den numerischen Berechnungen treten die ersten Beulen etwa in der Mitte eines Trägerfeldes auf. Diese Unterschiede lassen sich mit den gewählten Vorverformungen erklären. Der Versuchsträger M103 versagt bei Traglast

infolge lokaler Stegbeulen. Im Nachbeulbereich entwickeln sich globale Beulen, die abweichend von den numerischen Berechnungen sich nicht über die gesamte Steghöhe erstrecken. Das stellt einen Unterschied zum numerischen Modell dar. Es wird vermutet, dass lokales und globales Beulen dieses Trägers sehr eng bei einander liegen (numerische Eigenwertberechnungen bestätigen die Vermutung) und demzufolge Unterschiede im Traglastverhalten zwischen Versuch und FE Modell auftreten können und erklärbar sind.

4.4 Parameter der Studie und Grundlegendes

4.4.1 Parameter der Studie

Um eine Aussage über den Einfluss der Stegprofilierung auf die Querkrafttragfähigkeit zu treffen, müssen sämtliche Einflussparameter untersucht werden. Es wurden dazu zwei Parameterstudien (A und B) geführt.

Parameterstudie A umfasst folgende geometrische Varianten der Gurt-, Steg- sowie Profilierungsabmessungen. Für den Steg wurden die Höhen 500 mm, 1000 mm, 1500 mm, Stegdicken 2 mm, 2,5 mm und 3 mm, Gurtbreiten 200 mm, 300 mm, Gurtdicken 15 mm, 25 mm, 35 mm und die Abmessungen der Profilierungen innerhalb der Grenzbereiche für die Wellenlänge von 155 mm bis 380 mm und Wellenamplitude 40 mm bis 120 mm angenommen. Die Wahl der genannten Wertebereiche für den Steg, Gurt und die Profilierung richtete sich nach den Grenzbereichen der derzeit auf dem Markt erhältlichen profilierten Träger. Sämtliche Stegprofilierungen und die dazugehörigen Querschnittswerte sind in Anlage A3 zusammengefasst.

TT2_500_40_155_200_25

Darin bedeuten nach der Reihenfolge und mit Bindestrichen getrennt:

- Parameterreihe TT – Trapezsteg, WT – Wellsteg und zugehörige Stegdicke t_w
- Steghöhe h_w
- Wellenamplitude a_3
- Wellenlänge $2w$
- Gurtbreite b_f
- Gurtdicke t_f

Parameterstudie B untersucht gezielt den Einfluss der Spreizung als auch die gegenseitig aussteifende Wirkung der ebenen Blechbereiche auf die Querkrafttragfähigkeit von Trapezstegträgern.

Konstante Parameter sind die Steghöhe $h_w = 500$ mm, Trägerlänge $L = 2000$ mm, Gurtbreite $b_f = 200$ mm, Gurtdicke $t_f = 15$ mm und Blechlänge $a_2 = 100$ mm. Variiert

werden die Stegdicke $t_w = \{1;1,5;2;3\}$ mm, Spreizung $\alpha = \{15;20;25;30;35;45;75\}^\circ$ und die Blechlängen $a_1 = \{50;100;200\}$ mm.

Konstante Größen werden in der Trägerbezeichnung nicht verwendet, damit ergibt sich folgende Bezeichnung der Träger:

TT1_15_50

Darin bedeuten in der Reihenfolge mit Bindestrichen getrennt: TT1 – Trapezstegträger, Stegdicke t_w (z.B. $t_w = 1$ mm); Spreizung α (z.B. $\alpha = 15^\circ$) und Blechlänge a_1 (z.B. $a_1 = 50$ mm).

4.4.2 Grundlegendes zu den FE-Berechnungen

Zur Untersuchung des Trag- und Beulverhaltens werden zwei Berechnungsverfahren durchgeführt. Mit dem Programm ABAQUS wird eine Beullastberechnung durchgeführt (Solver BUCKLE) sowie eine Berechnung, die das Strukturverhalten im Allgemeinen beschreibt (Solver STATIC, NLGEOM).

Bei der Betrachtung der Eigenformen, die mit Hilfe des Solvers BUCKLE bestimmt werden, stellt die erste Eigenform stets die Verzweigungslast dar und beschreibt das elastische Beulen. Weitere berechnete Eigenformen können Auskunft über das Nachbeulverhalten geben, somit auch inelastisches Beulen beschreiben. Für ein genaues Beschreiben des inelastischen Beulens dient eine nichtlineare Traglastberechnung, wobei das Materialverhalten erfasst wird.

Für den Vergleich des Beulverhaltens mit analytisch ermittelten, kritischen Beulspannungen, wird stets die erste Eigenform der numerischen Beullastberechnung ausgewertet. Bei der Beullastberechnung werden die Beullasten unabhängig vom Materialverhalten (Fließgrenze) bestimmt. Ist die ermittelte Beullast im elastischen Bereich, so wird von elastischem Beulen gesprochen. Das Konzept des elastischen Beulens sollte nur für theoretische, kritische Spannungen angewandt werden. Befindet sich die Beullast im inelastischen Bereich hat die Beullast bzw. Beulspannung die theoretische, kritische Beulspannung überschritten und kann unter- sowie oberhalb der Fließgrenze des Materials liegen. In diesem Fall wird von inelastischen Beulen gesprochen. Die Versagensform des inelastischen Beulens, ermittelt mit der Beullastberechnung (Solver BUCKLE), kann von der Versagensform der Struktur abweichen (siehe Kapitel 4.5 und 4.6).

Des Weiteren wird die Beullastberechnung zur Berechnung der Ersatzimperfektionen genutzt. Dabei wird nicht nur die jeweils erste Eigenform verwendet, sondern sämtliche Eigenformen, die verschiedene Beularten aufzeigen (z.B. lokales und globales Stegbeulen). Die Berechnung der Ersatzimperfektion ist ausführlich in Kapitel 4.2.3 beschrieben. Anschließend werden die ermittelten skalierten Imperfektionen in Form von Vorverformungen auf die Geometriedaten der Eingabedateien angewandt. Geometrische Nichtlinearitäten (z.B. Zulassung großer Verformungen) aber auch Materialnichtlinearitäten werden bei der nichtlinearen Traglastberechnung

berücksichtigt. ABAQUS bietet verschiedene Möglichkeiten, das Strukturverhalten bis hin zum Versagen schrittweise zu beschreiben. Ein Verfahren, das statische Gleichgewicht bis zum endgültigen Versagen der Struktur aufrecht zu erhalten, ist das Riks-Verfahren (Pfadverfolgungsverfahren). Dabei ist es möglich, die Last über den Wert der eigentlichen Belastung zu steigern und somit das Versagensverhalten darzustellen. Beim Riks-Verfahren wird die Belastungsänderung in Abhängigkeit des Last-Verschiebungsverhältnisses gesteuert. Der Anfangswert der Belastung wird in der Eingabedatei vorgegeben. Dabei wird die skalare Größe der Bogenlänge zwischen zwei Inkrementen automatisch dem Lastschrittalgorithmus angepasst und ein mögliches plötzliches Auftreten des Versagens (z.B. Lastverzweigungsproblem) verhindert. Das Versagen wird allmählich angekündigt. Die sich einstellende Lastverformungskurve stellt das schrittweise Belasten der Struktur dar und beschreibt das Strukturverhalten. Mit Erreichen des Traglastmaximums erfolgt die Entlastung. Dabei können die Verformungen abnehmen oder ansteigen. Tritt kein Versagen der gesamten Struktur auf, stabilisiert sich das System bzw. das Material verfestigt sich. Danach folgt eine erneute Laststeigerung und ein zweites Lastmaximum wird erreicht. Bis zum endgültigen Versagen, kann dieser Vorgang mehrmals wiederholt werden. Hauptaugenmerk der Untersuchungen zur Querkrafttragfähigkeit profilierter Träger ist die Beurteilung des Tragverhaltens bei Traglast im elastischen sowie inelastischen Bereich. Detaillierte Untersuchungen im Nachbeulbereich wie Lou/Edlund [58] sie durchgeführt haben, ist nicht Schwerpunkt dieser Untersuchungen.

4.5 Ergebnisse der FE Parameterstudie – Beullastberechnung

4.5.1 Allgemeines zu den Beulformen

Wie auch schon Lou/Edlund in experimentellen und numerischen Untersuchungen feststellen, können bei Trägern mit profilierten Stegen nach [58] drei Beularten beschrieben werden (Bild 4.36).

- a) lokales Beulen: Schubbeulen erfolgt in einem ebenen Bereich des Bleches (z.B. a_1) zwischen zwei Faltungen und ist auf diesen Bereich streng begrenzt (Bild 4.36 a).
- b) zonales Beulen: eine Mischform bzw. Interaktion von lokalen und globalen Beulen. Die Schubbeule erstreckt sich über mehrere Falten, nimmt jedoch nicht die gesamte Steghöhe ein (Bild 4.36 b).
- c) globales Beulen: Schubbeulen erstreckt sich über mehrere Blechfalten und nimmt die gesamte Steghöhe ein (Bild 4.36 c).

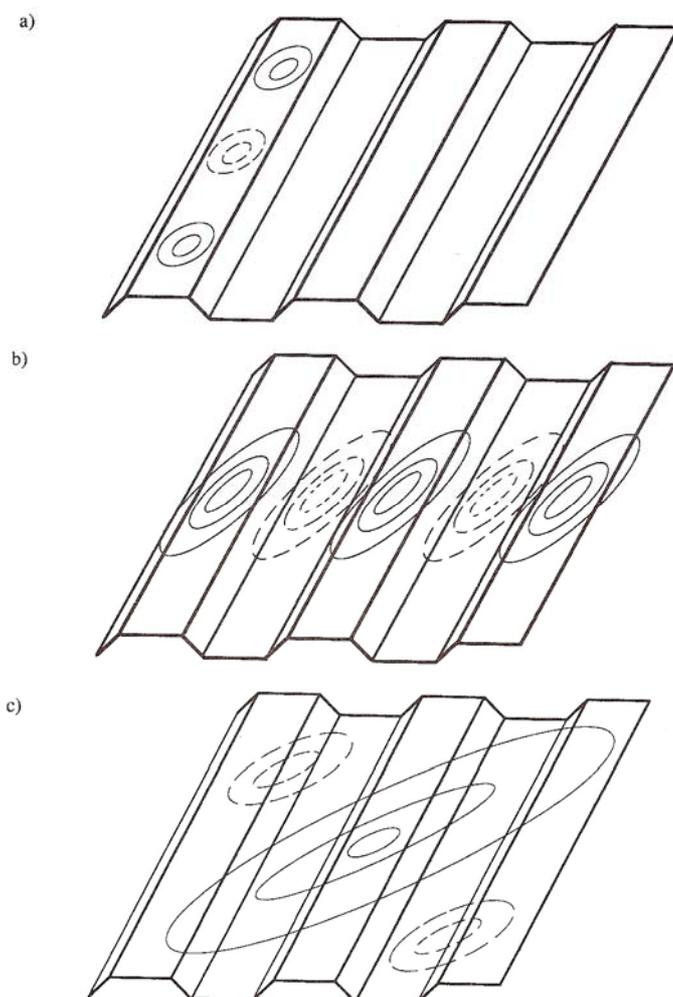


Bild 4.36: Beularten nach [58]

4.5.2 Beulformen der Parameterstudie

Lou/Edlund haben die Beulformen ausschließlich an trapezförmig profilierten Stegen untersucht. Die Auswertung der Parameterstudie zeigt, dass die Beulformen von trapez- und sinusförmig profilierten Stegen nicht in allen Bereichen den Definitionen von Lou/Edlund entsprechen. Auf Grundlage der Ergebnisse der Parameterstudie werden die Beularten wie folgt beschrieben.

Lokales Schubbeulen -Trapezstegträger

Trapezförmige Profilierungen sind durch scharfkantige Faltungen definiert. Geometrisch gesehen, eignen sich die Faltungen, um das profilierte Blech innerhalb dieser Grenzen in ebene Bereiche einzuteilen. Lokales Beulen erfolgt innerhalb dieser Geometriegrenzen. Diese Beulform bestätigt sich bei vielen Trägern der Parameterstudie und die Definition entsprechend Lou/Edlund für das lokale Beulen von Trapezstegträgern kann bestätigt werden (Bild 4.37).

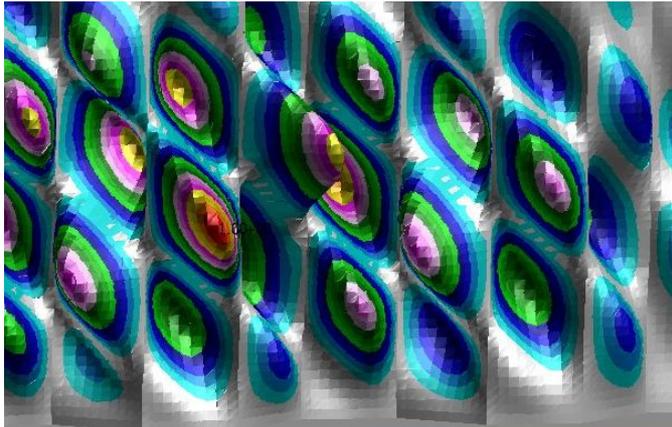


Bild 4.37: Lokales Beulen Trapezsteg

Lokales Schubbeulen - Wellstegträger

Sinusförmige Profilierungen hingegen ermöglichen keine geometrisch konkrete Einteilung in ebene Blechabschnitte. Die Faltung ist sanft und geht mit einer steten Richtungsänderung einher. Klar definierte Bereiche, wie es für die Trapezstegträger üblich ist, sind nicht möglich. Lokales Beulen von Wellstegträgern weist gekrümmte Flächen der Beulfelder auf, welche sich über die Hälfte einer gesamten Wellenlänge erstrecken und nur einen Teil der Steghöhe einnehmen. Die Definition von Lou/Edlund zum lokalen Beulen kann nicht eindeutig auf Wellstegträger übertragen werden.

Zonales Schubbeulen –Trapezstegträger

Neben dem lokalen Beulen tritt bei vielen Trägern auch zonales Beulen auf. Dabei können zwei Arten von zonalen Beulen im elastischen Bereich sowie im inelastischen Bereich beschrieben werden.

- a) In zwei benachbarten ebenen Blechen treten gleichzeitig lokale Beulen auf. Das Ausweiten der Beulen beschreibt ein zonales Beulen, welches sich über zwei ebene Bleche und eine Faltung erstreckt (Bild 4.38).

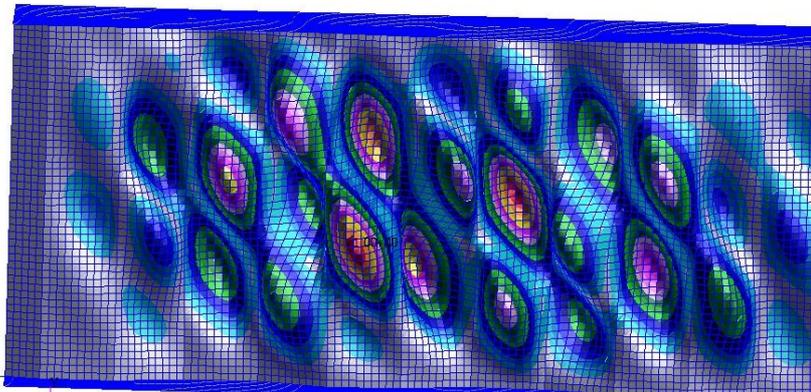


Bild 4.38: Zonales Beulen - Trapezsteg

- b) Des Weiteren treten zonale Beulen auf, die sich über eine Blechfalte hinweg in zwei benachbarte ebene Blechbereiche erstrecken. Das Entstehen aus zwei Beulen heraus, kann dabei nicht beobachtet werden (Bild 4.39).

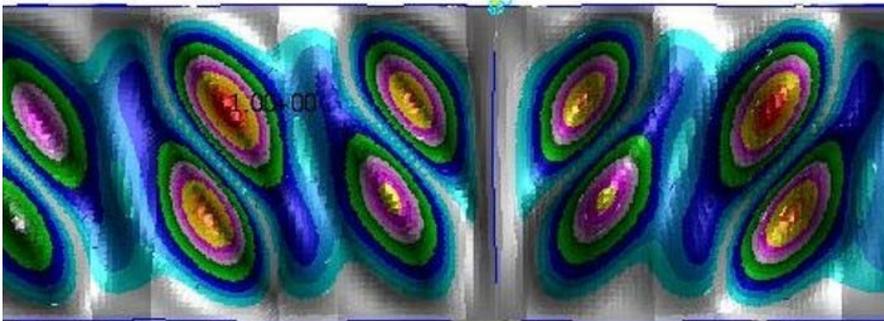


Bild 4.39: Zonales Beulen - Trapezsteg

Das Modell des zonalen Beulens im Traglastzustand sowie beim Auftreten von inelastischen Beulen kann wie folgt beschrieben werden. Die ebenen Bleche beulen infolge der Schubbeanspruchung. Dabei entsteht eine Zugkraft, die sich mittig der Bleche bis zu den Bleckkanten ausprägt. Die sich ausbildende Zugkraft steigt mit zunehmender Blechschlankheit. Gleichzeitig und unter Annahme statischen Gleichgewichts entsteht Druck in den Kanten. Das betrachtete ebene Blech mit seinen Kanten beult unter Druckbeanspruchung wie ein Stab.

Zonales Beulen beschreibt das Beulen eines definierten Bereiches des schubbeanspruchten Steges. Dieser Bereich umfasst mindestens eine und maximal zwei Faltungen sowie mindestens zwei und maximal drei ebene Blechbereiche. Die maximale Beulfeldlänge für das zonale Beulen kann daher mit $a_{\max,z} = a_1 + a_2$ beschrieben werden.

Die zonale Beulart wird bei Beullastberechnungen nur bei trapezförmigen Profilierungen beobachtet. Sinusförmige Profilierungen sind davon ausgeschlossen.

Das zonale Beulen im Traglastzustand kann auch als Interaktion zwischen lokalen und globalen Beulen verstanden werden. Dieser Begriff ist in der Literatur verbreitet. Die Verformungen im Traglastzustand der Versuchsträger (Kapitel 4.2.2 und 4.3.3) zeigen Interaktionen der lokalen und globalen Beulformen. Merkmal dieser Interaktion ist, dass sich die Beulform nicht über die gesamte Steghöhe erstreckt.

Globales Beulen – Trapezstegträger & Wellstegträger

Die dritte Beulart ist das globale Beulen, welches wie nach Lou/Edlund sowie vieler anderer Wissenschaftler definiert, für Trapez- und Wellstegträger bestätigt werden kann. Die Schubbeule erfasst mehrere Blechfaltungen und erstreckt sich über die gesamte Steghöhe.

4.5.3 Grundlegendes zur Auswertung und Modellbildung

Entsprechend Kapitel 4.5.2 ist es sinnvoll die kritischen Beulspannungen für lokales und zonales Beulen für Trapez- und Wellstegträger getrennt voneinander zu berechnen. Zusätzlich wird geprüft, ob die Ermittlung der kritischen lokalen Beulspannung für Trapezstegträger auch für Wellstegträger angewandt werden kann.

Die Ergebnisse zeigen, dass für das globale Beulen der Trapez- und Wellstegträger dasselbe Modell zugrunde gelegt werden kann.

Für die Abgrenzung des lokalen und zonalen Beulens der Trapezstegträger werden die Ergebnisse der Parameterstudie A und B zugrunde gelegt. Die Ergebnisse der Studie B sind dabei federführend, da die Parameterwahl auf die Abgrenzung des lokalen und zonalen Beulens abgestimmt ist. Für das globale Beulen sowie für die Wellstegträger wird ausschließlich Parameterstudie A zugrunde gelegt. Die Auswertung der Ergebnisse ist empirisch und vergleicht die analytischen Modelle der EN 1993-1-5.

In Anlage A3, Bild A3-1 bis A3-3 sind einige Beulformen des zonalen Beulens der Parameterstudie B dargestellt. Die farbliche 2D Darstellung der Magnitude Verformungen der ersten Eigenform bezieht sich stets auf das globale Koordinatensystem. Vergleichend sind die tatsächlichen Magnitude Deformationen und Mises Spannungen im Traglastzustand dargestellt. Die Verformungen im Traglastzustand sind ebenfalls auf ein festes Koordinatensystem bezogen. Bei einigen Trägern (grün hinterlegt) ist die Deformation senkrecht zur Trägerebene (y-Richtung) auf das feste Koordinatensystem bezogen, dargestellt. Diese Darstellung wurde abweichend zur Magnitude Verformung gewählt, da auftretende Verformungen in z-Richtung des Trägers dominierend waren.

Die Auswertung der Beulformen liefert einen entscheidenden Beitrag zur Bestätigung bzw. Optimierung der Nachweisführung der Querkrafttragfähigkeit nach EN 1993-1-5 für beliebig stegprofilierter Träger. Dabei stellen sich folgende Fragen:

- Genügt die Nachweisführung der Querkrafttragfähigkeit für Trapezstegträger auf Grundlage des lokalen und globalen Beulens (derzeitiger Stand EN 1993-1-5)? Beschreibt ein weiterer Nachweis auf Grundlage des zonalen Beulens die Querkrafttragfähigkeit zuverlässiger und progressiver?

Es gibt bereits verschiedene Ansätze von Wissenschaftlern, die diesen Gedanken aufgegriffen und in Modellen umgesetzt haben (siehe [32] und Kapitel 2.2). Dabei wurde das zonale Beulen als Interaktion zwischen lokalem und globalem Beulen verstanden. Die Interaktion wird in einigen Modellen in Form von Reduktionsfaktoren im Nachweis der globalen Schubtragfähigkeit oder in einem separaten Nachweis erfasst. Die Grundlage im separaten Nachweis bildet die Interaktion der kritischen lokalen und globalen Beulspannungen.

Auf Grundlage der Parameterstudie A und B werden empirische Modelle gebildet. Zum einen werden durch geometrische Parameter die Beulverhalten lokal und zonal voneinander abgegrenzt. Zusätzlich wird ein Modell zur Bestimmung zonaler kritischer

Beulspannungen vorgestellt, welches die Grundlage für die erweiterte Nachweisführung in Form eines dritten Nachweises bildet.

Dabei werden die numerisch ermittelten Beullasten bzw. Beulspannungen $\tau_{cr,FE}$ den analytischen, kritischen Beullasten bzw. Beulspannungen $\tau_{cr,l}$ und $\tau_{cr,g}$ nach EN 1993-1-5 gegenübergestellt.

Es sei bemerkt, dass bei der Studie nach vergleichenden Untersuchungen keine wissenschaftlichen Arbeiten entdeckt wurden, in denen $\tau_{cr,FE}$ mit $\tau_{cr,l}$ bzw. $\tau_{cr,g}$ vergleichend dargestellt wurden. Stets wurden die kritischen Beulspannungen $\tau_{cr,l}$ und $\tau_{cr,g}$ sowie auch die analytischen Traglasten V_{Rd1} bzw. V_{Rd2} mit den ermittelten numerischen Traglastergebnissen $V_{Rd,FE}$ (Traglastspannung oder Traglast) verglichen.

Die Ergebnisse der Parameterstudie zeigen jedoch, dass durchaus Unterschiede im Verformungs- bzw. Strukturverhalten der numerischen Beullasten und numerischen Traglasten bestehen (Anlage A3, Bild A3-1 bis A3-3). Es ist ersichtlich, dass das Tragverhalten bei Traglast nicht immer der ersten Eigenform entspricht. Nach EN 1993-1-5 werden jedoch die kritischen Beulspannungen ermittelt, um den Einfluss der Geometrie auf das Strukturverhalten zu beschreiben. Weicht die Versagensform jedoch von der ersten Eigenform ab, wird die Geometrie nicht zweifelsfrei beschrieben. Das ist ein weiterer Grund welcher die Anwendung von drei Nachweisformen (auf Grundlage von kritischen Beulspannungen für lokal, zonal und global) für die Ermittlung der Querkrafttragfähigkeit von Trapezstegträgern befürwortet.

- Kann die Ermittlung der lokalen Beulspannung für Trapez- und Wellstegträger harmonisiert werden?

Die ermittelten Ergebnisse der Parameterstudie A werden mit analytischen Modellen der kritischen Beulspannungen nach EN 1993-1-5 für Trapez- und Wellstegträger sowie nach dem Modell von Branka [69] und der kritischen Beulspannung von Schalen unter Schubbeanspruchung EN 1993-1-6 verglichen. Dabei wird die Frage beantwortet, welches Modell die zuverlässigsten Ergebnisse liefert. Auf Grundlage empirischer Auswertung wird ein Vorschlag zur Optimierung gemacht.

4.5.4 Auswertung der Ergebnisse

Nachdem der Einfluss der Profilform auf das Beulverhalten beschrieben ist, erfolgt die Auswertung der Ergebnisse bezogen auf die in Kapitel 4.5.3 angestellten Überlegungen zur Modellbildung. Zunächst wird der Einfluss folgender Parameter auf die lokale und zonale kritische Beulspannung von Trapezstegträgern untersucht. Anschließend werden geometrische Einflüsse auf das Beulverhalten der Wellstegträger dargestellt und mit analytischen Ergebnissen verglichen. Zum Schluss werden die Ergebnisse zum globalen Beulverhalten zusammengefasst. Sämtliche Trägerparameter und Ergebnisse der Beulspannungen sind in Anlage 3 Tabelle A3-1 zusammengestellt. Die Beulformen gehen aus der Tabelle A3-2 hervor, in der die untersuchten Träger nach Beulform sortiert sind.

Zur lokalen und zonalen kritischen Beulspannung von Trapezstegträgern

Dabei werden zur Beurteilung des Beulverhaltens folgende Parameter betrachtet.

- Spreizung α
- Stegdicke t_w
- Ebene Blechbreiten der Profilierung a_1 und a_2

Der Untersuchung der Parameter Spreizung α , Stegdicke t_w und maximale Breite des ebenen Bleches a_{\max} ist in Studie B zugrunde gelegt. Die Parameter der Studie sind in Kapitel 4.4.1 erläutert. Bild 4.40 zeigt den Einfluss der Spreizung für verschiedene Stegdicken. Dabei ist die dimensionslose Darstellung in Form von $\cos \alpha$ sowie das Verhältnis der kritischen Beulspannungen $\tau_{cr,FE} / \tau_{cr,l}$ gewählt.

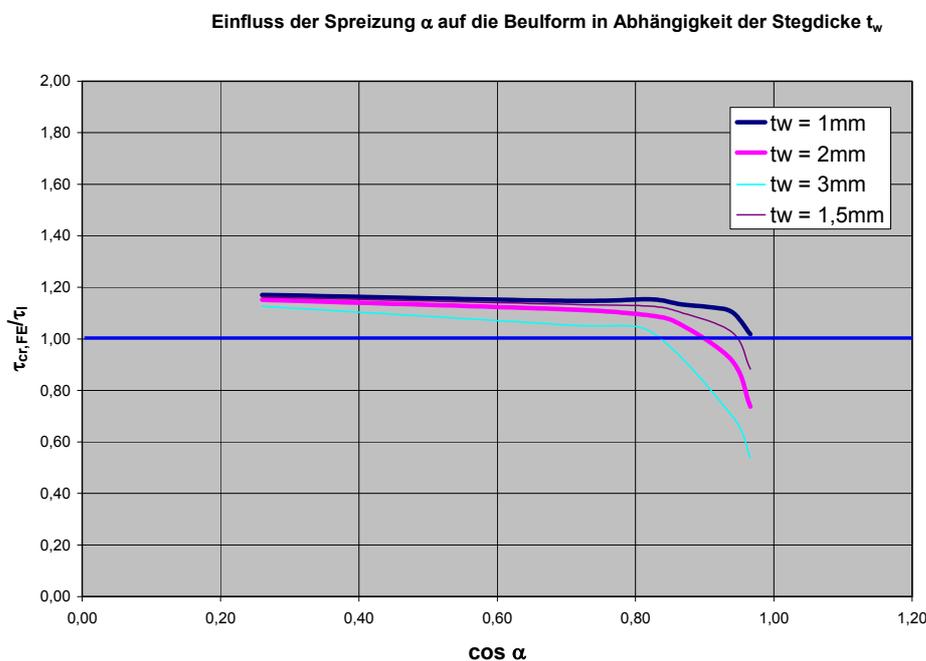


Bild 4.40: Einfluss der Spreizung auf das Beulverhalten von Trapezstegträgern

Unterschreiten die bezogenen Spannungen den Wert 1, so ist die Beulform zonal. Zonales Beulen tritt überwiegend bei größeren Stegdicken auf. Dünne Stegbleche hingegen neigen zum lokalen Beulen. Der Einfluss der Stegdicke auf die Beullast zeigt, dass die Beullast annähernd proportional zu $t_w^{1,5}$ angenommen werden kann. Neben der Stegdicke üben auch andere Parameter Einfluss auf die Beullast und Beulform aus. In Abhängigkeit der Spreizung der Profilierung variiert auch die maximale Stegdicke bis zu welcher lokales Beulen auftritt, (Bild 4.40).

Zusätzlich wird die maximale Beulfeldlänge a_{\max} in die Untersuchungen aufgenommen und als Verhältnis a_{\max}/t_w in Bild 4.41 dargestellt. Der Vergleich der Diagramme zeigt, dass die Beulfeldlänge und Stegdicke die Beullast und damit die Beulform annähernd ähnlich beeinflussen.

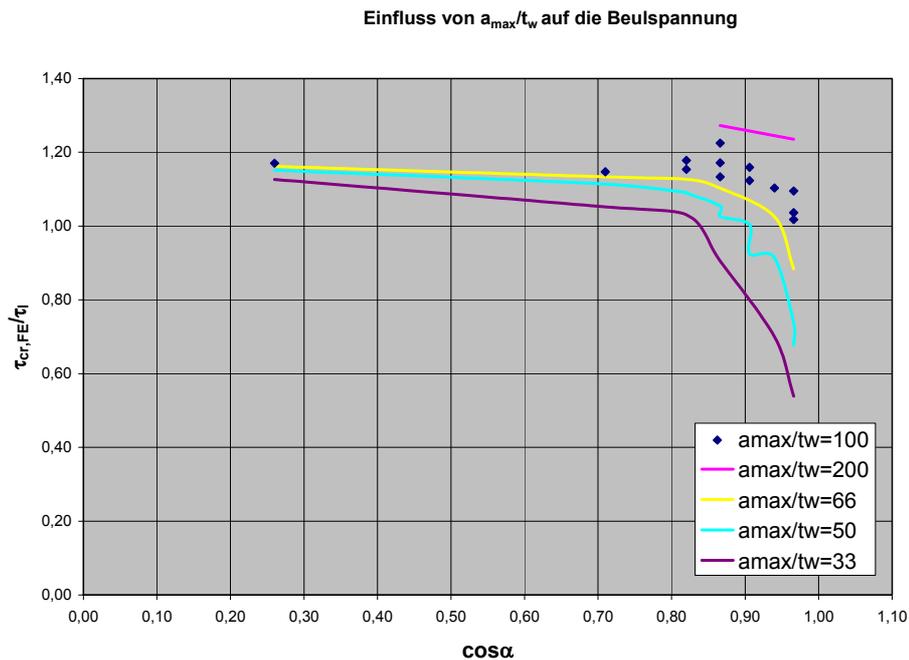


Bild 4.41: Einfluss der Spreizung auf das Beulverhalten in Abhängigkeit von a_{max}/t_w für Trapezstegträger

Anhand dieser Ergebnisse können Abgrenzungskriterien für zonales und lokales Beulen aufgestellt werden. Dabei werden die analytisch berechneten kritischen Beulspannungen mit den numerisch ermittelten verglichen. In Anlage 3, Tabelle A3-2 sind alle untersuchten Träger entsprechend ihrer Beulform aufgelistet und vergleichend zu den analytischen Beulspannungen dargestellt. Betrachtet man die Spannungsverhältnisse $\tau_{cr,FE}/\tau_{cr,l}$ der Träger mit zonalen Beulerscheinungen (Tabelle A3-2), so zeigt sich, dass die Verhältnisse kleinere als auch größere Werte von 1 annehmen. Das zonale Beulen kann somit nicht nur mit dem Unterschreiten des Spannungsverhältnisses $\tau_{cr,FE}/\tau_{cr,l} = 1$ beschrieben werden. Aus diesem Grund wurde es von der Verfasserin als sinnvoll erachtet, dass Abgrenzungskriterium empirisch auszuwerten und die Ergebnisse der Parameterstudie A hinzu zunehmen. Es wird angenommen, dass alle Träger mit $\tau_{cr,FE}/\tau_{cr,l} < 1$ zonales Beulen aufweisen. Fasst man die Ergebnisse der Parameterstudie B zusammen, kann das Abgrenzungskriterium in Bild 4.42 für lokales und zonales Beulen aufgestellt werden. Die Auswertung der Parameterstudie A und B (Bild 4.43) ergibt das Kriterium in Bild 4.44, welches für die weiterführenden Betrachtungen zu Grunde gelegt wird.

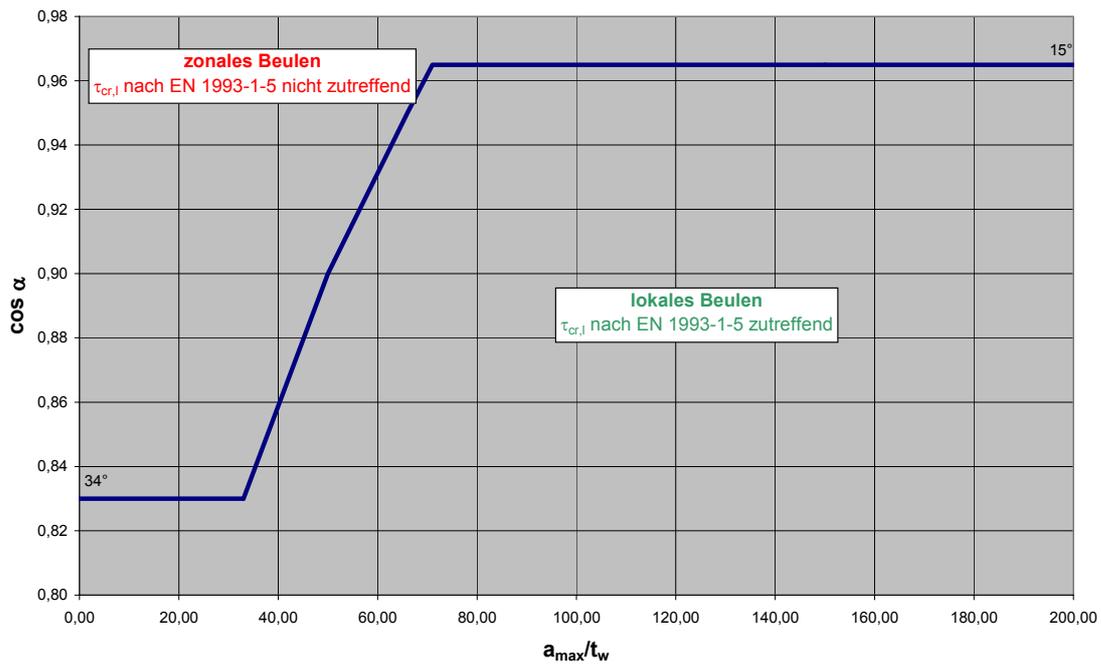


Bild 4.42: Abgrenzungskriterium für lokales und zionales Beulen (Parameterstudie B)

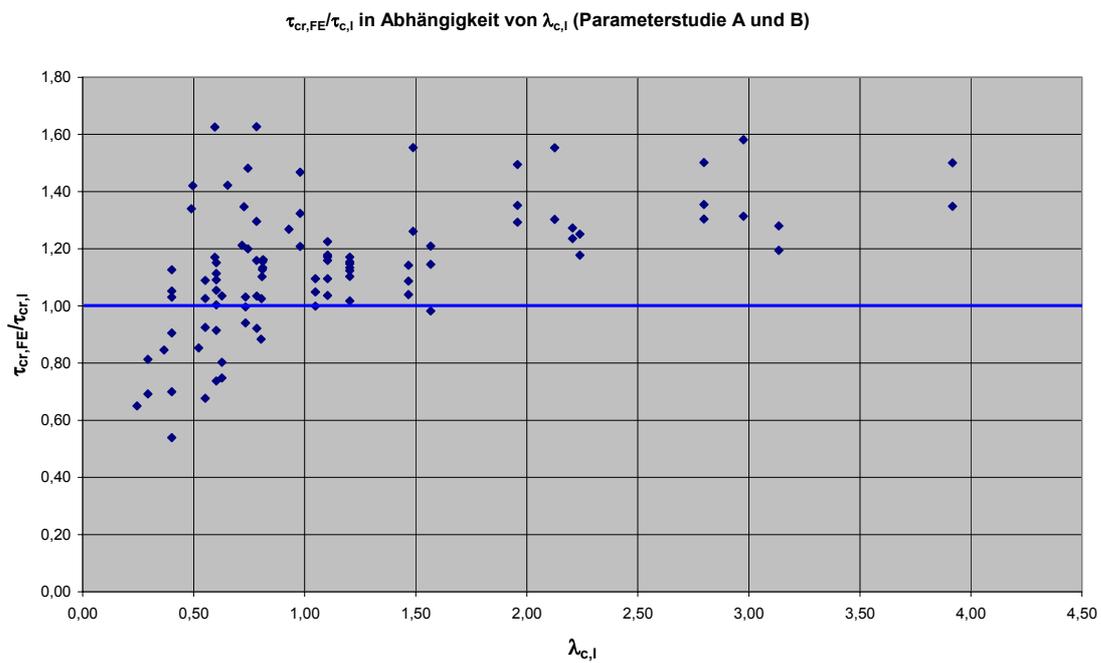


Bild 4.43: Numerische und analytische Beulspannungen (Parameterstudie A und B)

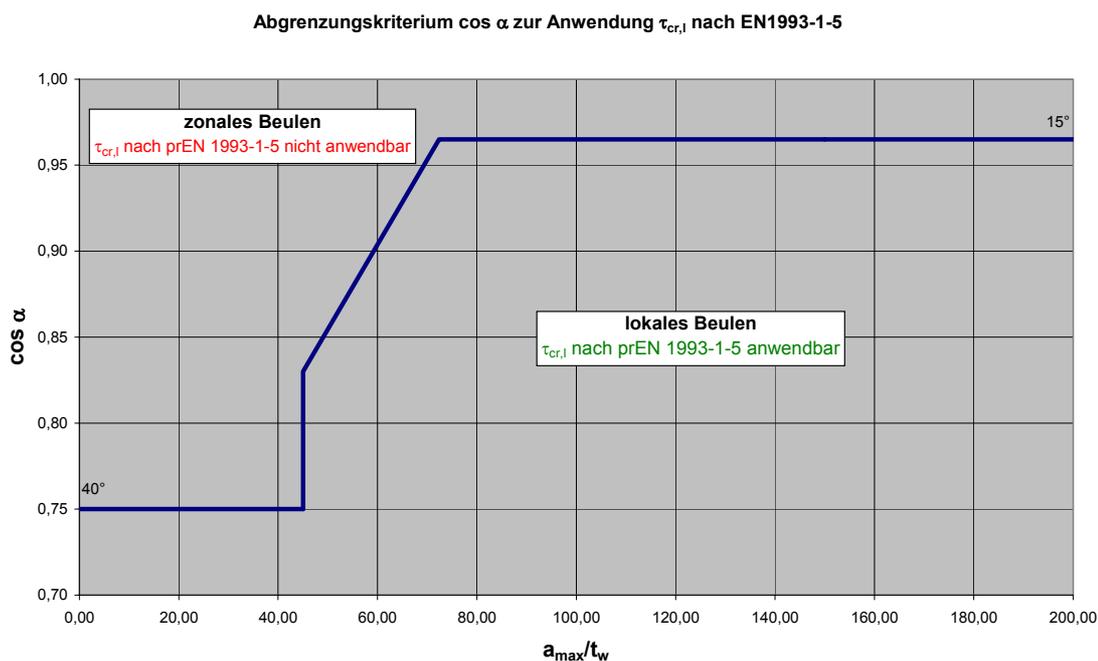


Bild 4.44: Abgrenzungskriterium für lokales und zonales Beulen (Parameterstudie A und B)

Entsprechend Bild 4.44 werden die Träger zum lokalen Beulen abgegrenzt und für das zonale Beulen kann folgende empirische Gleichung zur Bestimmung der kritischen zonalen Beulspannung angewandt werden, Gl. (4.1):

$$\tau_{cr,z} = E \cdot \frac{t_w^{1,5}}{a_{max,z}^{1,5}} \cdot \left(\frac{0,9}{\cos \alpha} \right)^2 \quad (4.1)$$

mit

$$a_{max,z} = a_1 + a_2$$

$$\lambda_{c,z} = \sqrt{\frac{f_{y,w}}{\tau_{cr,z} \cdot \sqrt{3}}} \quad (4.2)$$

Die Ergebnisse sind in Bild 4.45 bezogen auf die numerisch ermittelten zonalen Beulspannungen dargestellt.

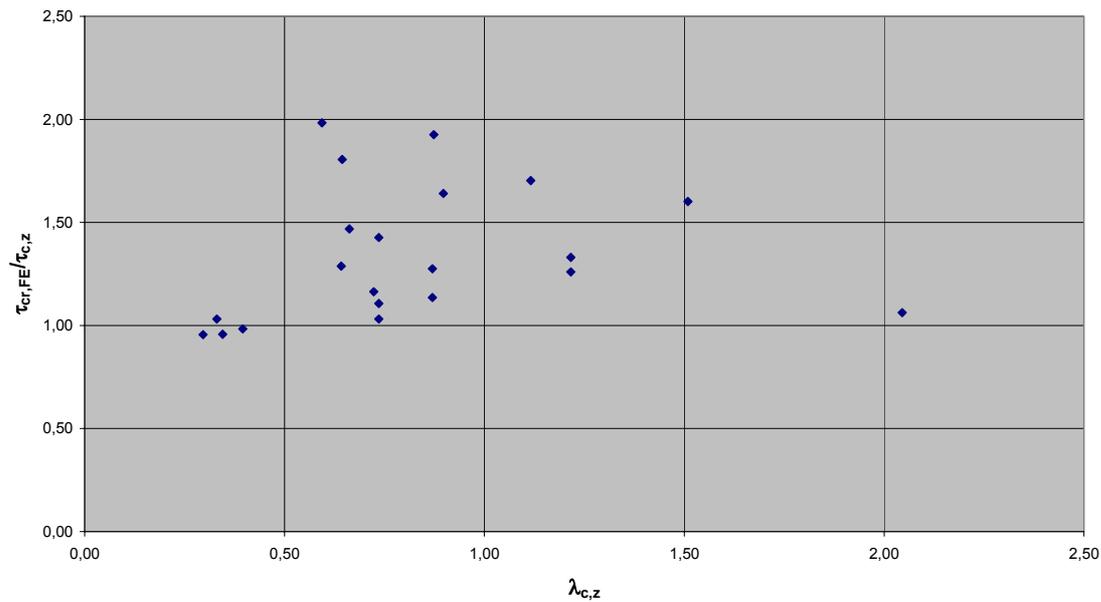


Bild 4.45: Numerische und analytische zonale Beulspannungen (Parameterstudie A und B) nach Modell NEU – zonales Beulen

Für die Träger, die lokale Beulen aufweisen, wird nach EN 1993-1-5 ein zufriedenstellendes Ergebnis erzielt, Bild 4.46.

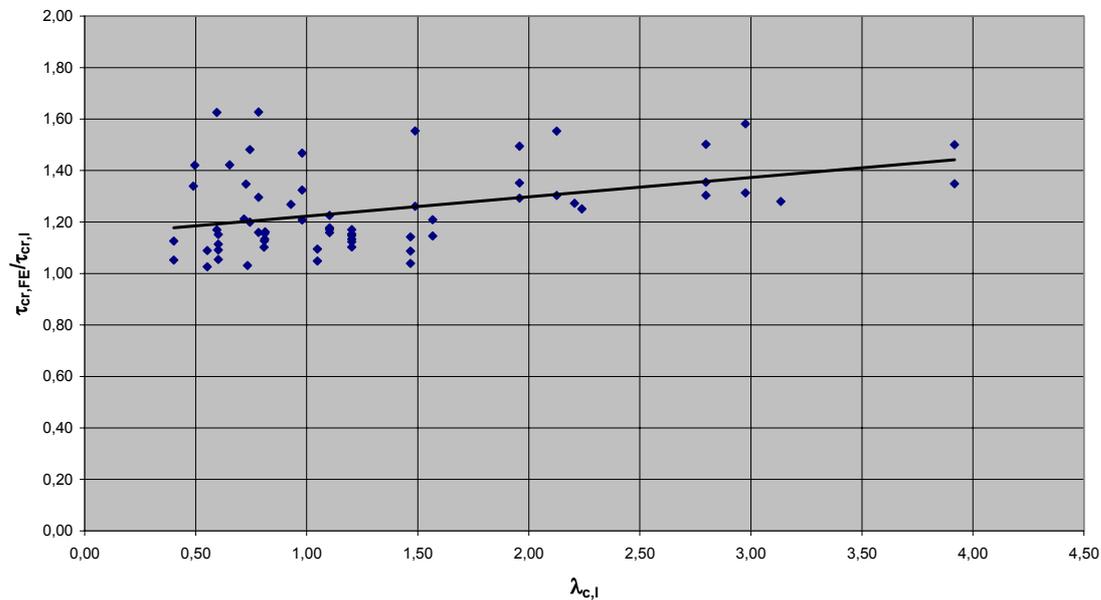


Bild 4.46: Träger mit lokalen Beulerscheinungen (Parameterstudie A und B) Modell EN 1993-1-5

Weitere Betrachtungen zu den Beulfeldlängen zeigen, dass die abwechselnd horizontalen und schrägen ebenen Blechteile (a_1 und a_2) gegenseitig eine versteifende Wirkung ausüben. Die kritische Beulspannung reduziert sich. In Bild 4.47 ist der Einfluss zu sehen. EN 1993-1-5 berücksichtigt diese aussteifende Wirkung nicht.

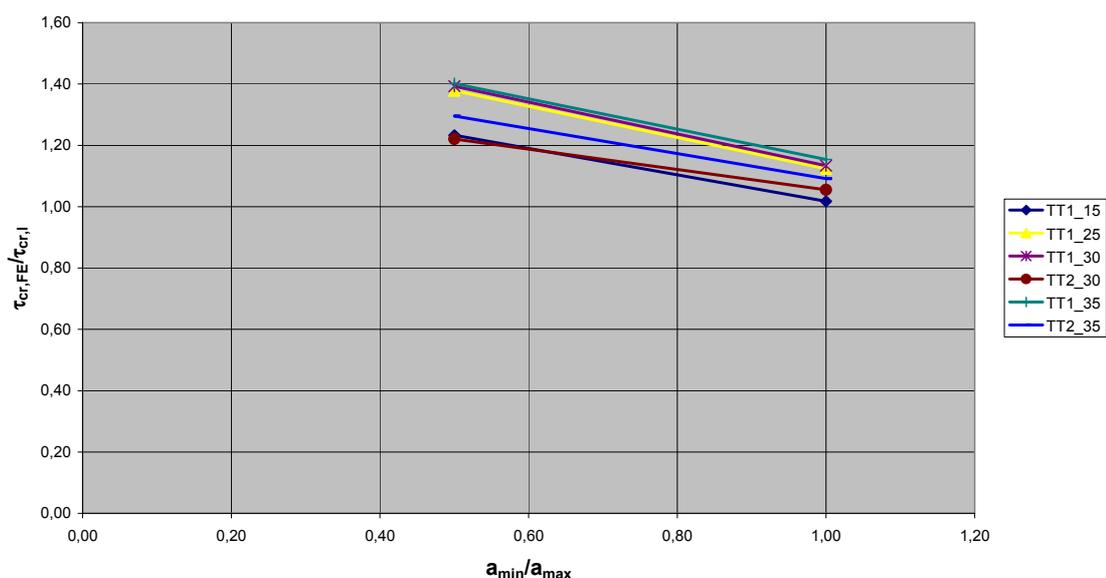


Bild 4.47: Einfluss unterschiedlicher Beulfeldlängen a_1 und a_2 auf die kritische Beulspannung

Darin bedeuten:

$$a_{\min} = \min(a_1; a_2)$$

$$a_{\max} = \max(a_1; a_2)$$

Die Berücksichtigung der aussteifenden Wirkung ist nur sinnvoll für $\frac{a_{\min}}{a_{\max}} \geq 0,5$. So

zum Beispiel ist für den Extremfall $a_{\min} = 0$, was einer dreieckförmigen Profilierung entspricht, keine aussteifende Wirkung des Nachbarfeldes vorhanden und das einfache Modell einer gelenkig gelagerten Platte wird angesetzt.

Durch eine Reduzierung der maximalen Beulfeldlänge a_{\max} kann diese Aussteifung für die kritische lokale Beulspannung in EN 1993-1-5 berücksichtigt werden.

Die Reduzierung der maximalen Beulfeldlänge mit dem Faktor $\left(\frac{a_{\min}}{a_{\max}}\right)^{1/8}$ liefert

optimierte Ergebnisse (Bild 4.48). Unter Berücksichtigung der Parameterstudien A und B wird Gl. (4.3) als Reduktionsfaktor R für die maximale Beulfeldlänge vorgeschlagen. Die Ergebnisse sind in Bild 4.49 im Verhältnis zu den numerischen Beulspannungen dargestellt. Der Vergleich der Trendlinien in Bild 4.46 und Bild 4.49 beweist, dass eine Verbesserung mit dem neuen Ansatz zur Bestimmung der lokalen kritischen Beulspannungen, Gl. (4.4) erzielt wird.

$$R = \left(\frac{a_{\min}}{a_{\max}}\right)^{1/16} \quad (4.3)$$

$$\tau_{cr,l,new} = 4,83 \cdot E \cdot \left[\frac{t_w}{a_{max} \cdot R} \right]^2 \quad (4.4)$$

$$\lambda_{c,l,new} = \sqrt{\frac{f_{y,w}}{\tau_{cr,l,new} \cdot \sqrt{3}}} \quad (4.5)$$

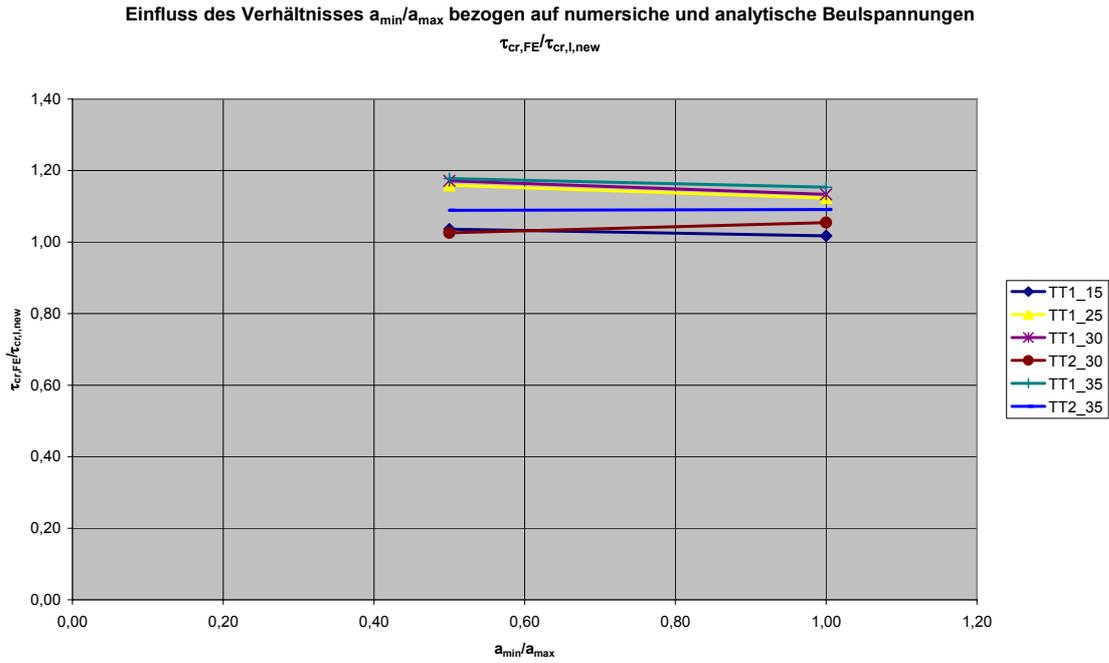


Bild 4.48: Berücksichtigung des Reduktionsfaktors R in EN 1993-1-5 für lokales Beulen

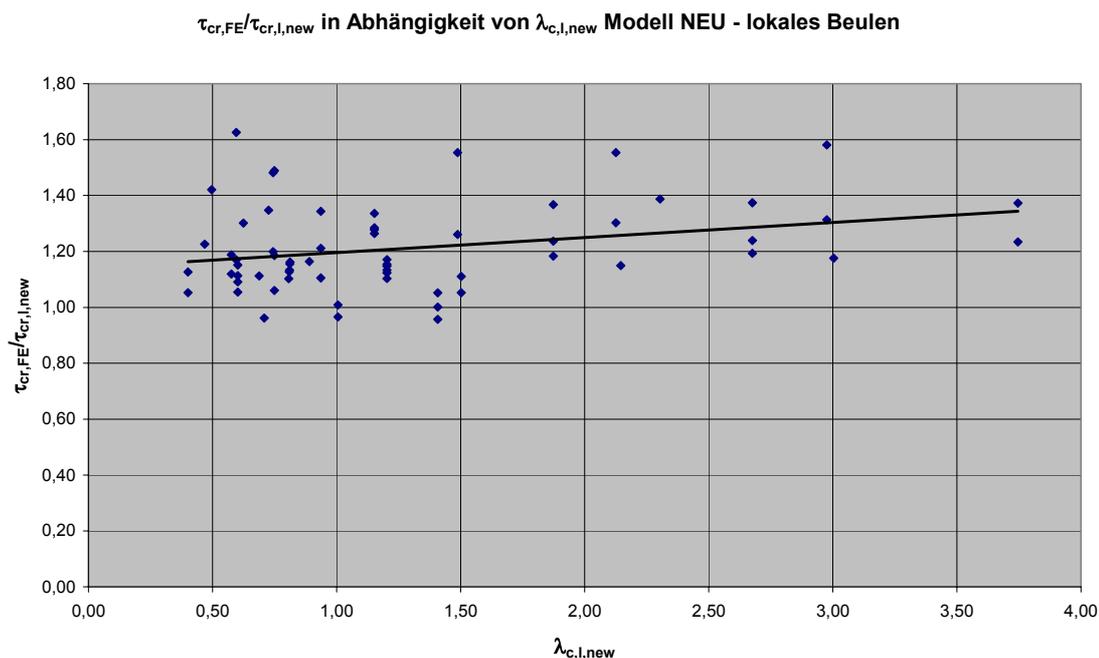


Bild 4.49: Träger mit lokalen Beulerscheinungen (Parameterstudie A und B) Modell NEU – lokales Beulen

Zur lokalen kritischen Beulspannung von Wellstegträgern

Im zweiten Teil der Untersuchungen werden die numerischen Beulspannungen der Wellstegträger der Parameterstudie A mit den analytischen lokalen Beulspannungen nach dem Ansatz von Branka [69] Gl. (3.22) und EN 1993-1-6 [19] Gl. (3.25) verglichen. Im Unterschied zu den Trapezstegträgern treten bei Wellstegträgern keine zonalen Beulen auf (4.5.2). Die Anwendung der kritischen lokalen Beulspannung der Trapezstegträger (entsprechend EN 1993-1-5, [18]) auf die Wellstegträger mit angenommenen ebenen Blechbereichen (Bild 3.2) führt zu sehr ungünstigen Ergebnissen und bestätigt damit das unterschiedliche Beulverhalten (Bild 4.50). In Bild 4.51 sind die numerischen Spannungen mit den kritischen Schalenbeulspannungen und in Bild 4.54 mit den lokalen Beulspannungen für Wellstegträger nach Branka, [69] verglichen.

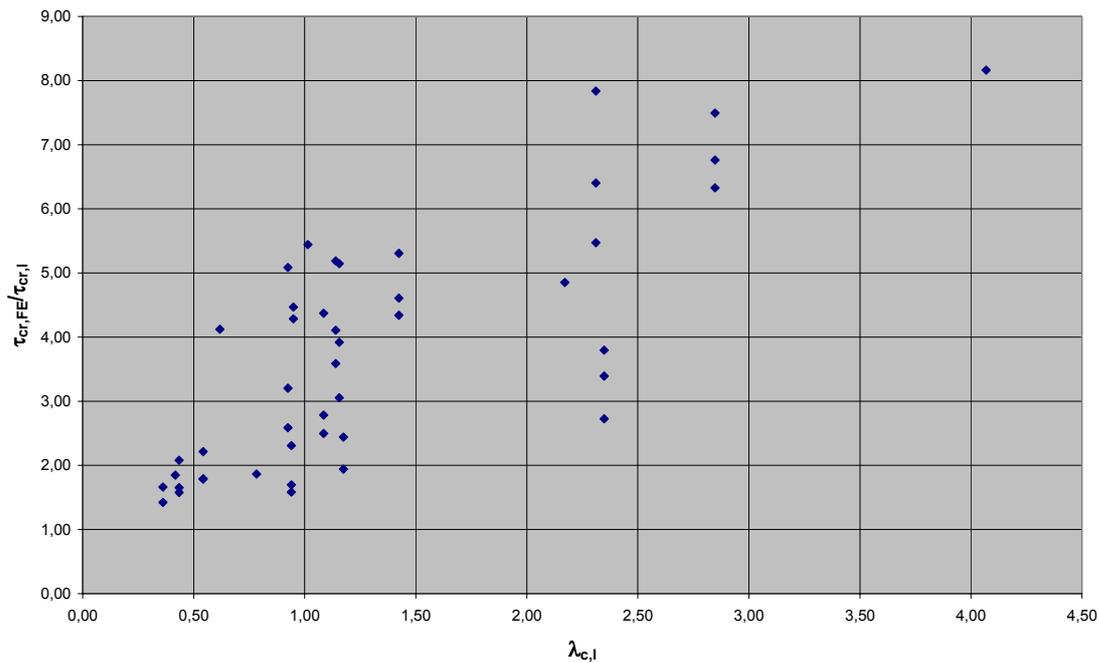


Bild 4.50: Vergleich numerischer Beulspannungen der Wellstegträger mit analytischen nach EN 1993-1-5 für Trapezstegträger auf Grundlage geometrischer Annahmen entsprechend Bild 3.2

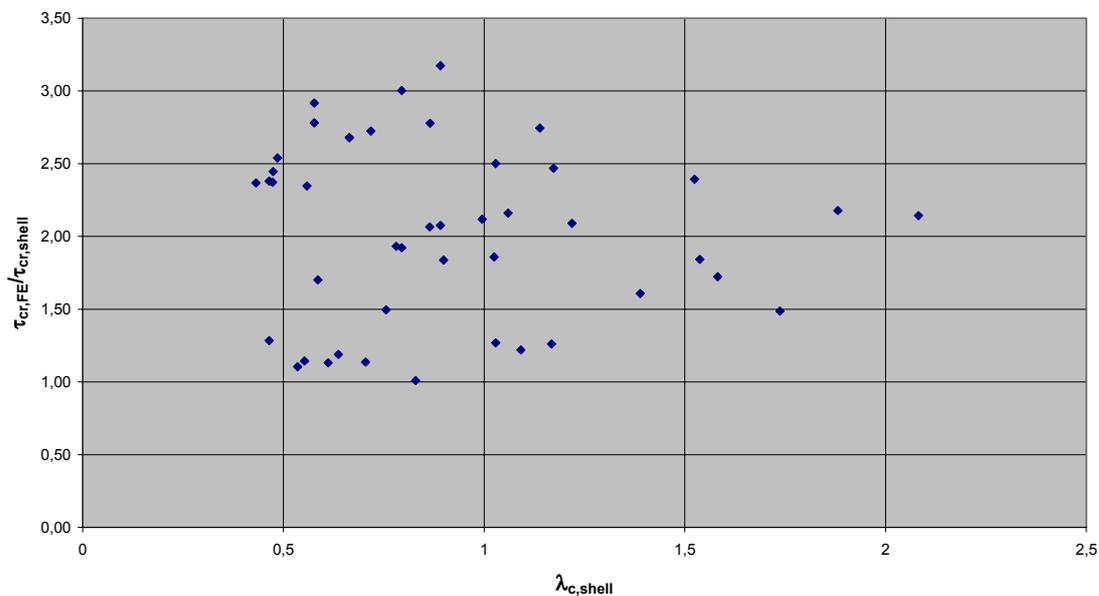


Bild 4.51: Vergleich numerischer Beulspannungen der Wellstegträger mit analytischen nach EN 1993-1-6

Die Berechnung nach EN 1993-1-6, Gl. (3.25) liefert konservative Ergebnisse. Bild 4.52 zeigt, dass der Einfluss kleiner $s/2t_w$ Verhältnisse nicht gut erfasst wird. Das kann zum einen Schalen mit großen Stegdicken oder großen Wellenlängen (entfernt von der gekrümmten Fläche) entsprechen. Der Einfluss der Steghöhe (Bild 4.53) wird mit dem Schalenmodell gut erfasst.

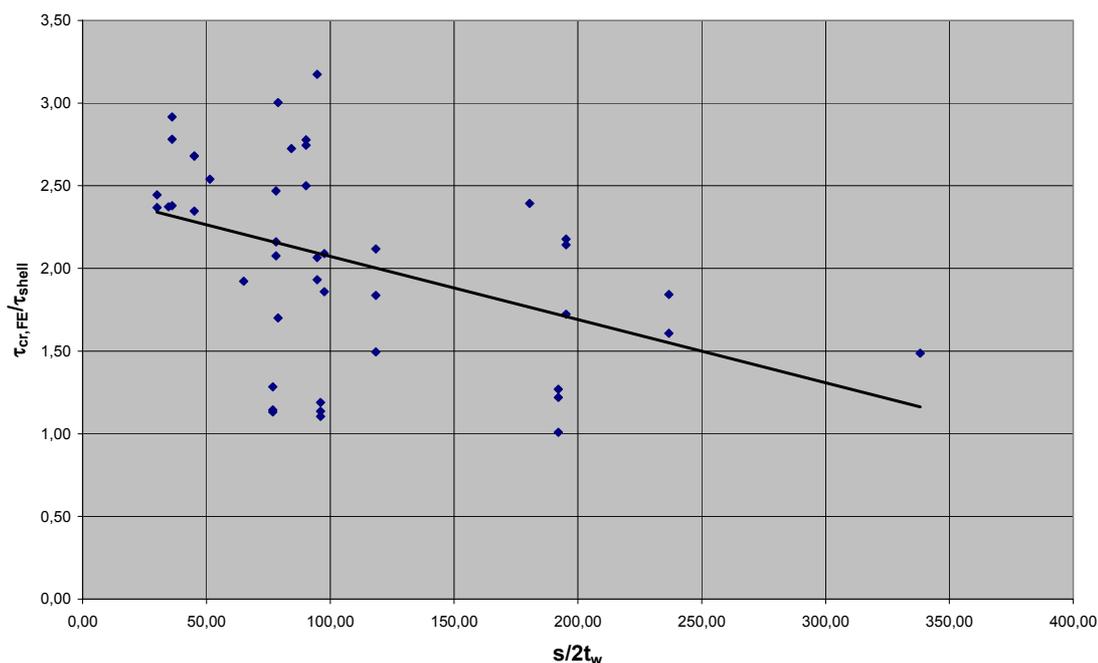


Bild 4.52: Einfluss der Wellenlänge und Stegdicke auf das Beulverhalten

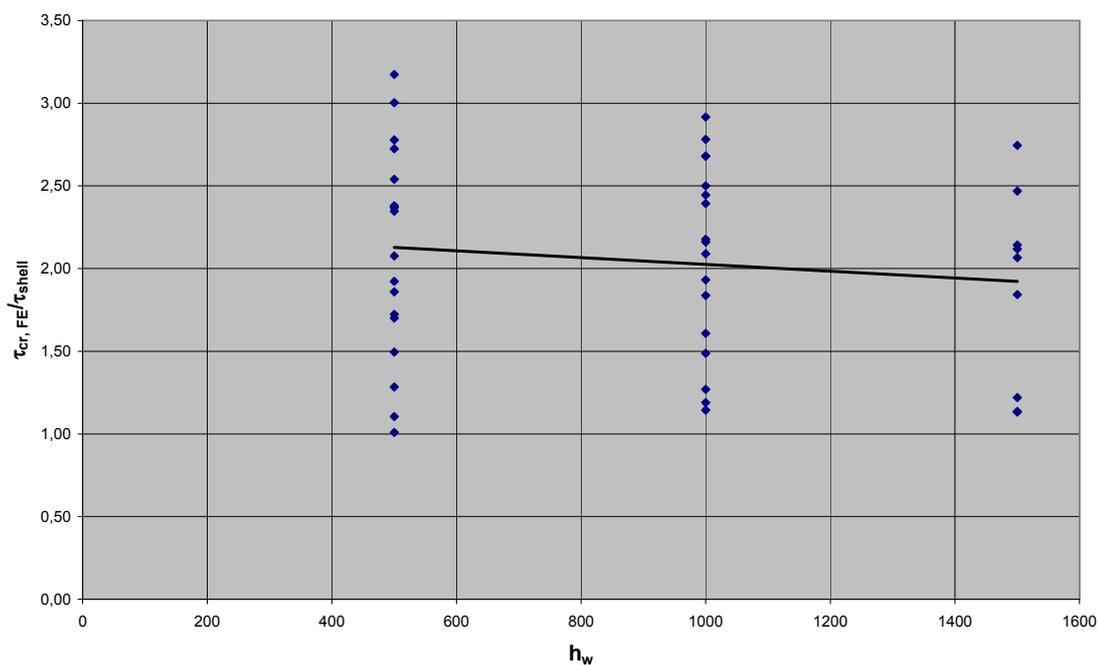


Bild 4.53: Einfluss der Steghöhe auf das Beulverhalten

Der Vergleich der numerischen Beulspannungen mit den analytischen nach [69], Gl. (3.22) führt zu unsicheren Ergebnissen (Bild 4.54). Das heißt, die kritische Beullast der Wellstegträger wird überschätzt. Insbesondere sind Wellstegträger mit großen Wellenlängen $2s$ davon betroffen.

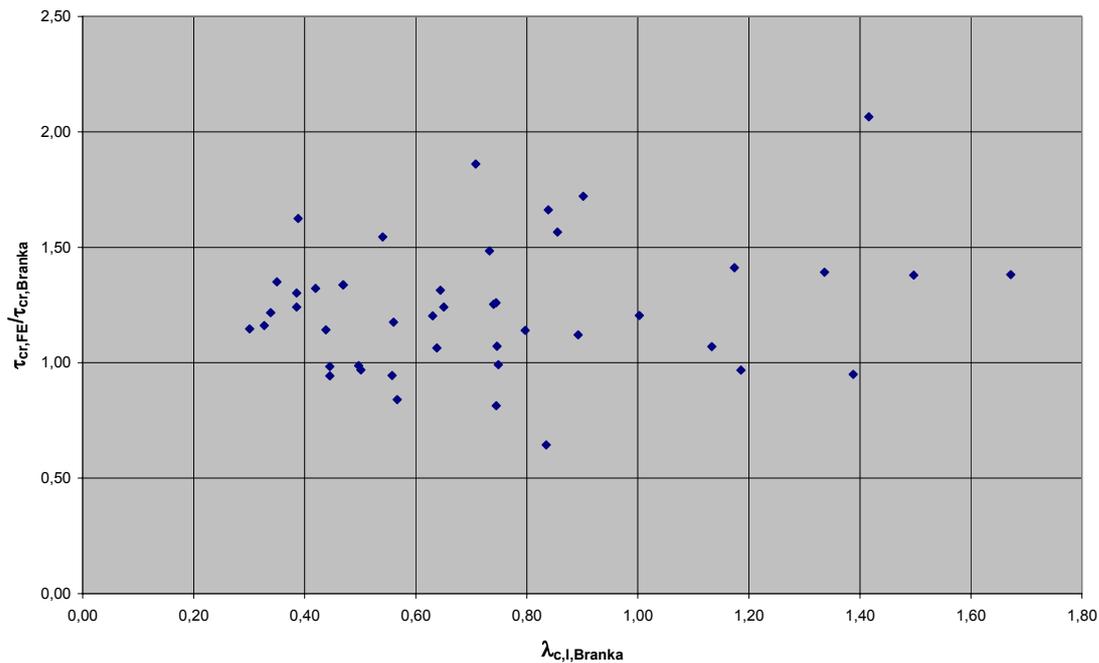


Bild 4.54: Vergleich numerischer und analytischer Beulspannungen nach [69]

Die Auswertung der Beulfeldlängen hat ergeben, dass die Annahme von s zu verbesserten Ergebnissen führt. Schon bei einer Annahme von $5/6s$ werden bessere Ergebnisse erzielt (Bild 4.55). Damit ergeben sich Gl. (4.6) und Gl. (4.7) für die Ermittlung der kritischen Beulspannung sowie Plattenschlankheit. Es werden verschiedene Parameter untersucht, empirisch wird keine bessere Lösung auf Grundlage des Modells von Branka gefunden.

$$\tau_{cr,Branka,new} = \left(5,34 + \frac{a_3 \cdot 5/6s}{h_w \cdot t_w} \right) \cdot \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \cdot \left(\frac{t_w}{s} \right)^2 \quad (4.6)$$

$$\lambda_{c,Branka,new} = \sqrt{\frac{f_{y,w}}{\tau_{cr,Branka,new} \cdot \sqrt{3}}} \quad (4.7)$$

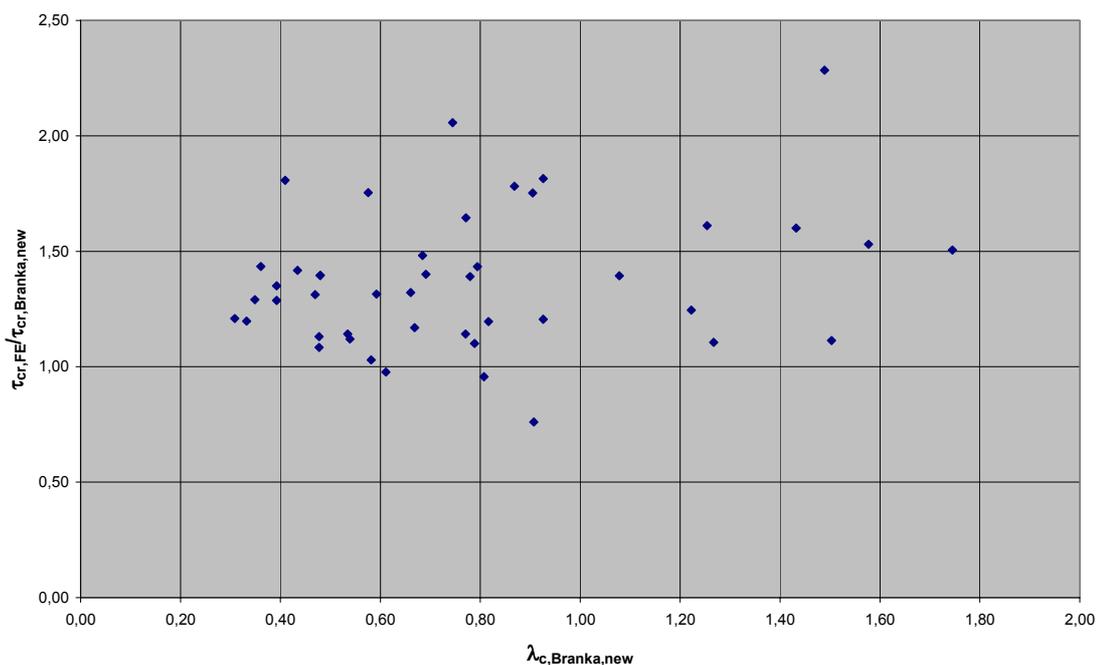


Bild 4.55: Vergleich numerischer und analytischer Beulspannungen nach Modell NEU - lokales Beulen

Der Vergleich der Diagramme Bild 4.51 und Bild 4.55 zeigt, dass auch mit dem verbesserten Ansatz nach Branka nicht 100%ig abgesicherte kritische Spannungen erzielt werden. Die Berechnung der kritischen Spannungen auf Grundlage der Schalentheorie liefert abgesicherte Ergebnisse, jedoch werden für einige Wellstegträger sehr konservative Ergebnisse erzielt.

Zur globalen kritischen Beulspannung von Trapez- und Wellstegträgern

Bei den zugrunde gelegten Versuchsträgern sind es nur einige wenige, die in Folge globalen Beulens versagen. Es ist aber erkennbar, dass die Trapez- sowie Wellstegträger globales Beulen aufweisen. Es tritt ausschließlich globales Beulen bei $h_w/t_w > 500$ und $L/h_w < 2$ auf. Eine empirische Untersuchung ist aufgrund der geringen Anzahl der Träger nicht sinnvoll. Das analytische Modell in EN 1993-1-5 wird zu Grunde gelegt.

4.6 Ergebnisse der FE Parameterstudie – Traglast

4.6.1 Einfluss der Parameter im Vergleich unterschiedlicher Profilierungsformen

Beim Vergleich der Last-Verformungskurven der Trapez- und Wellstegträger sind Unterschiede im Verformungsverhalten festzustellen. Die Trapezstegträger weisen größere Verformungen auf. Im inelastischen Beulbereich sind die Trapezstegträger gegenüber den Wellstegträgern durch ein gutartiges Strukturverhalten gekennzeichnet (Anlage 3, Bild A3-4 bis Bild A3-15). Eine Erklärung dafür kann die Ausbildung von

Zugdiagonalen sein, die eine Verfestigung und Lastumlagerung hervorrufen. Nach dem Ausbilden der Zugstreben im Stegblech wird keine Laststeigerung beobachtet.

Der Vergleich der Verformungs- und Spannungsplots (Anlage 3, Bild A3-1 bis A3-3) einiger Trapezstegträger bei Beul- und maximaler Traglast zeigt Unterschiede in der Beulform. Zum Beispiel treten für die Träger der Parameterstudie B (TT15_45_100, TT15_35_100, TT2_30_100) lokale Beulen bei der ersten Eigenform auf. Im Traglastzustand sind jedoch zonale Beulen zu sehen. Die Unterschiede können damit begründet werden, dass die ermittelten numerischen Beullasten bereits im inelastischen Bereich liegen. Somit handelt es sich bei Erreichen der Traglast um ein Nachbeulverhalten. Es ist vorstellbar, dass erste lokale Beulen mit Erreichen der Fließgrenze auftreten, die sich bis zum Erreichen der Traglast hin zu zonalen Beulen entwickeln. Treten zonale Beulen bereits in der Beullastberechnung auf, dann sollte diese Geometrie der Beulform auch für die Traglastberechnung zugrunde gelegt werden, anstelle einer angenommenen lokalen Beulform und deren dazugehörigen kritischen Beulspannungen.

Die Auswertung der Last - Verformungskurven verdeutlicht den Einfluss der geometrischen Parameter auf das Tragverhalten und wird wie folgt zusammengefasst:

- Der Vergleich der globalen Stegstabilität gegen Schubbeulen zwischen Trapez- und Wellstegträger zeigt, dass Wellstegträger im Vergleich zu den Trapezstegträgern schon bei geringeren Steghöhen h_w global schubbeulen. Trapezstegträger weisen erst bei größeren Steghöhen h_w globale Beulerscheinungen auf. Wenngleich die Auswertung der Eigenformen beider Profilierungsformen zeigt, dass die jeweils ersten beiden Eigenwerte (lokales und globales Beulen) sehr dicht beieinander liegen. Eine Interaktion zwischen lokalen und globalen Stegbeulen ist möglich. Demnach kann geschlussfolgert werden, dass der Trapezsteg einen geringfügig besseren Beitrag zum globalen Stabilitätsverhalten bzgl. Schubbeulen liefert. Eine detaillierte Untersuchung wurde an dieser Stelle nicht vorgenommen, da die Anzahl der untersuchten Träger mit globalen Schubbeulversagen gering ist.
- Der Einfluss der Stegdicke auf das Tragverhalten stellt sich in Abhängigkeit der Profilierungsparameter (s , a_3) unterschiedlich dar und kann nicht konstant angenommen werden. Grund dafür ist, dass in Abhängigkeit der Stegdicke und Profilierungsparameter das Versagen im elastischen oder inelastischen Beulbereich auftritt. Somit beeinflusst die elastische Beultheorie das Tragverhalten. Dieses Verhalten kann für beide Trägerarten bestätigt werden.
- Es ist auffällig, dass der Einfluss der Steghöhe ebenfalls in Abhängigkeit von den Profilierungsparametern (s , a_3) sowie von der Stegdicke t_w beschrieben werden kann. Zum einen beeinflusst die Steghöhe die Art der Beulerscheinungen. So können bei Trapezstegträgern mit Steghöhen > 500 mm zonale statt lokale Beulen auftreten, hierbei spielt jedoch der Einfluss der Profilierungsparameter eine entscheidende Rolle.

- Die Untersuchungen haben weiterhin gezeigt, dass die Gurtdicke keinen nennenswerten Einfluss auf die Schubtragfähigkeit der Träger hat.
- Der Einfluss der Profilierungsparameter ist ausführlich in Kapitel 4.5 beschrieben und kann auf das Tragverhalten übertragen werden. Der Einfluss des Materialverhaltens (Beulen im elastischen oder inelastischen Bereich) ist zu Beginn dieses Kapitels beschrieben. Somit beschreiben die Profilierungsparameter wesentlich das Beul- sowie Nachbeulverhalten der Trapez- und Wellstegträger.

4.6.2 Vergleich numerischer Traglastergebnisse und analytischer bestehender sowie neuer Traglastmodelle

Entsprechend der in Kapitel 4.5 ermittelten Beulformen werden die analytischen kritischen Beulspannungen für die Traglastmodelle zu Grunde gelegt. Sämtliche Ergebnisse sind in Anlage A3, Tabelle A3-2 ersichtlich. Die Berechnungen sämtlicher Traglasten und dazugehörige Parameter sind in Kapitel 3 detailliert erläutert. Im Folgenden werden die Ergebnisse in Diagrammen dargestellt. Dabei sind stets die Ergebnisse der Parameterstudien (entsprechend der jeweiligen Beulform), sämtliche Versuche (Kapitel 4.2.4) sowie das analytische Traglastmodell nach EN 1993-1-5 und ein neues optimiertes Traglastmodell „NEU“ auf Grundlage empirischer Untersuchungen dargestellt.

Trapezstegträger - Schubtragfähigkeit für den Nachweis - lokales Beulen

Bild 4.56 vergleicht die FE Traglastergebnisse und Versuche mit der Abminderungskurve nach EN und einem neuen Vorschlag bezogen auf die Schlankheit für lokales Beulen nach EN 1993-1-5.

Dem neuen Traglastmodell werden die kritischen Beulspannungen und die Schlankheit nach Gl. (4.4) und Gl. (4.5) zugrunde gelegt. Wie die Ergebnisse zeigen kann die Plateaulänge optimiert werden. Träger mit niedrigen Schlankheiten sind nicht beulgefährdet im elastischen Bereich. Dabei wird mit der modifizierten Abminderungskurve das Beulverhalten als auch das Strukturverhalten im Nachbeulbereich besser erfasst. Bild 4.57 stellt die Abminderungskurve bezogen auf die Schlankheit $\lambda_{c,l,new}$ Gl. (4.5) dar.

Der Abminderungsfaktor des Modells „NEU“ ergibt sich zu:

$$\chi_{c,l,new} = \frac{1}{(0,62 + \lambda_{c,l,new})} \leq 1 \quad (4.8)$$

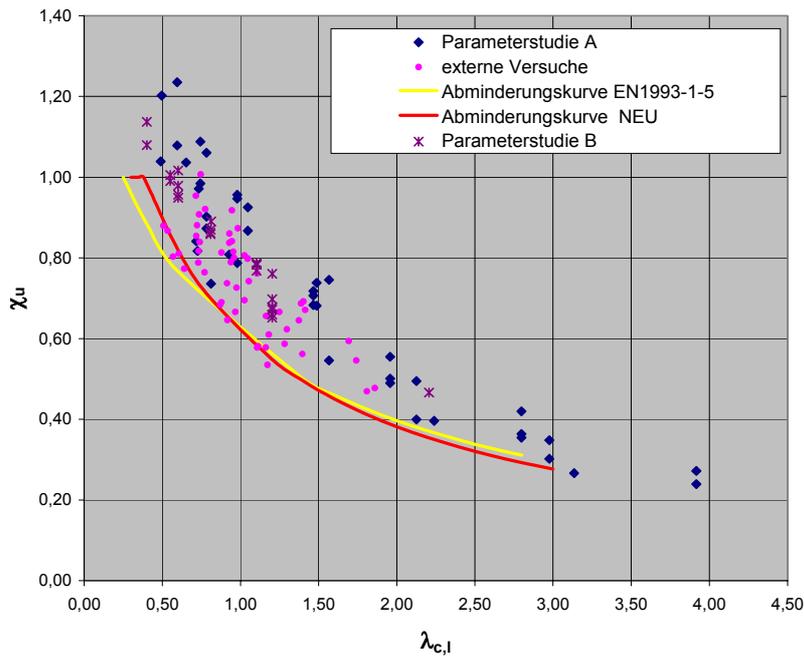


Bild 4.56: Abminderungsfaktoren in Abhängigkeit der Schlankheit $\lambda_{c,l}$ (EN 1993-1-5)

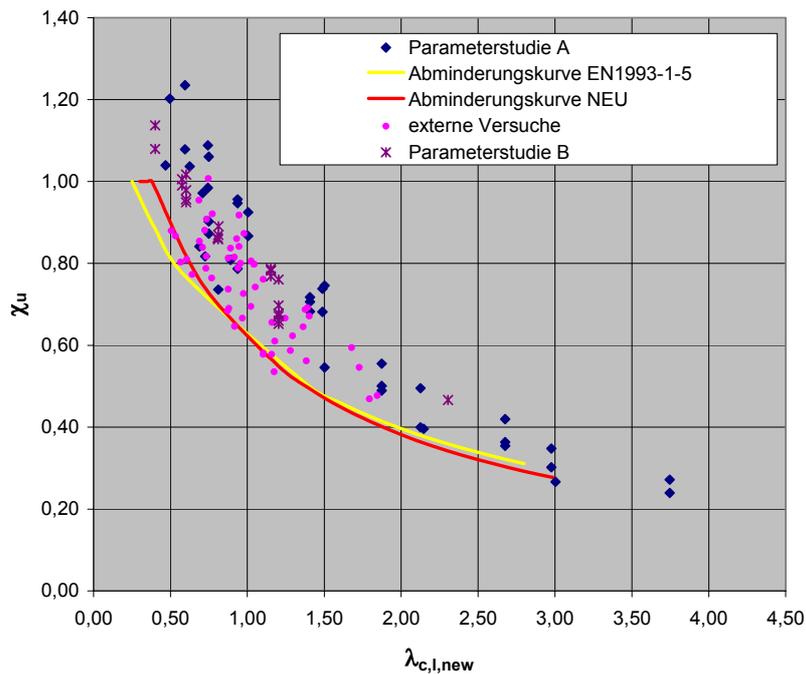


Bild 4.57: Abminderungsfaktoren in Abhängigkeit der Schlankheit $\lambda_{c,l,new}$ (NEU)

Es ist auffällig, dass einige Versuchsergebnisse unterhalb der Abminderungskurve liegen. Es wird vermutet, dass einige Versuche anstelle lokalen Beulens auch zonales Beulen aufweisen. Bei den Versuchen wird nicht nach lokal und zonal unterschieden.

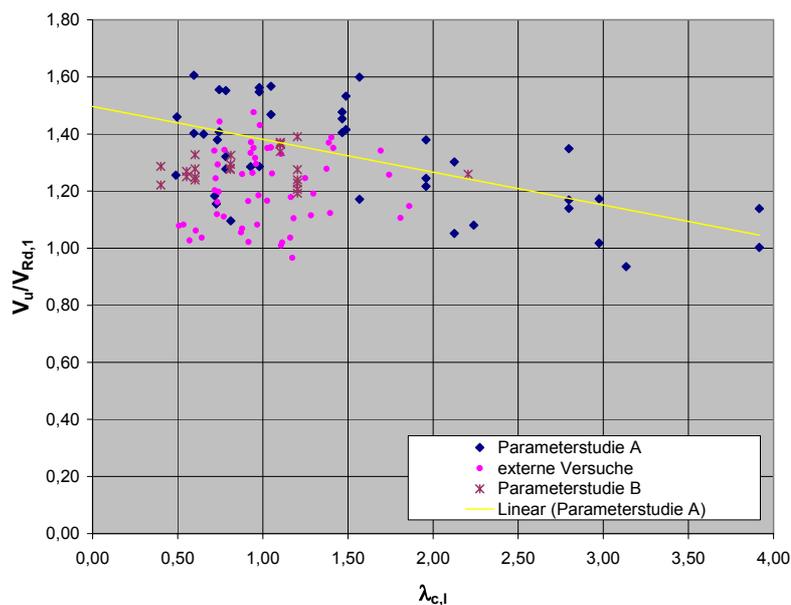


Bild 4.58: Analytische, numerische und experimentelle Traglastergebnisse (EN 1993-1-5)

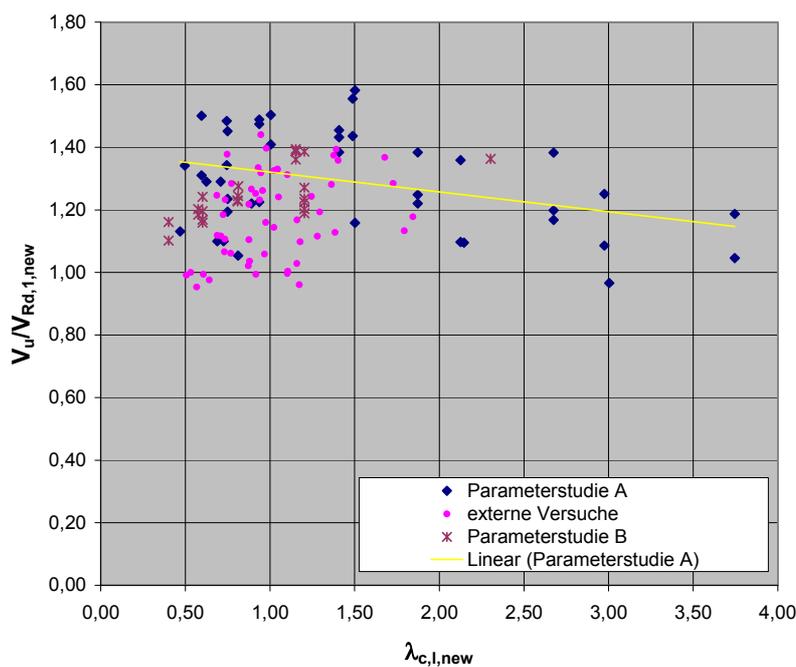


Bild 4.59: Analytisch, numerische und experimentelle Traglastergebnisse (NEU)

Der Vergleich der Trendlinie in den Diagrammen Bild 4.58 und Bild 4.59 zeigt, dass eine Optimierung gelungen (ca.5%) und sinnvoll ist. Die numerischen Ergebnisse liegen im abgesicherten Bereich.

Trapezstegträger - Schubtragfähigkeit für den Nachweis - zonales Beulen

Abweichend von EN 1993-1-5 wird ein Traglastmodell für zonales Beulen vorgeschlagen, welches das Nachbeulverhalten und Imperfektionen berücksichtigt.

Grundlage dafür sind die in Kapitel 4.5, Gl. (4.1) und Gl. (4.2) ermittelten kritischen Beulspannungen für zonales Beulen.

Die Parameterstudien in den folgenden Diagrammen umfassen ausschließlich die Träger, welche durch zonales Beulen gekennzeichnet sind.

Die Abminderungskurve für zonales Beulen wurde auf Grundlage der numerischen Ergebnisse empirisch ermittelt, Gl. 4.9, Bild 4.60, Bild 4.61.

$$\chi_{c,z} = \frac{1}{(0,5 + \lambda_{c,z})} \leq 1 \quad (4.9)$$

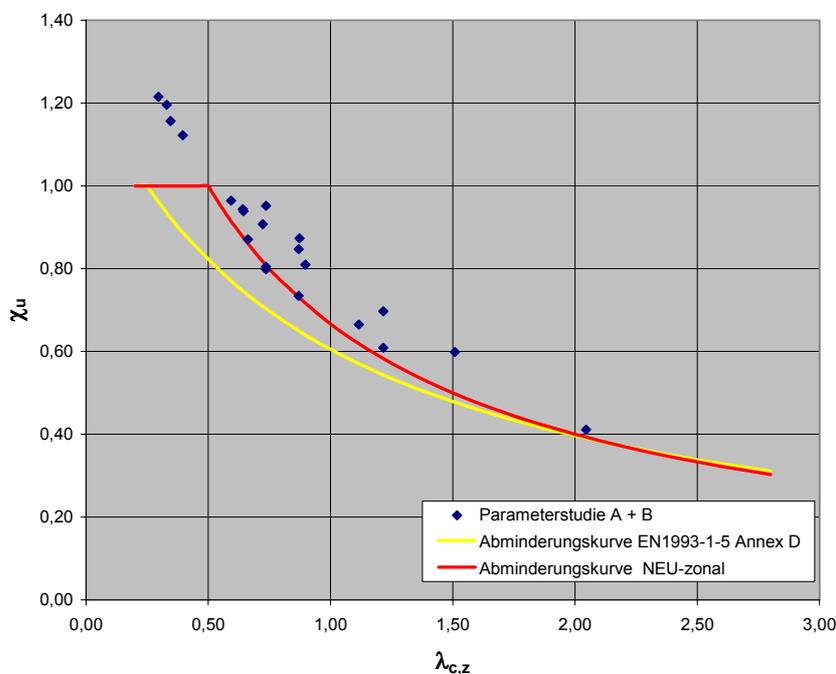


Bild 4.60: Abminderungsfaktoren in Abhängigkeit der Schlankheit $\lambda_{c,z}$ (NEU)

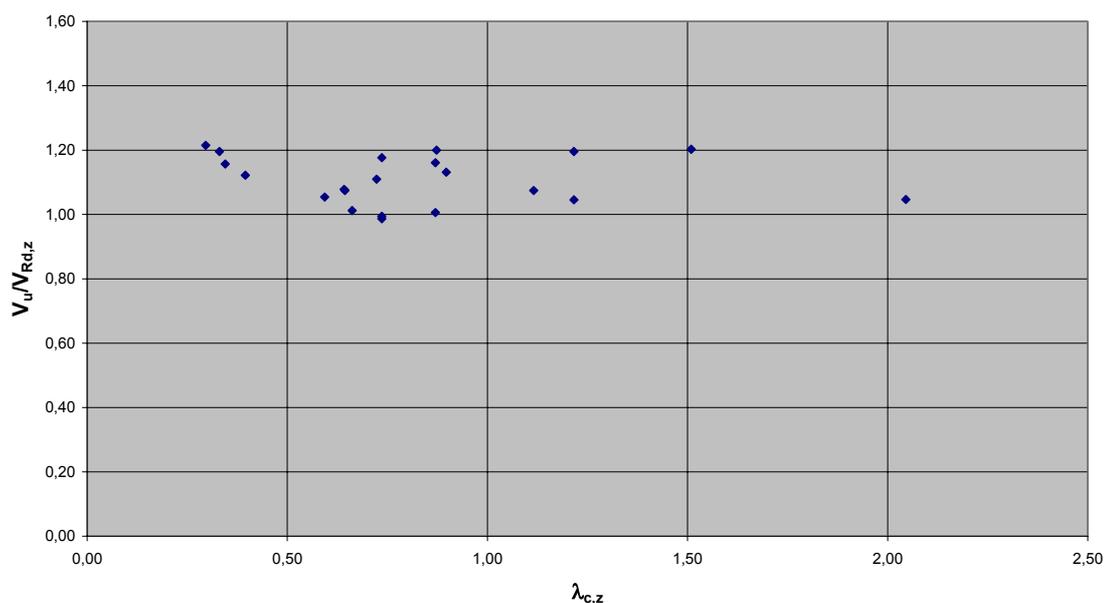


Bild 4.61: Analytische, numerische Traglastergebnisse (NEU)

Wellstegträger - Schubtragfähigkeit für den Nachweis - lokales Beulen

Grundlage zur Ermittlung geeigneter Traglastmodelle für Wellstegträger sind die verwendeten kritischen Beulspannungen Gl. (4.6) und Gl. (4.7) sowie die kritischen Beulspannungen für Schalen nach EN 1993-1-6 Gl. (3.25).

Zunächst sind die Abminderungskurven bezogen auf die Schlankheit $\lambda_{c,shell}$ entsprechend Gl. (3.20) mit der kritischen Beulspannung Gl. (3.25) und $\lambda_{c,Branka,new}$ Gl. (4.7) dargestellt. Dabei ergeben sich unterschiedliche Abminderungsbeiwerte Gl. (4.10) und Gl. (4.11) sowie Bild 4.62 und Bild 4.63.

$$\chi_{c,shell} = \frac{1}{(0,5 + \lambda_{c,shell})^{1,25}} \leq 1 \quad (4.10)$$

$$\chi_{c,l,new} = \frac{1}{(0,5 + \lambda_{c,l,new})^{1,5}} \leq 1 \quad (4.11)$$

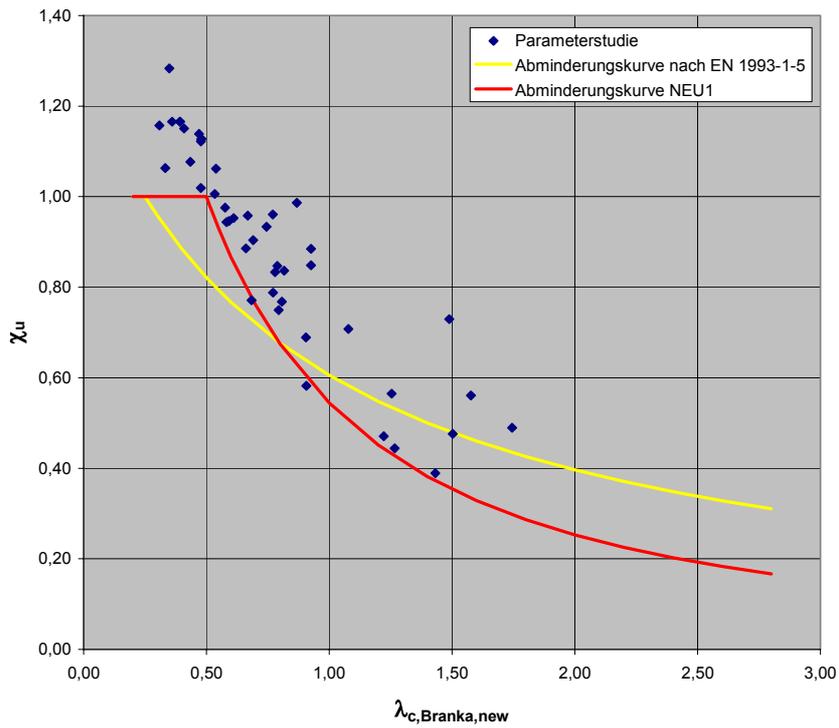


Bild 4.62: Abminderungsfaktoren in Abhängigkeit der Schlankheit $\lambda_{c,l,new}$ (NEU1)

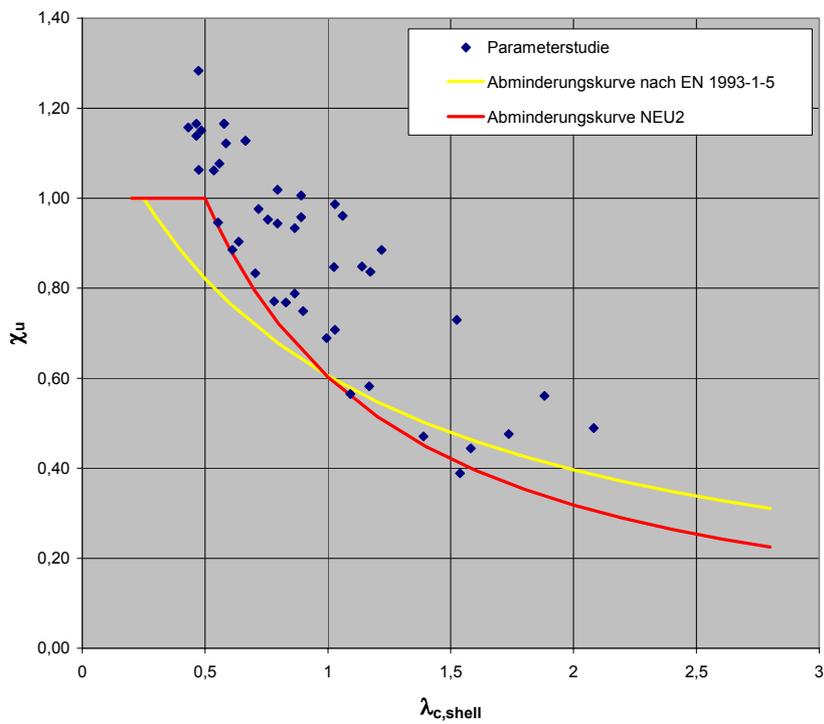


Bild 4.63: Abminderungsfaktoren in Abhängigkeit der Schlankheit $\lambda_{c,shell}$ (NEU2)

In Bild 4.64 sind die Tragfähigkeiten im Verhältnis zum Modell in EN 1993-1-5 dargestellt. Die Plattenschlankheit wird nach [69] berechnet. Es werden keine abgesicherten Ergebnisse erzielt.

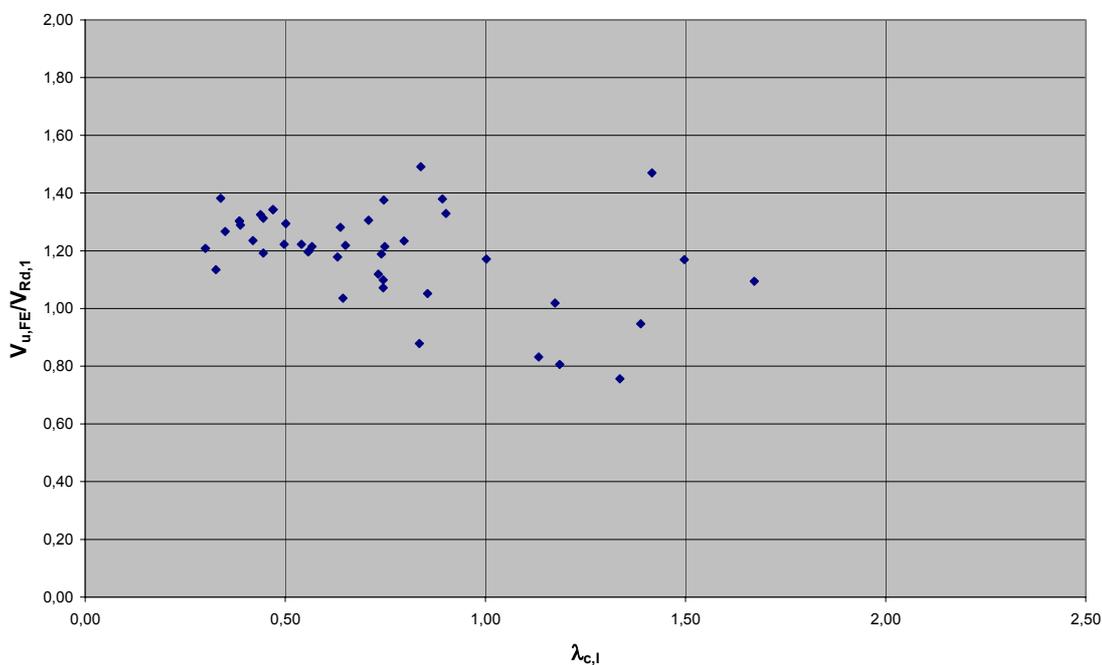


Bild 4.64: Analytische, numerische Traglastergebnisse (EN 1993-1-5 und [69])

In Bild 4.65 sind die Traglastergebnisse im Verhältnis zur rechnerischen Traglast auf Grundlage des neuen Modells NEU1 und in Bild 4.66 im Verhältnis zur rechnerischen Traglast auf Grundlage des Modells NEU2 dargestellt.

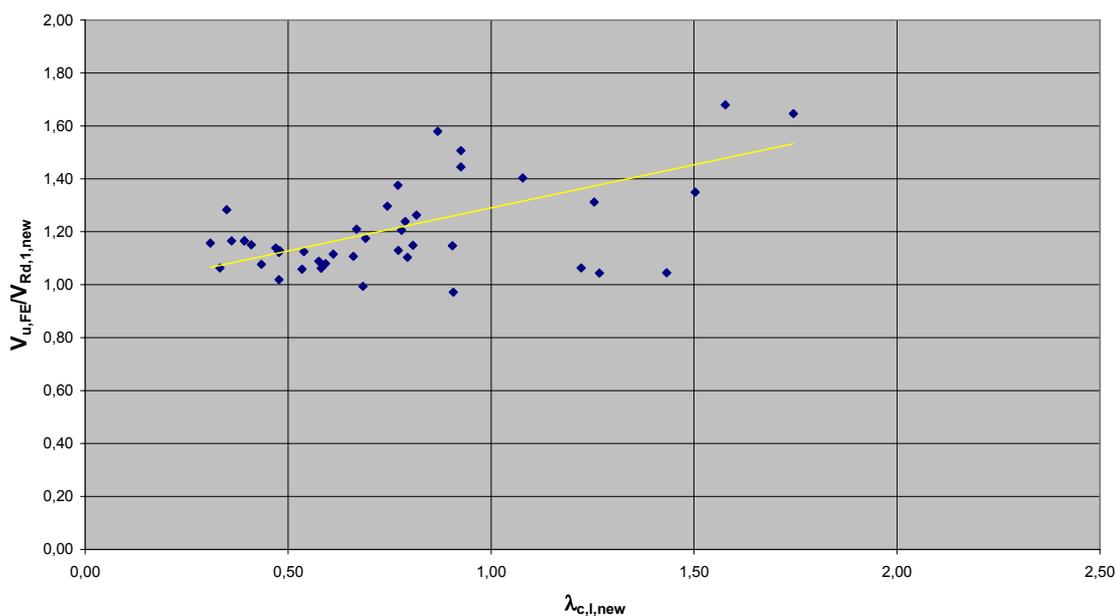


Bild 4.65: Analytische, numerische Traglastergebnisse (NEU1)

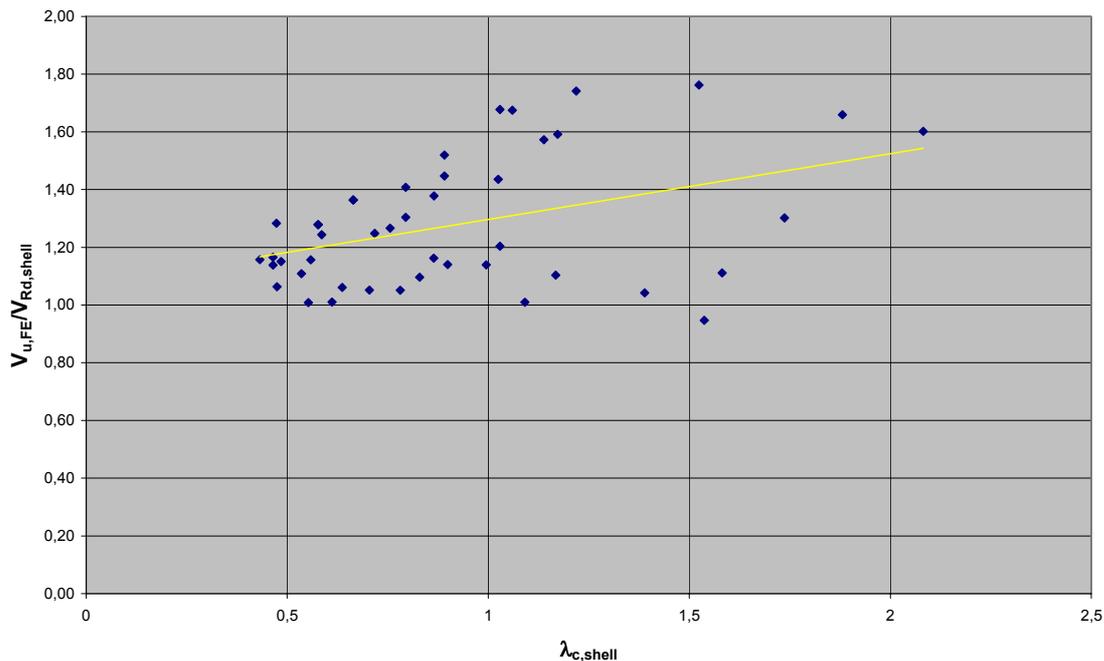


Bild 4.66: Analytische, numerische Traglastergebnisse (NEU2)

Die Trendlinie des Traglastmodells NEU2 Bild 4.66 weist gegenüber dem Modell NEU1 geringfügig bessere Ergebnisse auf. Die ermittelten kritischen Beulspannungen des Modells NEU2 sind zwar konservativer als im Modell NEU1, jedoch liegen die Ergebnisse stets auf der sicheren Seite (>1).

4.7 Zusammenfassung Vorschlag EN 1993-1-5 Annex D

Auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse und empirisch ermittelten, kritischen Beulspannungen sowie Traglastmodelle wird folgender Vorschlag für EN 1993-1-5 Annex D [18] unterbreitet.

D.2.2

(1)

Die Schubtragfähigkeit ist in der Regel wie folgt zu bestimmen:

$$V_{Rd} = \chi_c \cdot \frac{f_{yw}}{\gamma_{M1} \cdot \sqrt{3}} \cdot h_w \cdot t_w \quad (\text{D.4})$$

wobei χ_c der kleinere Wert der Abminderungsbeiwerte aus lokalem Plattenbeulen $\chi_{c,l}$ (siehe (2)), aus zonalem Plattenbeulen $\chi_{c,z}$ (siehe (3)) und globalem Beulen $\chi_{c,g}$ (siehe (3)) ist.

(2)

Der Abminderungsbeiwert $\chi_{c,l}$ für lokales Plattenbeulen für Trapezstegträger ist in der Regel wie folgt zu ermitteln:

$$\chi_{c,l} = \frac{1}{(0,62 + \lambda_{c,l})} \leq 1 \quad (\text{D.5})$$

mit

$$\tau_{cr,l} = 4,83 \cdot E \cdot \left[\frac{t_w}{a_{\max} \cdot R} \right]^2 \quad (\text{D.6})$$

$$R = \left(\frac{a_{\min}}{a_{\max}} \right)^{1/16} \quad (\text{D.7})$$

$$\frac{a_{\min}}{a_{\max}} \geq 0,5, \text{ sonst } R=1$$

$$\bar{\lambda}_{c,l} = \sqrt{\frac{f_y}{\tau_{cr,l} \cdot \sqrt{3}}} \quad (\text{D.8})$$

a_{\max} ist der größere Wert von a_1 und a_2

a_{\min} ist der kleinere Wert von a_1 und a_2

Für sinusförmig profilierte Stegbleche ist der Abminderungsbeiwert $\chi_{c,l}$ für lokales Plattenbeulen mit:

$$\chi_{c,shell} = \frac{1}{(0,5 + \lambda_{c,shell})^{1,25}} \leq 1 \quad (\text{D.9})$$

und $\tau_{cr,l}$ nach EN 1993-1-6 und die bezogene Schlankheit entsprechend D.8 zu ermitteln. Der Krümmungsradius r der Schale kann für die Wellstegträger wie folgt erfasst werden:

$$r = \frac{0,25w^2}{a_3} + 0,25a_3 - 0,5t_w \quad (\text{D.10})$$

Werden Profilierungsabmessungen $\cos \alpha$ und a_{\max}/t_w der Trapezstegträger (Bild D.2) unterschritten, ist zusätzlich der Nachweis gegen zonales Plattenbeulen zu führen.

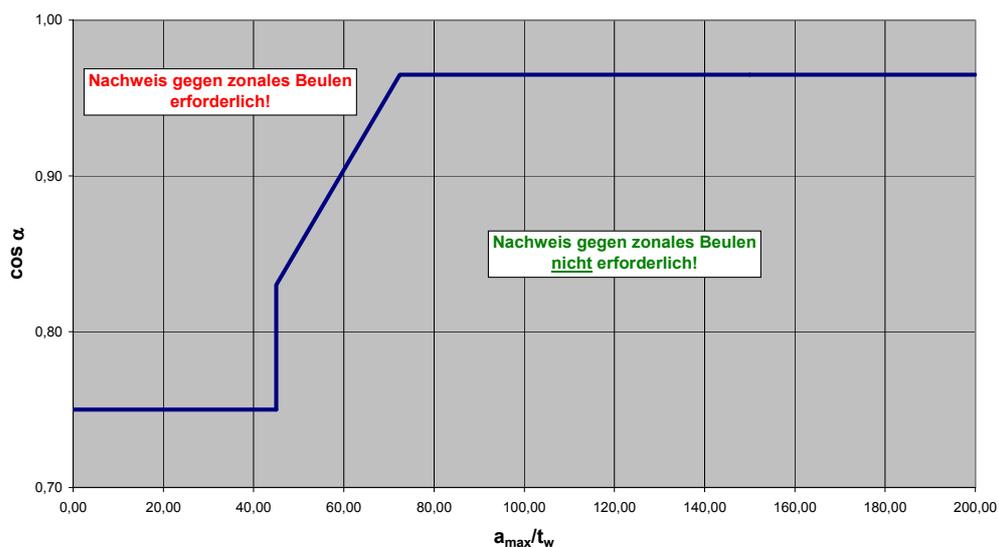


Bild 4.67: Bild D.2 in EN 1993-1-5 Annex D

Der Abminderungsbeiwert $\chi_{c,z}$ für zonales Plattenbeulen ist in der Regel wie folgt zu berechnen:

$$\chi_{c,z} = \frac{1}{(0,5 + \lambda_{c,z})} \leq 1 \quad (\text{D.10})$$

mit

$$\tau_{cr,z} = E \cdot \left(\frac{t_w}{a_{\max,z}} \right)^{1,5} \cdot \left(\frac{0,9}{\cos \alpha} \right)^2 \quad (\text{D.11})$$

$$\lambda_{c,z} = \sqrt{\frac{f_{y,w}}{\tau_{cr,z} \cdot \sqrt{3}}} \quad (\text{D.12})$$

Darin bedeutet $a_{\max,z} = a_1 + a_2$.

Für sinusprofilerte Stegbleche ist der Nachweis gegen zonales Beulen nicht zu führen.

(3) - keine Änderungsvorschläge für [18] -

5 Gurtbeulen

5.1 Allgemeines

Dieses Kapitel befasst sich mit dem Einfluss der Stegprofilierung auf den druckbeanspruchten Gurt. Insbesondere wird dabei folgende Frage beantwortet, ob die Annahmen der Beulfeldabmessungen für das plattenartige Gurtbeulen nach [18] gerechtfertigt sind. Es werden allgemeine Aussagen und Beurteilungen zum Beulverhalten des Gurtes getroffen.

Numerische Berechnungen an druckbeanspruchten Gurten mit Stützung durch beliebig profilierte Stege bilden die Grundlage der Untersuchungen. Die Ergebnisse werden durch eigene und externe, experimentelle sowie numerische Untersuchungen ([55], [44], [34]) zum Gurtbeulverhalten von Well- und Trapezstegträgern ergänzt und verifiziert. Anschließend erfolgt eine Gegenüberstellung numerischer und analytischer Berechnungen.

5.2 Großversuche und externe Untersuchungen

5.2.1 Allgemeines

Zur Validierung des finiten Elemente Modells, welches die Grundlage für die Parameterstudie liefert, werden eigene Versuche zum Gurtbeulverhalten an Trägern mit sinusförmiger Stegprofilierung durchgeführt. Dabei werden Querschnittsabmessungen und Randbedingungen der Träger so gewählt, dass die Traglast ausschließlich durch Versagen des Druckgurtes erreicht wird. Die durchgeführten Versuche orientieren sich an den Versuchsträgern, die an der TU Krakau zum M-V Interaktionsverhalten verwendet werden [44]. Grund dafür ist die Erhöhung der Anzahl der Versuchsträger und die damit verbundene erhöhte statistische Sicherheit bei der Versuchsauswertung. Die Ergebnisse der Untersuchungen an der TU Krakau werden für die Gurtbeulbetrachtungen herangezogen und ergänzen somit die eigene Versuchsreihe zu den Wellstegträgern.

Die eigenen Versuchsreihen umfassen ausschließlich Träger mit feingliedrig und sinusförmig profilierten Stegen.

5.2.2 Versuchsträger

Durch die Anordnung von beidseitigen Querschotten und zwei Lasteinleitungssteifen werden die Träger der Versuchsreihe 4 in vier rechteckige Teilfelder mit unterschiedlichen Seitenverhältnissen geteilt. Das b_f/t_f Verhältnis der Gurte beträgt 20. Das h_w/t_w Verhältnis des Steges beträgt 250. Die Verhältnisse der Profilierung b_f/a_3

sowie $2w/b$ betragen 5 und 1,3. Die Stegprofilierung wird mit $2s = 179,6$ mm und $a_3 = 38$ mm ermittelt. Die Spannweite l der Versuchsträger V4a bis V4c beträgt 5745 mm, Bild 3.4. Bei den Versuchsträgern (Bild 5.1) wird eine Zweipunktlasteinleitung vorgesehen. Damit konnte eine konstante Momentenbelastung im mittleren Bereich des Druckgurtes erzielt werden. Die Einzellasten wurden mittels einer PC-gesteuerten 1000 kN Hydraulikpresse über den beiden mittleren Steifen aufgebracht. Zur gleichmäßigen Lastverteilung werden Vierkantprofile 20 mm x 20 mm x 200 mm an den Lastangriffspunkten verwendet (Bild 5.2).

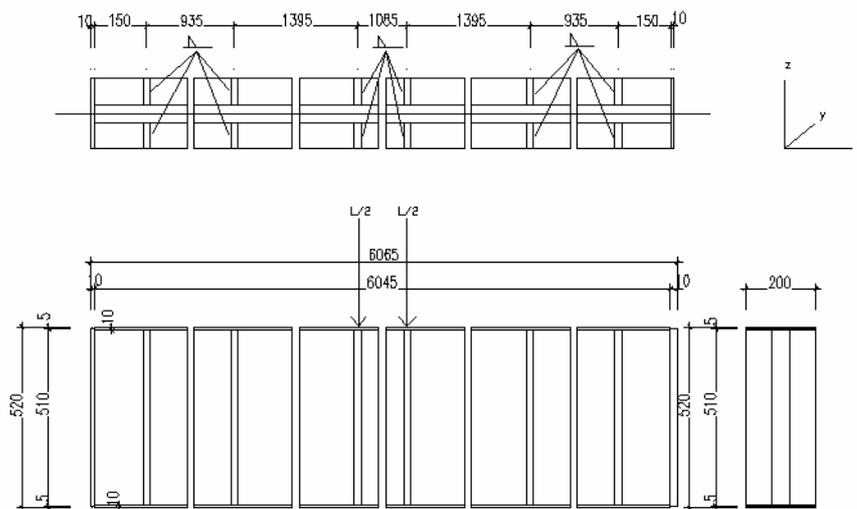


Bild 5.1: Abmessungen der Versuchsträger BTU Cottbus und Lasteinleitung

Die Lagerung des Trägers ist statisch bestimmt. Der Träger wird auf einem festen und einem losen Rollenlager über den Steifen im Auflagerbereich, welche im Abstand von 150 mm vom Trägerrand positioniert sind, gelagert. Die Abmessungen der Versuchsträger der Versuchsreihe V4 sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Tabelle 5.1: Abmessungen der Versuchsträger [mm]

	h	t_w	b_{r1}	t_{r1}	b_{r2}	t_{r2}	$t_{s1,6}$	$t_{s2,5}$	$t_{s3,4}$	L	$f_{y,f}$
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[N/mm ²]
V4a	500	2,0	200	10,1	200	10,0	15,0	15,0	15,0	6065	335
V4b	500	2,0	200	10,1	200	10,0	15,0	15,0	15,0	6065	335
V4c	500	2,0	200	10,1	200	10,0	15,0	15,0	15,0	6065	335

Die Versuchsträger der Krakauer Versuchsprogramme ergänzen die durchgeführten Versuche zum Gurtbeulverhalten sinusförmiger Profilierungen. Sämtliche Angaben zu diesen Versuchsträgern sind in Kapitel 5.2.4 zusammengefasst.



Bild 5.2: Versuchseinrichtung BTU Cottbus

Zur Beurteilung des Tragverhaltens werden für die Ermittlung der Stützkkräfte Kraftmessdosen (Typ C2, Hottinger Baldwin Messtechnik HBM, Darmstadt) verwendet. Die Durchbiegung des Trägers wird an verschiedenen Stellen mittels mehrerer Wegaufnehmer (Typ IWT 402, Messbereich 100 mm, Hottinger Baldwin Messtechnik HBM, Darmstadt) gemessen. Die Wegaufnehmer sind am Steg und am Untergurt angebracht. Daher erlaubt die Auswertung der Verformungen eine genaue Ermittlung der vertikalen Verschiebungen. Darüber hinaus werden horizontale Wegaufnehmer in Trägermitte am Ober- und Untergurt angebracht, um den Anteil der horizontalen Verschiebungen bzw. Verdrehungen des Versuchsträgers zu erfassen. Zur Ermittlung der Dehnungen werden im mittleren Bereich des Druckgurtes lineare Dehnmessstreifen angebracht (1-LY11-10/350). Des Weiteren werden im Steg Rosetten angebracht, um die auftretenden Hauptdehnungen zu ermitteln [37].

Die Materialkennwerte werden an Proben im einfachen Zugversuch in Anlehnung an die Norm DIN EN 10002, Teil 1 bestimmt (Anlage A2).

Strukturelle Imperfektionen der Versuchsträger werden nicht bestimmt, vereinfachend wurden Ersatzimperfektionen für die nachfolgenden numerischen Berechnungen angenommen (Kapitel 5.2.5)

5.2.3 Versuchsdurchführung und -ergebnisse

Die Traglastversuche erfolgen weggesteuert mit einer Geschwindigkeit von 0,6 mm/min. Die Laststeigerung erfolgt bei allen Versuchsträgern über eine schrittweise Vergrößerung des Zylinderweges der Prüfmaschine. Alle Versuchsträger zeigen ein sehr ähnliches Versagensverhalten, welches ausführlich am Versuchsträger V4a im Folgenden beschrieben ist.

Beim Versuchsträger V4a wird nach Lasteinleitung bei einer Kraft von 271 kN die erste Beule im Obergurt sichtbar. Genau mittig des Trägers verformt sich der Gurt in z-

Richtung. Das Traglastmaximum wird zuvor mit 276,9 kN erreicht. Es wird vermutet, dass mit Beginn des Lastabfalls Beulen senkrecht zur Gurtebene auftreten. Danach erfolgt ein allmählicher Lastabfall bis zu einer Last von 206,9 kN. Während des Lastabfalls weichen Ober- und Untergurt zunehmend in gleiche y-Richtung (positiv) aus. Bei einer Last von 206,9 kN kommt es zu einem biegedrillknickähnlichen Verhalten des Trägers. Die Obergurtverschiebung nimmt schlagartig um $\Delta y = 23,3$ mm zu. Der Untergurt ändert seinen Richtungssinn mit einer Wegänderung von $\Delta y = 25$ mm. Das plötzliche Ausweichen des Trägers deutet auf ein globales Stabilitätsproblem hin. Es wird vermutet, dass für die vorliegenden Trägerabmessungen die Versagensarten lokales Gurtbeulen und Biegedrillknicken dicht beieinander liegen und sich gegenseitig beeinflussen. Die beiden weiteren untersuchten Träger versagen bei nur unbedeutend geringeren Traglasten infolge lokalen Stabilitätsverlustes des Gurtes. Globaler Stabilitätsverlust wird nicht beobachtet. Mit Erreichen der Traglast werden auch hier Gurtbeulen sichtbar. Bild 5.3 zeigt Gurtbeulen wie sie sich bis zum Erreichen des Traglastmaximums entwickeln und sich darüber hinaus ausprägen.



Bild 5.3: Gurtbeule bei Traglast und weiterer Laststeigerung

Die Traglastergebnisse sind in Tabelle 5-2 zusammengefasst.

Tabelle 5-2: Traglastergebnisse der Versuchsreihe V4 und analytische Auswertung nach DIN 18800 und EN 1993-1-5

Versuch	DIN 18800T3								EN 1993-1-5					
	F_u [kN]	σ_u [N/mm ²]	R [-]	$\sigma_u / f_{y,f}$ [-]	k_σ [-]	λ_p [-]	$\sigma_u / \sigma_{p,Rd,1}$ [-]	$\sigma_u / \sigma_{p,Rd,2}$ [-]	$k_{\sigma,1}$ [-]	$k_{\sigma,2}$ [-]	λ_p [-]	ρ [-]	$\rho * f_{y,f}$ [N/mm ²]	$\sigma_u / \rho * f_{y,f}$ [-]
V4a	1290	323	0,13	0,96	0,43	0,74	1,01	1,01	1,39	0,60	0,62	1,00	335	0,96
V4b	1275	319	0,13	0,95	0,43	0,74	1,00	1,00	1,39	0,60	0,62	1,00	335	0,95
V4c	1273	318	0,13	0,95	0,43	0,74	1,00	1,00	1,39	0,60	0,62	1,00	335	0,95

F_u beschreibt die resultierende Beanspruchung für den Druckgurt des Trägers. Daraus ergeben sich die maximalen Druckspannungen im Gurt σ_u . Das Flächenverhältnis R ist in Kapitel 5.2.4 beschrieben.

Die erzielten Tragspannungen im Druckgurt liegen nahe der Fließgrenze. Es tritt kein Gurtbeulen im rein elastischen Zustand auf. Vergleichend sind die Grenzbeulspannungen nach DIN 18800 und EN 1993-1-5 zusammengefasst. Tragspannungen und Grenzbeulspannungen liegen dicht beieinander. Nach EN 1993-1-5 werden diese leicht unterschritten.

Bild 5.4 zeigt das Last-Verformungsdiagramm der Versuchsreihe V4a. Hierbei sind die vertikalen Verformungen des Maschinenweges dargestellt. Es wird die Darstellung des Maschinenweges gewählt, da der Wegaufnehmer kurz vor Erreichen des Traglastmaximums versagt.

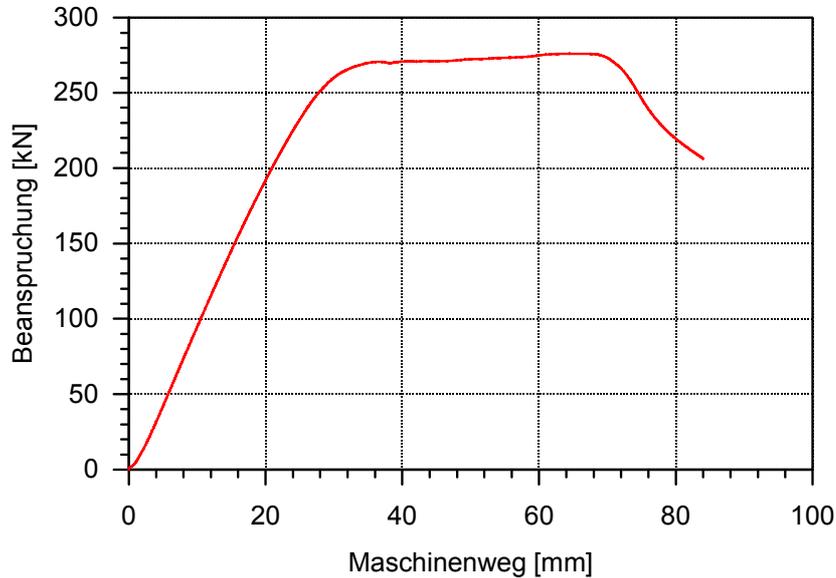


Bild 5.4: Last-Verformungsdiagramm der Versuchsreihe V4a

5.2.4 Externe Untersuchungen

Nachfolgend sind externe experimentelle sowie numerische Untersuchungen an Well- und Trapezstegträgern mit wesentlichen Informationen zusammengefasst, die für weiterführende Betrachtungen im Rahmen dieser Untersuchungen herangezogen werden.

TU Krakau

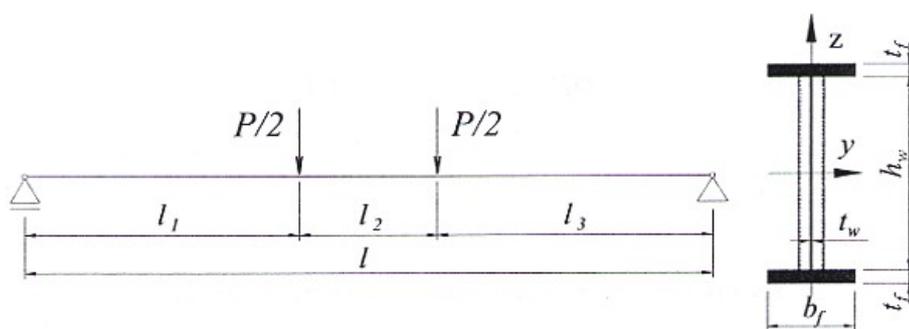


Bild 5.5: Statisches Modell der Krakauer Versuchsträger [44]

Tabelle 5.3: Abmessungen der Krakauer Versuchsträger [44]

-	l	l ₁	l ₂	l ₃	b _w	t _w	b _f	t _f	A _f	A _w
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[cm ²]	[cm ²]
A1	7147	3134	947	3066	500	2,1	200	12,0	48,0	10,5
A2	7142	3146	940	3056	500	2,1	200	12,1	48,4	10,5
A3	7096	3098	954	3044	500	2,0	200	12,0	48,0	10,5

Die Abmessungen der Sinusprofilierung (Wellenamplitude und -länge) entsprechen denen in Kapitel 5.2.2. Die Stegprofilierung beträgt $2s = 180$ mm und $a_3 = 40$ mm. Die Streckgrenze der Stege beträgt $f_{y,w} = 302$ N/mm² und die Streckgrenze der Gurte $f_{y,f} = 271,5$ N/mm².

Tabelle 5.4: Vergleich der Tragspannungen der Versuchsergebnisse mit analytischen Modellen der Grenzbeulspannungen

Versuch	DIN 18800T3								EN 1993-1-5					
	F _u	σ _u	R [-]	σ _u / f _{y,f}	k _σ	λ _p	σ _u /σ _{p,Rd,1}	σ _u /σ _{p,Rd,2}	k _{σ,1}	k _{σ,2}	λ _p	ρ	ρ*f _{y,f}	σ _u /ρ*f _{y,f}
	[kN]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[-]
A1	1269	264	0,13	0,98	0,43	0,55	0,98	0,98	1,37	0,60	0,46	1,00	271	0,98
A2	1289	269	0,13	0,99	0,43	0,55	0,99	0,99	1,37	0,60	0,46	1,00	271	0,99
A3	1250	260	0,13	0,96	0,43	0,55	0,96	0,96	1,37	0,60	0,46	1,00	271	0,96

Die Tragspannungen des Gurtes erreichen annähernd die Fließgrenze des Materials im Versagenszustand. Es kann nicht von einem rein elastischen Gurtbeulen ausgegangen werden. Die Querschnittsabmessungen des Gurtes sind für Gurtbeulbetrachtungen nicht optimal. Betrachtet man die analytisch berechneten Grenzbeulspannungen (Tabelle 5.4) so werden nach DIN 18800 (Kapitel 3.2) und EN 1993-1-5 (Kapitel 3.4) zufrieden stellende Ergebnisse erzielt. Die Berechnung der Beulwerte für plattenähnliches Beulen nach EN 1993-1-5 liefert sehr große Beulwerte. Es stellt sich die Frage, ob die Berechnung der Beulwerte (plattenähnliches Gurtbeulen) für feingliedrige Profilierungen nach EN 1993-1-5 [18] gerechtfertigt ist und angewandt werden kann.

Johnson/Cafolla

Johnson/Cafolla [34] untersuchen den Einfluss des Abstandes b (hier bezeichnet als c), vom freien Rand bis zum Steg, hinsichtlich des lokalen Gurtbeulens von Trapezstegträgergurten. Mit Hilfe numerischer Berechnungen ist eine Klassifizierung in Abhängigkeit der geometrischen Profilierungsparameter gelungen. Johnson/Cafolla definieren einen maximalen (c_L), mittleren (c_M) und minimalen (c_S) Abstand vom Schweißnahtanschluss Steg hin zum freien Rand des Gurtes. W beschreibt die Schenkellänge des Steg-Gurt Schweißnahtanschlusses.

$$\begin{aligned}
 c_L &= (b_f + a_4 \cdot \tan \alpha - t_w) / 2 - W \\
 c_M &= (b_f - t_w) / 2 - W \\
 c_s &= (b_f - a_4 \cdot \tan \alpha - t_w) / 2 - W
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

Bei einseitig geschweißten Trägern (z.B. Wellstegträger) ist es sinnvoll, den Abstand b jeweils vom Flanschrand bis zur Schweißnahtwurzel anzunehmen.

Für die numerischen Berechnungen werden folgende geometrische Parameter der Profilierungen variiert:

t_f (6 mm, 8 mm), b_f (200 mm), a_1 (0 mm-250 mm), a_4 (20 mm-200 mm), α (30°–45°)

Die numerischen Ergebnisse werden in Abhängigkeit von geometrischen Verhältnissen dargestellt. Johnson/Cafolla untersuchen verschiedene Funktionen, welche Längen- bzw. Flächenverhältnisse der Profilierung und des Gurtes abbilden. In [34] sind die geometrischen Funktionen beschrieben. Zur dimensionslosen Darstellung wird die Funktion R Gl. (5.2), welche Flächenverhältnisse beschreibt, gewählt:

$$\frac{(a_1 + a_4) a_3}{(a_1 + 2a_4) b_f} = R
 \tag{5.2}$$

Die Ergebnisse der numerischen Berechnungen zeigen, dass für bestimmte geometrische Abmessungen der Gurte und Profilierungen der mittlere Randabstand c_M für profilierte Träger, auf der sicheren Seite liegend, angewandt werden kann, Gl. (5.3).

$$R < 0,14
 \tag{5.3}$$

Ergänzend zu den numerischen Untersuchungen werden von Johnson/Cafolla fünf Versuche zum Gurtbeulen durchgeführt (Bild 5.5).

Tabelle 5-5: Geometrie und Materialwerte der Versuchsträger [34]

Versuch	t_f [mm]	b_f [mm]	a_1 [mm]	a_4 [mm]	α [°]	t_w [mm]	h_w [mm]	L [mm]	$f_{y,t}$ [N/mm ²]	$f_{y,s}$ [N/mm ²]
CW1	8,39	200	180	45	45	3,06	440	450	306	320
CW2	6	200	180	45	45	3,29	440	450	414	312
CW3	8,1	200	250	45	45	3,26	440	590	216	284
CW4	6,08	200	250	45	45	2,97	440	590	362	222
CW5	6	200	250	63	45	2,97	440	626	362	222

Die Versuchsträger CW1 und CW2 sind im Versuch druckbeansprucht, die Träger CW3 - CW5 druck- und schubbeansprucht. $f_{y,s}$ entspricht $f_{y,w}$.

Die Querschnittsabmessungen der Gurte werden so gewählt, dass die Gurte nach EN 1993-1-5 [18] in die Querschnittsklasse 3-4 eingeordnet werden können.

Für die Versuchsträger kann gezeigt werden, dass die Berechnung der kritischen Gurtbeulwerte mit c_M zu unsicheren Ergebnissen führt [34]. In Tabelle 5.6 sind die Ergebnisse der Versuche im Vergleich zu DIN 18800 [11], Kapitel 3.2 und EN 1993-1-5 (Kapitel 3.4) dargestellt. An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass von der Verfasserin dieser Arbeit in den vorliegenden Unterlagen [34] Unstimmigkeiten

zwischen den angegebenen maximalen Tragspannungen in den Gurten und den auftretenden Versagenslasten festgestellt werden. Wahrscheinlich liegen von Seiten der Verfasserin Interpretationsschwierigkeiten auf Grund ungenügender Informationen zu den Versuchen vor. In [34] werden stets die Tragspannungen mit analytischen Modellen verglichen. Für die Auswertung in Tabelle 5.7 werden demnach ebenso die Tragspannungen aus [34] zugrunde gelegt.

Tabelle 5.6: Vergleich der Tragspannungen der Versuchsergebnisse mit analytischen Modellen der Grenzbeulspannungen

Versuch	DIN 18800T3								EN 1993-1-5					
	F_u [kN]	σ_u [N/mm ²]	R [-]	$\sigma_u / f_{y,f}$ [-]	k_σ [-]	λ_p [-]	$\sigma_u / \sigma_{P,Rd,1}$ [-]	$\sigma_u / \sigma_{P,Rd,2}$ [-]	$k_{\sigma,1}$ [-]	$k_{\sigma,2}$ [-]	λ_p [-]	ρ [-]	$\rho * f_{y,f}$ [N/mm ²]	$\sigma_u / \rho * f_{y,f}$ [-]
CW1	997	297	0,19	0,97	0,43	0,86	1,20	1,22	0,62	0,60	0,73	1,00	306	0,97
CW2	662	276	0,19	0,67	0,43	1,43	1,36	1,69	0,63	0,60	1,20	0,70	291	0,95
CW3	710	219	0,20	1,01	0,43	0,76	1,09	1,10	0,55	0,60	0,66	1,00	216	1,01
CW4	550	226	0,20	0,62	0,43	1,31	1,17	1,40	0,55	0,60	1,15	0,73	263	0,86
CW5	610	254	0,26	0,70	0,43	1,43	1,44	1,80	0,55	0,60	1,27	0,67	244	1,04

Entsprechend [34] werden die maximalen Gurtspannungen infolge lokalen Gurtbeulens bei den Versuchsträgern CW1-CW3 und CW5 erreicht. Der Versuchsträger CW4 zeigt zuerst lokale Beulen im Steg und anschließend lokale Gurtbeulen. Die Dehnmessstreifen in den Gurten weisen ein nichtlineares Verhalten auf. Der Versuchsträger CW4 wird deshalb für die Auswertung nicht näher betrachtet.

Die Traglastspannungen der Versuchsträger CW1 und CW3 erreichen die Fließgrenze des Materials.

Vergleicht man die berechneten Grenzbeulspannungen nach DIN 18800 und EN 1993-1-5 [18], so werden nach [18] stark optimierte Grenzbeulspannungen erzielt. Nach DIN 18800 werden zu konservative Grenzbeulspannungen ermittelt.

Lindner

Es werden fünf Versuche an druckbeanspruchten Trapezstegträgern durchgeführt. Es werden zwei b_f/a_3 Verhältnisse gewählt. Alle anderen Abmessungen bleiben konstant, Tabelle 5.7.

Tabelle 5.7: Abmessungen der Versuchsträger Lindner

Träger	t_f [mm]	b_f [mm]	a_1 [mm]	a_4 [mm]	α [°]	t_w [mm]	h_w [mm]	L [mm]	$f_{y,f}$ [N/mm ²]
TST100A	5	150	150	100	45	1	350	1256	316
TST100B	5	150	150	100	45	1	350	1256	317
TST100C	5	150	150	100	45	1	350	1256	329
TST50A	5	150	150	50	45	1	350	1006	336
TST50B	5	150	150	50	45	1	350	1006	289

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass das Verhältnis b_f/a_3 erheblichen Einfluss auf die Traglast und das Versagenverhalten ausübt. In Tabelle 5.8 sind die Versuchsergebnisse im Vergleich zu DIN 18800 und EN 1993-1-5 dargestellt.

Tabelle 5.8: Vergleich der Tragspannungen der Versuchsergebnisse mit analytischen Modellen der Grenzbeulspannungen

Versuch	DIN 18800T3								EN 1993-1-5						
	F_u [kN]	σ_u [N/mm ²]	R [-]	$\sigma_u / f_{y,f}$ [-]	k_σ [-]	λ_p [-]	$\sigma_u / \sigma_{p,Rd,1}$ [-]	$\sigma_u / \sigma_{p,Rd,2}$ [-]	$k_{\sigma,1}$ [-]	$k_{\sigma,2}$ [-]	λ_p [-]	ρ [-]	$\rho \cdot f_{y,f}$ [N/mm ²]	$\sigma_u / \rho \cdot f_{y,f}$ [-]	
TST100A	277	184	0,48	0,58	0,43	1,52	1,27	1,65	0,55	0,60	1,35	0,64	202	0,91	
TST100B	251	167	0,48	0,53	0,43	1,53	1,15	1,50	0,55	0,60	1,35	0,64	202	0,83	
TST100C	262	175	0,48	0,53	0,43	1,55	1,18	1,56	0,55	0,60	1,37	0,63	207	0,85	
TST50A	296	197	0,27	0,59	0,43	1,25	1,05	1,22	0,58	0,60	1,08	0,77	258	0,77	
TST50B	263	175	0,27	0,61	0,43	1,16	1,01	1,13	0,58	0,60	1,00	0,81	235	0,75	

Die erreichten Tragspannungen liegen weit unterhalb der Fließspannungen. Es kann davon ausgegangen werden, dass das Erreichen der kritischen Beullasten Ursache für das Versagen der Versuchsträger ist. Die Querschnittsabmessungen werden gut gewählt. Die erzielten Versuchsergebnisse werden mit den analytischen Ergebnissen nach DIN 18800 und EN 1993-1-5 verglichen. Mit der Annahme des geringsten Beulwertes nach DIN 18800 und der Beultragkurve für dreiseitig gelagerte Platten mit

- konstanten Randverschiebungen und
- konstanten Randspannungen

werden abgesicherte Grenzbeulspannungen für die Versuchsträger erzielt. Es zeigt sich, dass die Berechnung der Grenzbeulspannungen unter Annahme konstanter Randverschiebungen optimierte Grenzbeulspannungen liefert. Dabei ist zu klären, ob die Annahme des geringsten Beulwertes mit $k_\sigma = 0,43$ sinnvoll ist.

Vergleicht man die Tragspannung der Versuchsträger mit den berechneten Grenzbeulspannungen nach EN 1993-1-5 werden keine abgesicherten Ergebnisse erzielt. Die berechneten Grenzbeulspannungen sind größer als die im Versuch ermittelten (Tabelle 5.8). Die analytischen Grenzbeulspannungen nach EN 1993-1-5 werden auf Grundlage des wirksamen Querschnittes mit der bekannten Winter-Formel für dreiseitig gelagerte Platten berechnet. Die Formel berücksichtigt sowohl das überkritische Nachbeulverhalten als auch geometrische und strukturelle Imperfektionen. Somit hängt die Wirksamkeit des Querschnittes von der bezogenen Plattenschlankheit ab. Die Beultragkurve nach EN 1993-1-5 beruht auf vielen Untersuchungen von Trägern mit ebenen Stegen. Der Vergleich mit Ergebnissen an Trapezstegträgern (Tabelle 5.8) zeigt, dass die Annahmen für Träger mit profilierten Stegen in EN 1993-1-5 nicht optimal sind.

Zusätzlich zu den experimentellen Versuchen werden von Lindner numerische Berechnungen durchgeführt. Dabei wird bei allen Berechnungen die Gurtbreite $b_f = 150$ mm konstant angenommen [55].

Es werden die Geometrieparameter $b_f/t_f \{37,5; 30; 25; 20; 15\}$, $b_f/a_3 \{1,25; 1,5; 1,75; 2; 2,5; 3\}$, Spreizung $\alpha \{30^\circ; 45^\circ\}$, $a/b \{1,25; 1,5; 1,75; 2; 2,25; 2,5; 2,75; 3,0\}$ und die Randspannungsverhältnisse $\phi \{1; 0,75; 0,5\}$ variiert. Anhand dieser numerischen Studie zu den Trapezstegträgern konnten fundierte Aussagen zum Gurtbeulverhalten von Trapezstegträgern getroffen werden. Beulwerte werden ermittelt. Beispielhaft sind die

numerisch ermittelten Beulwerte [55] für die Gurte, die den Abmessungen der Versuchsträger entsprechen, in Tabelle 5.9 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die numerisch ermittelten die analytischen Beulwerte überschreiten (Vgl. Tabelle 5.8 und Tabelle 5.9). Werden die numerischen Beulwerte für die Berechnung der Grenzbeulspannung nach DIN 18800 und EN 1993-1-5 zugrunde gelegt, werden Überschätzungen des Tragverhaltens für beide Beultragkurven erzielt. Es verstärkt sich die Frage, ob die Anwendung der Beultragkurven für Trapezstegträger nach dem derzeitigen Stand EN 1993-1-5 zweifelsfrei ist.

Tabelle 5.9: Vergleich Grenzbeulspannungen auf Grundlage numerisch ermittelter Beulwerte

Versuch	DIN 18800T3								EN 1993-1-5						
	F_u [kN]	σ_u [N/mm ²]	R [-]	$\sigma_u / f_{y,f}$ [-]	k_σ [-]	λ_p [-]	$\sigma_u / \sigma_{P,Rd,1}$ [-]	$\sigma_u / \sigma_{P,Rd,2}$ [-]	$k_{\sigma,1}$ [-]	$k_{\sigma,2}$ [-]	λ_p [-]	ρ [-]	$\rho * f_{y,f}$ [N/mm ²]	$\sigma_u / \rho * f_{y,f}$ [-]	
TST100A	277	184	0,48	0,58	0,79	1,13	0,94	1,04	0,79	0,79	1,13	0,74	233	0,79	
TST100B	251	167	0,48	0,53	0,79	1,13	0,85	0,94	0,79	0,79	1,13	0,74	234	0,72	
TST100C	262	175	0,48	0,53	0,79	1,15	0,87	0,97	0,79	0,79	1,15	0,73	239	0,73	
TST50A	296	197	0,27	0,59	1,05	0,80	0,67	0,68	1,05	1,05	0,80	0,96	321	0,61	
TST50B	263	175	0,27	0,61	1,05	0,74	0,64	0,64	1,05	1,05	0,74	1,00	289	0,61	

Der Schwerpunkt der folgenden Untersuchungen befasst sich nicht mit der Analyse der Beultragkurve bezogen auf profilierte Stege. Stattdessen werden Untersuchungen zu den Beulwerten für das plattenähnliche Gurtbeulen durchgeführt, welche die Grundlage für die Weiterentwicklung einer angemessenen Beultragkurve für Träger mit profilierten Stegen darstellt.

5.2.5 FE Modellierung der Großversuche

Um das plattenartige Gurtbeulverhalten der Wellstegträger und generell profilierter Träger umfassender zu verstehen, wird eine umfangreiche numerische Parameterstudie durchgeführt (Kapitel 5.4). Grundlage für die Parameterstudie ist ein geeignetes FE Modell, welches auf Grundlage der durchgeführten Versuche entwickelt wurde. Dabei wird der Versuch mit ermittelten Materialkennwerten nachgerechnet.

Der Steg wird mit zehn Elementen über die Höhe und acht Elementen über die Wellenlänge $2w$ modelliert. Der Gurt mit acht Elementen über die Gurtbreite modelliert. Zur Anwendung kommen S4R Schalenelemente.

Geometrische und strukturelle Imperfektionen werden über eine geometrische Ersatzimperfektion affin zur ersten Eigenform angesetzt (Bild 5.6). Der Stich der Amplitude für beulgefährdete Bauteile beträgt nach DIN 18800 Teil 3 $L/250$. Die Länge L in DIN 18800 Teil 3 entspricht der Beulfeldlänge a und wird für die Versuchsträger V4a –V4c mit 300 mm angenommen. Die maximale Vorverformung beträgt somit 1,2 mm und wird als Amplitude in der FE Traglastberechnung angesetzt. Neben den skalierten Vorverformungen, entsprechend des niedrigsten Eigenwertes, werden weitere relevante Eigenwerte in Form von skalierten Vorverformungen bei der Traglastberechnung angesetzt. Es wird sinngemäß Kapitel 4.3.2 verfahren.

Es wird eine genügend genaue Annäherung der Traglast und Verformungsgrößen zwischen Versuchsträger und FE Modell erzielt, dargestellt am Versuchsträger V4a (Bild 5.7). Die aufgebrachte Last ist in Abhängigkeit der vertikalen Verschiebung des Versuchsträgers dargestellt, welche mittels eines senkrechten Wegaufnehmers gemessen wird. Leider versagt der Wegaufnehmer bei einer maximalen Verschiebung von knapp 64 mm, somit ist die Lastverschiebungskurve des Versuchsträgers nicht bis zum Ende aufgezeichnet. In Bild 5.4 ist anstelle der vertikalen Verschiebung des Versuchsträgers, der Maschinenweg dargestellt und bestätigt das Tragverhalten. Um die Verformungen des Versuchsträgers des FE Modells und des Versuchsträgers zu vergleichen, ist es jedoch sinnvoll, die direkten vertikalen Verformungen darzustellen, Bild 5.7.

Das Tragverhalten bei Traglast des modellierten Versuchsträgers (Verformungen, Spannungen) stimmt mit den Versuchsergebnissen überein (Bild 5.8, Bild 5.9).

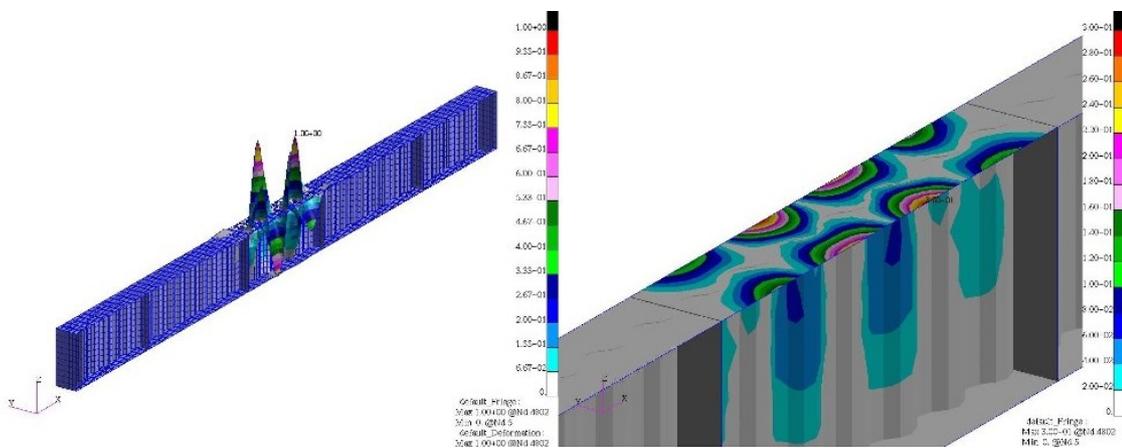


Bild 5.6: Erster Eigenwert des Systems

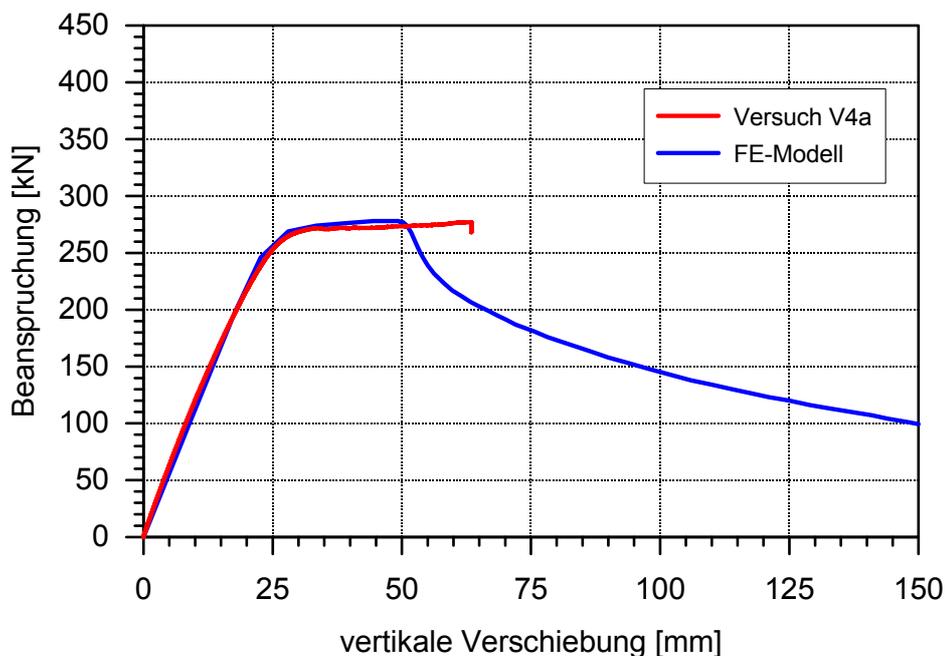


Bild 5.7: Last-Verformungskurve Versuch und FE-Modell

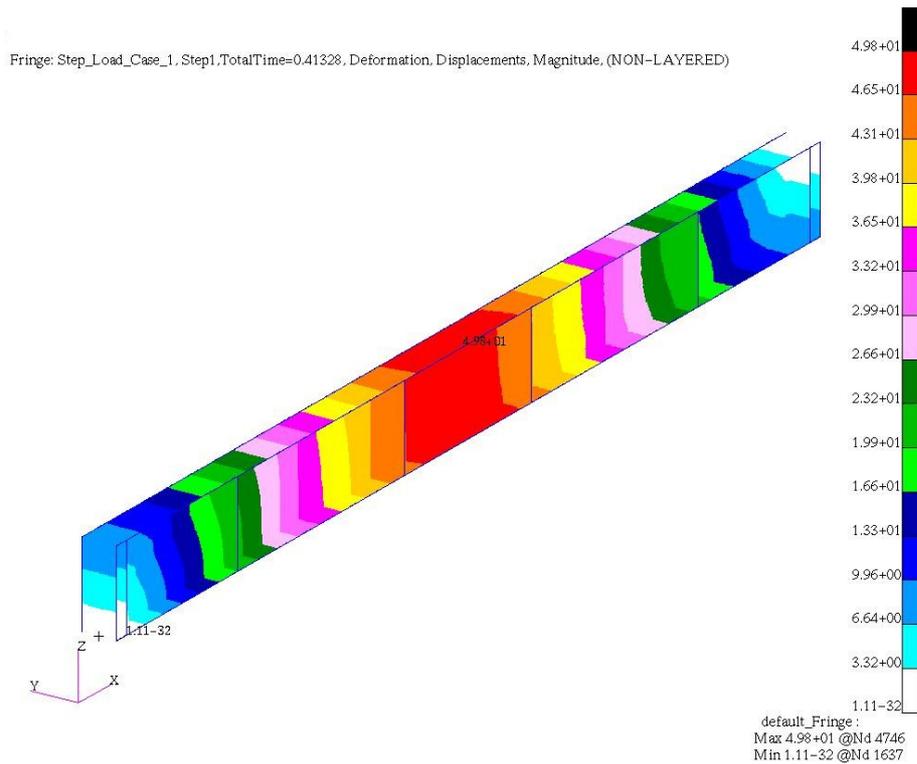


Bild 5.8: Verformungen (Magnitude) des FE Modells [mm]

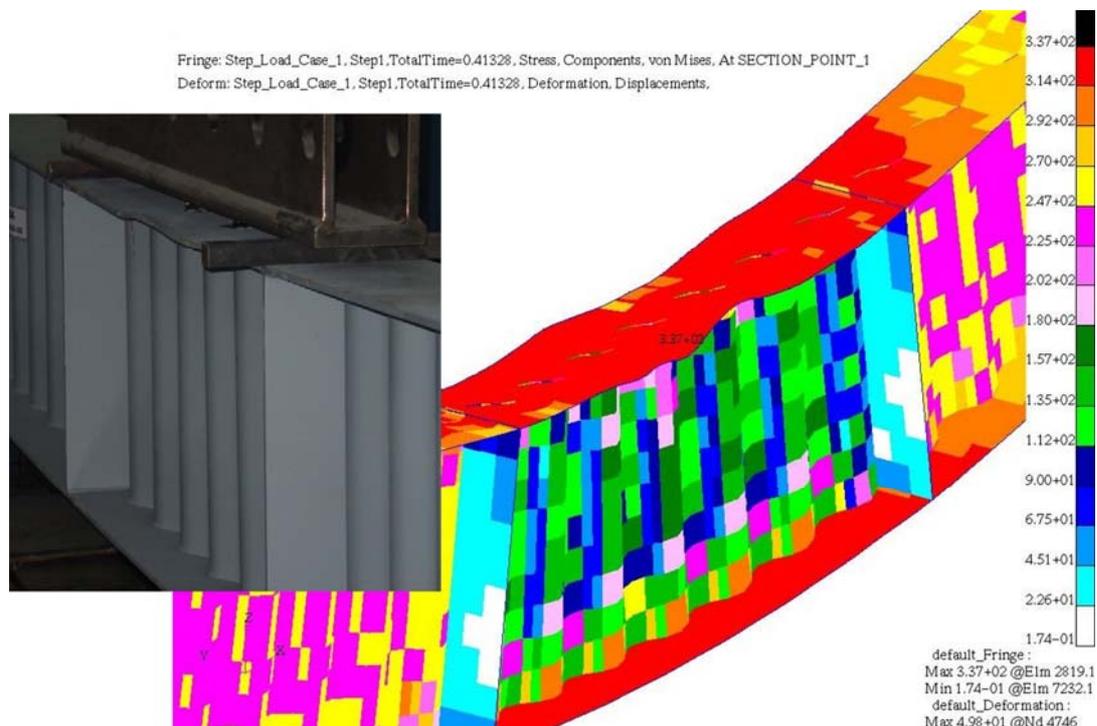


Bild 5.9: FE Modell: Spannungen (Mises) im Obergurt [N/mm^2] im Vergleich zum Versuch V4a

Damit wird bestätigt, dass für die weiteren numerischen Untersuchungen das vorhandene FE Modell für Wellstegträger verwendet werden kann.

5.3 Randbedingungen der numerischen und analytischen Untersuchungen

5.3.1 Parameter

Entsprechend (Bild 3.4) variieren für die Parameterstudie die b_f/a_3 , b_f/t_f , a/b Verhältnisse, die Wellenlänge w und -amplitude a_3 sowie die Profilierungsform (Sinus, Trapez). Für den Gurt werden die Parameter in den Grenzbereichen $150 \leq b_f \leq 350$ [mm] und $5 \leq t_f \leq 40$ [mm] und für die Profilierung werden die Parameter in den Grenzbereichen $155 \leq 2w \leq 380$ [mm] und $40 \leq a_3 \leq 120$ [mm] gewählt. Das entspricht den Verhältnissen $7,5 \leq b_f/t_f \leq 40$ und $1,25 \leq b_f/a_3 \leq 8,75$. Die Spreizung α der Profilierung wurde für alle Profilierungen größer 30° entsprechend der Untersuchungen von Lindner und Huang [51] angenommen. Für die sinusförmige Profilierung sind jedoch Spreizungen $\alpha \leq 30^\circ$ möglich. Bei der Ermittlung der Ersatztrapezform entsprechend (Bild 3.2) der sinusförmigen Profilierung, werden stets die ungünstigsten Abmessungen angenommen (Anlage 4, Tabelle 4-1). Das Randspannungsverhältnis beträgt $\phi = 1$, welches das ungünstigste Verhältnis dargestellt.

Für die numerische Parameterstudie der Gurtbeulwerte werden folgende Bezeichnungen verwendet (Beispiel: W200-10-40-155). Hierin bedeuten mit Bindestrichen getrennt und in Reihenfolge von links nach rechts angeordnet: Profilierungsart (W-Sinus, T-Trapez), Gurtbreite b_f (200 mm), Gurtstärke t_f (10 mm), Wellenamplitude a_3 (40 mm) und Wellenlänge $2w$ (155 mm).

5.3.2 FE Modell und Randbedingungen

Um dem Ziel – die Untersuchung und Bestimmung des Gurtbeulverhaltens des druckbeanspruchten Gurtes „plattenähnliches Gurtbeulen“ – näher zu kommen, wurde das FE Modell (Kapitel 5.2) schrittweise verfeinert. Im ersten Schritt wird das Trägermodell auf das Modell eines druckbeanspruchten Gurtes vereinfacht. Eine ähnliche Vorgehensweise zur Modellbildung wird auch von Johnson/Cafolla gewählt [34]. Johnson/Cafolla haben die Reduzierung des Trägermodells auf den Druckgurt untersucht. Die Ergebnisse bestätigen, dass diese Annahme zu richtigen Ergebnissen führt, wenn das Plattenbeulverhalten des Gurtes untersucht werden soll. Im zweiten Schritt wird das Modell auf den Bereich zwischen den Lasteinleitungssteifen reduziert. Hinsichtlich des Beulverhaltens, sind im Vergleich zur Modellierung des gesamten Trägers ähnliche Ergebnisse bezüglich des Plattenbeulens des Gurtes wie bei der Berechnung des vereinfachten Modells zu erwarten. Voraussetzung ist dabei eine geeignete und korrekte Wahl der Randbedingungen. Des Weiteren wird der modellierte Druckgurt verkürzt angenommen. Dabei stellen sich zwei Fragen.

Wie können die Rand- und Übergangsbedingungen bei der Annahme eines verkürzten Druckgurtes realitätsnah modelliert werden? Es besteht die Möglichkeit, die Rand- und Übergangsbedingungen an den Wendepunkten oder Extrempunkten der Beulform zu formulieren. Werden die Randbedingungen an den Extrempunkten formuliert, ist die

Tangente der Verformungslinie = Null. An diesen Stellen kann eine Einspannung angenommen werden. (Bild 5.10). Vergleichende Untersuchungen haben gezeigt, dass es keine Rolle spielt, an welchen Stellen die Extrempunkte angenommen werden (Wellenberg bzw. Wellental).



Bild 5.10: Vorhandene Extrempunkte beispielhaft an der Trapezform

Die zweite Frage, inwieweit der „verkürzte“ bzw. bereichsweise modellierte Gurt im Vergleich zur „wahren“ Länge des druckbeanspruchten Gurtes einen Einfluss auf die Beul- bzw. Traglast ausübt, kann einfach beantwortet werden. Lindner hat im Rahmen eines Forschungsprojektes [55] den Einfluss der Anzahl der Trapezbereiche auf das Beulverhalten untersucht. Es zeichnet sich ein Konvergenzverhalten des Gurtes ab. Nach [55] genügt es schon, nur einen Trapez- bzw. Sinusbereich des Gurtes zu modellieren. Das Konvergenzverhalten konnte für die sinusförmige Profilierung (Wellenamplitude 40 mm, Wellenlänge 155 mm, Gurtbreite 200 mm) bestätigt werden (Bild 5.11, Bild 5.12). Für die FE Modellierung wurden 5 bis 7 Trapez- bzw. Sinusbereiche gewählt, um eine genügende Annäherung an den Grenzwert des Beulwertes zu erhalten (ein Sinusbereich entspricht einer Wellenlänge $2w$). Auf eine Untersuchung des Konvergenzverhaltens für die trapezförmige Profilierung wird an dieser Stelle verzichtet, da dieselben Ergebnisse zu erwarten sind und in den numerischen Berechnungen von Lindner bestätigt werden. Für die trapezförmigen Profilierungen werden die Untersuchungen, welche durch Versuche bestätigt werden, entsprechend [55] angenommen.

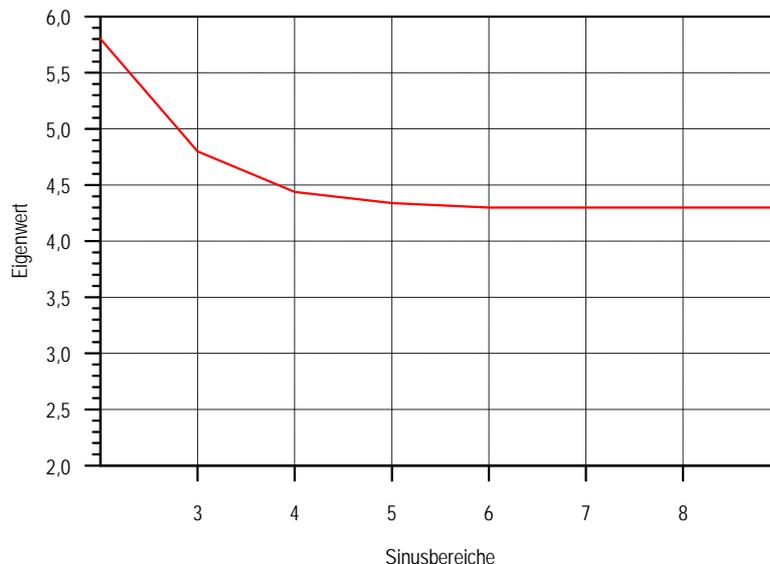


Bild 5.11: Konvergenzverhalten des Gurtes mit sinusförmig profilierter Stützung

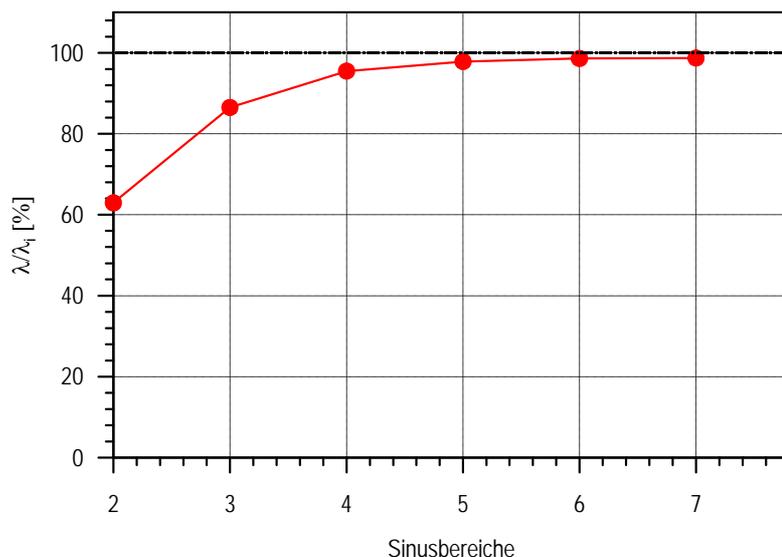


Bild 5.12: Konvergenzverhalten in %

Somit wurden für die Lagerungsbedingungen des vereinfachten Modells Einspannungen der Rotationfreiheitsgrade sowie Unverschieblichkeiten in z- und x-Richtung angenommen. Der Verschiebungsfreiheitsgrad in y-Richtung ist frei (Koordinatensystem in Bild 5.13).

Die Funktion der elastischen Stützung des Gurtes durch den profilierten Steg wird im FE Modell in den Knotenanschlusspunkten des Steges über eine vertikale Halterung nur bedingt erfasst. Die reale Steifigkeit des Steges und dessen Einfluss auf das Gurtbeulverhalten bzgl. Torsionsbeulen kann nicht einwandfrei erfasst werden. Demnach liegt der Schwerpunkt der Untersuchungen im plattenähnlichen Gurtbeulen.

Der Gurt wird gleichmäßig über die gesamte Breite mit einer Gesamtbeanspruchung von 1000 kN belastet. Die Beanspruchung wird in die Knotenpunkte der Randelemente eingeleitet. Die Elementierung wird so gewählt, dass die Geometrie optimal erfasst wird. Ein Wellenbereich umfasst je nach Profilierungsparameter 8x6 bis 14x8 Elemente sowie fünf Integrationspunkte über die Dicke des Steges. Es werden die Schalenelemente (S4R) verwendet.

Der Vergleich der ermittelten Beullasten des gesamten modellierten Trägers (3084 kN) und des vereinfachten Modells (3186 kN) zeigt eine gute Übereinstimmung (Bild 5.6, Bild 5.13). Somit wird das vereinfachte Modell für die Wellstegträger zur Untersuchung des plattenähnlichen Beulens zu Grunde gelegt.

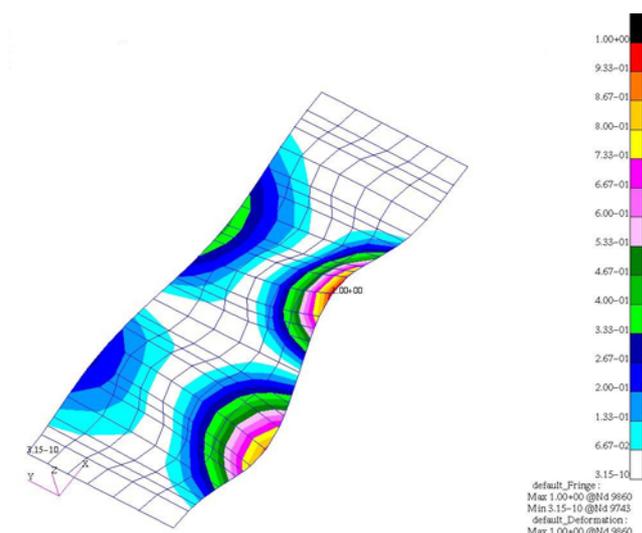


Bild 5.13: Beulform des vereinfachten Gurtmodells (Modell Hannebauer)

Es werden keine eigenen Versuche zum Gurtbeulverhalten an Trapezstegträgern durchgeführt. Zur Bestätigung des verwendeten FE Modells (Modell Hannebauer) werden die experimentellen und numerischen Ergebnisse von Lindner mit den Ergebnissen des entwickelten, vereinfachten FE Modells verglichen.

Dazu wird der Versuchsträger TST100B (Tabelle 5.7) mit dem erstellten vereinfachten Modell nachgerechnet. Die ermittelten numerischen Beullasten nach Modell Hannebauer werden mit dem numerischen Modell von Lindner [55] verglichen. Die numerische Traglast (Modell Hannebauer) wird mit dem Versuchsergebnis TST100B [55] verglichen.

Nach [55] wird die numerische Beullast von 178,9 kN und die Traglast im Versuch für den Versuchsträger je Gurt mit 125 kN ermittelt. Es werden stets die Beul- bzw. Traglasten verglichen, die für einen Gurt zutreffend sind.

Auf das entwickelte Modell werden die geometrischen Parameter entsprechend Versuch TST100B angewandt und folgende Ergebnisse erzielt:

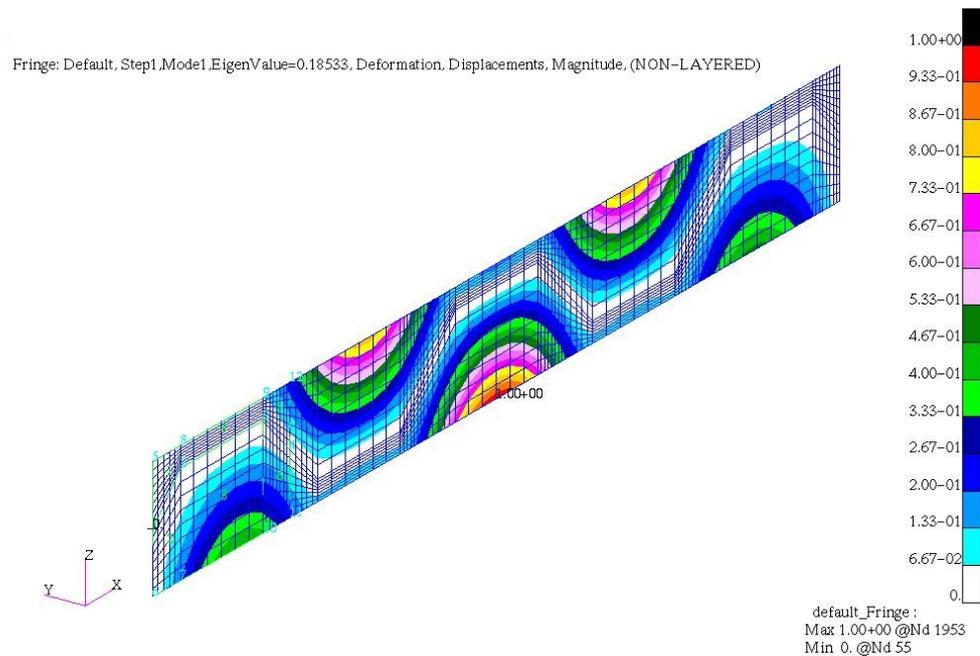


Bild 5.14: Beullast TST100B (Modell Hannebauer)

Die numerisch ermittelte Beullast beträgt 185 kN. Die Abweichung zu der von Lindner numerisch ermittelten Beullast beträgt ca. 3%.

Die numerisch ermittelte Traglast des vereinfachten Modells beträgt 135 kN und weist damit eine 8%ige höhere Traglast im Vergleich zu [55] auf. Das Verformungsverhalten sowie die zentrische Stauchung stimmen mit den Versuchswerten überein (Bild 5.15). Die zentrische Stauchung des Versuchsträgers TST100B beträgt 1,3 mm [55].

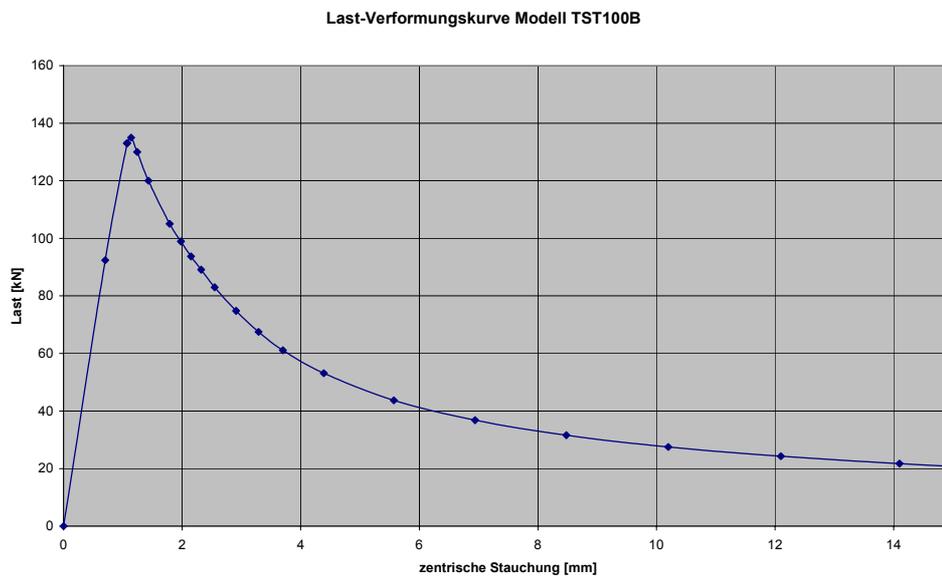


Bild 5.15: Last-Verformungskurve TST100B (Modell Hannebauer)

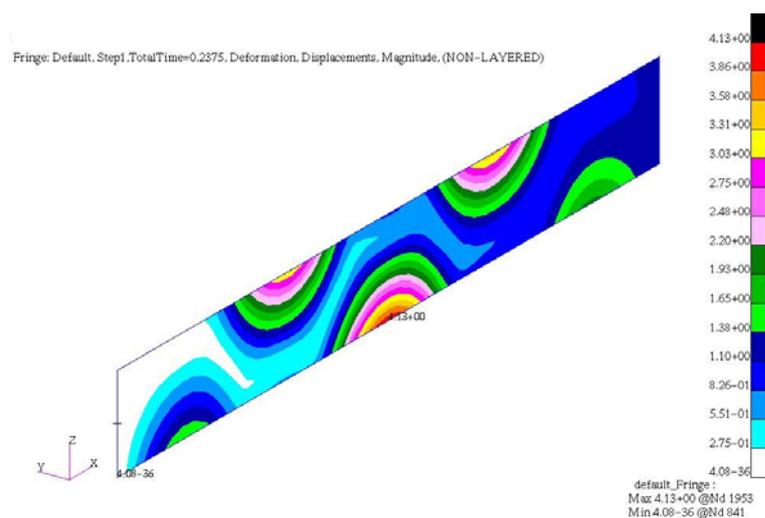


Bild 5.16: Verformungen (Magnitude) bei maximaler Traglast

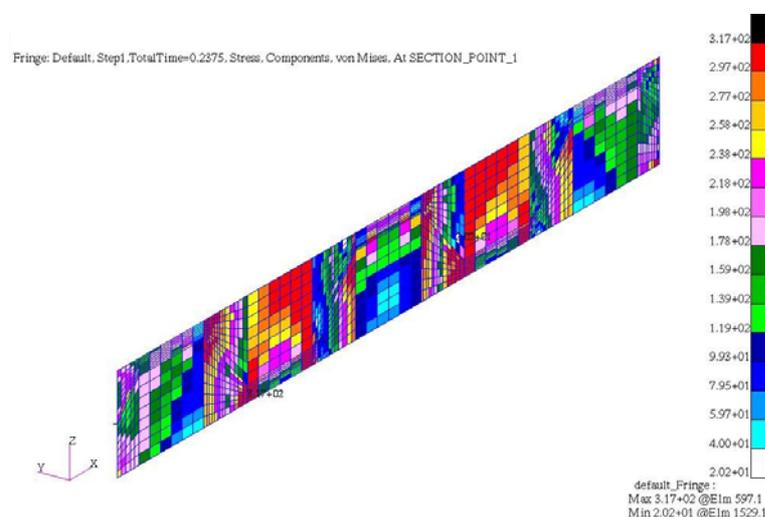


Bild 5.17: Spannungen (Mises) bei maximaler Traglast

5.3.3 Numerische Beulwertberechnung

Die numerische Berechnung der Beulwerte erfolgt mit dem Programmsystem ABAQUS. Mit der Berechnungsprozedur „Buckling“ können die Eigenformen und Eigenwerte der Gurtbeulberechnungen bestimmt werden. Mathematisch wird das Stabilitätsproblem (Verzweigungsproblem), durch die allgemeine Matrizeigenwertaufgabe abgebildet, wobei der kleinste positive Eigenwert gleichbedeutend mit dem Verzweigungslastfaktor λ bzw. der kritischen Eulerlast $N_{ki,n}$ nach der linear elastischen Beultheorie ist Gl. (5.4). Mit Hilfe der Eulerschen Bezugskraft N_e , Gl. (5.5), wird der dimensionslose Beulwert $\kappa_{\sigma,num}$ ermittelt, Gl. (5.6).

$$N_{ki,n} = \lambda \cdot N_n \quad (5.4)$$

$$N_e = \sigma_e \cdot A = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \cdot \frac{t_f^3 \cdot b_f}{b^2} \quad (5.5)$$

$$k_{\sigma,n} = \frac{N_{ki,n}}{N_e} \quad (5.6)$$

Der Index n in der Gleichung zur Ermittlung der kritischen Eulerlast $N_{ki,n}$ steht für numerisch. Sämtliche geometrischen Parameter in Gl. (5.5) sind Bild 3.4 zu entnehmen. N ist die Druckbeanspruchung des modellierten Gurtes entlang der gelagerten Längsränder.

5.3.4 Analytische Beulwertberechnung

Den numerischen Berechnungen werden analytische Plattenbeulberechnungen zur Auswertung gegenüber gestellt. Zum einen sind es die Beulwerte einer dreiseitig gelagerten Platte nach [74] mit den in (Bild 5.18) dargestellten geometrischen Parametern Gl. (5.7).

$$\alpha = \frac{a}{b} \quad (5.7)$$

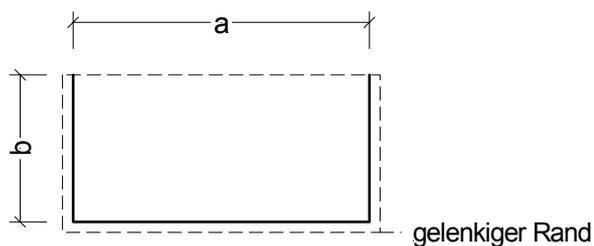


Bild 5.18: Idealisiertes Beulfeld im Druckgurt

Zum anderen werden die numerischen Ergebnisse mit den Beulwerten nach EN 1993 - 1 - 5 Annex D [18] Gl. (3.14) sowie Gl. (3.16) verglichen.

5.4 Ergebnisse und Auswertung der Beulwertuntersuchung

5.4.1 Ergebnisse der numerisch ermittelten Beulwerte und Beulfelder

Die Auswertung der Ergebnisse der numerischen Berechnungen ergibt verschiedene Gurtbeulversagen. In Abhängigkeit der Profilierungsparameter treten zwei Arten von Gurtbeulen auf, das Platten- und Torsionsbeulen des Gurtes.

Plattenähnliches Beulen tritt dann auf, wenn auf einer Gurtseite das Ausbeulen stets wechselnd nach oben und unten erfolgt (z -Richtung). Auf der gegenüberliegenden Gurtseite prägen sich die Gurtbeulen genau entgegengesetzt aus. Eine Rotation des Gurtes um den Steg, wie beim Torsionsbeulen bekannt, ist dabei nicht möglich. Sind die

Gurtbeulen auf einer Gurtseite stets in eine Richtung gerichtet, ist eine Rotation des Gurtes vorhanden.

Da im Folgenden das Plattenbeulen untersucht wird, werden alle numerisch ermittelten Beulwerte, dessen erste Eigenform dem Torsionsbeulen entspricht, von der Auswertung der Parameterstudie ausgeschlossen.

Die Beulform „Plattenbeulen“ (Bild 5.19) wie sie aus den Untersuchungen von Trapezstegträgergurten [55] bekannt ist, bestätigt sich für die sinus- sowie trapezförmigen Profilierungen des untersuchten Wertebereiches. Die Beulwellen dieser Beulform bewegen sich im Bereich der maximalen Abstände a und b immer abwechselnd nach oben und unten.

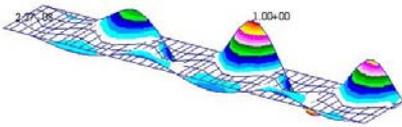


Bild 5.19: Erwartete Beulform „Plattenbeulen“

In Abhängigkeit der Profilierungsparameter des Steges (Wellenamplitude a_3 und Wellenlänge $2w$) und der Gurtbreite b_f prägen sich die Beulfelder des Plattenbeulens in ihren geometrischen Abmessungen unterschiedlich aus. Grundsätzlich ist zu erkennen, dass die Form der Profilierung (sinusförmig, trapezförmig) keinen bzw. geringen Einfluss besitzt. Die Parameter ($2w$, a_3 , b_f) bestimmen das plattenartige Beulverhalten, welches in Abhängigkeit der Beulfeldabmessungen variiert. Diese Parameter lassen sich sehr gut mit dem Geometrieverhältnis R Gl. (5.3), Kapitel 5.2.4 beschreiben.

Die Beulformen des plattenartigen Gurtbeulens mit Beulfeldlängen $a > 2w$, heben sich deutlich von den bekannten Beulfeldlängen, $a = a_1 + 2a_4$, ab und leisten einen weitaus geringeren Widerstand gegen Plattenbeulen (z.B. T350-10-40-155, T350-10-40-380 mit $R < 0,14$).

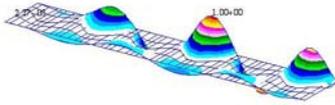
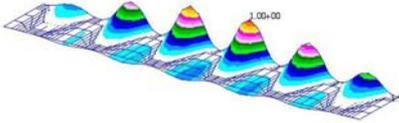
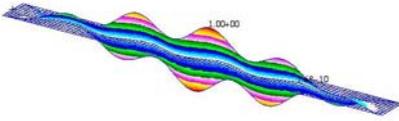
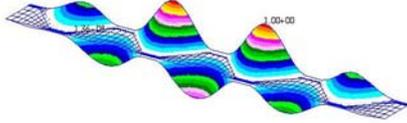
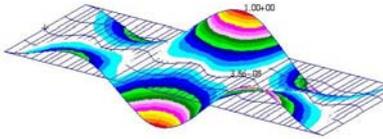
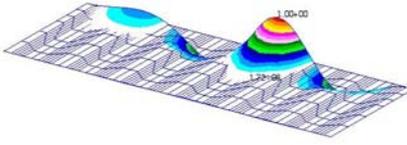
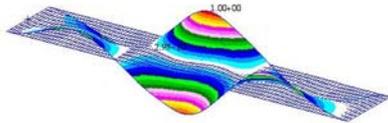
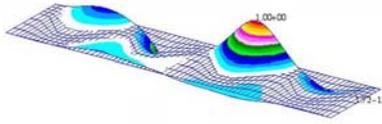
T150-10-40-155		$a = 2w$ $b = \frac{b_f}{2} + \frac{a_3}{2}$	R=0,16
T150-10-100-155		$a = 2w$ $b = \frac{b_f}{2} + \frac{a_3}{2}$ Rotation	R=0,45
T150-10-40-380		$a = 2w$ $b = \frac{b_f}{2} + \frac{a_3}{2}$ Rotation	R=0,16
T150-10-100-380		$a = a_1 + 2a_4$ $b = \frac{b_f}{2} + \frac{a_3}{2}$ Rotation	R=0,41
T350-10-40-155		$a = 3w$ $b = \frac{b_f}{2}$	R=0,07
T350-10-100-155		$a = 3w$ $b = \frac{b_f}{2}$	R=0,20
T350-10-40-380		$a = 3w$ $b = \frac{b_f}{2}$	R=0,07
T350-10-100-380		$a = a_1 + 2a_4$ $b = \frac{b_f}{2} + \frac{a_3}{2}$	R=0,21

Bild 5.20: Beulfelder und ihre Abmessungen für Trapezstegträger

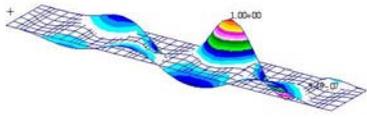
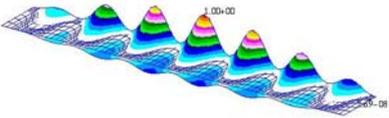
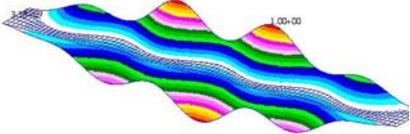
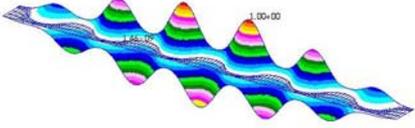
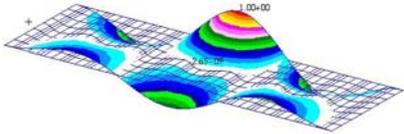
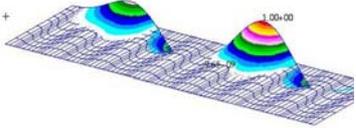
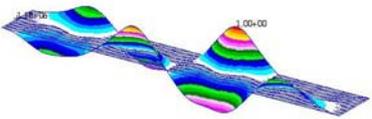
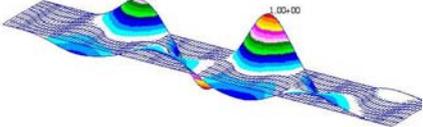
W150-10-40-155		$a = 2w$ $b = \frac{b_f}{2} + \frac{a_3}{2}$	R=0,20
W150-10-100-155		$a = 2w$ $b = \frac{b_f}{2} + \frac{a_3}{2}$ Rotation	R=0,54
W150-10-40-380		$a = 2w$ $b = \frac{b_f}{2} + \frac{a_3}{2}$ Rotation	R=0,21
W150-10-100-380		$a = a_1 + 2a_4$ $b = \frac{b_f}{2} + \frac{a_3}{2}$ Rotation	R=0,54
W350-10-40-155		$a = 3w$ $b = \frac{b_f}{2}$	R=0,09
W350-10-100-155		$a = 3w$ $b = \frac{b_f}{2}$	R=0,23
W350-10-40-380		$a = 3w$ $b = \frac{b_f}{2}$	R=0,09
W350-10-100-380		$a = 2w$ $b = \frac{b_f}{2} + \frac{a_3}{2}$	R=0,23

Bild 5.21: Beulfelder und ihre Abmessungen für Wellstegträger

5.4.2 Vergleich numerischer und analytischer Beulwerte

Tabelle 5.10 ist zu entnehmen, dass unabhängig von der Art der Profilierung (sinus- bzw. trapezförmig) nicht nur das Beulverhalten (siehe Bild 5.20, Bild 5.21), sondern auch die Beulwerte $k_{\sigma,n}$ übereinstimmen. Die Profilierungsart ist demnach nicht ausschlaggebend, einzig die Parameter der Profilierung sind für die Beulwertermittlung entscheidend. Beim Vergleich der numerischen Beulwerte der sinus- und trapezförmigen Profilierung (Anlage 4, Tabelle 4-1, beispielhaft Tabelle 5.10) bestätigt sich auch die Annahme für die geometrischen Abmessungen der sinusförmigen Profilierung entsprechend der Ersatztrapezform (Kapitel 5.3.1). Für die weiteren Untersuchungen zur Beulwertbestimmung wurden die daraus resultierenden Unterschiede für die sinusförmige Profilierung beibehalten, da diese Annahmen eine sichere Methode darstellt.

Tabelle 5.10: Vergleich der Beulfelder der sinus- und trapezförmigen Profilierung

Bezeichnung	R [-]	$k_{\sigma,num}$ [-]	α_{num} [-]	$k_{\sigma,a}$ [-]	α_a [-]
T150-10-40-155	0,17	1,16	1,63	1,01	1,32
T150-20-40-155	0,17	0,96	1,63	1,01	1,32
T350-10-40-155	0,07	1,56	1,19	2,86	0,64
T350-20-40-155	0,07	1,46	1,19	2,86	0,64
T350-10-100-155	0,20	2,50	0,69	4,36	0,50
T350-20-100-155	0,20	2,29	0,69	4,36	0,50
W150-10-40-155	0,20	1,19	1,61	1,33	1,05
W150-20-40-155	0,20	1,01	1,61	1,33	1,05
W350-10-40-155	0,09	1,34	1,19	4,19	0,52
W350-20-40-155	0,09	1,24	1,19	4,19	0,52
W350-10-100-155	0,23	2,31	1,03	6,03	0,42
W350-20-100-155	0,23	2,13	1,03	6,03	0,42

Die numerischen Beulwerte $k_{\sigma,num}$ aller Profilierungen werden den analytischen Beulwerten $k_{\sigma,a}$ Gl. (3.14) gegenübergestellt (beispielhaft, Tabelle 5.10). Es ist zu erwähnen, dass es sich bei den in Tabelle 5.10 dargestellten analytischen Beulwerten um die Beulwerte für Plattenbeulen handelt ohne Berücksichtigung effektiver Gurtbreiten. $k_{\sigma,num}$ ergibt sich aus der Beullast für Plattenbeulen entsprechend der ersten Eigenform. Der Vergleich der Beulfeldabmessungen zeigt, dass die in [18] Gl. (3.15) verwendeten Beulfeldabmessungen α_a nicht zweifelsfrei sind.

Im Folgenden werden die Gurtbeulwerte bestätigt und ergänzt.

Im Diagramm (Bild 5.22) sind die Verhältnisse der analytisch berechneten, Gl. (3.14), und numerisch berechneten Beulwerte (Torsions- und Plattenbeulen) in Abhängigkeit von R dargestellt. Es ist eindeutig erkennbar, dass die Beulwertberechnungen nach Gl. (3.14) welche den Untersuchungen zu den Trapezstegträgern zugrunde liegen, nicht für alle Profilierungen und Gurtabmessungen zutreffend sind und keine abgesicherten Ergebnisse liefern. Andererseits liegen eine Vielzahl der untersuchten Gurte im abgesicherten Bereich und weisen eher konservative Ergebnisse auf.

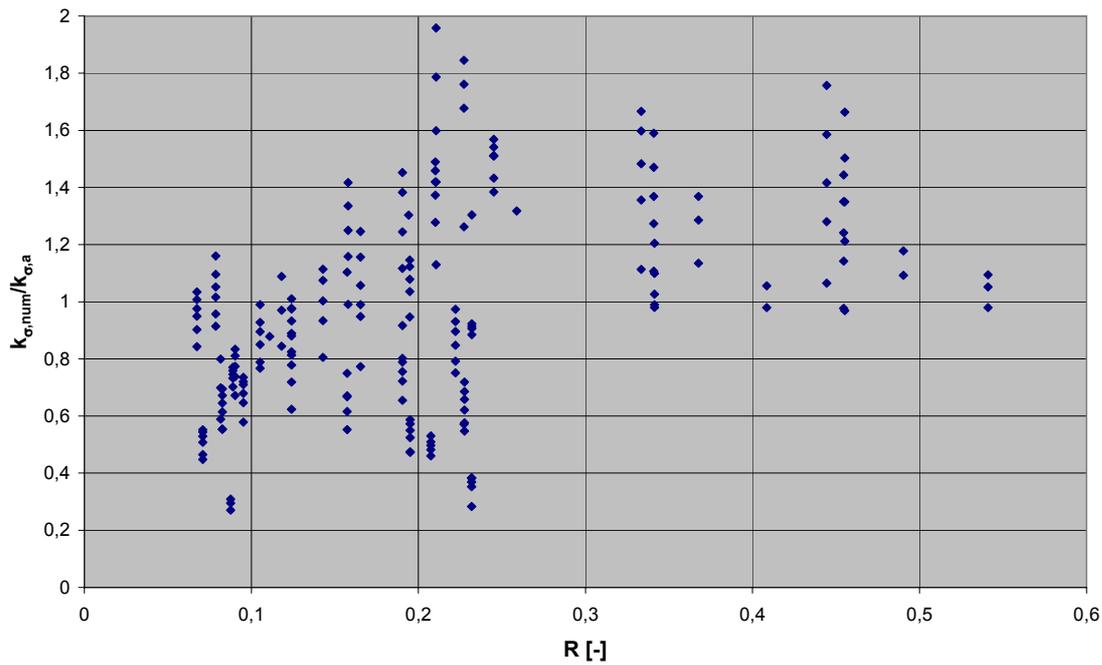


Bild 5.22: Numerische Beulwerte im Vergleich zu den Beulwerten nach [18]

Wie zuvor erwähnt, ist das Torsionsbeulen nicht mit dem entwickelten Modell analysierbar. Deshalb werden in der Parameterstudie sämtliche Gurte eliminiert, dessen erste Eigenform dem Torsionsbeulen entspricht. Das sich daraus ergebene Parameterfeld ist in Bild 5.23 zusammengefasst.

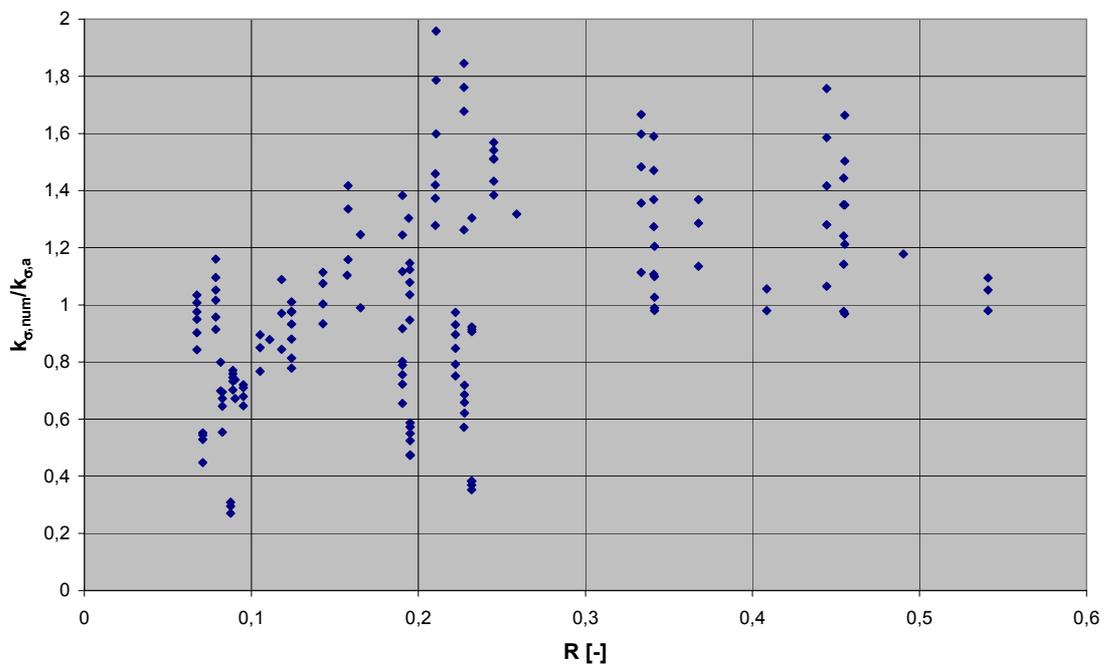


Bild 5.23: Numerische Beulwerte im Vergleich zu den Beulwerten nach [18] (Plattenbeulen)

In Anlage 4, Tabelle 4-1 sind sämtliche numerisch ermittelten Beulwerte aller untersuchten Profilierungen zusammengefasst.

Betrachtet man k_{σ} Gl. (3.14), so treten für eine Vielzahl der Gurte mit $R < 0,3$ große Überschreitungen (bis zu 50%) der tatsächlich vorhandenen Beulwerte auf (Bild 5.23).

Vergleicht man dagegen die numerischen Beulwerte der Profilierungen $R > 0,3$ mit den analytischen Beulwerten, so liegen die numerisch ermittelten Beulwerte weitestgehend auf der sicheren Seite.

Der Vergleich der numerischen und analytischen Beulwertberechnungen lässt auch einen Vergleich der Beulfeldabmessungen zu (Tabelle 5.10). Auch hier treten erhebliche Unterschiede auf. Die Beulfeldbestimmung entsprechend Gl. (3.14) für die Gurt- und Profilierungsabmessungen $R < 0,3$ führt zu anderen Ergebnissen. Die Ergebnisse der numerischen Berechnungen zeigen (Bild 5.20, Bild 5.21, Anlage 4), dass die Beulfelder erheblich größer ausfallen.

Die Beulwertbestimmung für plattenähnliches Gurtbeulen soll demnach in Abhängigkeit der geometrischen Parameter (R) optimiert werden.

5.5 Vorschlag zur Beulwertberechnung - plattenähnliches Beulen

5.5.1 Allgemeines

Der nachfolgend angegebene Vorschlag zur Beulwertbestimmung für plattenähnliches Gurtbeulen orientiert sich an einer möglichst genauen Zuordnung der Stegprofilierungen mit dem geometrischen Flächenverhältnis $R < 0,3$.

5.5.2 Kategorien

Aufgrund der ermittelten Ergebnisse zum plattenähnlichen Gurtbeulen von Gurten werden Beulwerte in Abhängigkeit der geometrischen Parameter der Profilierung angegeben. Die Parameter b (größter Abstand des Steges vom Gurtrand) und die angenommene Beulfeldbreite a sind von sämtlichen geometrischen Einflussparametern indirekt beeinflusst. Sie werden für die Beulwertermittlung herangezogen. Mit einer Änderung der geometrischen Parameter ändert sich die elastische Einspannung des breiteren Wellbereiches b_a in den angrenzenden schmalen Bereich b_b (Bild 3.4). Bei der Auswertung der Beulwerte werden grundsätzlich zwei Kategorien in Abhängigkeit des Parameters R unterschieden.

5.5.3 Kategorie Profilierungen $R < 0,3$

Die Auswertung des Beulverhaltens (Kapitel 5.4.2) weist auf größere Beulfeldlängen hin. Für Profilierungen mit $R < 0,3$ variieren die Beulfeldlängen in Abhängigkeit der Parameter w , a_3 , b_f/a_3 und b_f/b_t zwischen $1,5 < w < 3$, (Bild 5.24). Die Beulfeldlängen haben entscheidenden Einfluss auf die Beulwerte. Bild 5.25 zeigt deutlich die Überschätzung der Beulwerte.

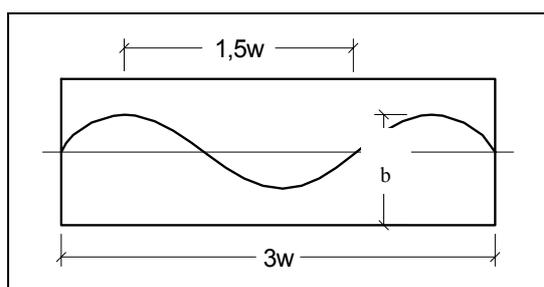


Bild 5.24: Beulfeldabmessungen beispielhaft an der sinusförmigen Profilierung

Dabei wird b für Trapezstegträger entsprechend EN 1993-1-5 [18] angenommen. Für Wellstegträger ist b nach Gl. (5.8) zu bestimmen. Nach Johnson [34] ist sogar die Annahme von c_M für Profilierungen $R < 0,14$ möglich.

$$b = (b_f + a_3 + t_w) / 2 \quad (5.8)$$

Für die Beulfeldlänge a wird vereinfachend folgende Beulfeldlänge vorgeschlagen mit dem daraus resultierenden Beulwert in Gl. (5.10):

$$a = 3w \quad (5.9)$$

$$k_{\sigma} = 0,43 + \left(\frac{b}{a_v} \right)^2 \quad (5.10)$$

Die auf Grundlage dieser Parameter resultierenden Beulwerte $k_{\sigma,v}$ werden den numerischen Beulwerten (beispielhaft: Tabelle 5.11, Anlage 4) gegenübergestellt. Der Index „v“ ... „Vorschlag“ beschreibt die neuen Beulwerte und Beulfeldgrößen.

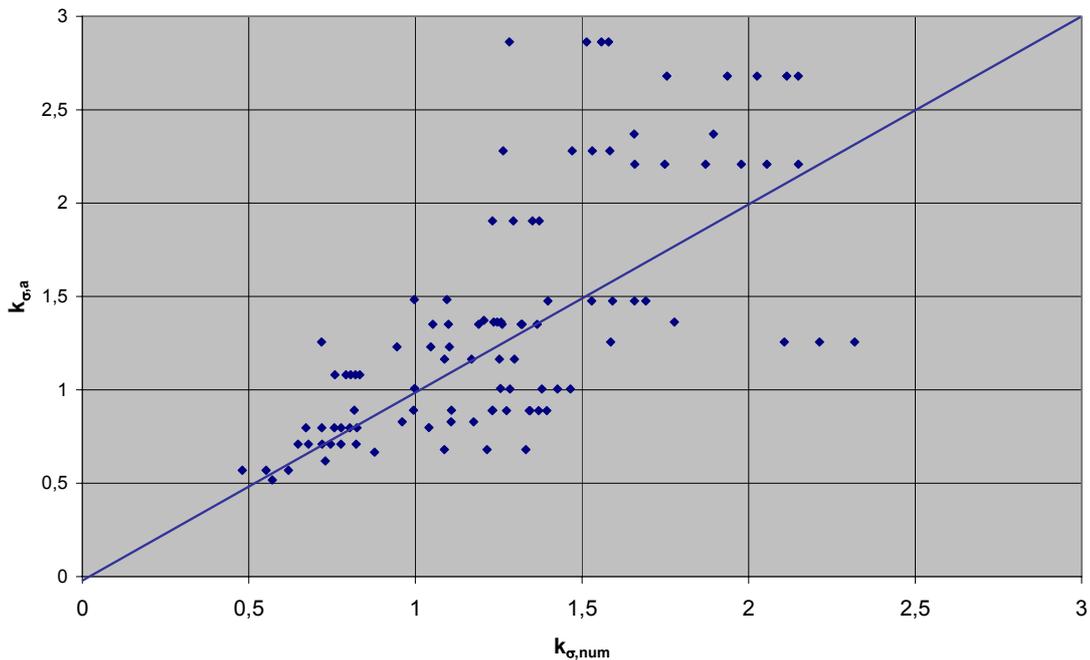


Bild 5.25: Vergleich numerischer ($k_{\sigma,num}$) und analytischer ($k_{\sigma,a}$) Beulwerte $R < 0,3$

Tabelle 5.11: Vergleich der Beulfelder der sinus- und trapezförmigen Profilierung

Bezeichnung	R [-]	$k_{\sigma,num}$ [-]	α_{num} [-]	$k_{\sigma,v}$ [-]	α_v [-]
T150-10-40-155	0,17	1,16	1,63	0,60	2,45
T150-20-40-155	0,17	0,96	1,63	0,60	2,45
T350-10-40-155	0,07	1,56	1,19	1,13	1,19
T350-20-40-155	0,07	1,46	1,19	1,13	1,19
T350-10-100-155	0,20	2,50	0,69	1,37	1,03
T350-20-100-155	0,20	2,29	0,69	1,37	1,03
W150-10-40-155	0,20	1,19	1,61	0,60	2,42
W150-20-40-155	0,20	1,01	1,61	0,60	2,42
W350-10-40-155	0,09	1,34	1,19	1,14	1,19
W350-20-40-155	0,09	1,24	1,19	1,14	1,19
W350-10-100-155	0,23	2,31	1,03	1,37	1,03
W350-20-100-155	0,23	2,13	1,03	1,37	1,03

Die ermittelten Beulwerte $k_{\sigma,v}$ liegen für den untersuchten Wertebereich auf der sicheren Seite und stellen eine abgesicherte Alternative zum Beulwert nach EN 1993-1-5 [18] für Profilierungen $R < 0,3$ dar (Bild 5.26).

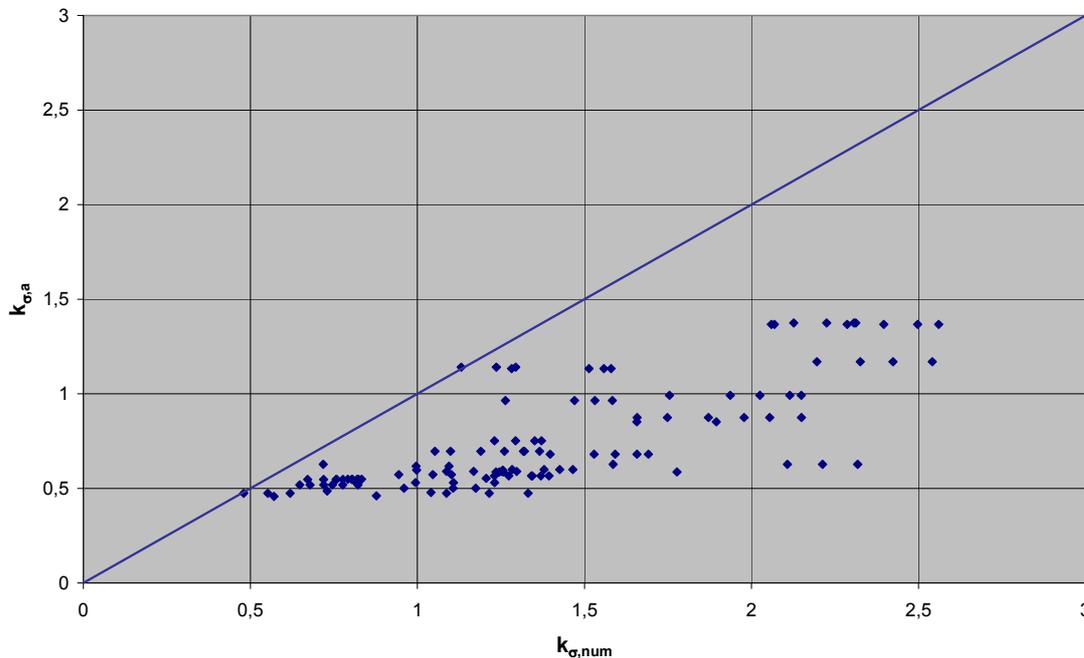


Bild 5.26: Vergleich numerischer ($k_{\sigma,num}$) und vorgeschlagener ($k_{\sigma,v}$) Beulwerte $R < 0,3$

Die Berechnung der Beulwerte $k_{\sigma,v}$ für plattenähnliches Beulen führt zu gesicherten Ergebnissen. Es wird angenommen, dass die numerisch ermittelten Beulwerte den tatsächlichen entsprechen. Es ist jedoch offensichtlich, dass $k_{\sigma,v}$ auch teilweise konservative Ergebnisse für Gurte mit $R < 0,3$ liefert. Es wird vermutet, dass eine weitere Optimierung erzielt wird, wenn der Einfluss des Verhältnisses Gurtbreite zu Wellenlänge auf das Beulverhalten exakt beschrieben wird.

5.5.4 Kategorie Profilierungen $R > 0,3$

Im Rahmen der durchgeführten Parameterstudie können für die Profilierungen $R > 0,3$ die Beulfeldabmessungen entsprechend Gl. (3.14) sicher bestätigt werden (Bild 5.27).

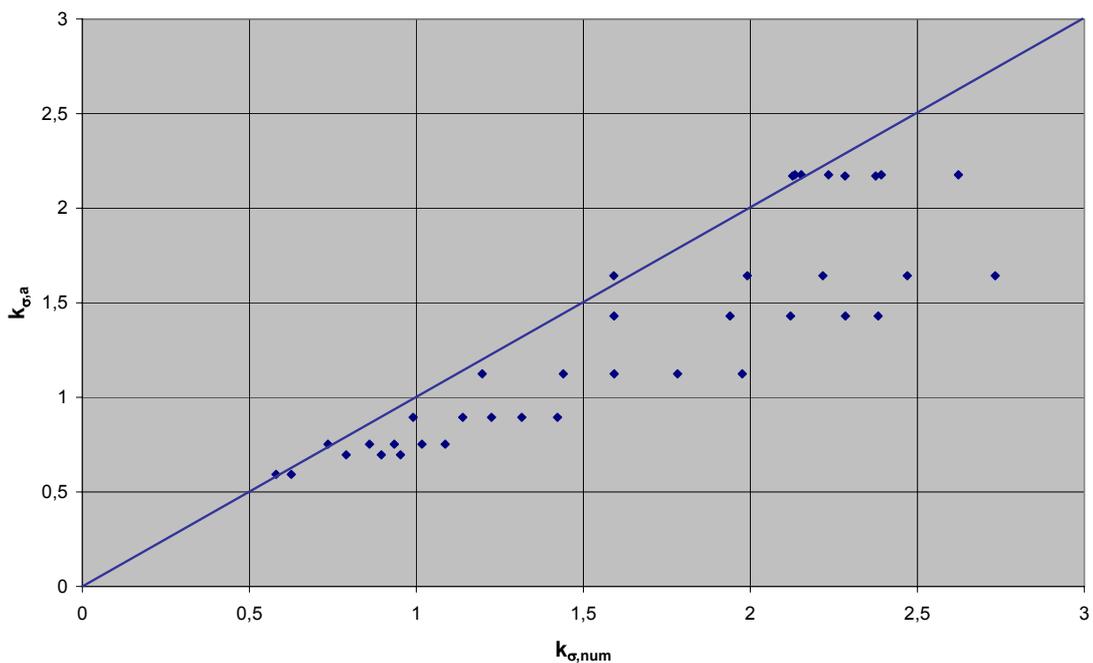


Bild 5.27: Vergleich numerischer ($k_{\sigma,num}$) und analytischer ($k_{\sigma,a}$) Beulwerte $R > 0,3$

5.5.5 Zusammenfassung

Mit der Einstufung der Gurte entsprechend der Flächenverhältnisse R ist eine gesicherte Beulwertbestimmung gelungen Gl. (5.10). Die Beulwerte für das Torsionsbeulen werden weiterhin mit $k_{\sigma} = 0,6$ ermittelt. Untersuchungen, inwieweit die Flexibilität des Steges das Torsionsbeulen beeinflusst, sind durchzuführen, um $k_{\sigma} = 0,6$ entsprechend EN 1993-1-5 [18] zweifelsfrei zu bestätigen bzw. zu optimieren. Sind diese Grundlagen geschaffen, kann die Beultragkurve optimiert werden.

In Kapitel 5.2.4 werden die berechneten Grenzbeulspannungen mit den experimentellen maximalen Tragspannungen der Gurte verglichen. Tabelle 5.12 vergleicht die neu entwickelten Grenzbeulspannungen mit denen nach EN 1993-1-5.

Tabelle 5.12: Grenzbeulspannungen nach EN 1993-1-5 und Vorschlag

Versuch	EN 1993-1-5										Vorschlag					
	F_u [kN]	σ_u [N/mm ²]	R [-]	$\sigma_u / f_{y,f}$ [-]	$k_{\sigma,1}$ [-]	$k_{\sigma,2}$ [-]	λ_p [-]	ρ [-]	$\rho * f_{y,f}$ [N/mm ²]	$\sigma_u / \rho * f_{y,f}$ [-]	$k_{\sigma,v,1}$ [-]	$k_{\sigma,v,2}$ [-]	$\lambda_{p,v}$ [-]	ρ_v [-]	$\rho_v * f_{y,f}$ [N/mm ²]	$\sigma_u / \rho_v * f_{y,f}$ [-]
TST100A	277	184	0,48	0,58	0,55	0,60	1,35	0,64	202	0,91	0,46	0,60	1,48	0,59	186,39	0,91
TST100B	251	167	0,48	0,53	0,55	0,60	1,35	0,64	202	0,83	0,46	0,60	1,48	0,59	186,56	0,83
TST100C	262	175	0,48	0,53	0,55	0,60	1,37	0,63	207	0,85	0,46	0,60	1,51	0,58	190,61	0,85
TST50A	296	197	0,27	0,59	0,58	0,60	1,08	0,77	258	0,77	0,46	0,60	1,21	0,70	233,59	0,85
TST50B	263	175	0,27	0,61	0,58	0,60	1,00	0,81	235	0,75	0,46	0,60	1,13	0,74	213,60	0,82
CW1	997	297	0,19	0,97	0,62	0,60	0,73	1,00	306	0,97	0,46	0,60	0,83	0,93	284,03	1,05
CW2	662	276	0,19	0,67	0,63	0,60	1,20	0,70	291	0,95	0,46	0,60	1,37	0,63	260,65	1,06
CW3	710	219	0,20	1,01	0,55	0,60	0,66	1,00	216	1,01	0,45	0,60	0,74	1,00	216,00	1,01
CW4	550	226	0,20	0,62	0,55	0,60	1,15	0,73	263	0,86	0,45	0,60	1,28	0,67	240,88	0,94
CW5	610	254	0,26	0,70	0,55	0,60	1,27	0,67	244	1,04	0,45	0,60	1,40	0,62	224,23	1,13
A1	1269	264	0,13	0,98	1,37	0,60	0,46	1,00	271	0,98	0,67	0,60	0,46	1,00	271,00	0,98
A2	1289	269	0,13	0,99	1,37	0,60	0,46	1,00	271	0,99	0,67	0,60	0,46	1,00	271,00	0,99
A3	1250	260	0,13	0,96	1,37	0,60	0,46	1,00	271	0,96	0,67	0,60	0,46	1,00	271,00	0,96
V4a	1290	323	0,13	0,96	1,39	0,60	0,62	1,00	335	0,96	0,67	0,60	0,62	1,00	335,00	0,96
V4b	1275	319	0,13	0,95	1,39	0,60	0,62	1,00	335	0,95	0,67	0,60	0,62	1,00	335,00	0,95
V4c	1273	318	0,13	0,95	1,39	0,60	0,62	1,00	335	0,95	0,67	0,60	0,62	1,00	335,00	0,95

Es wird gezeigt, dass die Ermittlung der Grenzbeulspannung nach EN 1993-1-5 mit den üblichen Beulwerten Gl. (3.14) entsprechend [18] sowie nach den in diesem Kapitel vorgeschlagenen und optimierten Beulwerten Gl. (5.10) nicht zu gesicherten Ergebnissen führt. Dennoch ist die Ermittlung der richtigen Beulwerte wesentlich. Die Ergebnisse leisten einen Beitrag zur Optimierung der Beultragkurve für Plattenbeulen profilierter Stege. Weitere Untersuchungen zu den Beultragkurven für dreiseitig gelagerte Platten mit profilierten Blechen sind erforderlich.

6 Biegedrillknicken

6.1 Allgemeines

Zur Vervollständigung der grundlegenden Untersuchungen zum Tragverhalten von Trägern mit profilierten Stegen werden an der Forschungs- und Materialprüfanstalt Cottbus Pilotversuche zum globalen Stabilitätsverhalten von Wellstegträgern durchgeführt. Schwerpunkt bildeten Untersuchungen zum Biegedrillknicken. Die Ergebnisse werden mit den Knickspannungslinien verglichen und eine Aussage zur Einordnung der Wellstegträger wird getroffen.

6.2 Experimentelle Arbeiten

6.2.1 Versuchsvorbereitung

Zur Auswahl dienen numerische Voruntersuchungen geeigneter Versuchsträger. Die Voruntersuchungen beinhalteten Studien zur Profilierungsform und zur Trägergeometrie. Bei den Trägern der Reihe V5 wird die Stegprofilierung von $2s = 179,6$ mm und $a_3 = 38$ mm und bei den Trägern der Reihe V6 von $2s = 177,2$ mm und $a_3 = 40$ mm verwendet. Der Trägerüberstand $L_{\bar{u}}$ beträgt auf jeder Seite 150 mm, damit ergibt sich eine Stützweite l der Träger von 5720 mm.

Das Versuchsprogramm zum Biegedrillknicken umfasst drei gabelgelagerte Träger als Einfeldträger mit mittiger und senkrechter Lasteinleitung (Versuchsreihe V6). Zusätzlich werden Ergebnisse aus der Versuchsreihe V5, welche ursprünglich für Untersuchungen zur Lasteinleitung dienen, herangezogen. Der relevante Versuchsträger V5b, welcher ebenfalls infolge Biegedrillknicken versagt, ist aufgeführt (Tabelle 6-1).

Tabelle 6-1: Abmessungen der Versuchsträger [mm]

	h_w	t_w	b_f	t_f	t_s	L	$L_{\bar{u}}$
V5b	1000	2,6	250,1	20,0	10,0	6020	150
V6a	1000	3,2	250,0	20,0	10,0	6018	150
V6b	1000	3,1	250,1	20,0	10,0	6021	150
V6c	1000	3,1	250,1	20,0	10,0	6023	150

Der Versuchsaufbau der Versuchsreihen V5 und V6 ist identisch. Die Lasteinleitung der Versuchsreihe V6 wird über einen Lasteinleitungsträger der Länge 100 cm realisiert, um lokales Stegbeulen zu vermeiden (Bild 6.1). Die Lasteinleitung des Versuchsträgers V5b ist Bild 6.2 zu entnehmen. Die Verwendung von Lasteinleitungssteifen stellt eine

weitere Möglichkeit zur Verhinderung von lokalen Stegbeulen dar, die jedoch nicht angewandt wurde.

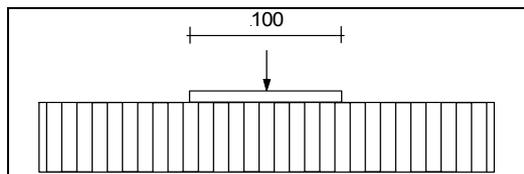


Bild 6.1: Lasteinleitung Versuchsreihe V6 [cm]

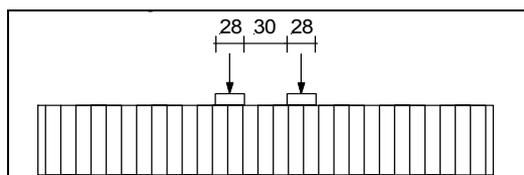


Bild 6.2: Lasteinleitung Versuchsreihe V5 [cm]

Ein Problem bei den Versuchen stellt der Lasteintrag dar. Ziel sollte ein steter senkrechter Kraftangriff (auch bei beginnender seitlicher Verschiebung) zur Trägerlängsachse sein. Eine gelenkige Führung des Kraftzylinders am Fuß- und Kopfpunkt des Kraftzylinders begünstigt die freie Bewegung des Versuchsträgers bei einem annähernd senkrechten Kraftangriff zur Trägerlängsachse. Dennoch können auf Grund der starren Verbindung vom unteren Gelenk des Kraftzylinders bis zur Gurtoberseite (ca. 30 cm) seitliche Abtriebskräfte nicht 100%ig vermieden werden. Eine seitliche Stützung in Trägermitte wird nicht durchgeführt, um die seitliche Bewegung des Trägers nicht zu unterbinden. Als beispielgebender Versuchsaufbau mit exakten Randbedingungen für Biegedrillknickuntersuchungen dient ein Versuchsaufbau an der TU Berlin [52]. Aufgrund des hohen technischen und finanziellen Aufwandes wird diese Versuchseinrichtung in der Forschungs- und Materialprüfanstalt Cottbus nicht umgesetzt. Dennoch wird die auftretende zusätzliche Beanspruchung rechnerisch berücksichtigt (Kapitel 6.4).

Angestrebt wird eine Gabellagerung. Dies kann durch eine seitliche Halterung über die gesamte Trägerhöhe an den Trägerenden realisiert werden, wobei die Rotation des Trägers um seine Hochachse vollständig gegeben ist. Die Lagerung des Trägers in den Stützbereichen auf einem Rohr mit Vollquerschnitt (Durchmesser: 15 cm) ermöglicht die Rotation des Trägers um seine Querachse. Der gewählte Kreisquerschnitt begünstigt den Reibungswiderstand und die Rotationsfähigkeit des Trägers (Bild 6.3).



Bild 6.3: beispielhafter Versuchsaufbau

Das Messen der Stützkräfte erfolgt an beiden Auflagern. Es wurden 1000 kN Kraftmessdosen (Typ C2, Hottinger Baldwin Messtechnik HBM, Darmstadt) verwendet. Die vertikale Durchbiegung in Trägermitte und die seitlichen Auslenkungen des Ober- und Untergurtes werden mittels Wegaufnehmer (Typ IWT 402, Messbereich 100 mm, Hottinger Baldwin Messtechnik HBM, Darmstadt) gemessen. Zusätzlich werden Dehnmessstreifen zur Ermittlung des Spannungs-Dehnungsverhaltens der Versuchsträger im Steg und Gurt angebracht.

Zur genauen Erfassung der Materialkennwerte des verwendeten Stahls werden Zugproben durchgeführt. Die Bestimmung der mechanischen Werkstoffkenngrößen erfolgt für die Steg- und Gurtbleche im einfachen Zugversuch in Anlehnung an die EN 10002, Teil 1 (Anlage 2, Tabelle A2-1).

Geometrische Vorverformungen der Versuchsträger werden nicht vermessen. Für die FE-Berechnungen wurden zur Berücksichtigung der geometrischen und strukturellen Imperfektionen Ersatzimperfektionen angewandt.

6.2.2 Versuchsdurchführung und Versuchsergebnisse

Die Traglastversuche beider Versuchsreihen werden weggesteuert mit einer Geschwindigkeit von 0,4 mm/min durchgeführt. Die Beanspruchung wird über einen 1000 kN Hydraulikzylinder mittig in den Versuchsträger über einen Lastverteilungsträger entsprechend der Lasteinleitungslänge eingetragen.

Der Versuchsträger V6a versagt bei einer maximalen Beanspruchung von 810 kN. Begleiterscheinung war ein dumpfer Knall und eine seitliche schlagartige Auslenkung (y-Richtung, gemessen am Obergurt mittig des Trägers) von $\Delta y = 9,5$ mm (Tabelle 6-2). Nach einem Lastabfall von ca. 5% wird ein erneuter Lastanstieg und eine kontinuierliche Zunahme der seitlichen Verschiebung des Obergurtes verzeichnet. Der

Wert des zweiten Traglastmaximums grenzte an den zuvor erreichten. Die Versagensform war eine reine Biegedrillknickform.

Der Träger V6b erreichte das Biegedrillknickmoment bei einer Last von 780 kN und gleichzeitiger horizontalen Verschiebung von $\Delta y = 15,5$ mm. Es erfolgte allmählich ein Traglastabfall auf ca. 740 kN. Lokale Beulen im Stegbereich wurden nicht festgestellt. Verbunden mit einem dumpfen Geräusch trat bei dieser Laststufe schlagartig eine horizontale Bewegung des Trägers auf. Das Traglastmaximum (795 kN) sowie das Versagensverhalten des Trägers V6c glichen dem des Trägers V6a. Das Biegedrillknickverhalten des Trägers konnte bestätigt werden (Bild 6.4). Es wurden größere seitliche Auslenkungen erzielt. Die Spannungen im Steg und Gurt erreichten nicht die Streckgrenze des Materials (Tabelle 6-2). Das Tragverhalten aller Versuchsträger einschließlich der seitlichen Verschiebungen der Gurte sind in Bild 6.5 zusammengefasst.

Im Gegensatz dazu, stellte sich beim Versuchsträger V5b mit Erreichen einer Last von 510 kN zunächst eine schlagartige seitliche Verschiebung des Druckgurtes von $\Delta y = 12$ mm und eine gleichzeitige entgegengerichtete Verschiebung des Zuggurtes $\Delta y = 3$ mm ein. Es folgte ein schlagartiger Lastabfall von ca. 15%. Der Versuchsträger befand sich in einer neuen Gleichgewichtslage und ein erneuter Lastanstieg erfolgte. Mit dem Erreichen der Traglast wurden im Steg unterhalb des Lasteinleitungsbereiches plastische Stauchungen verzeichnet. Das Entziehen des Druckgurtes von der Beanspruchung, verbunden mit einem seitlichen Ausweichen der Gurte und Verdrehen des Trägers um seine Stablängsachse, deutete auf einen globalen Stabilitätsverlust hin. Es wird vermutet, dass durch auftretende seitliche Abtriebskräfte, infolge der nicht einwandfreien vertikalen Lasteinleitung, der Stabilitätsverlust verstärkt wurde. Auch zeigt das resultierende Spannungsverhältnis $\sigma_{u,f} / f_{y,f}$ Unterschiede zur Versuchsreihe V6. Es stellt sich deshalb die Frage, ob das Erreichen der Stabtragfähigkeit ausschließlich auf den globalen Stabilitätsverlust Biegedrillknicken zurückzuführen ist. Vorstellbar ist, dass sich mit Erreichen der Traglast (nach erneutem Lastanstieg) und dem Ausbilden von lokalen Beulen im Steg um eine Interaktion zwischen lokalem Stegbeulen und globalen Beulen des Trägers handelt.

Tabelle 6-2: Ergebnisse Versuchsreihe V6

Vers.-Träger	Versagen	Traglast $F_{u,y}$ [kN]	$\sigma_{u,f} / f_{y,f}$ [-]	max. Verschiebung horizontal [mm]	max. Verschiebung vertikal [mm]
V6a	BDK	810	0,84	9,5	17,4
V6b	BDK	780	0,81	15,5	16,3
V6c	BDK	795	0,82	19,2	17,1
V5b	BDK	590	0,53	12	17



Bild 6.4: Biegedrillknicken des Trägers V6c

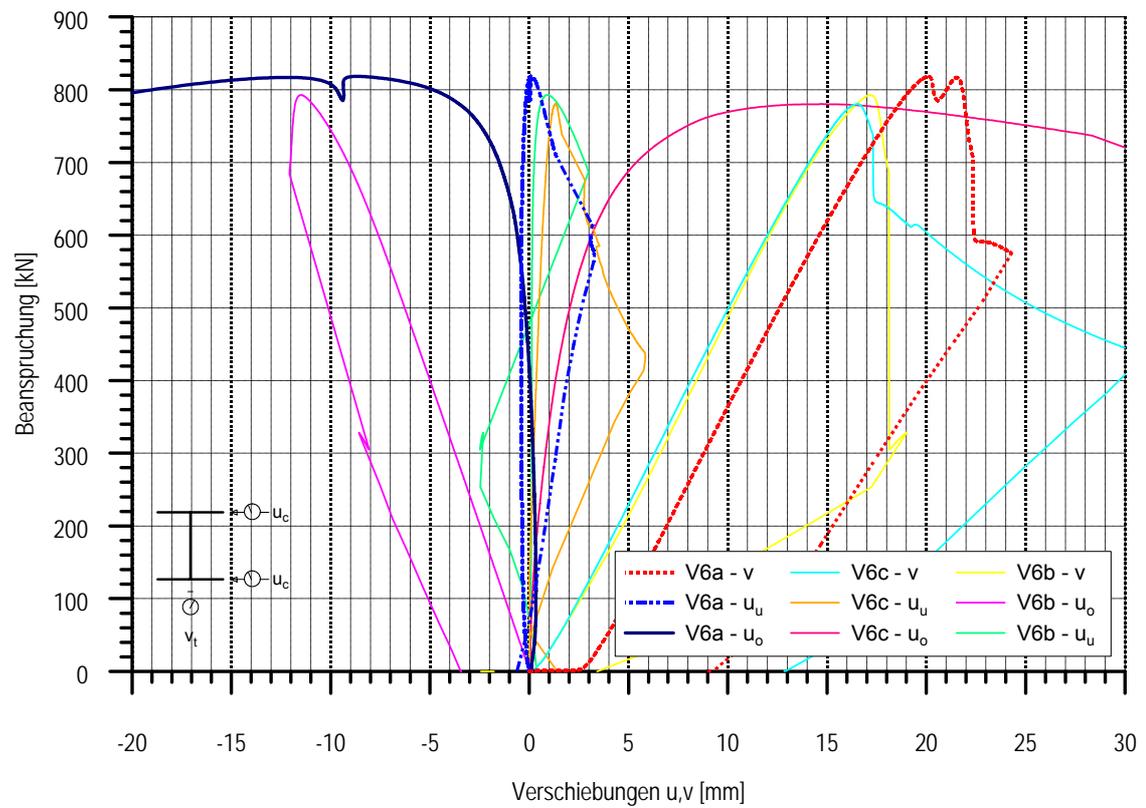


Bild 6.5: Ergebnisse Versuchsreihe V6

6.3 Voraussetzungen der Parameterstudie

6.3.1 Parameter

Um eine Aussage zum Biegedrillknickverhalten der Wellstegträger zu treffen, ist eine umfangreiche Parameterstudie erforderlich. Grundsätzlich kann das Versagen infolge Normalkraft, Biegung und Biegung mit Normalkraft auftreten. Anlass der Untersuchungen ist die Frage, ob die feingliedrige Profilierung des Steges einen Einfluss auf das globale Stabilitätsverhalten ausübt und die Einordnung in die europäischen Knickspannungslinien bzw. Biegedrillknicklinien erfolgen kann.

Entscheidender Parameter der Untersuchungen ist die bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}_T$ bzw. $\bar{\lambda}_{LT}$, welche sich aus EN 1993-1-1 [17], Gl. (6.1), Gl. (6.2) errechnet.

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}} \quad (6.1)$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}} \quad (6.2)$$

Die Verzweigungslast N_{cr} nach der Elastizitätstheorie für den entsprechenden Knickfall und das ideale Biegedrillknickmoment M_{cr} nach der Elastizitätstheorie beinhalten sämtliche geometrische Einflussparameter. Der Einfluss des lokalen Plattenbeulens auf das Biegedrillknickverhalten wird für Träger der Querschnittsklasse 4 anhand von effektiven Querschnittswerten erfasst. Daraus ergeben sich die zu untersuchenden Parameter für die Studie (mit Angabe der gewählten Grenzbereiche):

- Trägerlänge L (4 m, 6 m, 12 m, 24 m)
- Gurtbreite b_f (100 mm, 250 mm, 350 mm)
- Gurtdicke t_f (10 mm, 20 mm, 40 mm)
- Steghöhe h_w (1000 mm)
- Stegdicke t_w (2 mm, 2,5 mm, 3 mm)

Aufgrund des gewählten Systems können allgemeingültige Aussagen zum Biegedrillknickverhalten mit veränderlichem Momentenverlauf getroffen werden. Im Rahmen dieser Parameterstudie wurden FE Rechnungen an Wellstegträgern vorgenommen.

Untersuchungen unter alleiniger Normalkraftbeanspruchung sowie unter kombinierter Beanspruchung Biegung mit Normalkraft werden nicht geführt. Diese Untersuchungen sind erforderlich, um einen umfassenden Überblick zum globalen Stabilitätsverhalten der Wellstegträger zu erhalten.

Die Modelle der FE Parameterstudien sind folgendermaßen bezeichnet:

A1000-10100-4. Darin bedeuten nach der Reihenfolge von links nach rechts und mit Bindestrichen getrennt:

- Stegdicke (A = 2 mm, B = 2,5 mm, C = 3 mm)
- Steghöhe
- Gurtstärke, -breite
- Trägerlänge

6.3.2 FE Modell

Die Entwicklung eines Finiten Elemente Modells unter Berücksichtigung der gegebenen Randbedingungen der Versuchsreihen besitzt einen hohen Anspruch. Sämtliche Berechnungen dieser Parameterstudie wurden mit dem Programmpaket ABAQUS durchgeführt.

Können Biegedrillknickberechnungen mit stabähnlichen Elementen durchgeführt werden, welche das globale Stabilitätsverhalten beschreiben? Die Elementbibliothek in ABAQUS hat für Stabwerkberechnungen ein umfangreiches Paket zur Verfügung. Die Balkenelemente werden in Elemente mit geschlossenen Querschnitten (ohne Berücksichtigung der Wölbkrafttorsion) und in Elemente mit Wölbkrafttorsion (offene Querschnitte) unterschieden. Diese Elemente basieren auf der Theorie von Euler-Bernoulli und Timoshenko.

Bei der Anwendung der Stabelemente für Stabmodelle mit offenen Querschnitten treten aus theoretischer Sicht Abweichungen zum bekannten Tragverhalten auf. Begründet sind diese Abweichungen in der theoretischen Formulierung der Stabilitätsprobleme. Guggenberger und Salzgeber [25] haben den inneren Kräftevektor des Biegetorsionsstabes analysiert. Basis der Formulierung ist eine konsistent quadratische Approximation der geometrisch exakten nichtlinearen Verzerrungen (Green-Lagrange) unter Voraussetzung der Euler-Bernoulli-Hypothese. Im Kräftegleichgewicht treten die allgemein bekannten Schnittgrößen – Normalkraft, Biegemoment, Torsionsmoment und auch Wölbmoment – auf. Zusätzlich entsteht eine weitere Schnittgröße, welche in der deutschsprachigen Literatur als Wagner-Term bezeichnet wird. Diese Schnittgröße entsteht durch Integration der aktuellen nichtlinearen Spannungsanteile mit dem Quadrat des polaren Abstandes über die Fläche. Sie beschreibt verschiedene Anteile. In Verbindung mit der Längsdehnung wird das Drillknicken erfasst. Die weiteren Anteile stehen in Verbindung mit den Krümmungen, Torsionsverdrillungen und –verwölbungen und beschreiben das Biegedrillknickverhalten unsymmetrischer Querschnitte. Diese Anteile fehlen in der Stabelementformulierung in ABAQUS. Aus diesem Grund sind Balkenelemente aus der Elementbibliothek von ABAQUS für die Biegedrillknickuntersuchungen nicht geeignet. Vergleicht man dagegen die Ergebnisse

monosymmetrischer Querschnitte zwischen Stab- und Schalenelementen, so geben die Modelle mit Schalenelementen die Ergebnisse entsprechend des klassischen Beul- und Knickverhaltens wieder. Schlussfolgernd wurden zur Modellierung sämtlicher numerischer Berechnungen der Parameterstudie Schalenelemente (S4R) verwendet. Die Modellentwicklung ist aufwendiger und die Berechnungen rechenzeitintensiver. Jedoch werden sinnvolle Ergebnisse erzielt.

Das Finite Elemente Modell wird entsprechend der Abmessungen und Randbedingungen der Versuchskörper abgebildet (Bild 6.6). Es wurde eine Gabellagerung angenommen. Dabei wird der Träger in allen drei Verschiebungsrichtungen ohne Zwängungen gehalten. Die Rotationen um die Quer- und Hochachse sind frei. Verdrehungen um die Längsachse werden durch ein Behindern von seitlichen Verschiebungen des Obergurtes im Bereich der Auflagersteifen vermieden.

Die Lasteinleitung erfolgt stets senkrecht zur Trägerebene in vertikaler Richtung. Aufgrund des in den Versuchen verwendeten Lasteinleitungsträgers, wird die Beanspruchung auf die Länge des Lasteinleitungsträgers verteilt angenommen. Diese wird mittels eines MPC (Multi Point Constraint) realisiert. Vergleichend dazu wird die Last punktuell mittig in den Träger eingeleitet und die Gurtdicke wurde durch eine äquivalente Dicke angenommen, um den versteifenden Einfluss des Lasteinleitungsträgers zu modellieren. Es zeigt sich, dass mit der Anwendung des MPC und die daraus resultierende Verteilung der Beanspruchung über die Länge des Lasteinleitungsträgers sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Diese Methode wird in der Parameterstudie umgesetzt.

Die Steifen werden entsprechend ihrer Abmessungen, mit dem Steg und Gurt verbunden, modelliert.

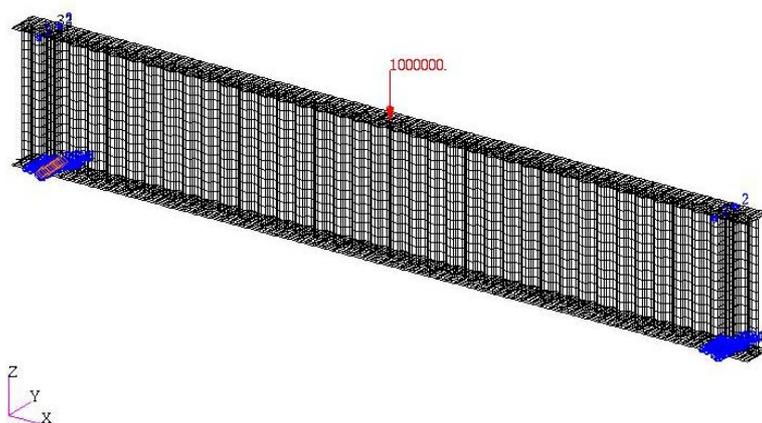


Bild 6.6: FE Modell

Die Verformungsfigur wird mit den entsprechenden Amplituden nach DIN 18800 Teil 2 multipliziert. Die Vorkrümmung hat demzufolge einen Stich von $L/200$. L entspricht in

diesem Fall der Stützweite $l = 5720$ mm. Somit beträgt der Maximalwert der Verformungen 28,6 mm.

6.3.3 Ergebnisse im Vergleich

Das Erfassen der realen Geometrie vorhandener Steifen im Auflagerbereich sowie der realen Wellenform im FE Modell trägt entscheidend zur Modelloptimierung bei. Bei alleinigem Stabilitätsversagen der Versuchskörper ist das Erfassen der Materialkennwerte nicht maßgebend. Einige Ergebnisse der Versuche zeigen jedoch, dass das Erreichen der Traglast infolge des globalen Stabilitätsverlustes und des Materialfließens sehr dicht beieinander liegen. Dabei ist das Materialverhalten sehr entscheidend. Aus diesem Grund ist es erforderlich, nicht nur das lineare Materialgesetz zu verwenden, sondern das elastische sowie plastische Materialverhalten zu erfassen. Es werden die in den Zugversuchen ermittelten Materialkurven in der FE Rechnung verwendet.

Das entwickelte FE Modell weist maximale Traglastunterschiede von 3% bis 4% gegenüber den Versuchswerten auf. Bild 6.7 zeigt den ersten Eigenwert des Systems. Die Ersatzimperfectionen, welche geometrische und strukturelle Imperfectionen berücksichtigen, werden bei der Traglastberechnung angesetzt. Zusätzlich werden auch auftretende lokale Imperfectionen z.B. Plattenbeulen des Gurtes bei der Traglastberechnung in Form von Vorverformungen berücksichtigt. Die Berechnung und Anwendung der Verformungen für die Traglastberechnung sind in Kapitel 4.3 und 4.4 ausführlich beschrieben und können auf die Traglastberechnungen Biegedrillknicken sinngemäß übertragen werden.

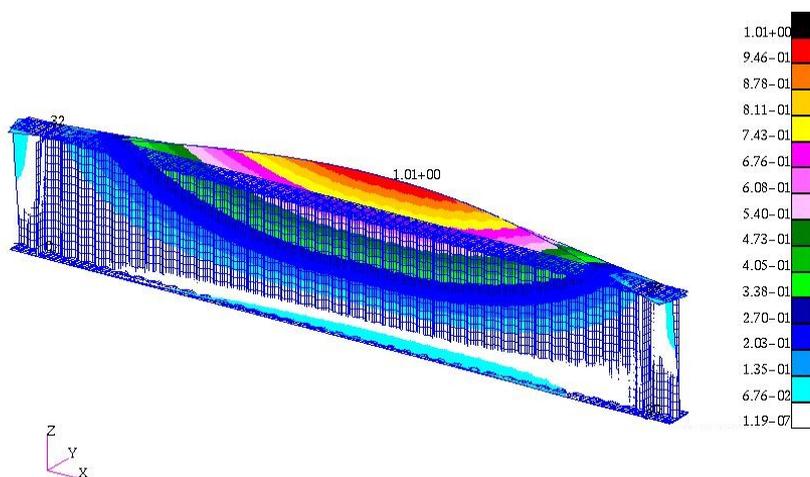


Bild 6.7: Erster Eigenwert

Gemessene Dehnungen und berechnete Spannungen lagen im Traglastzustand unterhalb der Werte der Streckgrenze. Das vorhandene Modell stimmt mit den Versuchsergebnissen sehr gut überein (Bild 6.8).

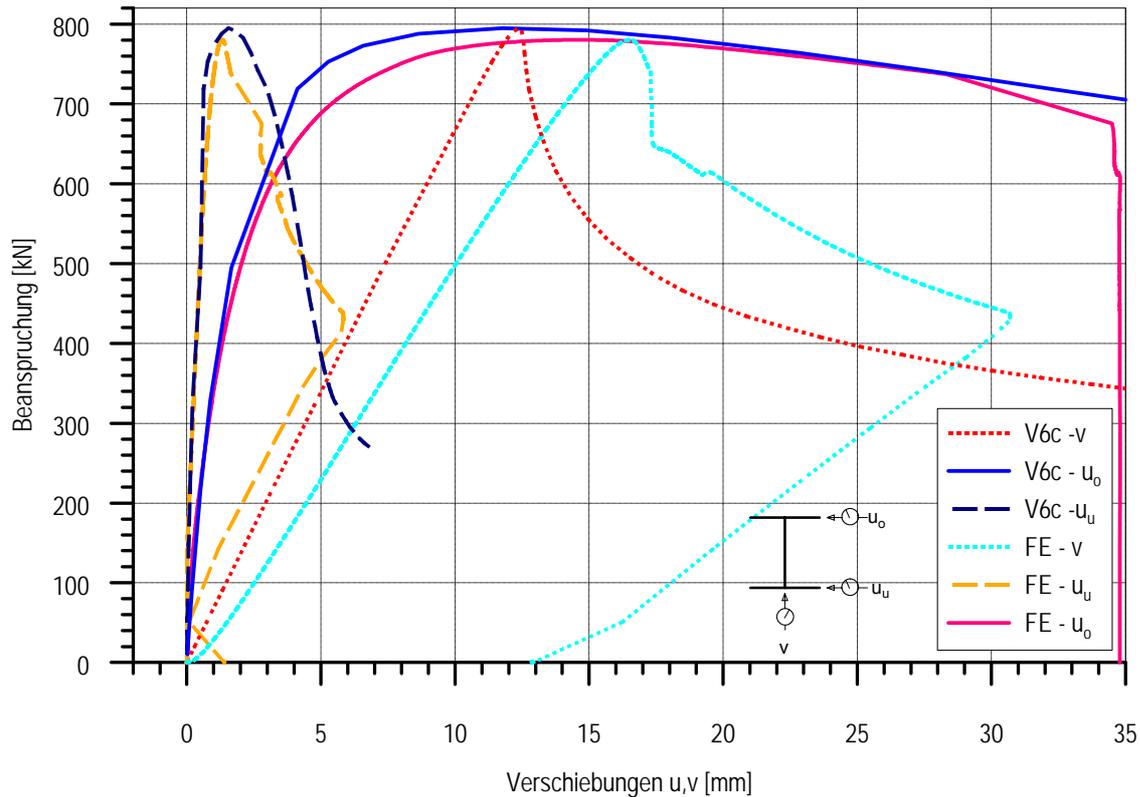


Bild 6.8: Vergleich Versuchsträger V6c und FE-Modell

Trotz der guten Übereinstimmung der numerischen und experimentellen Ergebnisse, ist es dennoch fraglich, ob die getroffenen Randbedingungen den Versuch optimal abbilden.

6.4 Ergebnisse

6.4.1 Algorithmus der Berechnung

Die Ergebnisse der Parameterstudie werden ausgewertet und in $\chi_{LT} - \bar{\lambda}_{LT}$ Diagrammen dargestellt Gl. (6.17) und (6.18). Im Folgenden ist der Berechnungsalgorithmus zur Ermittlung der bezogenen Biegeschlankheiten und Abminderungsfaktoren aus den Ergebnissen der Parameterstudie dargestellt.

Statische Größen:

$$h_m = h_w + t_f \quad (6.3)$$

$$z_p = -\left(\frac{h_w}{2} + t_f + z\right) \quad (6.4)$$

$$z_1 = \frac{h_m}{2} \quad (6.5)$$

z beschreibt den starren Abstand vom unteren Gelenk des Kraftzylinders bis zur Gurtoberseite und beträgt 30 cm. Das ist eine konservative Annahme der Lasteinleitung. Der Einfluss horizontaler Abtriebskräfte wird dadurch erfasst. Der Vergleich des rechnerisch ermittelten idealen kritischen Momentes M_{cr} und dem numerisch ermittelten kritischen Moment $M_{cr,num}$ zeigt, dass die Annahme sinnvoll und gerechtfertigt ist.

Flächenmomente 2. Grades:

$$I_{z1f} = I_{z2f} = \frac{t_f \cdot b_f^3}{12} = I_{zf} \quad (6.6)$$

$$I_{y1f} = I_{y2f} = \frac{b_f \cdot t_f^3}{12} \quad (6.7)$$

$$I_T = 1/3 \cdot \sum b_i \cdot t_i^3 = 1/3 \cdot (h_w \cdot t_w^3 + 2 \cdot b_f \cdot t_f^3) \quad (6.8)$$

Wölb torsionsträgheitsmoment Anteil des ebenen Bleches:

$$I_w = \frac{I_{z1f} \cdot I_{z2f}}{I_{z1f} + I_{z2f}} \cdot h_m^2 \quad (6.9)$$

Verschiebungsanteile ([2], Kapitel 2.2):

$$u_x = \frac{h_m}{2 \cdot G \cdot a_1 \cdot t_w} + \frac{h_m^2 \cdot a^3}{600 \cdot a_1^2 \cdot E} \cdot \frac{I_{y1f} + I_{y2f}}{I_{y1f} \cdot I_{y2f}} \quad (6.10)$$

Streckenwölbfeder ([2], Kapitel 2.2):

$$c_w = \frac{b_t^2 \cdot h_m^2}{8 \cdot u_x \cdot s} \quad (6.11)$$

Wölb torsionsträgheitsmoment [2]:

$$I_w^* = I_w + c_w \cdot (l^2 + 4 \cdot l \cdot L_{\ddot{u}}) / (E \cdot \pi^2) \quad (6.12)$$

Drehradius:

$$c^2 = \frac{I_w^* + 0,039 \cdot l^2 \cdot I_T}{I_{zf}} \quad (6.13)$$

Plastisches Biegemoment:

$$M_{pl,y} = f_y \cdot h_w \cdot t_f \cdot b_f \quad (6.14)$$

Ideale Kräfte und Momente:

$$N_{cr} = \pi^2 \cdot E \cdot I_{zf} / l^2 \quad (6.15)$$

$$M_{cr} = \zeta \cdot N_{cr} \cdot \left(\sqrt{c^2 + 0,25z_p^2} + 0,5z_p \right) \quad (6.16)$$

ζ ist der Momentenbeiwert und wird für die Berechnungen mit 1,3 angenommen.

Bezogene Biegeschlankheit:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{M_{pl,y}}{M_{cr}}} \quad (6.17)$$

Abminderungsfaktor:

$$\chi_{LT} = \frac{M_{u,y}}{M_{pl,y}} \quad (6.18)$$

Entsprechend [17] ist der Nachweis gegen Biegedrillknickversagen mit Gl. (6.19) zu erbringen.

$$\frac{M_{y,d}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.19)$$

$M_{y,d}$ ist der rechnerische Bemessungswert des Biegemomentes. Der Bemessungswert der Biegedrillknickbeanspruchbarkeit ist entsprechend Gl. (6.20) zu ermitteln.

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (6.20)$$

Dabei ist W_y entsprechend der jeweiligen Querschnittsklasse zu wählen [17].

6.4.2 Versuche und Parameterstudie

Die aufgetretenen Biegemomente $M_{u,y}$ überschreiten bei einigen Trägern das plastische Moment $M_{pl,y}$. Die gewählten Parameter der Studie decken den Bereich schlanker und gedrungener Träger ab. Einige Versuchsträger versagen infolge Stegversagen und werden in die Auswertung der Ergebnisse nicht mit aufgenommen. Die Ergebnisse der Parameterstudie sind in Bild 6.9 zusammengefasst, sämtliche ermittelte Traglasten befinden sich in Anlage 5.

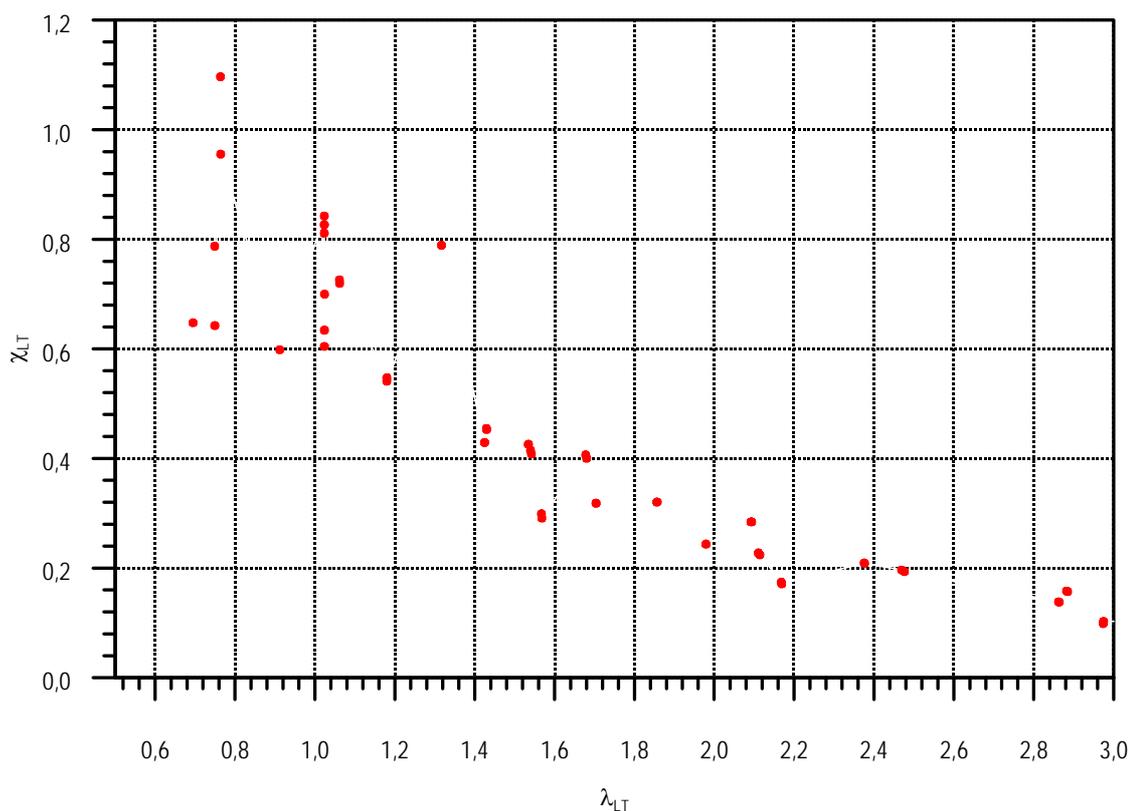


Bild 6.9: $\chi_{LT}-\bar{\lambda}_{LT}$ Diagramm aller untersuchten Parameter

Der Vergleich der Ergebnisse der durchgeführten Versuche und der numerischen Parameterstudie stimmen sehr gut überein.

Tabelle 6-3: Vergleich der experimentellen und numerischen Ergebnisse

Träger	$F_{u,y}$	$M_{u,y}$	$M_{pl,y}$	M_{cr}	λ_{LT}	χ_{LT}
	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[-]	[-]
V6a	810	105300	127500	120947	1,03	0,83
V6b	780	101400	127500	120947	1,03	0,80
V6c	795	103350	127500	120947	1,03	0,81
V5b	590	67260	127500	120867	1,03	0,53
C1000-20250-6	795	103350	127500	120947	1,03	0,81
B1000-20250-6	610	79300	127500	120867	1,03	0,63

6.4.3 Abminderungskurven

Die ermittelten Ergebnisse der Parameterstudie werden mit den europäischen Knickspannungslinien und den Biegedrillknickkurven nach DIN 18800 [11] verglichen. In Bild 6.10 sind auch die Ergebnisse der Versuche enthalten.

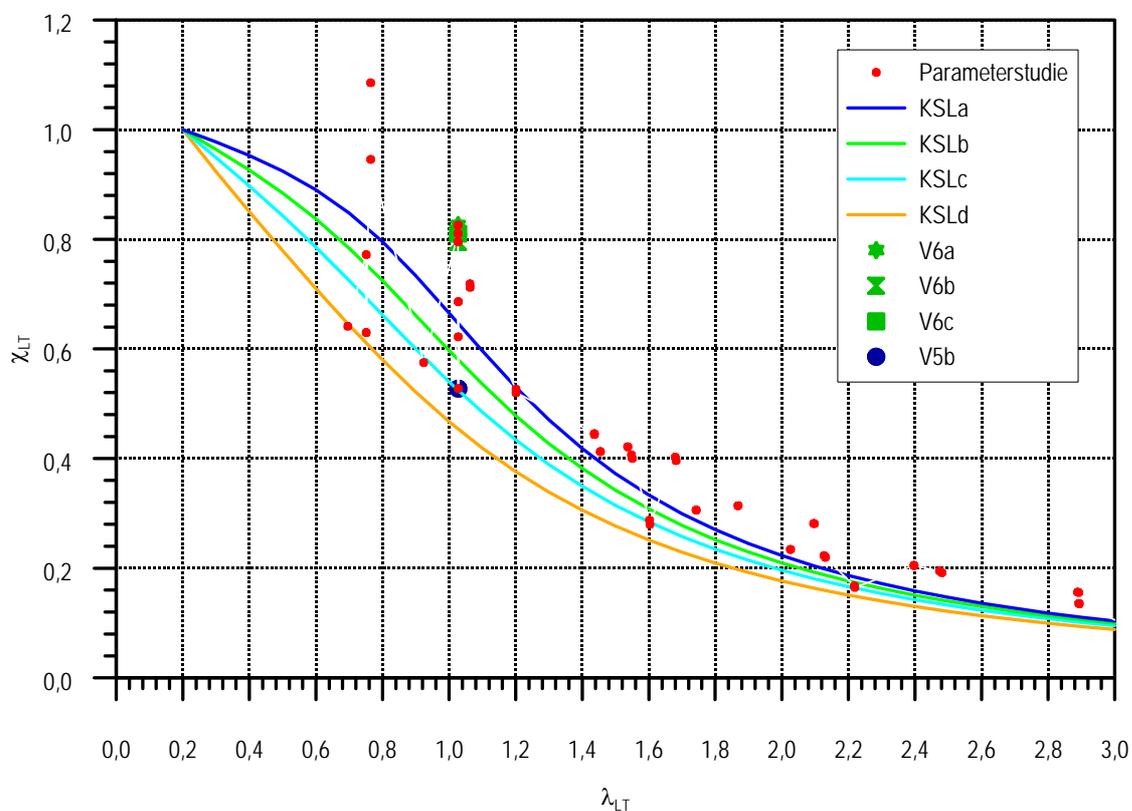


Bild 6.10: Vergleich der Ergebnisse mit europäischen Knickspannungslinien [17]

Der Vergleich der Parameterstudie mit den europäischen Knickspannungslinien zeigt, dass die Knickspannungslinie c für analytische Berechnungen der Wellstegträger geeignet ist und ein weites Parameterfeld abdeckt.

Werden die Wellstegträger in die Biegedrillknickkurven nach [11] berechnet, so erfolgt teilweise eine Überschätzung der Momententragfähigkeit der Träger (Bild 6.11).

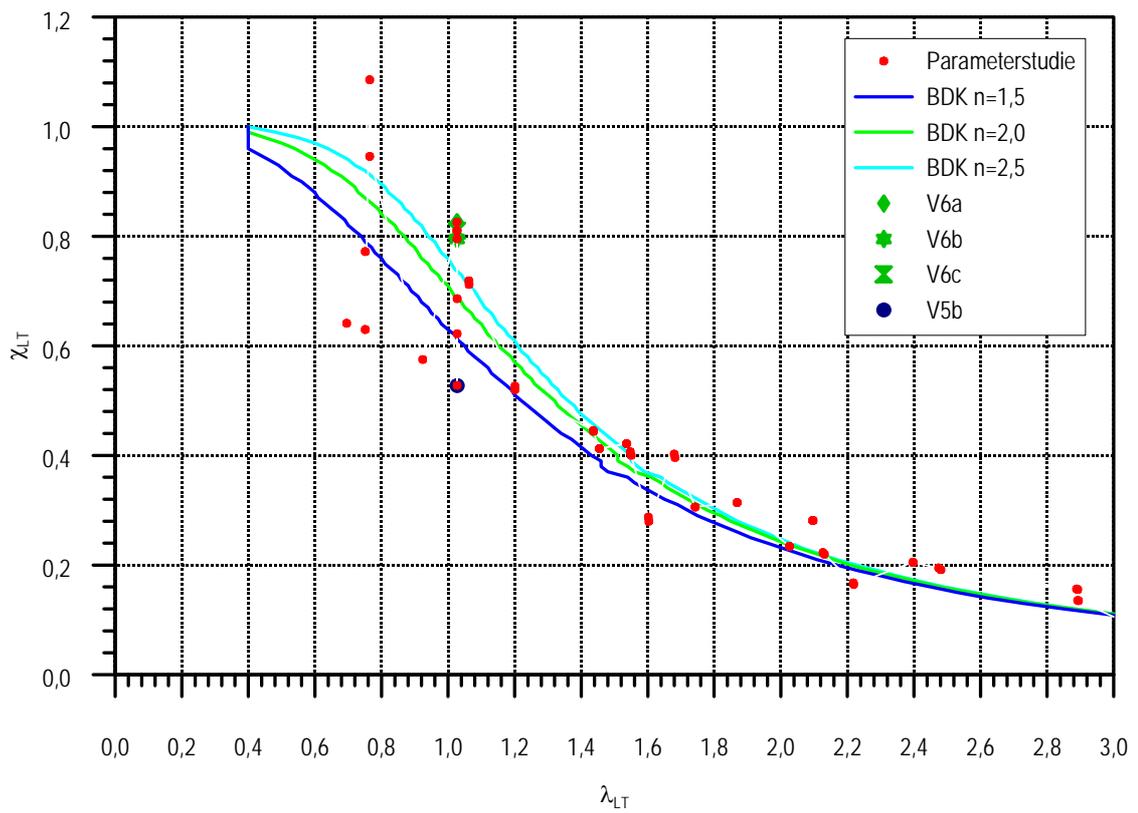


Bild 6.11: Vergleich der Ergebnisse mit den Biegedrillknickkurven [11]

7 Zusammenfassung

7.1 Schlussfolgerungen

In der vorliegenden Arbeit ist das Stabilitätsverhalten und dessen Einfluss auf die Querschnitts- und Stabtragfähigkeit von Trägern mit profilierten Stegen umfassend untersucht worden. Die gewählten Parametergrenzwerte orientieren sich am derzeitigen Anwendungsbereich stegprofilierter Träger. Es wurden ausschließlich sinus- und trapezförmige Profilierungen untersucht. Die derzeit aktuelle Norm EN 1993-1-5 liefert die Grundlage für die Bemessung der Trapez- und Wellstegträger mit beliebigen Stegprofilierungen und Trägerabmessungen.

Die durchgeführten Untersuchungen ergänzen die derzeit bestehenden Berechnungsverfahren für die Querschnitts- und Stabtragfähigkeit der Träger mit profilierten Stegen und ermöglichen eine wirtschaftliche und tragwerkssichere Bemessung und Anwendung dieser Trägerart. Gleichzeitig dienen die Ergebnisse der Weiterentwicklung des mehrfach diskutierten Interaktionsmodells zur Querkrafttragfähigkeit. Ferner leistet die Arbeit einen Beitrag zur Vervollständigung der grundlegenden Untersuchungen zum Tragverhalten der Wellstegträger. Denn erst mit dem vollständigen Stand des Wissens können allgemeingültige Aussagen zur Querschnitts- und Stabtragfähigkeit von Trägern mit profilierten Stegen getroffen werden.

Die Ergebnisse der experimentellen und numerischen Untersuchungen zum lokalen Stabilitätsverhalten des Stegbleches bei Querkraftbeanspruchung tragen zu einem besseren Verständnis über das Tragverhalten bei. Umfangreiche Parameterstudien zeigen, dass die Profilierungsform (trapez- bzw. sinusförmig) sowie die Parameter Wellenamplitude und -länge die Tragmechanismen bestimmen. Kritische Beulspannungen, die bei der Traglastberechnung zur Beschreibung der geometrischen Beulformen herangezogen werden, werden bestimmt. Es wird bestätigt, dass sich das Stegbeulverhalten der Wellstegträger von dem des Trapezstegträgers unterscheidet. Entsprechend werden die Profilierungen voneinander abgegrenzt und empirisch ermittelte, kritische Beulspannungen vorgeschlagen. Die Interaktion des lokalen und globalen Beulens wird dabei mit einer Beulspannung für zonales Beulen beschrieben. Auf Grundlage dieser Ergebnisse kann die Tragfähigkeit stegprofilierter Träger besser beschrieben werden. Die Abminderungskurven, welche das Nachbeulverhalten sowie Imperfektionen berücksichtigen, sind optimiert. Eine wesentliche Verbesserung der Plateaulängen ist für Träger mit profilierten Stegen gelungen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden numerische und experimentelle Untersuchungen zum Einfluss der lokalen Instabilität des Gurtes biegebeanspruchter Träger durchgeführt. Im Speziellen ist das plattenähnliche Gurtbeulen näher untersucht. Das Plattenbeulen hängt

nicht von der Profilform sondern ausschließlich von den Profilierungsparametern (Wellenamplitude und –länge) ab. Damit werden die Aussagen von Protte [76] bestätigt. Im Vergleich zur EN 1993-1-5 treten große Abweichungen der Beulfeldabmessungen auf, die sich weitaus ungünstiger auf das Tragverhalten auswirken können als bisher angenommen. Auf Grundlage der Untersuchungen ist eine Optimierung der Beulfeldabmessungen für plattenähnliches Beulen vorgeschlagen. Die nach EN 1993-1-5 modifizierte Beultragkurve, welche ursprünglich für ebene Stegbleche entwickelt wurde und auch bestätigt ist, ist für stegprofilerte Träger nicht zweifelsfrei. Um einer tragwerkssicheren Bemessung der Trapez- und Wellstegträger gerecht zu werden, sind weitere Untersuchungen zur Beultragkurve notwendig.

Die Biegedrillknickuntersuchungen ergänzen die fehlenden Aussagen zum globalen Stabilitätsverhalten der Wellstegträger. Die Ergebnisse der Studie ordnen die Wellstegträger in die bestehenden europäischen Knickspannungslinien ein. Das vermutete bessere Biegedrillknickverhalten (wie für Trapezstegträger bekannt) kann für die Wellstegträger im untersuchten Wertebereich nicht bestätigt werden. Nach Meinung der Verfasserin sind die Wellstegträger wie die Träger mit ebenen Stegen zu behandeln. Wiederum wird bestätigt, dass die Profilform die Querschnitts- und Stabtragfähigkeit entscheidend beeinflusst.

7.2 Ausblick

Die vorliegende Arbeit ergänzt den Stand des Wissens über die Querschnitts- und Stabtragfähigkeit von Trapez- und Wellstegträgern. Gleichzeitig werfen die Ergebnisse neue Fragestellungen auf.

Die entwickelten Modelle zur Querkrafttragfähigkeit sollten mathematisch beschrieben werden, damit die empirischen Ergebnisse bestätigt werden können. Die Interaktion von lokalem und globalem Beulen (zonales Beulen) kann mit dem Ziel der wirtschaftlichen Bemessung optimiert werden.

Ferner ist die in EN 1993-1-5 verwendete Beultragkurve für dreiseitig gestützte Rechteckplatten für die Anwendung bei Trapez- und Wellstegträgern in Frage gestellt worden. Hier sind weiterführende Untersuchungen notwendig, damit eine tragwerkssichere Bemessung erfolgt.

An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass zum Tragverhalten der Wellstegträger noch Forschungsbedarf besteht. Untersuchungen zur Stabtragfähigkeit sollten mit dem Ziel durchgeführt werden, die Biegedrillknickuntersuchungen mit Aussagen zum Biegeknicken zu ergänzen und den Einfluss lokaler Instabilitäten des Gurtes auf das Biegedrill- und Biegeknicken zu erfassen.

Abweichend von den in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen sollten Untersuchungen:

- zum Einsatz profilierter Stegbleche in Rahmenecken [73],
- zur Querkrafttragfähigkeit von Wellstegträgern bzw. sinusförmig profilierten Rahmeneckblechen mit Ausschnitten,
- zum Einfluss einer beliebigen Stegprofilierung auf das Fließmuster des Steges und Gurtes sowie die Erweiterung des Komponentenmodells für nachgiebige Verbindungen

bestätigt bzw. durchgeführt werden und somit den Stand des Wissens zu den Wellstegträgern zu vervollständigen.

Literatur

- [1] Aschinger, R., Beljaev, V.F., Mikhailova, T.V.: Zur Querkrafttragfähigkeit von I-Trägern mit verschiedenen Stegprofilierungen. Stahlbau 60, H. 10, 1991
- [2] Aschinger, R.: Tragverhalten von geschweißten I-Trägern mit trapezförmig profilierten Stegen bei Torsion, Biegung, Biegedrillknicken und Normalkraft. Dissertation, TU Berlin, 1994
- [3] Aumayr, M.: Verformungs- und Beulverhalten von Wellblechen unter reiner Schubbelastung. Diplomarbeit, TU Wien, Juni 1992
- [4] Bathe, J.: Finite Elemente Methoden. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, 1990
- [5] Bergfelt, A., Leiva, L.: Shear buckling of trapezoidally corrugated girder webs. Publikation, Chalmers University of Technology, Div. of Steel and Timbers Structures, Göteborg, 1984, S. 84-86
- [6] Bergmann, S., Reißner, H.: Neuere Probleme aus der Flugzeugstatik. Zeitschrift für Flugtechnik und Motorluftschiffahrt, Vol. 20, 1929
- [7] Braham, M., Maqoui, R.: Merchant-Rankine's concept brought again in honour for web-tapered I-section steel members. Festschrift Joachim Lindner, März 1998
- [8] Brune, B.: Wirksame Breiten für druck- und biegebeanspruchte Stahlbleche im plastischen Zustand. Stahlbau 68, Heft 12, 1999, S. 1044-1057
- [9] Costa Ferreira sa Marques, C.M., Rondal, J.: Effet des imperfections sur les phenomenes d'instabilite' des structures en acier. Annales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics, Nr. 451, 1997
- [10] Deutscher Ausschuss für Stahlbau: DASt-Richtlinie 015, Träger mit schlanken Stegen. Köln, Stahlbau-Verlagsgesellschaft mbH, Juli 1990
- [11] DIN 18800 Teil 1-3. Deutsches Institut für Normung e.V., 1990
- [12] Easley, J.: Buckling Formulas for corrugated metal shear diaphragms. Journal of the Structural Division, 1975, S. 1403-1416
- [13] Easley, J.T., McFarland, D.E.: Buckling of Light-Gage Corrugated Metal Shear Diaphragms. Journal of the Structural Division, Vol. 95, July 1969, S.1403-1417
- [14] Elgaaly, M., Hamilton, R.W., Seshadri, A.: Shear strength of beams with corrugated webs. Journal of Structural Engineering, June 1997, S.772-782

- [15] Elgaaly, M., Hamilton, R.W., Seshadri, A.: Shear strength of beams with corrugated webs. *Journal of Structural Engineering*, 1996, S. 390-398
- [16] EN 1990: Anhang D. Versuchsgestützte Bemessung, 2002
- [17] EN 1993-1-1: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten Teil 1-1
- [18] Annex D of EN 1993-1-5: Plate girders with corrugated webs, 2006
- [19] EN 1993-1-6: Allgemeine Bemessungsregeln – Ergänzende Regeln für Schalenkonstruktionen. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Februar 2007
- [20] Fischer, M., Grube, R.: Querschnittstragfähigkeit von normalspannungsbeanspruchten Querschnitten, die beulgefährdete Platten aufweisen. *Stahlbau Heft 5*, 1986, S. 129-135
- [21] Fischer, M., Zhu, J., Priebe, J.: Die Methode der wirksamen Breiten. *Forschungsbericht Heft Nr. 21*, Universität Dortmund, 1996
- [22] Frey, F.: Essai d'une poutre a ame plisse, Rapport interne No 64, Nov 1975, Laboratoire de Mechanique des Materiaux et Statique de Constructions, Universite de Liege
- [23] Friemann, H., Stroetmann, R.: Zum Nachweis ausgesteifter biegedrillknickgefährdeter Träger. *Stahlbau 67*, Heft 12, 1998, S. 936-955
- [24] Grote, H.: Zum Einfluss des Beulens auf die Tragfähigkeit von Walzprofilen aus hochfestem Stahl. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 2003
- [25] Guggenberger, W., Salzgeber, G.: Geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung von Stabstrukturen mit Abaqus - Möglichkeiten, Einschränkungen und Verbesserungsvorschläge. 8. österr. Abaqus Anwendertreffen, Oktober 1998
- [26] Hamilton, R.: Behaviour of welded girders with corrugated webs. PhD Thesis, University of Maine, USA 1993
- [27] Hartung, J.: Statistik. Oldenburg Verlag GmbH, München, 1989
- [28] Höglund, T.: Shear Buckling Resistance of Steel and Aluminium Plate Girders. *Thin-walled Structures*, Vol. 29, 1997, S. 13-30
- [29] Institut für Brandschutztechnik und Sicherheitsforschung: Brandversuche an Wellstegträgern. Linz, 1995
- [30] Institut für Stahlbau: Prüfbericht über Versuche an I-Trägern mit gewelltem Stegblech. TU Wien, 1990
- [31] Johansson, B., u. a.: Die Behandlung des Beulens bei dünnwandigen Stahlkonstruktionen in ENV 1993-Teil 1.5 (Eurocode 3-1-5). *Stahlbau 68*, Heft 11, 1999, S. 857-879
- [32] Johansson, B.: Background Draft – Annex D Members with corrugated

- webs. LTU, Sweden, April 2006
- [33] Johnson, R., Cafolla, J.: Corrugated webs in plate girders for bridges. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Structures & Buildings, May 1997, S. 157-164
- [34] Johnson, R., Cafolla, J.: Local flange buckling in plategirders with corrugated webs. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Structures & Buildings, May 1997, S. 148-156
- [35] Kähönen, A.: About the calculation procedure of steel I-beam with corugated webs. Master Thesis Lappeenranta University of Technology, 1983 (In Finnish)
- [36] Kaim, P.: Spatial buckling behaviour of steel members under bending and axial compression. Dissertation, TU Graz, 2004
- [37] Keil, S.: Beanspruchungsermittlung mit Dehnungsmessstreifen. CUNEUS Verlag, 1995
- [38] Kindmann, R., Frickel, J.: Elastische und plastische Querschnittstragfähigkeit. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2002
- [39] Klöppel, K.: Zur Einführung der neuen Stabilitätsvorschriften. Stahlbautagung , Heft 12, München, 1952
- [40] Kollbrunner, C.F., Meister, M.: Knicken, Biegedrillknicken, Kippen. 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin, 1961
- [41] Krahwinkel, M.: Zur Beanspruchung stabilisierender Konstruktionen im Stahlbau. Dissertation, Bochum, 2001
- [42] Kubo, M., Fukumoto, Y.: Lateral torsional buckling of thin-walled I-beams. Journal of Structural Engineering, Vol. 114, Nr. 4, 1988, S. 841-855
- [43] Kubsch, G.: Experimentelle Untersuchungen des Beulverhaltens unausgesteifter Stahlbleche mit baupraktisch unvermeidbaren Imperfektionen. Dissertation, Darmstadt, 1980
- [44] Kuchta, K.: Carrying Capacity and Stiffness of plate girders with corrugated webs. Dissertation, Krakau, 2004
- [45] Laumann, J.: Zur Berechnung der Eigenwerte und Eigenformen für Stabilitätsprobleme des Stahlbaus. Dissertation, VDI Verlag GmbH, Bochum, 2003
- [46] Leiva, L.: Shear buckling of trapezoidally corrugated girder webs. Report Part 1, Chalmers University of Technology, Division of Steel and Timber Structures Publication, Göteborg, 1983, S. 83-86
- [47] Leiva-Aravena, L., Edlund, B.: Buckling of trapezoidally corrugated webs. ECCS Colloquium, 1987

- [48] Lindner, J., Aschinger, R.: Biegetragfähigkeit von I-Trägern mit trapezförmig profilierten Stegen. Bericht VR 2087, TU Berlin, Institut für Baukonstruktionen und Festigkeit, 1988
- [49] Lindner, J., Aschinger, R.: Ergänzende Auswertungen zur Interaktion zwischen Biegedrillknicken und örtlichem Beulen. Stahlbau 61, Heft 6, 1992, S. 188-191
- [50] Lindner, J., Aschinger, R.: Zur Torsionssteifigkeit von Trapezstegträgern. Stahlbau 59, 1990, S. 113-120
- [51] Lindner, J., Huang, B.: Beulwerte für trapezförmig profilierte Bleche unter Schubbeanspruchung. Stahlbau 64, 1995, S.370-374
- [52] Lindner, J.: Biegedrillknickuntersuchungen. Bericht VR 2073, DFG-Projekt, TU Berlin, 1985
- [53] Lindner, J.: Grenzschertragfähigkeit von I-Trägern mit trapezförmig profiliertem Steg. Stahlbau 57, 1988, S. 377-380
- [54] Lindner, J.: Rules for Member Stability in EN 1993-1-1, Background Documentation and design guidelines. TC8-2004-021, ECCS Committee 8 – Stability, November 2004
- [55] Lindner, J.: Trapezstegträger – Gurte. Schlussbericht zum DFG Forschungsvorhaben Li 351/7, Bericht VR 2106, TU Berlin, Oktober 1993
- [56] Lindner, J.: Zur Bemessung von Trapezstegträgern. Stahlbau 61, H. 10, 1992, S. 311-319
- [57] Lou, R.: Load carrying capacity of steel girders and panels with thin walled trapezoidally corrugated webs. Division of Steel and Timber Structures, Chalmers University of Technology, Sweden, 1995
- [58] Luo, R., Edlund, B.: Shear Capacity of Plate Girders with Trapezoidally Corrugated Webs. Division of Steel and Timber Structures, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 1996; 19-44
- [59] Machacek, J., Tuma, M.: Fatigue of girders with undulating webs. Eurosteel Conference, Coimbra, 2002, S. 523-532
- [60] Maquoi, R., Rondal, J.: Analytische Formulierung der neuen Europäischen Knickspannungskurven. Acier, Stahl, Steel, Nr. 1, 1978
- [61] Meißner, U., Menzel, A.: Die Methode der finiten Elemente. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, 1989
- [62] Meister, J.: Nachweispraxis Biegeknicken und Biegedrillknicken. Ernst & Sohn Verlag Berlin, 2002
- [63] Mendera, Z., Kuchta, K.: Analiza zachowania sie stalowych belek z falistym srodnikiem w swietle badan. XLIX Konferencja Naukowa KILiW

- PANiKN PZITB "Krynica 2003", Band 2, 2003, S. 213-220
- [64] Merchant, W.: The failure load of rigid joined frameworks as influenced by stability. *The Structural Engineer*, 1954
- [65] Müller, C.: Zum Nachweis ebener Tragwerke aus Stahl gegen seitliches Ausweichen. Dissertation, Aachen, 2003
- [66] Muszkiewicz, R.: Zum Einfluss der Drehbettung auf das Biegedrillknicken. Dissertation, Bochum, 2001
- [67] Oxfort, J.: Normierte Darstellung der Beultraglast von unversteiften Trägerstegblechen unter Einzellasten. ECCS Colloquium on Stability and Shell Structures, Ghent University, 1987, S. 73-77
- [68] Pasternak, H., Branka, P.: Abschlussbericht Tragverhalten von Wellstegträgern. BTU Cottbus, 1996
- [69] Pasternak, H., Branka, P.: Zum Tragverhalten von Wellstegträgern. *Bauingenieur* 73, 1998, S.437-444
- [70] Pasternak, H., Hannebauer, D.: Grundlegende Untersuchungen zum Tragverhalten von Trägern mit sinusförmig profilierten Stegen. DFG Zwischenbericht, Projekt: PA 347/15-1, Cottbus, 2002
- [71] Pasternak, H., Hannebauer, D.: Load carrying and stability behaviour of girders with profiled webs, Report: TC8-2003-006, BTU Cottbus, 2003
- [72] Pasternak, H., Hannebauer, D.: Profilierte Stege. *Stahlbaukalender* 2004, Ernst & Sohn, 2004
- [73] Pasternak, H., Hannebauer, D.: Zur Einleitung großer Querkräfte in Wellstegträger. *Bauingenieur* 79, Heft 5, 2004
- [74] Petersen, C.: *Statik und Stabilität der Baukonstruktionen*. 2. Aufl., Verlag Vieweg, Braunschweig, 1982
- [75] Pflüger, A.: *Stabilitätsprobleme der Elastostatik*. 3. Auflage, Springer-Verlag Berlin, 1974
- [76] Protte, W.: Zur Gurtbeulung eines Trägers mit profiliertem Stegblech. *Stahlbau* 62, Heft 11, 1993, S. 327-332
- [77] Ramberger, G.: 2. Gutachten über die Berechnung von geschweißten I-Trägern mit Stegen aus gewellten Blechen. Wien, 1990
- [78] Reitinger, R.: *Stabilität und Optimierung imperfektionsempfindlicher Tragwerke*. Dissertation, Stuttgart, 1994
- [79] Report No. RAT 3846 Technical Research Centre of Finland, Espoo 1983
- [80] Rubin, H.: Vergleich verschiedener Näherungsmodelle für das kombinierte Beul-Knick-Problem eines Stabes unter Druck und Biegung. *Stahlbau* 62,

- Heft 3, 1986, S. 79-86
- [81] Rusch, A., Lindner, J.: Tragfähigkeit von beulgefährdeten I-Profilen bei Biegung um die z-Achse. Stahlbau 68, Heft 6, 1999, S. 457-466
- [82] Rusch, A.: Tragfähigkeit von beulgefährdeten, normalspannungsbeanspruchten I-Profilen. Dissertation, Berlin, 2000
- [83] Scheer, J., u. a.: Versuche an Trägern mit Trapezblechstegen. Bericht Nr. 8127, Technische Universität Braunschweig, Institut für Stahlbau, Dezember 1984
- [84] Schleich, J.B., Sedlacek, G., Kraus, O.: Realistic safety approach for steel structures. Proceedings of the 3rd European Conference of Steel Structures, Auditorio Langinha Serafim – Coimbra, Portugal, 19-20 September 2002, S. 1521-1534
- [85] Seydel, E.: Beitrag zur Frage des Ausbeulens von versteiften Platten bei Schubbeanspruchung. 195. Bericht der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt, Berlin-Adlershof, 1931
- [86] Siokola, W.: Typenprüfung Wellstegträger. Zeman & Co GmbH, Wien, 1998
- [87] Timoshenko, S. P., Gere, J. M.: Theory of elastic stability. Mc Graw-Hill, Second edition, New York, 1961
- [88] Usami, T.: Effective Width of Locally Buckled Plates in Compression and Bending. Journal of Structural Engineering, Vol. 119, Nr. 5, 1993, S. 1358-1373
- [89] Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine: Bericht Nr. 943040 – Untersuchung zur Einleitung dynamischer Lasten in Wellstegträger WTB 750-300x12. Universität Karlsruhe, 1995
- [90] Wang, H.: Interaktion des lokalen und globalen Stabilitätsverhaltens dünnwandiger Stäbe. Dissertation, Stuttgart, 1998

Anlagen

Anlage A1 – Messstellenpläne

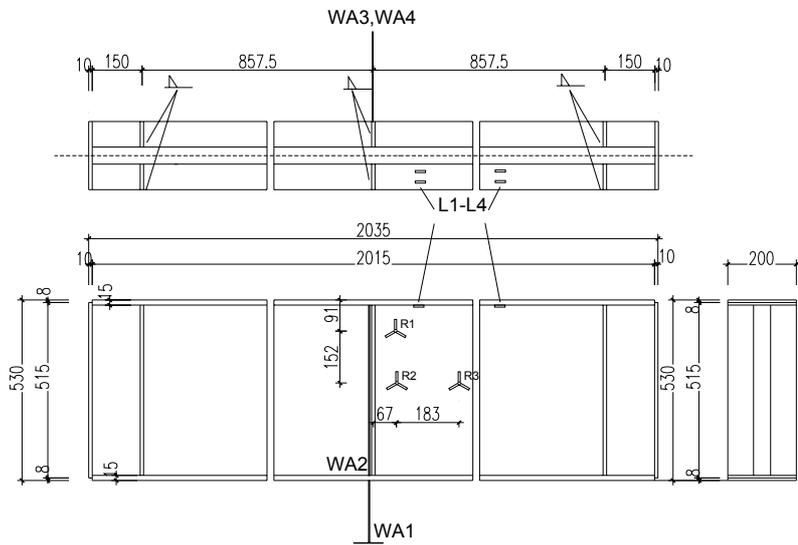


Bild A1-1: Messstellenplan Versuchsreihe V1-V3

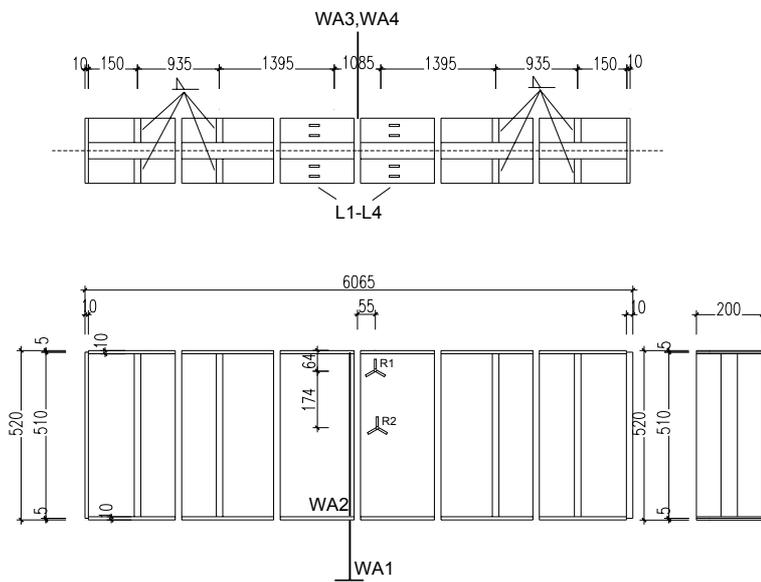


Bild A1-2: Messstellenplan Versuchsreihe V4

Anlage A2 – Materialkennwerte Versuch und FE Parameter

a) Wellsteg

Sämtliche Prüfkörper des Wellstegträgers wurden aus einem Stahl der Sorte S 235 (St37) hergestellt. Die Bestimmung der mechanischen Werkstoffkenngrößen erfolgte an Proben im einfachen Zugversuch in Anlehnung an die Norm DIN EN 10002, Teil 1. Die Zugversuche für die Stegbleche wurden kraftgesteuert mit einer Geschwindigkeit von 100 N/min gefahren. Es wurden an jeder Zugprobe zwei Versuche durchgeführt. Zur exakten Bestimmung des Elastizitätsmoduls wurden die Dehnungen im elastischen Bereich des Werkstoffes mit dem Extensometer ermittelt und die entsprechenden Spannungen der Prüfkörper berechnet. Anschließend wurde die Zugprobe bis zur Bruchlast beansprucht.

Tabelle A2-1: Zusammenfassung Materialkennwerte

	E-Modul [N/mm ²]	Streckgrenze [N/mm ²]
Gurt V2, V5, V6	218000	250
Gurt V4	212000	335
Steg V2, V5	190000	230
Steg V4	192000	320
Steg V6	202500	420

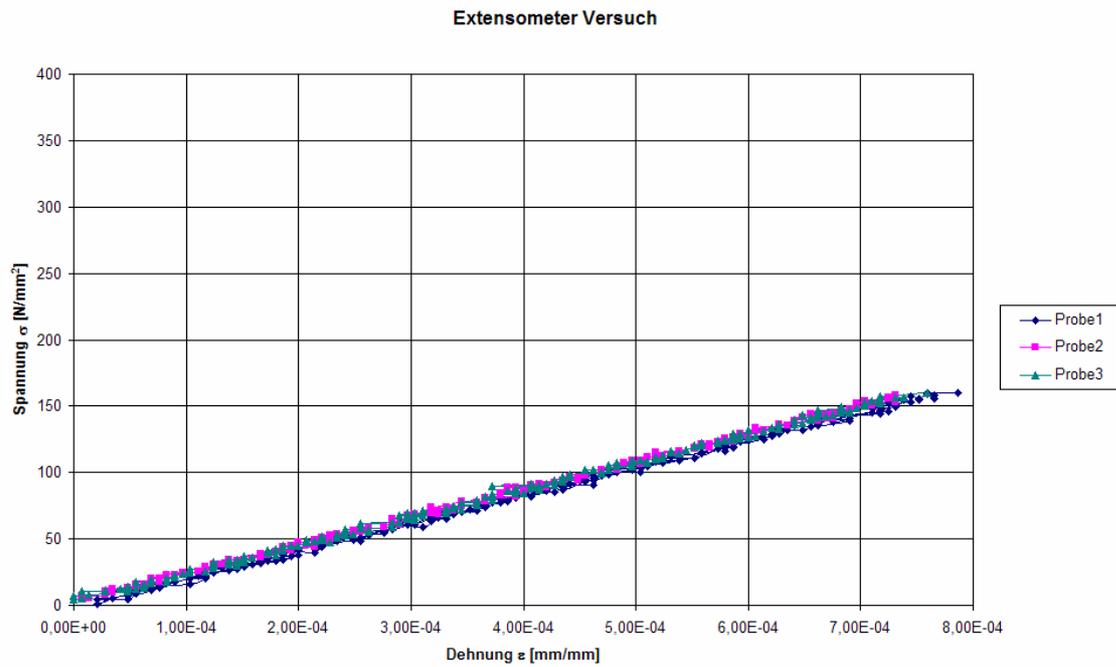


Bild A2-1: Materialkennwerte Spannung-Dehnung Gurt V2, V6, V5

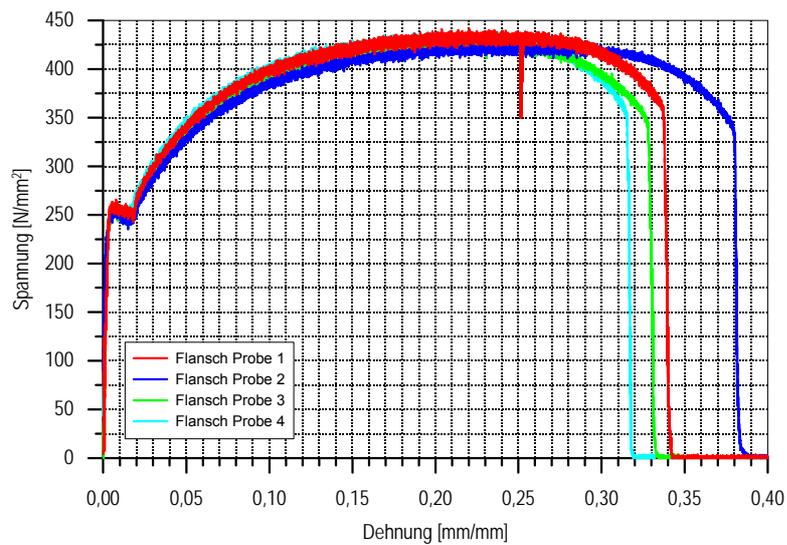


Bild A2-2: Materialkennwerte Gurt V2, V6, V5

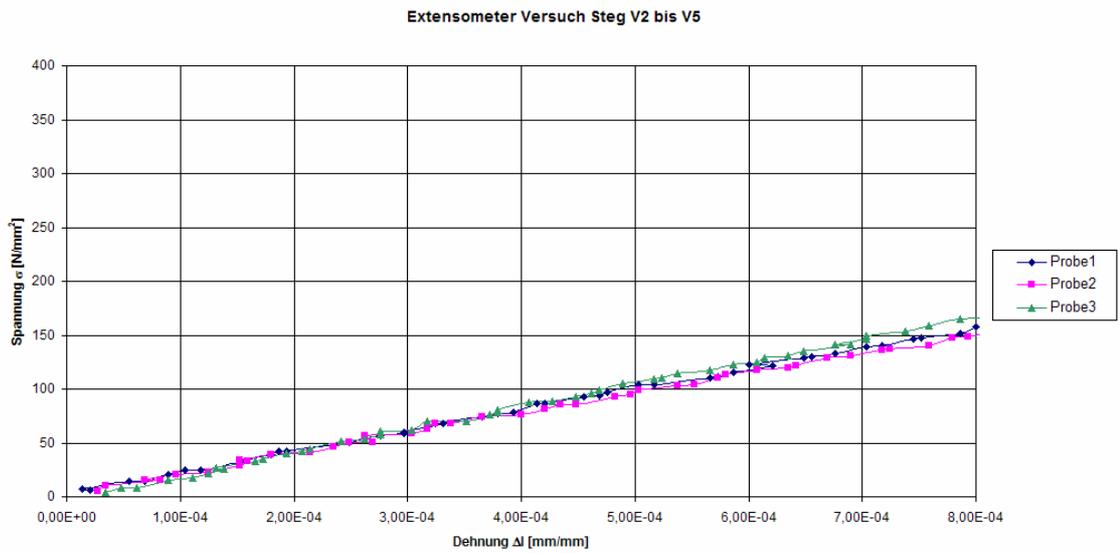


Bild A2-3: Spannungsdehnungsdiagramm Materialproben Steg V2, V5

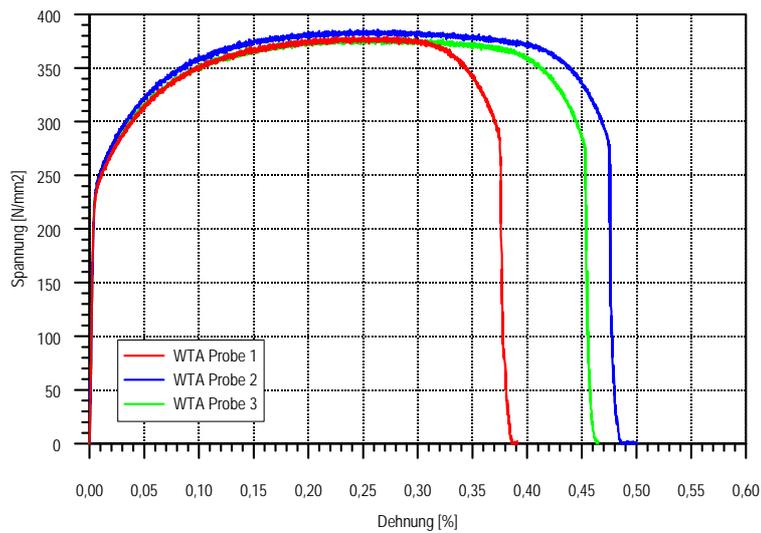


Bild A2-4: Spannungsdehnungsdiagramm Materialproben Steg V2, V5

Tabelle A2-2: Mittelwertbildung Materialkennwerte

Steg V2,V5	
Spannung[N/mm ²]	Dehnung [mm/mm]
15,064335	0,00027437
33,3510646	0,0007341
101,190863	0,00136622
170,597688	0,00242933
199,900248	0,00323384
209,84013	0,0037223
219,550187	0,00449809
230,236995	0,00622205
249,599673	0,01145141
300,505665	0,03406407
350,434913	0,07371525
375,313363	0,10988976
400,076913	0,21809725
402,94969	0,23677353
401,111118	0,24892749
401,685685	0,26366737
387,264208	0,28504453
267,25419	0,257849
264,38138	0,27172691
135,622516	0,39231821

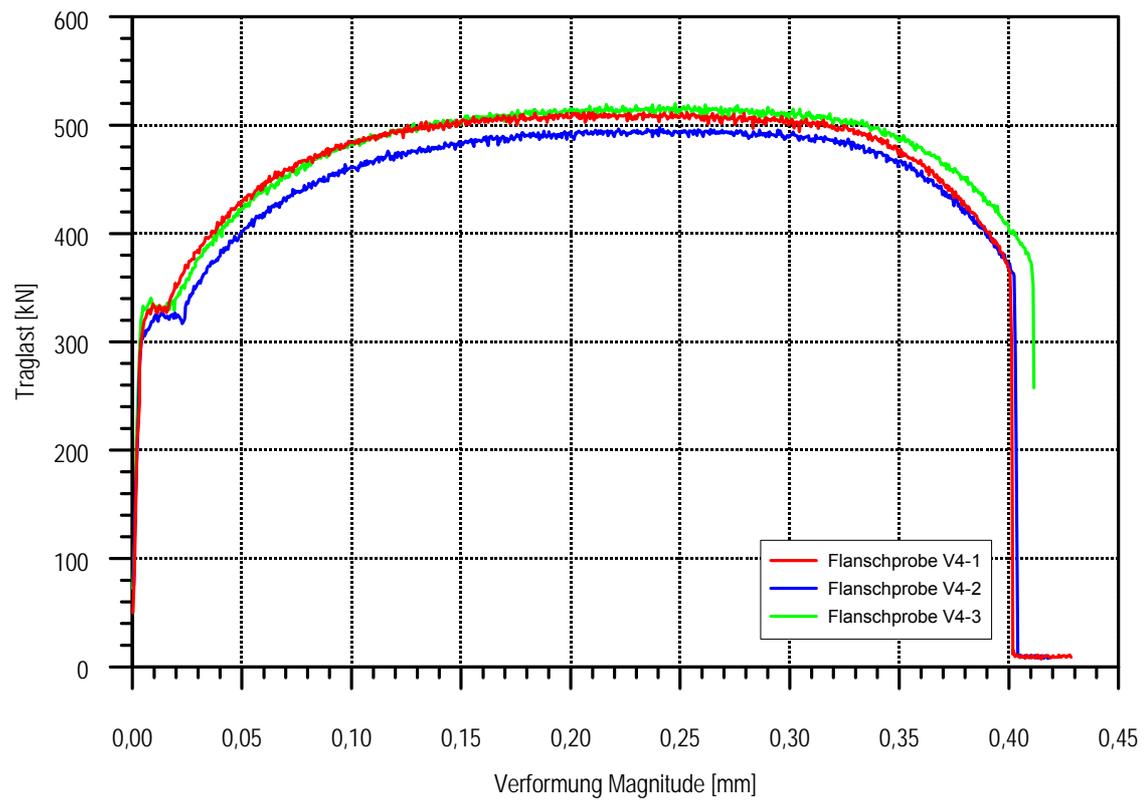


Bild A2-5: Spannungsdehnungsdiagramm Materialproben Gurt V4

Tabelle A2-3: Mittelwertbildung Materialkennwerte

Gurt V4	
Spannung[N/mm ²]	Dehnung [mm/mm]
50	0,00032
90	0,001
125	0,0014
207	0,0022
280	0,0033
315	0,005
330	0,008
335	0,01
350	0,02
400	0,036
450	0,06
480	0,095
500	0,13
505	0,19
507	0,25

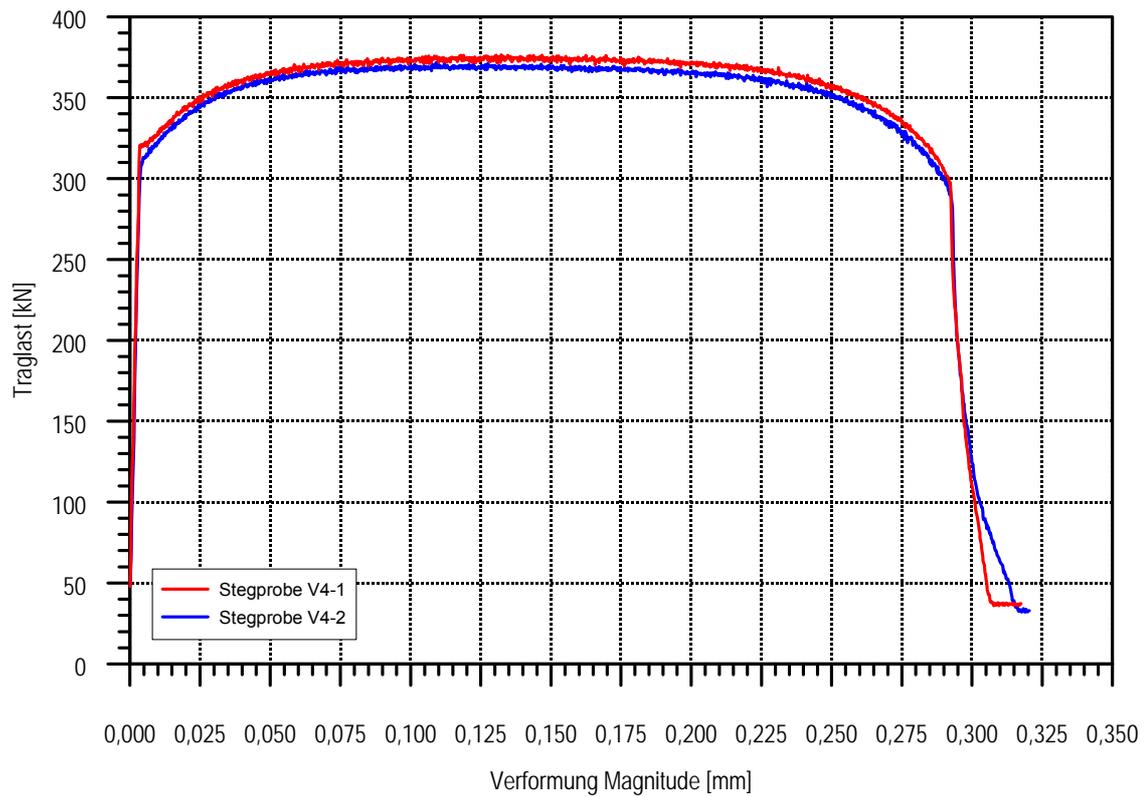


Bild A2-6: Spannungsdehnungsdiagramm Materialproben Steg V4

Tabelle A2-4: Mittelwertbildung Materialkennwerte

Steg V4	
Spannung[N/mm ²]	Dehnung [mm/mm]
15	0,000054
30	0,000076
100	0,000602
200	0,00195
300	0,0031
320	0,0036
330	0,011
350	0,025
365	0,048
370	0,06
371	0,1
372	0,2

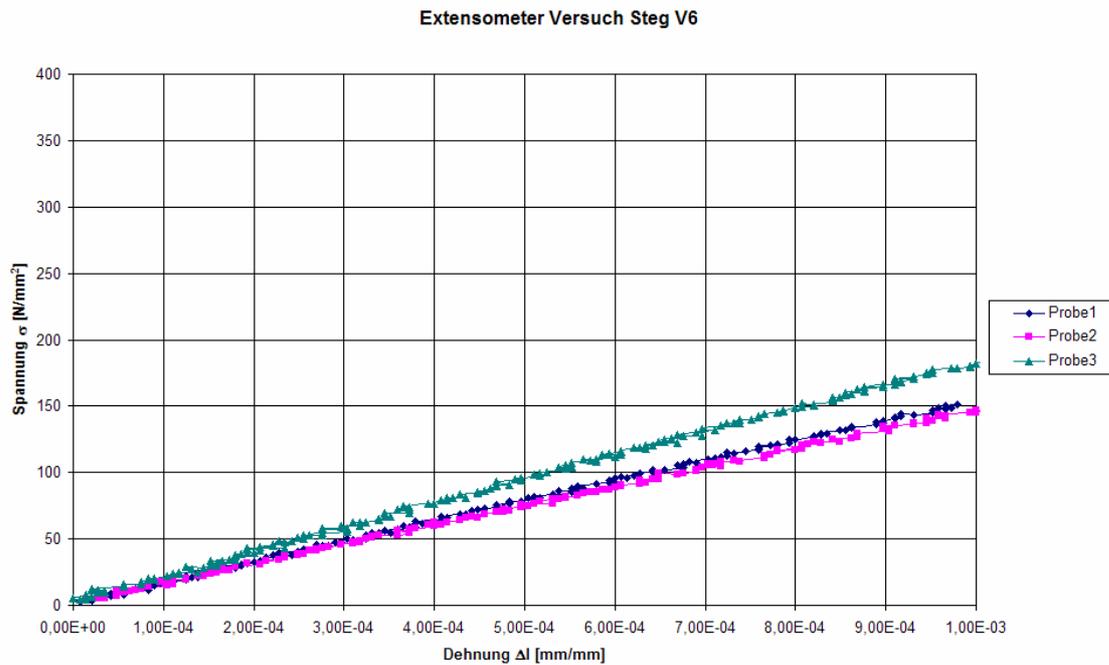


Bild A2-7: Materialkennwerte Steg V6

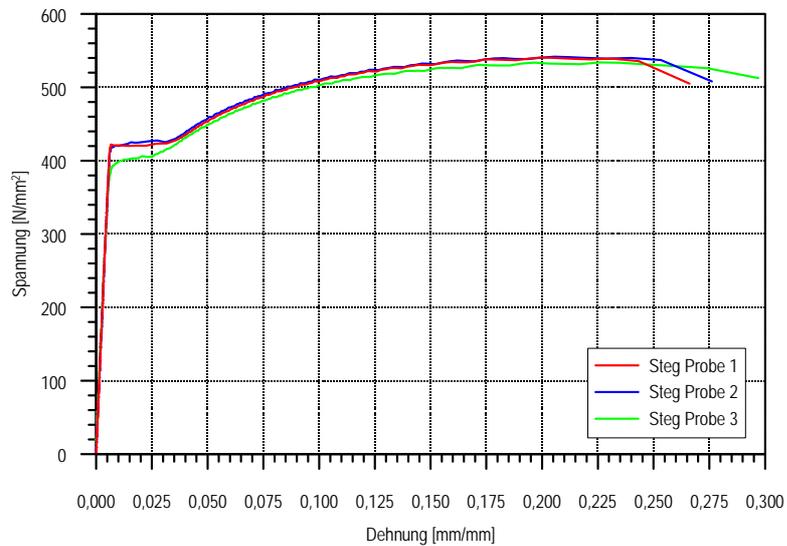


Bild A2-8: Materialkennwerte Steg V6

Zur Ermittlung des E-Moduls für Steg V6 wurden die Proben 1 und 2 zur Mittelwertbildung herangezogen. Probe 3 wies starke Abweichungen auf.

Tabelle A2-5: Mittelwertbildung Materialkennwerte

Gurt V2-V6		Steg V6	
Spannung[N/mm ²]	Dehnung [mm/mm]	Spannung[N/mm ²]	Dehnung [mm/mm]
17,37312391	-0,000241515	15,11219261	0,000116342
49,4752262	1,60305E-05	51,28334848	0,000676631
100,9366404	0,000660604	99,20687121	0,001409316
199,9696272	0,001997908	199,7548333	0,002788487
224,8467889	0,002513775	300,6292633	0,004340055
250,4841103	0,005140311	380,3494697	0,005503731
247,685135	0,015175034	399,6102652	0,00632713
250,957072	0,018102672	420,4380871	0,007572488
265,075223	0,020084488	420,6992045	0,010417029
294,8550298	0,03007406	420,7645076	0,012873678
376,2985857	0,080154864	441,004697	0,042008673
408,4699635	0,130193013	479,7874621	0,067006156
423,4695164	0,180099768	501,3334848	0,089331489
425,6478602	0,220148364	526,2746023	0,13273229
424,3492266	0,260108258	530,6490909	0,143938059
391,3212815	0,320106369	535,6764773	0,168073559
349,5765059	0,339219863	540,5080114	0,199277313

b) Trapezsteg

Die Materialkennwerte des Stahls für die verwendeten Versuchsträger mit trapezförmig profilierten Stegen wurden vom Hersteller angegeben. Verwendet wurde für die Herstellung der Träger der Stahl St37 mit folgenden Spannungs-Dehnungswerten.

Die Materialkennwerte des Steges wurden nach der Kaltverformung ermittelt.

Tabelle A2-6: Materialkennwerte Gurt und Steg

Gurt und Steg V1	
Spannung[N/mm ²]	Dehnung [mm/mm]
1	0
105	0,001
150	0,0015
200	0,002
225	0,0024
270	0,0029
277	0,015
325	0,03
367	0,056
375	0,078
405	0,13
420	0,156
430	0,21
415	0,285
400	0,305

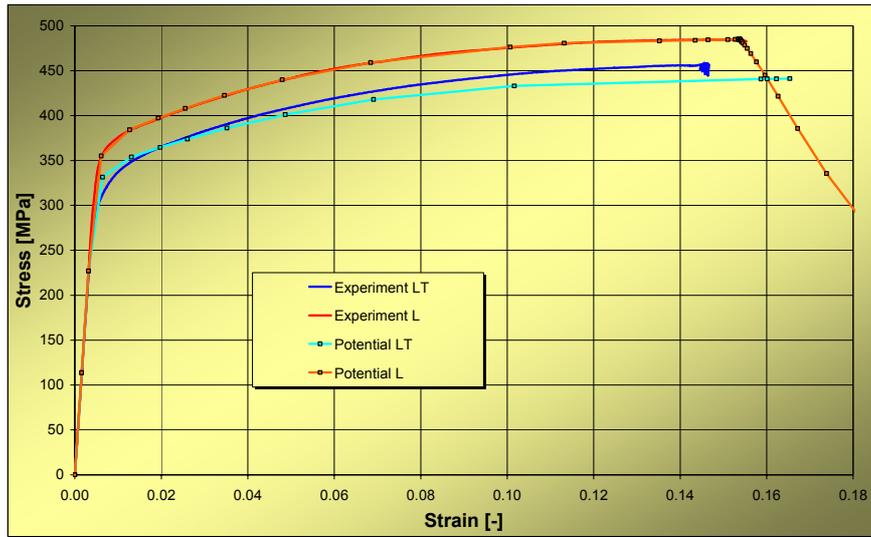


Bild A2-9: Spannungsdehnungsdiagramme (Hill Yield Criterium, ABAQUS)

Beispiel: verwendetes Materialgesetz in den FE Modellen

```
*MATERIAL, NAME=STEG
```

```
**
```

```
*ELASTIC, TYPE=ISO
```

```
190000., 0.3
```

```
**
```

```
*PLASTIC, HARDENING=ISOTROPIC
```

```
1., 0.0
```

```
200., 0.001
```

```
222., 0.00117
```

```
228., 0.0012
```

```
230., 0.0016
```

```
235., 0.002
```

```
240., 0.0028
```

```
245., 0.004
```

```
250., 0.0048
```

```
255., 0.008
```

```
260., 0.01
```

```
265., 0.012
```

```
270., 0.014
```

```
280., 0.02
```

```
310., 0.04
```

```
322., 0.05
```

```
335., 0.06
```

```
350., 0.09
```

```
365., 0.1
```

```
375., 0.2
```

```
376., 0.4
```

Beispiel: Ersatzimperfektion affin zur ersten Eigenform

*IMPERFECTION, FILE=100606190E, STEP=1

1, 0.2

Beispiel: Ersatzimperfektion affin zur Versagensverformung

*IMPERFECTION, FILE=100606190E_withoutIMP, INC=61, STEP1

Anlage A3 – Untersuchungen zum Kapitel 4

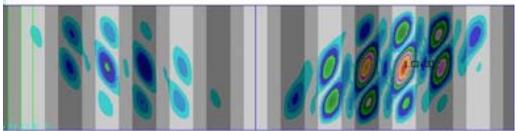
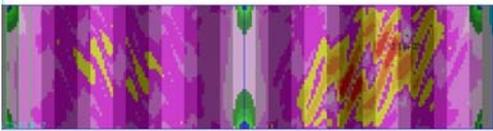
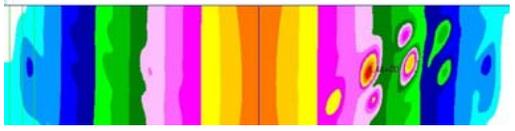
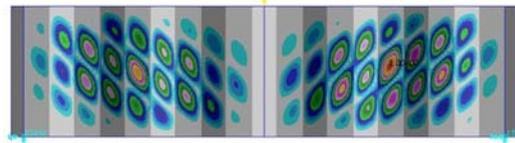
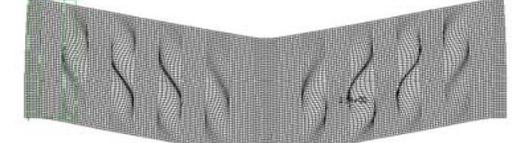
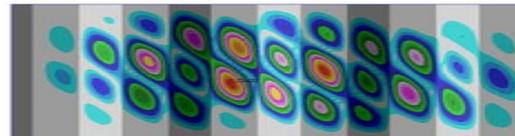
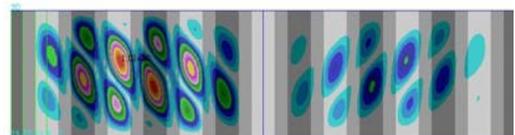
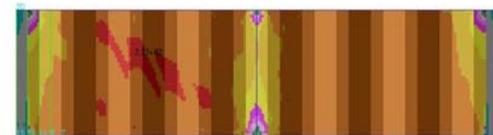
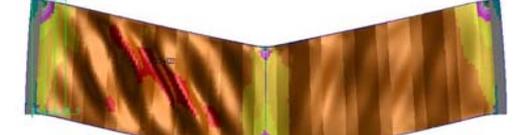
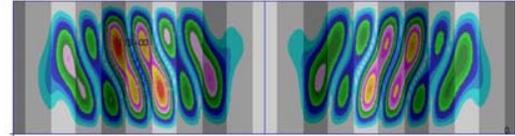
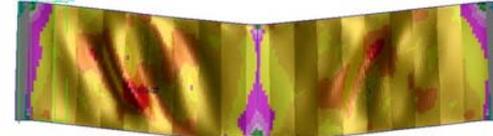
Modell	Beulberechnung	σ_{Mises} bei Maximallast Traglastberechnung	$v_{\text{Magnitude}}$ bei Maximallast Traglastberechnung
TT1_15_50			
TT1_15_100			
TT15_20_100			
TT2_15_50			
TT2_15_100			

Bild A3-1: Beulformen und Verformungen im Traglastzustand bei Traglast im Vergleich

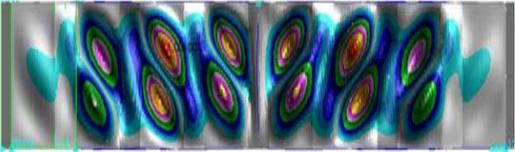
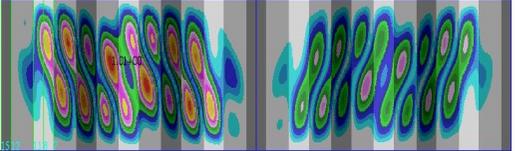
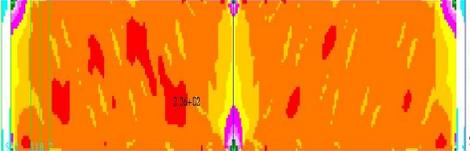
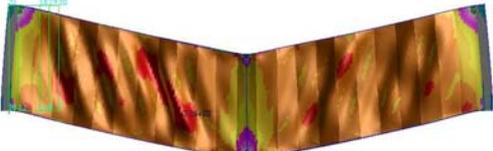
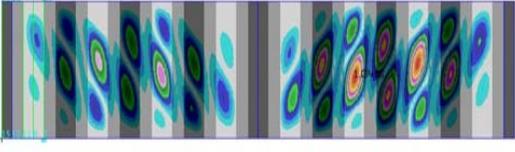
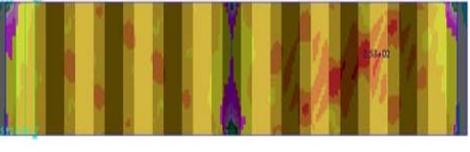
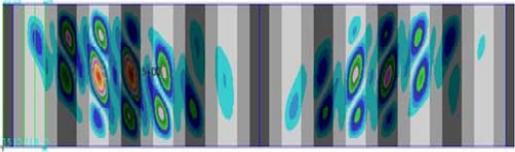
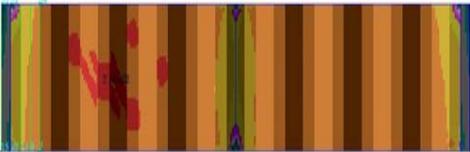
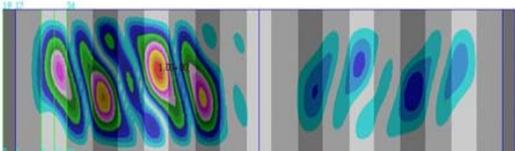
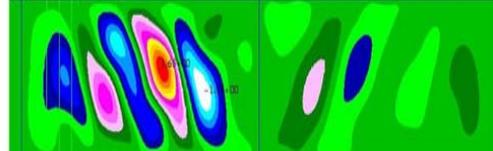
Modell	Beulberechnung	σ_{Mises} bei Maximallast Traglastberechnung	$V_{Magnitude}$ bei Maximallast Traglastberechnung
TT2_15_200			
TT2_20_100			
TT2_25_50			
TT2_30_50			
TT3_15_100			

Bild A3-2: Beulformen und Verformungen im Traglastzustand bei Traglast im Vergleich

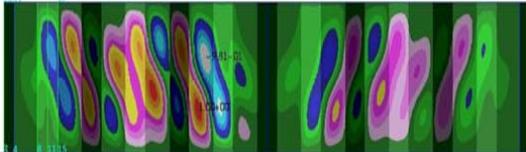
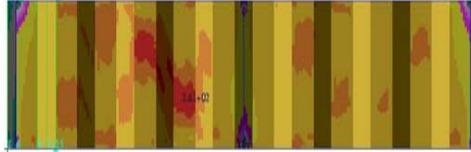
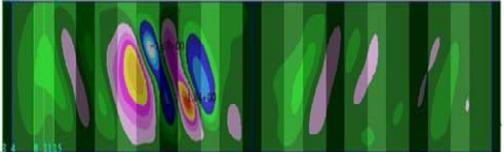
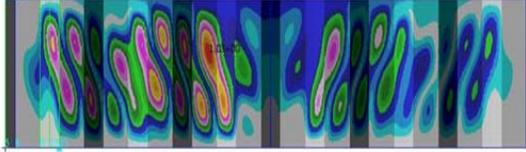
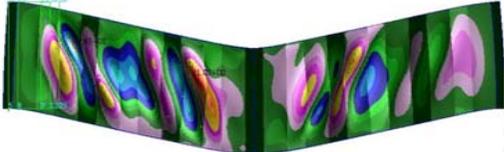
Modell	Beulberechnung	σ_{Mises} bei Maximallast Traglastberechnung	$v_{\text{Magnitude}}$ bei Maximallast Traglastberechnung
TT3_30_100			
TT3_35_100			

Bild A3-3: Beulformen und Verformungen im Traglastzustand bei Traglast im Vergleich

Tabelle A3-1: Zusammenfassung Querschnittswerte und numerische Beul- und Traglasten

Parameterstudie A Trapezstegträger	hw	t _w	b _f	t _f	a ₁	a ₃	α	f _{y,w}	E	ν	τ _{cr,FE}	V _{U,FE}
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[°]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[N/mm ²]	[kN]
TT25_500_40_155_200_15	500	2,5	200	15	31,50	40,00	41,30	230,00	190000	0,30	1254,85	198,50
TT2_500_120_380_200_15	500	2,0	200	15	80,00	120,00	47,73	230,00	190000	0,30	203,35	127,00
TT2_500_40_155_200_15	500	2,0	200	15	31,50	40,00	41,30	230,00	190000	0,30	835,57	149,00
TT2_500_40_380_200_15	500	2,0	200	15	66,00	40,00	18,06	230,00	190000	0,30	223,71	112,50
TT25_500_120_155_200_15	500	2,5	200	15	47,50	120,00	75,90	230,00	190000	0,30	609,48	205,00
TT25_500_120_380_200_15	500	2,5	200	15	80,00	120,00	47,73	230,00	190000	0,30	352,16	176,00
TT25_500_40_380_200_15	500	2,5	200	15	66,00	40,00	18,06	230,00	190000	0,30	349,69	158,00
TT3_500_40_155_200_15	500	3,0	200	15	31,50	40,00	41,30	230,00	190000	0,30	1445,02	242,00
TT3_500_40_380_200_15	500	3,0	200	15	66,00	40,00	18,06	230,00	190000	0,30	415,12	188,00
TT3_500_120_380_200_15	500	3,0	200	15	80,00	120,00	47,73	230,00	190000	0,30	443,30	206,50
TT2_500_120_155_200_15	500	2,0	200	15	47,50	120,00	75,90	230,00	190000	0,30	355,52	144,50
TT3_500_120_155_200_15	500	3,0	200	15	47,50	120,00	75,90	230,00	190000	0,30	767,01	239,50
TT1_500_120_155_200_15	500	1,0	200	15	47,50	120,00	75,90	230,00	190000	0,30	93,20	49,00
TT4_500_120_380_200_15	500	4,0	200	15	80,00	120,00	47,73	230,00	190000	0,30	742,27	276,00
TT05_500_120_155_200_15	500	0,5	200	15	47,50	120,00	75,90	230,00	190000	0,30	23,71	11,55
TT07_500_120_155_200_15	500	0,7	200	15	47,50	120,00	75,90	230,00	190000	0,30	45,66	23,00
TT1_500_40_155_200_15	500	1,0	200	15	31,50	40,00	41,30	230,00	190000	0,30	254,64	64,50
TT05_500_40_155_200_15	500	0,5	200	15	31,50	40,00	41,30	230,00	190000	0,30	70,52	23,45
TT07_500_40_155_200_15	500	0,7	200	15	31,50	40,00	41,30	230,00	190000	0,30	132,55	40,30
TT1_500_40_380_200_15	500	1,0	200	15	66,00	40,00	18,06	230,00	190000	0,30	65,36	36,25
TT05_500_40_380_200_15	500	0,5	200	15	66,00	40,00	18,06	230,00	190000	0,30	17,30	8,85
TT07_500_40_380_200_15	500	0,7	200	15	66,00	40,00	18,06	230,00	190000	0,30	33,14	18,40
TT1_500_120_380_200_15	500	1,0	200	15	80,00	120,00	47,73	230,00	190000	0,30	51,75	36,85
TT05_500_120_380_200_15	500	0,5	200	15	80,00	120,00	47,73	230,00	190000	0,30	12,99	7,95
TT07_500_120_380_200_15	500	0,7	200	15	80,00	120,00	47,73	230,00	190000	0,30	25,48	19,50
TT05_1000_40_155_200_15	1000	0,5	200	15	31,50	40,00	41,30	230,00	190000	0,30	67,11	47,65
TT07_1000_40_155_200_15	1000	0,7	200	15	31,50	40,00	41,30	230,00	190000	0,30	126,90	86,00
TT1_1000_40_155_200_15	1000	1,0	200	15	31,50	40,00	41,30	230,00	190000	0,30	246,19	139,50
TT25_1000_40_155_200_15	1000	2,5	200	15	31,50	40,00	41,30	230,00	190000	0,30	1067,61	384,00

Parameterstudie A Trapezstegträger	hw	t _w	b _f	t _f	a ₁	a ₃	α	f _{y,w}	E	ν	τ _{cr,FE}	V _{U,FE}
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[°]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[N/mm ²]	[kN]
TT05_1500_40_155_200_15	1500	0,5	200	15	31,50	40,00	41,30	230,00	190000	0,30	64,18	68,00
TT07_1500_40_155_200_15	1500	0,7	200	15	31,50	40,00	41,30	230,00	190000	0,30	120,92	86,00
TT1_1500_40_155_200_15	1500	1,0	200	15	31,50	40,00	41,30	230,00	190000	0,30	232,32	172,50
TT05_1000_120_155_200_15	1000	0,5	200	15	47,50	120,00	75,90	230,00	190000	0,30	19,70	20,05
TT07_1000_120_155_200_15	1000	0,7	200	15	47,50	120,00	75,90	230,00	190000	0,30	38,29	37,15
TT1_1000_120_155_200_15	1000	1,0	200	15	47,50	120,00	75,90	230,00	190000	0,30	75,63	90,50
TT2_1000_120_155_200_15	1000	2,0	200	15	47,50	120,00	75,90	230,00	190000	0,30	287,82	261,50
TT25_1000_120_155_200_15	1000	2,5	200	15	47,50	120,00	75,90	230,00	190000	0,30	438,58	358,00
TT25_1000_120_380_200_15	1000	2,5	200	15	80,00	120,00	47,73	230,00	190000	0,30	280,41	299,50
TT05_1000_120_380_200_15	1000	0,5	200	15	80,00	120,00	47,73	230,00	190000	0,30	11,68	18,05
TT07_1000_120_380_200_15	1000	0,7	200	15	80,00	120,00	47,73	230,00	190000	0,30	22,99	33,80
TT1_1000_120_380_200_15	1000	1,0	200	15	80,00	120,00	47,73	230,00	190000	0,30	46,80	66,50
TT2_1000_120_380_200_15	1000	2,0	200	15	80,00	120,00	47,73	230,00	190000	0,30	183,38	251,50
TT07_1500_120_380_200_15	1500	0,7	200	15	80,00	120,00	47,73	230,00	190000	0,30	22,13	49,40
TT1_1500_120_380_200_15	1500	1,0	200	15	80,00	120,00	47,73	230,00	190000	0,30	44,78	97,50
TT2_1500_120_380_200_15	1500	2,0	200	15	80,00	120,00	47,73	230,00	190000	0,30	167,34	313,50
TT25_1500_120_380_200_15	1500	2,5	200	15	80,00	120,00	47,73	230,00	190000	0,30	250,91	434,50
TT05_1000_40_380_200_15	1000	0,5	200	15	66,00	40,00	18,06	230,00	190000	0,30	16,14	14,45
TT07_1000_40_380_200_15	1000	0,7	200	15	66,00	40,00	18,06	230,00	190000	0,30	31,18	30,00
TT1_1000_40_380_200_15	1000	1,0	200	15	66,00	40,00	18,06	230,00	190000	0,30	61,93	99,00
TT2_1000_40_380_200_15	1000	2,0	200	15	66,00	40,00	18,06	230,00	190000	0,30	199,24	195,00
TT25_1000_40_380_200_15	1000	2,5	200	15	66,00	40,00	18,06	230,00	190000	0,30	271,27	267,00
TT1_1500_40_380_200_15	1500	1,0	200	15	66,00	40,00	18,06	230,00	190000	0,30	53,10	99,00
TT25_1500_40_380_200_15	1500	2,5	200	15	66,00	40,00	18,06	230,00	190000	0,30	252,79	397,50

Parameterstudie A Wellstegträger	hw	t _w	b _f	t _f	2w	a ₃	α	f _{y,w}	E	v	τ _{cr,FE}	V _{U,FE}
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[°]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[N/mm ²]	[kN]
WT25_500_40_155_200_15	500	2,6	200	15	155	40		230	190000	0,30	1408,01	221,50
WT2_1000_40_155_200_15	1000	2	200	15	155	40		230	190000	0,30	805,89	299,50
WT2_500_120_380_200_15	500	2	200	15	380	120		230	190000	0,30	347,42	126,50
WT1_500_120_380_200_15	500	1	200	15	380	120		230	190000	0,30	122,68	38,65
WT2_500_40_155_200_15	500	2	200	15	155	40		230	190000	0,30	998,00	143,00
WT2_500_40_380_200_15	500	2	200	15	380	40		230	190000	0,30	235,05	112,50
WT1_500_40_380_200_15	500	1	200	15	380	40		230	190000	0,30	91,44	29,50
WT25_1000_40_155_200_15	1000	2,5	200	15	155	40		230	190000	0,30	1164,16	387,00
WT25_500_120_155_200_15	500	2,5	200	15	155	120		230	190000	0,30	790,10	189,00
WT1_500_40_155_200_15	500	1	200	15	155	40		230	190000	0,30	492,78	62,00
WT25_500_120_380_200_15	500	2,5	200	15	380	120		230	190000	0,30	530,72	167,00
WT25_500_40_155_200_15	500	2,5	200	15	155	40		230	190000	0,30	1464,33	193,50
WT25_500_40_380_200_15	500	2,5	200	15	380	40		230	190000	0,30	347,22	159,00
WT25_500_80_155_200_15	500	2,5	200	15	155	80		230	190000	0,30	1433,40	191,00
WT25_500_80_380_200_15	500	2,5	200	15	380	80		230	190000	0,30	702,68	162,00
WT3_1000_40_155_200_15	1000	3	200	15	155	40		230	190000	0,30	1442,13	423,50
WT3_500_40_155_200_15	500	3	200	15	155	40		230	190000	0,30	1685,57	230,50
WT3_500_40_380_200_15	500	3	200	15	380	40		230	190000	0,30	404,12	188,00
WT3_500_120_380_200_15	500	3	200	15	380	120		230	190000	0,30	631,27	203,00
WT3_500_120_155_200_15	500	3	200	15	380	120		230	190000	0,30	658,42	223,50
WT2_500_120_155_200_15	500	2	200	15	155	120		230	190000	0,30	511,86	141,00
WT1_500_120_155_200_15	500	1	200	15	155	120		230	190000	0,30	194,85	51,00
WT05_1000_40_155_200_15	1000	0,5	200	15	155	40		230	190000	0,30	136,75	48,45
WT1_1000_40_155_200_15	1000	1	200	15	155	40		230	190000	0,30	313,71	131,00
WT2_1000_40_155_200_15	1000	2	200	15	155	40		230	190000	0,30	805,84	299,50
WT25_1000_40_155_200_15	1000	2,5	200	15	155	40		230	190000	0,30	1110,05	387,00
WT1_1500_40_155_200_15	1500	1	200	15	155	40		230	190000	0,30	281,14	169,00
WT1_1000_120_155_200_15	1000	1	200	15	155	120		230	190000	0,30	159,19	94,00
WT2_1000_120_155_200_15	1000	2	200	15	155	120		230	190000	0,30	389,59	240,00

Parameterstudie A Wellstegträger	hw	t _w	b _f	t _f	2w	a ₃	α	f _{y,w}	E	v	τ _{cr,FE}	V _{U,FE}
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[°]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[N/mm ²]	[kN]
WT25_1000_120_155_200_15	1000	2,5	200	15	155	120		230	190000	0,30	497,87	314,00
WT1_1500_120_155_200_15	1500	1	200	15	155	120		230	190000	0,30	136,03	112,50
WT2_1500_120_155_200_15	1500	2	200	15	155	120		230	190000	0,30	303,87	332,00
WT25_1500_120_155_200_15	1500	2,5	200	15	155	120		230	190000	0,30	402,02	441,00
WT07_1000_120_380_200_15	1000	0,7	200	15	380	120		230	190000	0,30	65,48	44,25
WT1_1000_120_380_200_15	1000	1	200	15	380	120		230	190000	0,30	110,66	62,50
WT2_1000_120_380_200_15	1000	2	200	15	380	120		230	190000	0,30	301,78	199,00
WT25_1000_120_380_200_15	1000	2,5	200	15	380	120		230	190000	0,30	420,30	256,00
WT1_1500_120_380_200_15	1500	1	200	15	380	120		230	190000	0,30	103,57	77,50
WT2_1500_120_380_200_15	1500	2	200	15	380	120		230	190000	0,30	284,18	274,50
WT25_1500_120_380_200_15	1500	2,5	200	15	380	120		230	190000	0,30	367,00	392,50
WT1_1000_40_380_200_15	1000	1	200	15	380	40		230	190000	0,30	81,73	74,50
WT2_1000_40_380_200_15	1000	2	200	15	380	40		230	190000	0,30	186,80	235,00
WT25_1000_40_380_200_15	1000	2,5	200	15	380	40		230	190000	0,30	255,43	319,00
WT1_1500_40_380_200_15	1500	1	200	15	380	40		230	190000	0,30	65,66	97,50
WT25_1500_40_380_200_15	1500	2,5	200	15	380	40		230	190000	0,30	238,38	416,50
Parameterstudie B Trapezstegträger	hw	t _w	b _f	t _f	a ₁	a ₃	α	f _{y,w}	E	v	τ _{cr,FE}	V _{U,FE}
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[°]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[N/mm ²]	[kN]
TT1_15_50	500	1,0	200	15	50,00	25,88	15,00	230,00	190000	0,30	113,09	40,45
TT1_15_100	500	1,0	200	15	100,00	25,88	15,00	230,00	190000	0,30	93,40	39,75
TT1_15_200	500	1,0	200	15	200,00	25,88	15,00	230,00	190000	0,30	33,71	27,30
TT1_20_100	500	1,0	200	15	100,00	34,20	20,00	230,00	190000	0,30	101,25	43,30
TT1_25_50	500	1,0	200	15	50,00	42,26	25,00	230,00	190000	0,30	126,49	51,00
TT1_25_100	500	1,0	200	15	100,00	42,26	25,00	230,00	190000	0,30	103,09	0,00
TT1_30_50	500	1,0	200	15	50,00	50,00	30,00	230,00	190000	0,30	127,84	52,00
TT1_30_100	500	1,0	200	15	100,00	50,00	30,00	230,00	190000	0,30	104,02	43,80
TT1_30_200	500	1,0	200	15	200,00	50,00	30,00	230,00	190000	0,30	34,72	30,95
TT1_35_50	500	1,0	200	15	50,00	57,40	35,00	230,00	190000	0,30	128,56	52,00
TT1_35_100	500	1,0	200	15	100,00	57,40	35,00	230,00	190000	0,30	105,88	44,60

Parameterstudie B Trapezstegträger	hw	t _w	b _f	t _f	a ₁	a ₃	α	f _{y,w}	E	ν	τ _{cr,FE}	V _{u,FE}
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[°]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[N/mm ²]	[kN]
TT1_45_100	500	1,0	200	15	100,00	70,71	45,00	230,00	190000	0,30	105,28	45,00
TT1_75_100	500	1,0	200	15	100,00	96,60	75,00	230,00	190000	0,30	107,42	46,30
TT15_15_100	500	1,5	200	15	100,00	25,88	15,00	230,00	190000	0,30	182,41	66,50
TT15_20_100	500	1,5	200	15	100,00	34,20	20,00	230,00	190000	0,30	211,68	80,00
TT15_30_100	500	1,5	200	15	100,00	50,00	30,00	230,00	190000	0,30	227,63	87,00
TT15_35_100	500	1,5	200	15	100,00	57,40	35,00	230,00	190000	0,30	232,71	87,00
TT15_45_100	500	1,5	200	15	100,00	70,71	45,00	230,00	190000	0,30	234,02	88,50
TT15_75_100	500	1,5	200	15	100,00	96,60	75,00	230,00	190000	0,30	239,86	91,00
TT2_15_50	500	2,0	200	15	50,00	25,88	15,00	230,00	190000	0,30	295,52	120,50
TT2_15_100	500	2,0	200	15	100,00	25,88	15,00	230,00	190000	0,30	270,62	107,50
TT2_15_200	500	2,0	200	15	200,00	25,88	15,00	230,00	190000	0,30	119,48	92,50
TT2_20_100	500	2,0	200	15	100,00	34,20	20,00	230,00	190000	0,30	335,57	116,00
TT2_25_50	500	2,0	200	15	50,00	42,26	25,00	230,00	190000	0,30	403,61	120,00
TT2_25_100	500	2,0	200	15	100,00	42,26	25,00	230,00	190000	0,30	368,56	119,00
TT2_30_50	500	2,0	200	15	50,00	50,00	30,00	230,00	190000	0,30	447,94	133,50
TT2_30_100	500	2,0	200	15	100,00	50,00	30,00	230,00	190000	0,30	387,06	126,00
TT2_30_200	500	2,0	200	15	200,00	50,00	30,00	230,00	190000	0,30	133,71	104,50
TT2_35_50	500	2,0	200	15	50,00	57,40	35,00	230,00	190000	0,30	475,52	131,50
TT2_35_100	500	2,0	200	15	100,00	57,40	35,00	230,00	190000	0,30	400,52	127,00
TT2_45_100	500	2,0	200	15	100,00	70,71	45,00	230,00	190000	0,30	408,76	130,00
TT2_75_100	500	2,0	200	15	100,00	96,60	75,00	230,00	190000	0,30	422,68	135,00
TT3_15_100	500	3,0	200	15	100,00	25,88	15,00	230,00	190000	0,30	445,02	173,50
TT3_20_100	500	3,0	200	15	100,00	34,20	20,00	230,00	190000	0,30	577,66	187,00
TT3_30_100	500	3,0	200	15	100,00	50,00	30,00	230,00	190000	0,30	747,77	192,00
TT3_35_100	500	3,0	200	15	100,00	57,40	35,00	230,00	190000	0,30	851,20	202,00
TT3_45_100	500	3,0	200	15	100,00	70,71	45,00	230,00	190000	0,30	869,07	215,00
TT3_75_100	500	3,0	200	15	100,00	96,60	75,00	230,00	190000	0,30	930,24	226,50

Tabelle A3-2: Zusammenfassung analytischer und numerischer lokaler, kritischer Beulspannungen und Traglasten (Trapezstegträger)

Parameterstudie A & B Trapezstegträger (lokal)	$V_{U,FE}$	$\tau_{cr,FE}$	$\tau_{cr,FE}/\tau_{cr,l}$	R	$\tau_{cr,FE}/\tau_{cr,l,new}$	$\lambda_{c,l}$	$\lambda_{c,l,new}$	$\lambda_{c,g}$	χ_u	$V_{u,FE}/N_{Rd,1}$	$V_{u,FE}/N_{Rd,1,new}$	$V_{u,FE}/N_{Rd,2}$
	[kN]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
TT2_500_120_380_200_15	127,00	203,35	1,47	0,96	1,34	0,98	0,94	0,14	0,96	1,56	1,49	0,96
TT25_500_120_155_200_15	205,00	609,48	1,63	1,00	1,63	0,60	0,60	0,12	1,24	1,61	1,50	1,24
TT25_500_120_380_200_15	176,00	352,16	1,63	0,96	1,49	0,78	0,75	0,14	1,06	1,55	1,45	1,06
TT3_500_120_380_200_15	206,50	443,30	1,42	0,96	1,30	0,65	0,62	0,13	1,04	1,40	1,29	1,04
TT2_500_120_155_200_15	144,50	355,52	1,48	1,00	1,48	0,74	0,74	0,13	1,09	1,56	1,48	1,09
TT3_500_120_155_200_15	239,50	767,01	1,42	1,00	1,42	0,50	0,50	0,12	1,20	1,46	1,34	1,20
TT1_500_120_155_200_15	49,00	93,20	1,55	1,00	1,55	1,49	1,49	0,15	0,74	1,53	1,56	0,74
TT4_500_120_380_200_15	276,00	742,27	1,34	0,96	1,23	0,49	0,47	0,12	1,04	1,26	1,13	1,04
TT05_500_120_155_200_15	11,55	23,71	1,58	1,00	1,58	2,98	2,98	0,18	0,35	1,17	1,25	0,35
TT07_500_120_155_200_15	23,00	45,66	1,55	1,00	1,55	2,13	2,13	0,17	0,49	1,30	1,36	0,49
TT1_500_40_155_200_15	64,50	254,64	1,03	0,97	0,96	0,73	0,71	0,39	0,97	1,38	1,29	0,97
TT05_500_40_155_200_15	23,45	70,52	1,14	0,96	1,05	1,47	1,41	0,47	0,71	1,45	1,43	0,71
TT07_500_40_155_200_15	40,30	132,55	1,10	0,96	1,01	1,05	1,01	0,43	0,87	1,47	1,41	0,87
TT1_500_40_380_200_15	36,25	65,36	1,21	0,96	1,11	1,57	1,50	0,41	0,55	1,17	1,16	0,55
TT05_500_40_380_200_15	8,85	17,30	1,28	0,96	1,18	3,13	3,00	0,49	0,27	0,94	0,97	0,27
TT07_500_40_380_200_15	18,40	33,14	1,25	0,96	1,15	2,24	2,15	0,45	0,40	1,08	1,09	0,40
TT1_500_120_380_200_15	36,85	51,75	1,49	0,96	1,37	1,96	1,87	0,17	0,56	1,38	1,38	0,56
TT05_500_120_380_200_15	7,95	12,99	1,50	0,96	1,37	3,92	3,75	0,20	0,24	1,00	1,05	0,24
TT07_500_120_380_200_15	19,50	25,48	1,50	0,96	1,37	2,80	2,68	0,19	0,42	1,35	1,38	0,42
TT05_1000_40_155_200_15	47,65	67,11	1,09	0,96	1,00	1,47	1,41	0,94	0,72	1,48	1,45	0,72
TT07_1000_40_155_200_15	86,00	126,90	1,05	0,96	0,97	1,05	1,01	0,86	0,93	1,57	1,50	0,93
TT1_1000_40_155_200_15	139,50	246,19	1,00	0,96	0,92	0,73	0,70	0,79	1,05	1,49	1,39	1,05
TT05_1500_40_155_200_15	68,00	64,18	1,04	0,96	0,96	1,47	1,41	1,40	0,68	1,41	1,38	1,13
TT05_1000_120_155_200_15	20,05	19,70	1,31	1,00	1,31	2,98	2,98	0,36	0,30	1,02	1,09	0,30
TT07_1000_120_155_200_15	37,15	38,29	1,30	1,00	1,30	2,13	2,13	0,33	0,40	1,05	1,10	0,40
TT1_1000_120_155_200_15	90,50	75,63	1,26	1,00	1,26	1,49	1,49	0,30	0,68	1,42	1,44	0,68
TT2_1000_120_155_200_15	261,50	287,82	1,20	1,00	1,20	0,74	0,74	0,26	0,98	1,41	1,34	0,98

Parameterstudie A & B Trapezstegträger	$V_{u,FE}$	$\tau_{cr,FE}$	$\tau_{cr,FE}/\tau_{cr,l}$	R	$\tau_{cr,FE}/\tau_{cr,l,new}$	$\lambda_{c,l}$	$\lambda_{c,l,new}$	$\lambda_{c,g}$	χ_u	$V_{u,FE}/V_{Rd,1}$	$V_{u,FE}/V_{Rd,1,new}$	$V_{u,FE}/V_{Rd,2}$
	[kN]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
TT25_1000_120_155_200_15	358,00	438,58	1,17	1,00	1,17	0,60	0,60	0,24	1,08	1,40	1,31	1,08
TT25_1000_120_380_200_15	299,50	280,41	1,30	0,96	1,19	0,78	0,75	0,27	0,90	1,32	1,24	0,90
TT05_1000_120_380_200_15	18,05	11,68	1,35	0,96	1,23	3,92	3,75	0,41	0,27	1,14	1,19	0,27
TT07_1000_120_380_200_15	33,80	22,99	1,35	0,96	1,24	2,80	2,68	0,37	0,36	1,17	1,20	0,36
TT1_1000_120_380_200_15	66,50	46,80	1,35	0,96	1,24	1,96	1,87	0,34	0,50	1,24	1,25	0,50
TT2_1000_120_380_200_15	251,50	183,38	1,32	0,96	1,21	0,98	0,94	0,29	0,95	1,55	1,47	0,95
TT07_1500_120_3800_200_15	49,40	22,13	1,30	0,96	1,19	2,80	2,68	0,56	0,35	1,14	1,17	0,35
TT1_1500_120_380_200_15	97,50	44,78	1,29	0,96	1,18	1,96	1,87	0,51	0,49	1,22	1,22	0,49
TT2_1500_120_380_200_15	313,50	167,34	1,21	0,96	1,11	0,98	0,94	0,43	0,79	1,29	1,22	0,79
TT25_1500_120_380_200_15	434,50	250,91	1,16	0,96	1,06	0,78	0,75	0,41	0,87	1,28	1,19	0,87
TT1_1000_40_380_200_15	99,00	61,93	1,15	0,96	1,05	1,57	1,50	0,82	0,75	1,60	1,58	0,75
TT1_20_100	43,30	101,25	1,10	1,00	1,10	1,20	1,20	0,43	0,65	1,19	1,19	0,65
TT1_25_50	51,00	126,49	1,16	0,96	1,26	1,10	1,15	0,39	0,77	1,34	1,36	0,77
TT1_25_100	50,50	103,09	1,12	1,00	1,12	1,20	1,20	0,37	0,76	1,39	1,39	0,76
TT1_30_50	52,00	127,84	1,17	0,96	1,28	1,10	1,15	0,34	0,78	1,36	1,39	0,78
TT1_30_100	43,80	104,02	1,13	1,00	1,13	1,20	1,20	0,32	0,66	1,21	1,20	0,66
TT1_30_200	30,95	34,72	1,27	0,96	1,39	2,21	2,30	0,30	0,47	1,26	1,36	0,47
TT1_35_50	52,00	128,56	1,18	0,96	1,28	1,10	1,15	0,30	0,78	1,36	1,39	0,78
TT1_35_100	44,60	105,88	1,15	1,00	1,15	1,20	1,20	0,29	0,67	1,23	1,22	0,67
TT1_45_100	45,00	105,28	1,15	1,00	1,15	1,20	1,20	0,24	0,68	1,24	1,24	0,68
TT1_75_100	46,30	107,42	1,17	1,00	1,17	1,20	1,20	0,18	0,70	1,28	1,27	0,70
TT15_30_100	87,00	227,63	1,10	1,00	1,10	0,81	0,81	0,29	0,86	1,28	1,23	0,86
TT15_35_100	87,00	232,71	1,13	1,00	1,13	0,81	0,81	0,26	0,86	1,28	1,23	0,86
TT15_45_100	88,50	234,02	1,13	1,00	1,13	0,81	0,81	0,22	0,87	1,29	1,24	0,87
TT15_75_100	91,00	239,86	1,16	1,00	1,16	0,81	0,81	0,16	0,89	1,33	1,28	0,89
TT2_30_50	133,50	447,94	1,03	0,96	1,12	0,55	0,58	0,29	1,01	1,27	1,20	1,01
TT2_30_100	126,00	387,06	1,05	1,00	1,05	0,60	0,60	0,27	0,95	1,24	1,16	0,95

Parameterstudie A & B Trapezstegträger	$V_{u,FE}$	$\tau_{cr,FE}$	$\tau_{cr,FE}/\tau_{cr,l}$	R	$\tau_{cr,FE}/\tau_{cr,l,new}$	$\lambda_{c,l}$	$\lambda_{c,l,new}$	$\lambda_{c,g}$	χ_u	$V_{u,FE}/V_{Rd,1}$	$V_{u,FE}/V_{Rd,1,new}$	$V_{u,FE}/V_{Rd,2}$
	[kN]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
TT2_30_200	104,50	133,71	1,23	0,96	1,34	1,10	1,15	0,26	0,79	1,37	1,39	0,79
TT2_35_50	131,50	475,52	1,09	0,96	1,19	0,55	0,58	0,26	0,99	1,25	1,18	0,99
TT2_35_100	127,00	400,52	1,09	1,00	1,09	0,60	0,60	0,24	0,96	1,25	1,17	0,96
TT2_45_100	130,00	408,76	1,11	1,00	1,11	0,60	0,60	0,20	0,98	1,28	1,20	0,98
TT2_75_100	135,00	422,68	1,15	1,00	1,15	0,60	0,60	0,15	1,02	1,33	1,24	1,02
TT3_45_100	215,00	869,07	1,05	1,00	1,05	0,40	0,40	0,18	1,08	1,22	1,10	1,08
TT3_75_100	226,50	930,24	1,13	1,00	1,13	0,40	0,40	0,13	1,14	1,29	1,16	1,14

Tabelle A3-3: Zusammenfassung analytischer und numerischer zonaler, kritischer Beulspannungen und Traglasten (Trapezstegträger)

Parameterstudie A & B Trapezstegträger zonal	$V_{u,FE}$ [kN]	$\tau_{cr,FE}$ [N/mm ²]	R [-]	$\tau_{cr,FE}/\tau_{cr,l}$ [-]	$\lambda_{c,l}$ [-]	$\lambda_{c,g}$ [-]	χ_u [-]	$V_{u,FE}/N_{Rd,1}$ [-]	$V_{u,FE}/N_{Rd,2}$ [-]	$\tau_{cr,z}$ [N/mm ²]	$\tau_{cr,FE}/\tau_{cr,z}$ [-]	$\lambda_{c,z}$ [-]	$V_{u,FE}/N_{Rd,z}$ [-]	$\tau_{cr,FE}/\tau_{cr,z}$ [-]
TT25_500_40_155_200_15	198,50	1254,85	0,92	0,81	0,29	0,31	1,20	1,24	1,20	1216,47	1,03	0,33	1,20	1,03
TT2_500_40_155_200_15	149,00	835,57	0,93	0,85	0,37	0,33	1,12	1,24	1,12	849,68	0,98	0,40	1,16	0,98
TT3_500_40_155_200_15	242,00	1445,02	0,93	0,65	0,24	0,30	1,21	1,21	1,21	1512,41	0,96	0,30	1,21	0,96
TT25_1000_40_155_200_15	384,00	1067,61	0,94	0,69	0,29	0,62	1,16	1,20	1,16	1115,47	0,96	0,35	1,16	0,96
TT2_500_40_380_200_15	112,50	223,71	0,92	1,03	0,78	0,34	0,85	1,24	0,85	175,38	1,28	0,87	1,20	1,28
TT25_500_40_380_200_15	158,00	349,69	0,92	1,03	0,63	0,33	0,95	1,26	0,95	245,10	1,43	0,74	1,25	1,43
TT3_500_40_380_200_15	188,00	415,12	0,92	0,85	0,52	0,31	0,94	1,17	0,94	322,20	1,29	0,64	1,16	1,29
TT2_1000_40_380_200_15	195,00	199,24	0,92	0,92	0,78	0,69	0,73	1,07	0,73	175,38	1,14	0,87	1,04	1,14
TT25_1000_40_380_200_15	267,00	271,27	0,92	0,80	0,63	0,65	0,80	1,07	0,80	245,10	1,11	0,74	1,05	1,11
TT25_1500_40_380_200_15	397,50	252,79	0,92	0,75	0,63	0,98	0,80	1,06	0,80	245,10	1,03	0,74	1,04	1,03
TT1_15_50	40,45	113,09	0,92	1,04	1,10	0,57	0,61	1,06	0,61	89,77	1,26	1,22	1,03	1,26
TT1_15_100	39,75	93,40	1,00	1,02	1,20	0,53	0,60	1,09	0,60	58,31	1,60	1,51	1,15	1,60
TT1_15_200	27,30	33,71	0,92	1,24	2,21	0,50	0,41	1,11	0,41	31,74	1,06	2,05	0,97	1,06
TT15_15_100	66,50	182,41	1,00	0,88	0,80	0,48	0,66	0,98	0,66	107,12	1,70	1,12	1,07	1,70
TT2_15_50	120,50	295,52	0,92	0,68	0,55	0,48	0,91	1,15	0,91	253,92	1,16	0,72	1,18	1,16
TT2_15_100	107,50	270,62	1,00	0,74	0,60	0,45	0,81	1,06	0,81	164,92	1,64	0,90	1,16	1,64
TT2_15_200	92,50	119,48	0,92	1,09	1,10	0,42	0,70	1,21	0,70	89,77	1,33	1,22	1,18	1,33
TT2_20_100	116,00	335,57	1,00	0,91	0,60	0,36	0,87	1,14	0,87	174,17	1,93	0,87	1,24	1,93
TT3_15_100	173,50	445,02	1,00	0,54	0,40	0,40	0,87	0,99	0,87	302,99	1,47	0,66	1,09	1,47

Tabelle A3-4: Zusammenfassung analytischer und numerischer lokaler, kritischer Beulspannungen und Traglasten (Wellstegträger)

Parameterstudie A Wellstegträger lokal	$V_{u,FE}$	$\tau_{cr,FE}$	$\tau_{cr,FE}/\tau_{cr,l,Branka}$	$\tau_{cr,FE}/\tau_{cr,l,new}$	$\tau_{cr,FE}/\tau_{cr,shell}$	$\lambda_{c,l,Branka}$	$\lambda_{c,g}$	χ_u	$V_{u,FE}/V_{Rd,1}$	$V_{u,FE}/V_{Rd,2}$	$\lambda_{c,l,new}$	$V_{u,FE}/V_{Rd,1,new}$	$\lambda_{c,shell}$	$V_{u,FE}/V_{Rd,1,shell}$
	[kN]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
WT25_500_40_155_200_15	221,5	1408,01	1,22	1,29	2,37	0,34	0,34	1,28	1,38	1,28	0,35	1,28	0,47	1,53
WT2_1000_40_155_200_15	299,5	805,89	1,34	1,40	2,68	0,47	0,74	1,13	1,34	1,13	0,48	1,13	0,66	1,53
WT2_500_120_380_200_15	126,5	347,42	0,84	0,98	1,50	0,57	0,16	0,95	1,21	0,95	0,61	1,08	0,76	1,37
WT2_500_40_155_200_15	143	998,00	1,32	1,42	2,35	0,42	0,37	1,08	1,24	1,08	0,43	1,08	0,56	1,37
WT2_500_40_380_200_15	112,5	235,05	0,99	1,10	1,86	0,75	0,36	0,85	1,21	0,85	0,79	1,15	1,02	1,42
WT1_500_40_380_200_15	29,5	91,44	0,97	1,11	1,72	1,19	0,43	0,44	0,81	0,44	1,27	0,88	1,58	0,96
WT25_1000_40_155_200_15	387	1164,16	1,30	1,35	2,92	0,39	0,70	1,17	1,30	1,17	0,39	1,17	0,58	1,50
WT25_500_120_155_200_15	189	790,10	1,14	1,31	1,28	0,44	0,17	1,14	1,32	1,14	0,47	1,14	0,46	1,35
WT1_500_40_155_200_15	62	492,78	1,86	2,06	2,78	0,71	0,44	0,93	1,31	0,93	0,74	1,21	0,87	1,43
WT25_500_120_380_200_15	167	530,72	0,99	1,14	3,17	0,50	0,15	1,01	1,22	1,01	0,53	1,05	0,89	1,57
WT25_500_40_155_200_15	193,5	1464,33	1,35	1,43	2,38	0,35	0,35	1,17	1,27	1,17	0,36	1,17	0,46	1,38
WT25_500_40_380_200_15	159	347,22	1,06	1,17	2,08	0,64	0,34	0,96	1,28	0,96	0,67	1,15	0,89	1,49
WT25_500_80_155_200_15	191	1433,40	1,62	1,81	2,54	0,39	0,22	1,15	1,29	1,15	0,41	1,15	0,49	1,39
WT25_500_80_380_200_15	162	702,68	1,54	1,75	2,73	0,54	0,21	0,98	1,22	0,98	0,58	1,07	0,72	1,37
WT3_1000_40_155_200_15	423,5	1442,13	1,16	1,20	2,45	0,33	0,66	1,06	1,13	1,06	0,33	1,06	0,47	1,27
WT3_500_40_155_200_15	230,5	1685,57	1,15	1,21	2,37	0,30	0,33	1,16	1,21	1,16	0,31	1,16	0,43	1,34
WT3_500_40_380_200_15	188	404,12	0,94	1,03	1,92	0,56	0,33	0,94	1,20	0,94	0,58	1,04	0,79	1,39
WT3_500_120_380_200_15	203	631,27	0,94	1,08	3,00	0,45	0,15	1,02	1,19	1,02	0,48	1,02	0,79	1,50
WT3_500_120_155_200_15	223,5	658,42	0,98	1,13	1,70	0,45	0,15	1,12	1,31	1,12	0,48	1,12	0,59	1,45
WT2_500_120_155_200_15	141	511,86	0,97	1,12	1,10	0,50	0,18	1,06	1,29	1,06	0,54	1,11	0,54	1,33
WT1_500_120_155_200_15	51	194,85	0,81	0,96	1,01	0,74	0,21	0,77	1,10	0,77	0,81	1,06	0,83	1,16
WT05_1000_40_155_200_15	48,45	136,75	2,07	2,28	2,39	1,42	1,04	0,73	1,47	0,77	1,49	1,67	1,52	1,54
WT1_1000_40_155_200_15	131	313,71	1,66	1,78	2,50	0,84	0,88	0,99	1,49	0,99	0,87	1,44	1,03	1,65
WT2_1000_40_155_200_15	299,5	805,84	1,34	1,40	2,68	0,47	0,74	1,13	1,34	1,13	0,48	1,13	0,66	1,53
WT25_1000_40_155_200_15	387	1110,05	1,24	1,29	2,78	0,39	0,70	1,17	1,30	1,17	0,39	1,17	0,58	1,50
WT1_1500_40_155_200_15	169	281,14	1,72	1,81	2,74	0,90	1,31	0,85	1,33	1,26	0,93	1,30	1,14	1,50
WT1_1000_120_155_200_15	94	159,19	1,20	1,39	1,27	1,00	0,42	0,71	1,17	0,71	1,08	1,22	1,03	1,19
WT2_1000_120_155_200_15	240	389,59	1,24	1,40	1,19	0,65	0,35	0,90	1,22	0,90	0,69	1,11	0,64	1,21
WT25_1000_120_155_200_15	314	497,87	1,18	1,31	1,14	0,56	0,34	0,95	1,20	0,95	0,59	1,05	0,55	1,19
WT1_1500_120_155_200_15	112,5	136,03	1,41	1,61	1,22	1,17	0,63	0,56	1,02	0,56	1,25	1,11	1,09	0,98
WT2_1500_120_155_200_15	332	303,87	1,25	1,39	1,14	0,74	0,53	0,83	1,19	0,83	0,78	1,12	0,70	1,16

Parameterstudie A Wellstegträger lokal	$V_{u,FE}$	$\tau_{cr,FE}$	$\tau_{cr,FE}/\tau_{cr,I,Branka}$	$\tau_{cr,FE}/\tau_{cr,I,new}$	$\tau_{cr,FE}/\tau_{cr,shell}$	$\lambda_{c,I,Branka}$	$\lambda_{c,g}$	χ_u	$V_{u,FE}/V_{Rd,1}$	$V_{u,FE}/V_{Rd,2}$	$\lambda_{c,I,new}$	$V_{u,FE}/V_{Rd,1,new}$	$\lambda_{c,shell}$	$V_{u,FE}/V_{Rd,1,shell}$
	[kN]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
WT25_1500_120_155_200_15	441	402,02	1,20	1,32	1,13	0,63	0,50	0,89	1,18	0,89	0,66	1,06	0,61	1,16
WT07_1000_120_380_200_15	44,25	65,48	0,95	1,11	1,49	1,39	0,42	0,48	0,95	0,48	1,50	1,10	1,74	1,09
WT1_1000_120_380_200_15	62,5	110,66	1,07	1,24	1,61	1,13	0,39	0,47	0,83	0,47	1,22	0,90	1,39	0,94
WT2_1000_120_380_200_15	199	301,78	1,26	1,43	1,84	0,74	0,33	0,75	1,07	0,75	0,79	1,02	0,90	1,17
WT25_1000_120_380_200_15	256	420,30	1,31	1,48	1,93	0,64	0,31	0,77	1,04	0,77	0,68	0,94	0,78	1,13
WT1_1500_120_380_200_15	77,5	103,57	1,39	1,60	1,84	1,34	0,58	0,39	0,76	0,39	1,43	0,86	1,54	0,82
WT2_1500_120_380_200_15	274,5	284,18	1,57	1,75	2,12	0,86	0,49	0,69	1,05	0,69	0,90	1,04	0,99	1,14
WT25_1500_120_380_200_15	392,5	367,00	1,48	1,64	2,07	0,73	0,46	0,79	1,12	0,79	0,77	1,05	0,86	1,21
WT1_1000_40_380_200_15	74,5	81,73	1,38	1,53	2,18	1,50	0,86	0,56	1,17	0,56	1,58	1,35	1,88	1,36
WT2_1000_40_380_200_15	235	186,80	1,12	1,21	2,09	0,89	0,72	0,88	1,38	0,88	0,93	1,35	1,22	1,63
WT25_1000_40_380_200_15	319	255,43	1,07	1,14	2,16	0,75	0,69	0,96	1,38	0,96	0,77	1,28	1,06	1,64
WT1_1500_40_380_200_15	97,5	65,66	1,38	1,51	2,14	1,67	1,29	0,49	1,09	0,71	1,74	1,29	2,08	1,27
WT25_1500_40_380_200_15	416,5	238,38	1,14	1,20	2,47	0,80	1,03	0,84	1,23	0,87	0,82	1,16	1,17	1,51

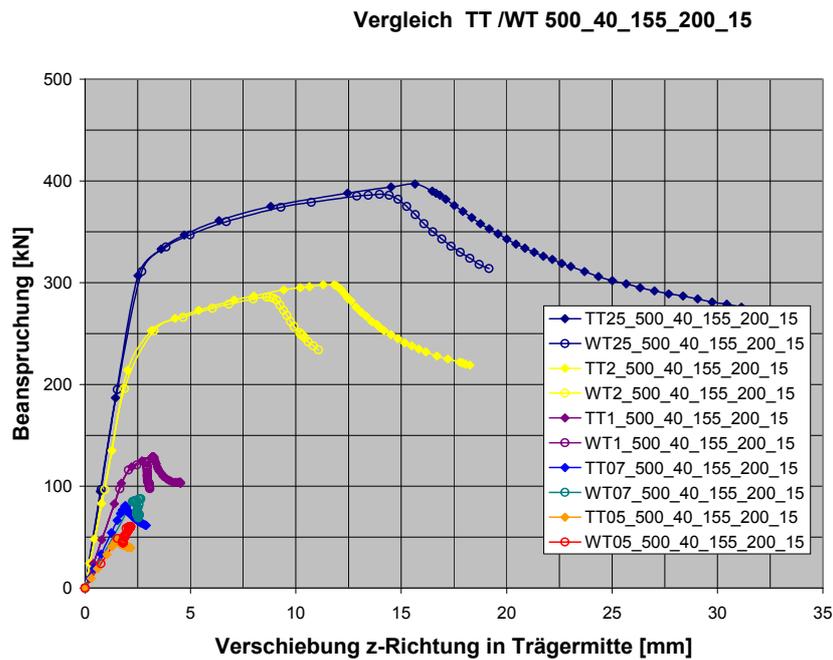


Bild A3-4: Vergleich der Last-Verformungsverhalten von Trapez- und Wellstegträgern

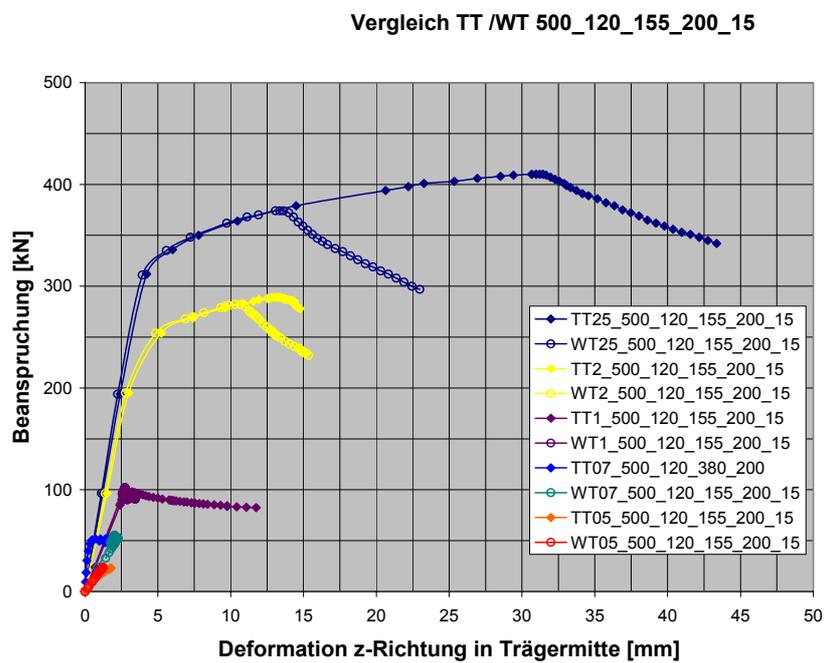


Bild A3-5: Vergleich der Last-Verformungsverhalten von Trapez- und Wellstegträgern

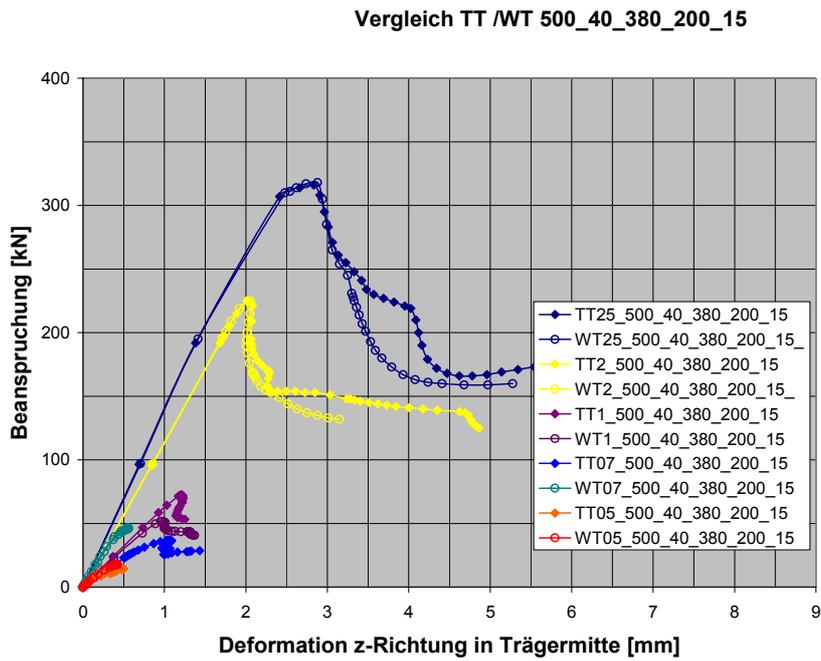


Bild A3-6: Vergleich der Last-Verformungsverhalten von Trapez- und Wellstegträgern

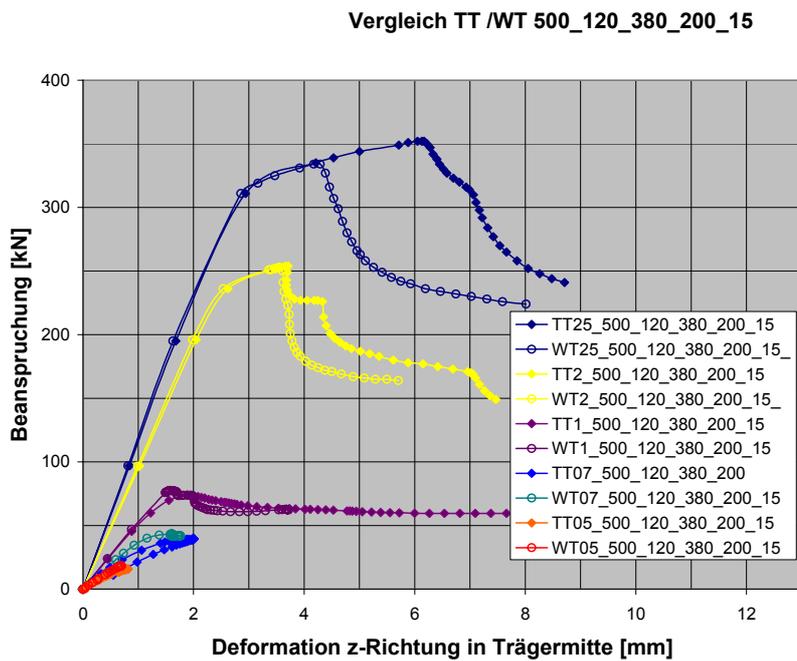


Bild A3-7: Vergleich der Last-Verformungsverhalten von Trapez- und Wellstegträgern

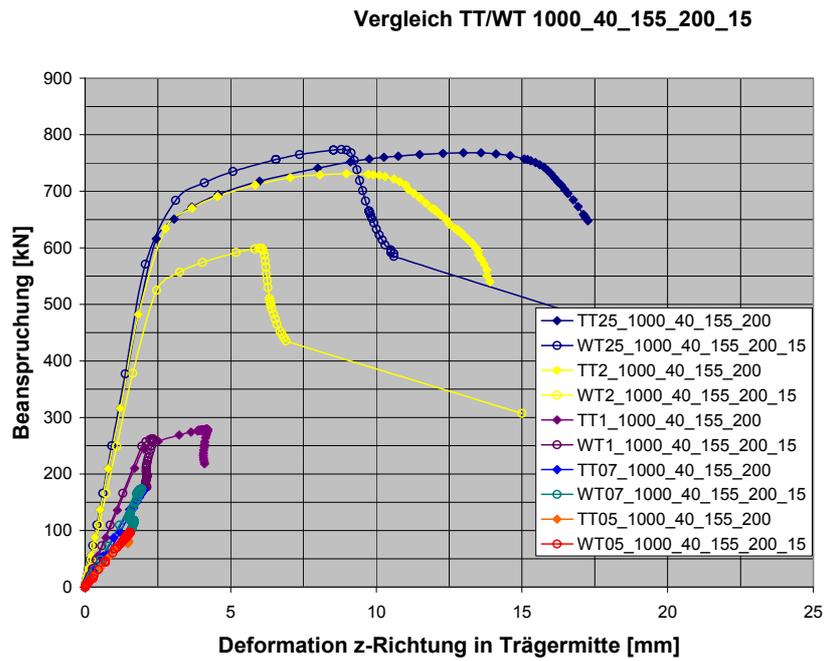


Bild A3-8: Vergleich der Last-Verformungsverhalten von Trapez- und Wellstegträgern

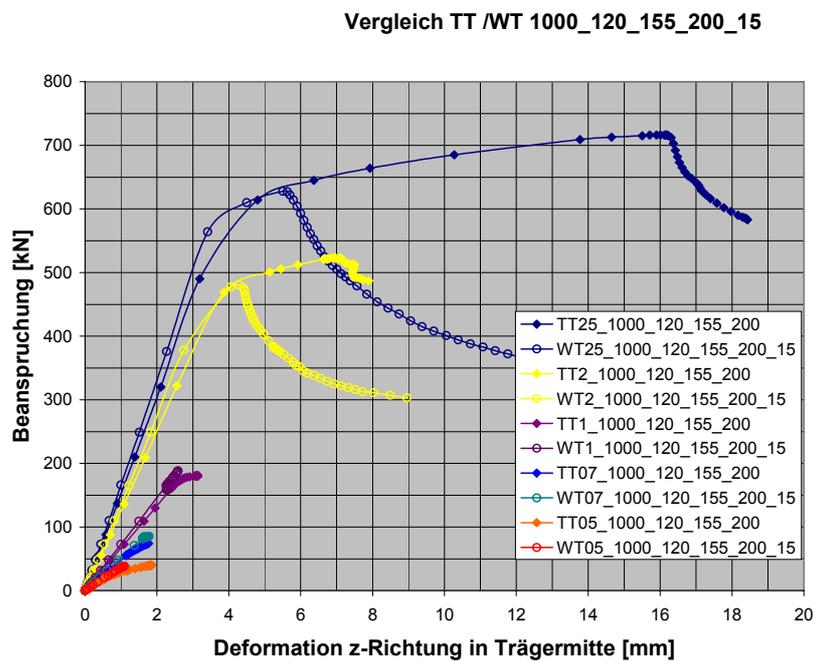


Bild A3-9: Vergleich der Last-Verformungsverhalten von Trapez- und Wellstegträgern

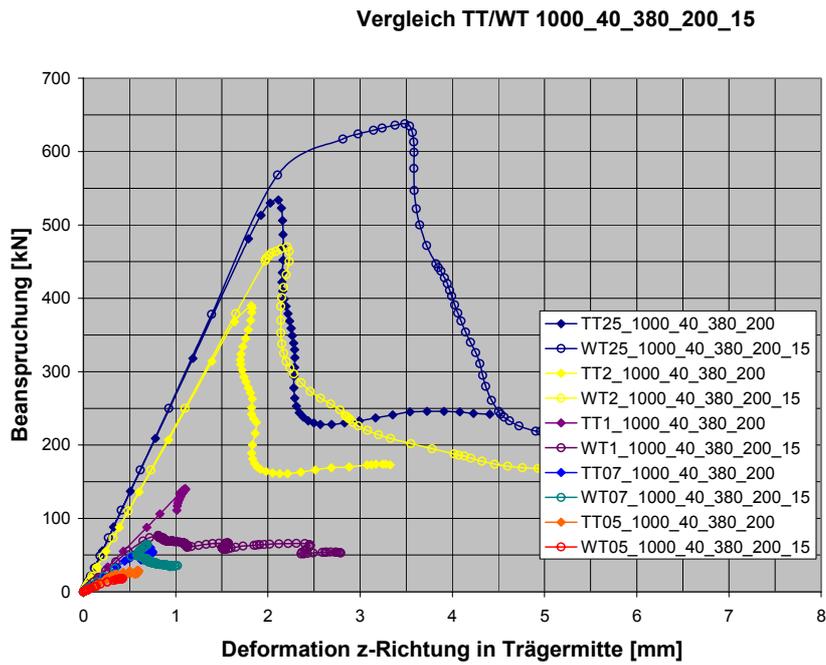


Bild A3-10: Vergleich der Last-Verformungsverhalten von Trapez- und Wellstegträgern

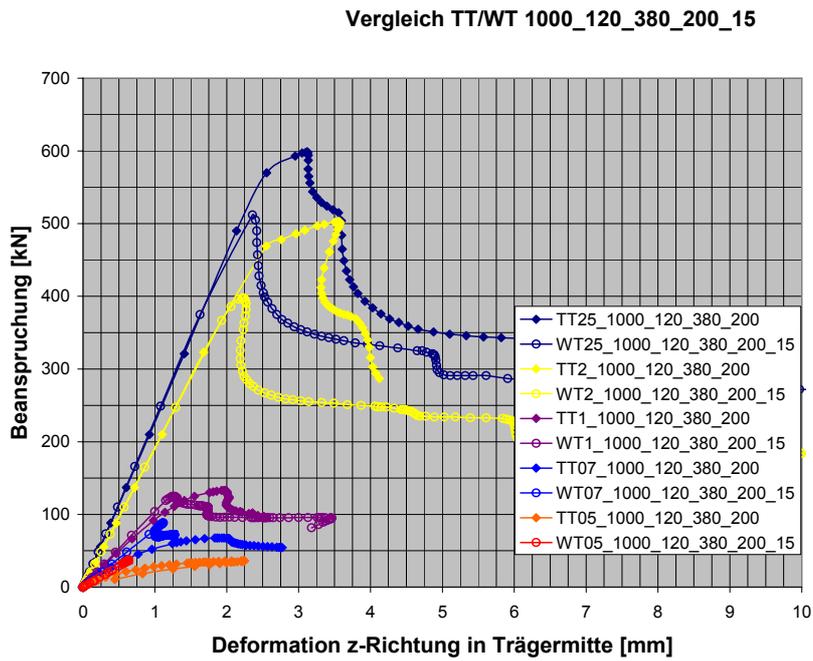


Bild A3-11: Vergleich der Last-Verformungsverhalten von Trapez- und Wellstegträgern

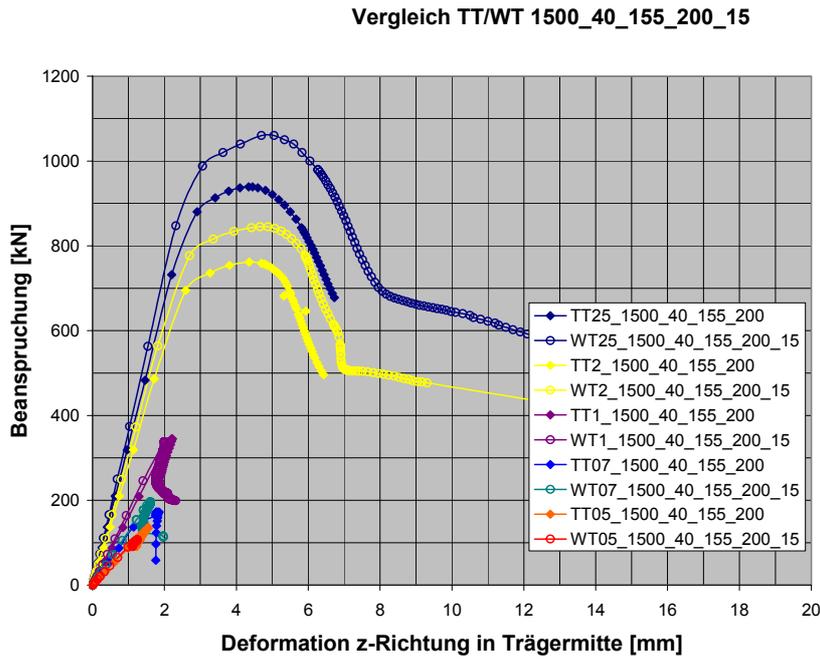


Bild A3-12: Vergleich der Last-Verformungsverhalten von Trapez- und Wellstegträgern

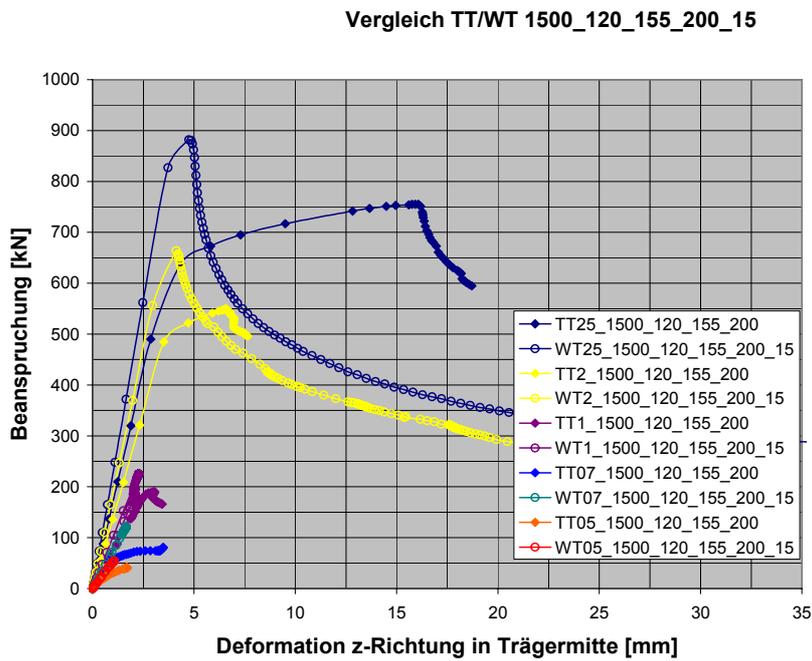


Bild A3-13: Vergleich der Last-Verformungsverhalten von Trapez- und Wellstegträgern

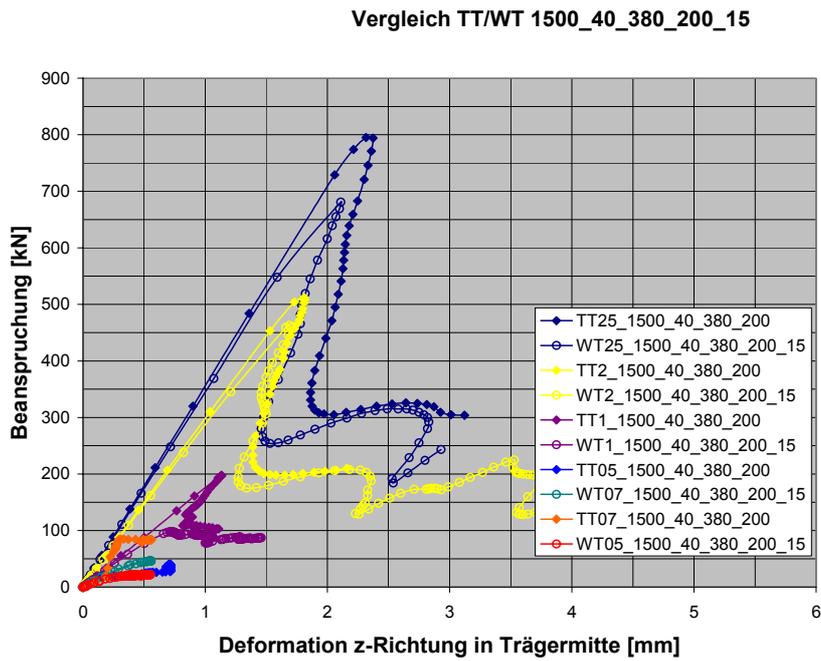


Bild A3-14: Vergleich der Last-Verformungsverhalten von Trapez- und Wellstegträgern

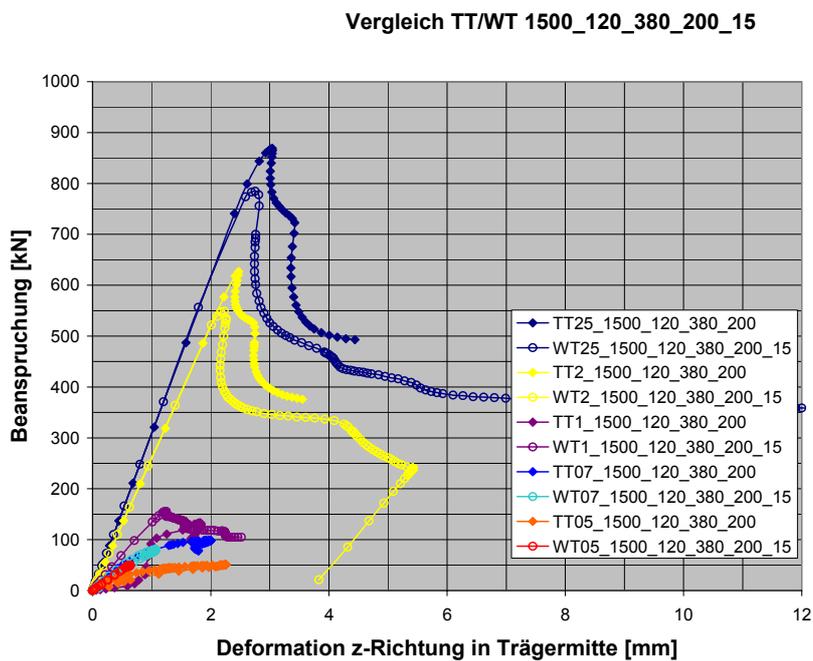


Bild A3-15: Vergleich der Last-Verformungsverhalten von Trapez- und Wellstegträgern

Anlage A4 – Untersuchungen zum Kapitel 5

Tabelle A4-1: Beulwerte im Vergleich

Bezeichnung	w [cm]	a ₃ [cm]	b _f [cm]	a ₁ [cm]	a ₄ [cm]	b _f /t _f [-]	b [cm]	a [cm]	a/b [-]	b _f /a ₃ [-]	R [-]	k _{σ,num} [-]	α _{num} [-]	k _{σ,a} [-]	α _a [-]	k _{σ,v} [-]	α _v [-]
T200-5-40-155	7,75	4,00	20,00	3,00	4,75	40,00	12,00	12,50	1,04	5,00	0,12	1,32	1,29	1,35	1,04	0,70	1,94
T200-7-40-155	7,75	4,00	20,00	3,00	4,75	26,67	12,00	12,50	1,04	5,00	0,12	1,05	1,29	1,35	1,04	0,70	1,94
T200-10-40-155	7,75	4,00	20,00	3,00	4,75	20,00	12,00	12,50	1,04	5,00	0,12	1,26	1,29	1,35	1,04	0,70	1,94
T200-15-40-155	7,75	4,00	20,00	3,00	4,75	13,33	12,00	12,50	1,04	5,00	0,12	1,19	1,29	1,35	1,04	0,70	1,94
T200-20-40-155	7,75	4,00	20,00	3,00	4,75	10,00	12,00	12,50	1,04	5,00	0,12	1,11	1,29	1,35	1,04	0,70	1,94
T200-30-40-155	7,75	4,00	20,00	3,00	4,75	6,67	12,00	12,50	1,04	5,00	0,12	0,97	1,29	1,35	1,04	0,70	1,94
T300-5-40-155	7,75	4,00	30,00	3,00	4,75	60,00	17,00	12,50	0,74	7,50	0,08	1,58	1,37	2,28	0,74	0,96	1,37
T300-10-40-155	7,75	4,00	30,00	3,00	4,75	30,00	17,00	12,50	0,74	7,50	0,08	1,53	1,37	2,28	0,74	0,96	1,37
T300-15-40-155	7,75	4,00	30,00	3,00	4,75	20,00	17,00	12,50	0,74	7,50	0,08	1,47	1,37	2,28	0,74	0,96	1,37
T300-20-40-155	7,75	4,00	30,00	3,00	4,75	15,00	17,00	12,50	0,74	7,50	0,08	1,40	1,37	2,28	0,74	0,96	1,37
T300-30-40-155	7,75	4,00	30,00	3,00	4,75	10,00	17,00	12,50	0,74	7,50	0,08	1,26	1,37	2,28	0,74	0,96	1,37
T300-7-40-155	7,75	4,00	30,00	3,00	4,75	40,00	17,00	12,50	0,74	7,50	0,08	1,26	1,37	2,28	0,74	0,96	1,37
T150-5-40-155	7,75	4,00	15,00	3,00	4,75	30,00	9,50	12,50	1,32	3,75	0,17	1,26	1,63	1,01	1,32	0,60	2,45
T150-10-40-155	7,75	4,00	15,00	3,00	4,75	15,00	9,50	12,50	1,32	3,75	0,17	1,16	1,63	1,01	1,32	0,60	2,45
T150-15-40-155	7,75	4,00	15,00	3,00	4,75	10,00	9,50	12,50	1,32	3,75	0,17	1,07	1,63	1,01	1,32	0,60	2,45
T150-20-40-155	7,75	4,00	15,00	3,00	4,75	7,50	9,50	12,50	1,32	3,75	0,17	0,96	1,63	1,01	1,32	0,60	2,45
T150-30-40-155	7,75	4,00	15,00	3,00	4,75	5,00	9,50	12,50	1,32	3,75	0,17	0,78	1,63	1,01	1,32	0,60	2,45
T150-7-40-155	7,75	4,00	15,00	3,00	4,75	20,00	9,50	12,50	1,32	3,75	0,17	1,00	1,63	1,01	1,32	0,60	2,45
T350-5-40-155	7,75	4,00	35,00	3,00	4,75	70,00	19,50	12,50	0,64	8,75	0,07	1,58	1,19	2,86	0,64	1,13	1,19
T350-10-40-155	7,75	4,00	35,00	3,00	4,75	35,00	19,50	12,50	0,64	8,75	0,07	1,56	1,19	2,86	0,64	1,13	1,19
T350-15-40-155	7,75	4,00	35,00	3,00	4,75	23,33	19,50	12,50	0,64	8,75	0,07	1,51	1,19	2,86	0,64	1,13	1,19
T350-20-40-155	7,75	4,00	35,00	3,00	4,75	17,50	19,50	12,50	0,64	8,75	0,07	1,46	1,19	2,86	0,64	1,13	1,19
T350-30-40-155	7,75	4,00	35,00	3,00	4,75	11,67	19,50	12,50	0,64	8,75	0,07	1,33	1,19	2,86	0,64	1,13	1,19
T350-7-40-155	7,75	4,00	35,00	3,00	4,75	46,67	19,50	12,50	0,64	8,75	0,07	1,28	1,19	2,86	0,64	1,13	1,19
T200-5-100-155	7,75	10,00	20,00	4,15	3,60	40,00	15,00	11,35	0,76	2,00	0,34	2,13	1,03	2,18	0,76	0,85	1,55
T200-7-100-155	7,75	10,00	20,00	4,15	3,60	26,67	15,00	11,35	0,76	2,00	0,34	2,23	1,03	2,18	0,76	0,85	1,55
T200-10-100-155	7,75	10,00	20,00	4,15	3,60	20,00	15,00	11,35	0,76	2,00	0,34	2,62	1,03	2,18	0,76	0,85	1,55
T200-20-100-155	7,75	10,00	20,00	4,15	3,60	10,00	15,00	11,35	0,76	2,00	0,34	2,15	1,03	2,18	0,76	0,85	1,55
T200-15-100-155	7,75	10,00	20,00	4,15	3,60	13,33	15,00	11,35	0,76	2,00	0,34	2,39	1,03	2,18	0,76	0,85	1,55
T300-5-100-155	7,75	10,00	30,00	4,15	3,60	60,00	20,00	11,35	0,57	3,00	0,23	2,54	0,78	3,54	0,57	1,17	1,16
T300-10-100-155	7,75	10,00	30,00	4,15	3,60	30,00	20,00	11,35	0,57	3,00	0,23	2,42	0,78	3,54	0,57	1,17	1,16
T300-15-100-155	7,75	10,00	30,00	4,15	3,60	20,00	20,00	11,35	0,57	3,00	0,23	2,33	0,78	3,54	0,57	1,17	1,16
T300-20-100-155	7,75	10,00	30,00	4,15	3,60	15,00	20,00	11,35	0,57	3,00	0,23	2,20	0,78	3,54	0,57	1,17	1,16
T300-30-100-155	7,75	10,00	30,00	4,15	3,60	10,00	20,00	11,35	0,57	3,00	0,23	1,93	0,78	3,54	0,57	1,17	1,16
T300-7-100-155	7,75	10,00	30,00	4,15	3,60	40,00	20,00	11,35	0,57	3,00	0,23	2,04	0,78	3,54	0,57	1,17	1,16

Bezeichnung	w [cm]	a ₃ [cm]	b _f [cm]	a ₁ [cm]	a ₄ [cm]	b _f /t _f [-]	c [cm]	a [cm]	a/c [-]	b _f /a ₃ [-]	R [-]	k _{σ,num} [-]	α _{num} [-]	k _{σ,a} [-]	α _a [-]	k _{σ,v} [-]	α _v [-]
T150-5-100-155	7,75	10,00	15,00	4,15	3,60	30,00	12,50	11,35	0,91	1,50	0,46	2,73	1,24	1,64	0,91	0,72	1,86
T150-10-100-155	7,75	10,00	15,00	4,15	3,60	15,00	12,50	11,35	0,91	1,50	0,46	2,47	1,24	1,64	0,91	0,72	1,86
T150-15-100-155	7,75	10,00	15,00	4,15	3,60	10,00	12,50	11,35	0,91	1,50	0,46	2,22	1,24	1,64	0,91	0,72	1,86
T150-20-100-155	7,75	10,00	15,00	4,15	3,60	7,50	12,50	11,35	0,91	1,50	0,46	1,99	1,24	1,64	0,91	0,72	1,86
T150-30-100-155	7,75	10,00	15,00	4,15	3,60	5,00	12,50	11,35	0,91	1,50	0,46	1,59	1,24	1,64	0,91	0,72	1,86
T350-5-100-155	7,75	10,00	35,00	4,15	3,60	70,00	22,50	11,35	0,50	3,50	0,20	2,56	0,69	4,36	0,50	1,37	1,03
T350-10-100-155	7,75	10,00	35,00	4,15	3,60	35,00	22,50	11,35	0,50	3,50	0,20	2,50	0,69	4,36	0,50	1,37	1,03
T350-15-100-155	7,75	10,00	35,00	4,15	3,60	23,33	22,50	11,35	0,50	3,50	0,20	2,40	0,69	4,36	0,50	1,37	1,03
T350-20-100-155	7,75	10,00	35,00	4,15	3,60	17,50	22,50	11,35	0,50	3,50	0,20	2,29	0,69	4,36	0,50	1,37	1,03
T350-30-100-155	7,75	10,00	35,00	4,15	3,60	11,67	22,50	11,35	0,50	3,50	0,20	2,06	0,69	4,36	0,50	1,37	1,03
T350-7-100-155	7,75	10,00	35,00	4,15	3,60	46,67	22,50	11,35	0,50	3,50	0,20	2,07	0,69	4,36	0,50	1,37	1,03
T200-5-40-200	10,00	4,00	20,00	6,00	4,00	40,00	12,00	14,00	1,17	5,00	0,14	1,30	1,67	1,16	1,17	0,59	2,50
T200-10-40-200	10,00	4,00	20,00	6,00	4,00	20,00	12,00	14,00	1,17	5,00	0,14	1,25	1,67	1,16	1,17	0,59	2,50
T200-15-40-200	10,00	4,00	20,00	6,00	4,00	13,33	12,00	14,00	1,17	5,00	0,14	1,17	1,67	1,16	1,17	0,59	2,50
T200-20-40-200	10,00	4,00	20,00	6,00	4,00	10,00	12,00	14,00	1,17	5,00	0,14	1,09	1,67	1,16	1,17	0,59	2,50
T200-30-40-200	10,00	4,00	20,00	6,00	4,00	6,67	12,00	14,00	1,17	5,00	0,14	0,94	1,67	1,16	1,17	0,59	2,50
T300-5-40-200	10,00	4,00	30,00	6,00	4,00	60,00	17,00	14,00	0,82	7,50	0,10	1,40	1,18	1,90	0,82	0,75	1,76
T300-7-40-200	10,00	4,00	30,00	6,00	4,00	40,00	17,00	14,00	0,82	7,50	0,10	1,37	1,18	1,90	0,82	0,75	1,76
T300-10-40-200	10,00	4,00	30,00	6,00	4,00	30,00	17,00	14,00	0,82	7,50	0,10	1,35	1,18	1,90	0,82	0,75	1,76
T300-15-40-200	10,00	4,00	30,00	6,00	4,00	20,00	17,00	14,00	0,82	7,50	0,10	1,29	1,18	1,90	0,82	0,75	1,76
T300-20-40-200	10,00	4,00	30,00	6,00	4,00	15,00	17,00	14,00	0,82	7,50	0,10	1,23	1,18	1,90	0,82	0,75	1,76
T300-30-40-200	10,00	4,00	30,00	6,00	4,00	10,00	17,00	14,00	0,82	7,50	0,10	1,10	1,76	1,90	0,82	0,75	1,76
T150-5-40-200	10,00	4,00	15,00	6,00	4,00	30,00	9,50	14,00	1,47	3,75	0,19	1,29	1,58	0,89	1,47	0,53	3,16
T150-10-40-200	10,00	4,00	15,00	6,00	4,00	15,00	9,50	14,00	1,47	3,75	0,19	1,23	2,11	0,89	1,47	0,53	3,16
T150-15-40-200	10,00	4,00	15,00	6,00	4,00	10,00	9,50	14,00	1,47	3,75	0,19	1,11	2,11	0,89	1,47	0,53	3,16
T150-20-40-200	10,00	4,00	15,00	6,00	4,00	7,50	9,50	14,00	1,47	3,75	0,19	0,99	2,11	0,89	1,47	0,53	3,16
T150-30-40-200	10,00	4,00	15,00	6,00	4,00	5,00	9,50	14,00	1,47	3,75	0,19	0,82	2,11	0,89	1,47	0,53	3,16
T350-15-40-200	10,00	4,00	35,00	6,00	4,00	23,33	19,50	14,00	0,72	8,75	0,08	1,40	1,54	2,37	0,72	0,85	1,54
T350-20-40-200	10,00	4,00	35,00	6,00	4,00	17,50	19,50	14,00	0,72	8,75	0,08	1,66	1,54	2,37	0,72	0,85	1,54
T350-30-40-200	10,00	4,00	35,00	6,00	4,00	11,67	19,50	14,00	0,72	8,75	0,08	1,89	1,54	2,37	0,72	0,85	1,54
T200-5-100-200	10,00	10,00	20,00	5,00	5,00	40,00	15,00	15,00	1,00	2,00	0,33	2,38	1,33	1,43	1,00	0,68	2,00
T200-10-100-200	10,00	10,00	20,00	5,00	5,00	20,00	15,00	15,00	1,00	2,00	0,33	2,28	1,33	1,43	1,00	0,68	2,00
T200-15-100-200	10,00	10,00	20,00	5,00	5,00	13,33	15,00	15,00	1,00	2,00	0,33	2,12	1,33	1,43	1,00	0,68	2,00
T200-20-100-200	10,00	10,00	20,00	5,00	5,00	10,00	15,00	15,00	1,00	2,00	0,33	1,94	1,33	1,43	1,00	0,68	2,00
T200-30-100-200	10,00	10,00	20,00	5,00	5,00	6,67	15,00	15,00	1,00	2,00	0,33	1,59	1,33	1,43	1,00	0,68	2,00
T300-5-100-200	10,00	10,00	30,00	5,00	5,00	60,00	20,00	15,00	0,75	3,00	0,22	2,15	1,00	2,21	0,75	0,87	1,50
T300-7-100-200	10,00	10,00	30,00	5,00	5,00	40,00	20,00	15,00	0,75	3,00	0,22	1,75	1,00	2,21	0,75	0,87	1,50
T300-10-100-200	10,00	10,00	30,00	5,00	5,00	30,00	20,00	15,00	0,75	3,00	0,22	2,05	1,00	2,21	0,75	0,87	1,50

Bezeichnung	w [cm]	a ₃ [cm]	b _r [cm]	a ₁ [cm]	a ₄ [cm]	b _r /t _r [-]	c [cm]	a [cm]	a/c [-]	b _r /a ₃ [-]	R [-]	k _{σ,num} [-]	α _{num} [-]	k _{σ,a} [-]	α _a [-]	k _{σ,v} [-]	α _v [-]
T300-15-100-200	10,00	10,00	30,00	5,00	5,00	20,00	20,00	15,00	0,75	3,00	0,22	1,98	1,00	2,21	0,75	0,87	1,50
T300-20-100-200	10,00	10,00	30,00	5,00	5,00	15,00	20,00	15,00	0,75	3,00	0,22	1,87	1,00	2,21	0,75	0,87	1,50
T300-30-100-200	10,00	10,00	30,00	5,00	5,00	10,00	20,00	15,00	0,75	3,00	0,22	1,66	1,00	2,21	0,75	0,87	1,50
T150-5-100-200	10,00	10,00	15,00	5,00	5,00	30,00	12,50	15,00	1,20	1,50	0,44	1,98	1,20	1,12	1,20	0,60	2,40
T150-10-100-200	10,00	10,00	15,00	5,00	5,00	15,00	12,50	15,00	1,20	1,50	0,44	1,78	1,20	1,12	1,20	0,60	2,40
T150-15-100-200	10,00	10,00	15,00	5,00	5,00	10,00	12,50	15,00	1,20	1,50	0,44	1,59	1,20	1,12	1,20	0,60	2,40
T150-20-100-200	10,00	10,00	15,00	5,00	5,00	7,50	12,50	15,00	1,20	1,50	0,44	1,44	1,20	1,12	1,20	0,60	2,40
T150-30-100-200	10,00	10,00	15,00	5,00	5,00	5,00	12,50	15,00	1,20	1,50	0,44	1,20	1,20	1,12	1,20	0,60	2,40
T350-5-100-200	10,00	10,00	35,00	5,00	5,00	70,00	22,50	15,00	0,67	3,50	0,19	2,15	0,89	2,68	0,67	0,99	1,33
T350-10-100-200	10,00	10,00	35,00	5,00	5,00	35,00	22,50	15,00	0,67	3,50	0,19	2,11	0,89	2,68	0,67	0,99	1,33
T350-15-100-200	10,00	10,00	35,00	5,00	5,00	23,33	22,50	15,00	0,67	3,50	0,19	2,03	0,89	2,68	0,67	0,99	1,33
T350-20-100-200	10,00	10,00	35,00	5,00	5,00	17,50	22,50	15,00	0,67	3,50	0,19	1,94	0,89	2,68	0,67	0,99	1,33
T350-30-100-200	10,00	10,00	35,00	5,00	5,00	11,67	22,50	15,00	0,67	3,50	0,19	1,75	0,89	2,68	0,67	0,99	1,33
T200-5-40-300	15,00	4,00	20,00	11,00	4,00	40,00	12,00	19,00	1,58	5,00	0,16	1,17	2,50	0,83	1,58	0,50	3,75
T200-10-40-300	15,00	4,00	20,00	11,00	4,00	20,00	12,00	19,00	1,58	5,00	0,16	1,11	2,50	0,83	1,58	0,50	3,75
T200-15-40-300	15,00	4,00	20,00	11,00	4,00	13,33	12,00	19,00	1,58	5,00	0,16	1,04	2,50	0,83	1,58	0,50	3,75
T200-20-40-300	15,00	4,00	20,00	11,00	4,00	10,00	12,00	19,00	1,58	5,00	0,16	0,96	2,50	0,83	1,58	0,50	3,75
T200-30-40-300	15,00	4,00	20,00	11,00	4,00	6,67	12,00	19,00	1,58	5,00	0,16	0,82	1,58	0,83	1,58	0,50	3,75
T300-5-40-300	15,00	4,00	30,00	11,00	4,00	60,00	17,00	19,00	1,12	7,50	0,11	1,22	1,76	1,23	1,12	0,57	2,65
T300-7-40-300	15,00	4,00	30,00	11,00	4,00	40,00	17,00	19,00	1,12	7,50	0,11	0,97	1,76	1,23	1,12	0,57	2,65
T300-10-40-300	15,00	4,00	30,00	11,00	4,00	30,00	17,00	19,00	1,12	7,50	0,11	1,14	1,76	1,23	1,12	0,57	2,65
T300-15-40-300	15,00	4,00	30,00	11,00	4,00	20,00	17,00	19,00	1,12	7,50	0,11	1,10	1,76	1,23	1,12	0,57	2,65
T300-20-40-300	15,00	4,00	30,00	11,00	4,00	15,00	17,00	19,00	1,12	7,50	0,11	1,05	1,76	1,23	1,12	0,57	2,65
T300-30-40-300	15,00	4,00	30,00	11,00	4,00	10,00	17,00	19,00	1,12	7,50	0,11	0,94	1,76	1,23	1,12	0,57	2,65
T150-5-40-300	15,00	4,00	15,00	11,00	4,00	30,00	9,50	19,00	2,00	3,75	0,21	1,33	2,00	0,68	2,00	0,47	4,74
T150-10-40-300	15,00	4,00	15,00	11,00	4,00	15,00	9,50	19,00	2,00	3,75	0,21	1,21	2,00	0,68	2,00	0,47	4,74
T150-15-40-300	15,00	4,00	15,00	11,00	4,00	10,00	9,50	19,00	2,00	3,75	0,21	1,09	2,00	0,68	2,00	0,47	4,74
T150-20-40-300	15,00	4,00	15,00	11,00	4,00	7,50	9,50	19,00	2,00	3,75	0,21	0,96	2,00	0,68	2,00	0,47	4,74
T150-30-40-300	15,00	4,00	15,00	11,00	4,00	5,00	9,50	19,00	2,00	3,75	0,21	0,77	2,00	0,68	2,00	0,47	4,74
T350-5-40-300	15,00	4,00	35,00	11,00	4,00	70,00	19,50	19,00	0,97	8,75	0,09	1,24	1,54	1,48	0,97	0,62	2,31
T350-10-40-300	15,00	4,00	35,00	11,00	4,00	35,00	19,50	19,00	0,97	8,75	0,09	1,20	1,54	1,48	0,97	0,62	2,31
T350-15-40-300	15,00	4,00	35,00	11,00	4,00	23,33	19,50	19,00	0,97	8,75	0,09	1,15	1,54	1,48	0,97	0,62	2,31
T350-20-40-300	15,00	4,00	35,00	11,00	4,00	17,50	19,50	19,00	0,97	8,75	0,09	1,09	1,54	1,48	0,97	0,62	2,31
T350-30-40-300	15,00	4,00	35,00	11,00	4,00	11,67	19,50	19,00	0,97	8,75	0,09	1,00	1,54	1,48	0,97	0,62	2,31
T200-5-100-300	15,00	10,00	20,00	8,00	7,00	40,00	15,00	22,00	1,47	2,00	0,34	1,42	1,47	0,89	1,47	0,54	3,00
T200-10-100-300	15,00	10,00	20,00	8,00	7,00	20,00	15,00	22,00	1,47	2,00	0,34	1,32	1,47	0,89	1,47	0,54	3,00
T200-15-100-300	15,00	10,00	20,00	8,00	7,00	13,33	15,00	22,00	1,47	2,00	0,34	1,22	1,47	0,89	1,47	0,54	3,00
T200-20-100-300	15,00	10,00	20,00	8,00	7,00	10,00	15,00	22,00	1,47	2,00	0,34	1,14	1,47	0,89	1,47	0,54	3,00

Bezeichnung	w [cm]	a ₃ [cm]	b _f [cm]	a ₁ [cm]	a ₄ [cm]	b _f /t _f [-]	c [cm]	a [cm]	a/c [-]	b _f /a ₃ [-]	R [-]	k _{σ,num} [-]	α _{num} [-]	k _{σ,a} [-]	α _a [-]	k _{σ,v} [-]	α _v [-]
T200-30-100-300	15,00	10,00	20,00	8,00	7,00	6,67	15,00	22,00	1,47	2,00	0,34	0,99	1,47	0,89	1,47	0,54	3,00
T300-5-100-300	15,00	10,00	30,00	8,00	7,00	60,00	20,00	22,00	1,10	3,00	0,23	2,11	1,50	1,26	1,10	0,63	2,25
T300-7-100-300	15,00	10,00	30,00	8,00	7,00	40,00	20,00	22,00	1,10	3,00	0,23	1,59	1,50	1,26	1,10	0,63	2,25
T300-10-100-300	15,00	10,00	30,00	8,00	7,00	30,00	20,00	22,00	1,10	3,00	0,23	2,21	1,50	1,26	1,10	0,63	2,25
T300-15-100-300	15,00	10,00	30,00	8,00	7,00	20,00	20,00	22,00	1,10	3,00	0,23	0,72	1,50	1,26	1,10	0,63	2,25
T300-20-100-300	15,00	10,00	30,00	8,00	7,00	15,00	20,00	22,00	1,10	3,00	0,23	2,32	1,10	1,26	1,10	0,63	2,25
T150-5-100-300	15,00	10,00	15,00	8,00	7,00	30,00	12,50	22,00	1,76	1,50	0,45	1,09	1,76	0,75	1,76	0,51	3,60
T150-10-100-300	15,00	10,00	15,00	8,00	7,00	15,00	12,50	22,00	1,76	1,50	0,45	1,02	1,76	0,75	1,76	0,51	3,60
T150-15-100-300	15,00	10,00	15,00	8,00	7,00	10,00	12,50	22,00	1,76	1,50	0,45	0,93	1,76	0,75	1,76	0,51	3,60
T150-20-100-300	15,00	10,00	15,00	8,00	7,00	7,50	12,50	22,00	1,76	1,50	0,45	0,86	1,76	0,75	1,76	0,51	3,60
T150-30-100-300	15,00	10,00	15,00	8,00	7,00	5,00	12,50	22,00	1,76	1,50	0,45	0,74	1,76	0,75	1,76	0,51	3,60
T350-5-100-300	15,00	10,00	35,00	8,00	7,00	70,00	22,50	22,00	0,98	3,50	0,19	1,69	1,33	1,48	0,98	0,68	2,00
T350-10-100-300	15,00	10,00	35,00	8,00	7,00	35,00	22,50	22,00	0,98	3,50	0,19	1,66	1,33	1,48	0,98	0,68	2,00
T350-15-100-300	15,00	10,00	35,00	8,00	7,00	23,33	22,50	22,00	0,98	3,50	0,19	1,59	1,33	1,48	0,98	0,68	2,00
T350-20-100-300	15,00	10,00	35,00	8,00	7,00	17,50	22,50	22,00	0,98	3,50	0,19	1,53	1,33	1,48	0,98	0,68	2,00
T350-30-100-300	15,00	10,00	35,00	8,00	7,00	11,67	22,50	22,00	0,98	3,50	0,19	1,40	1,33	1,48	0,98	0,68	2,00
T200-5-40-380	19,00	4,00	20,00	5,80	13,20	40,00	12,00	32,20	2,68	5,00	0,12	0,62	3,17	0,57	2,68	0,47	4,75
T200-10-40-380	19,00	4,00	20,00	5,80	13,20	20,00	12,00	32,20	2,68	5,00	0,12	0,55	3,17	0,57	2,68	0,47	4,75
T200-20-40-380	19,00	4,00	20,00	5,80	13,20	10,00	12,00	32,20	2,68	5,00	0,12	0,48	3,17	0,57	2,68	0,47	4,75
T300-5-40-380	19,00	4,00	30,00	5,80	13,20	60,00	17,00	32,20	1,89	7,50	0,08	0,82	3,35	0,71	1,89	0,52	3,35
T300-10-40-380	19,00	4,00	30,00	5,80	13,20	30,00	17,00	32,20	1,89	7,50	0,08	0,78	3,35	0,71	1,89	0,52	3,35
T300-15-40-380	19,00	4,00	30,00	5,80	13,20	20,00	17,00	32,20	1,89	7,50	0,08	0,75	3,91	0,71	1,89	0,52	3,35
T300-20-40-380	19,00	4,00	30,00	5,80	13,20	15,00	17,00	32,20	1,89	7,50	0,08	0,72	3,35	0,71	1,89	0,52	3,35
T300-30-40-380	19,00	4,00	30,00	5,80	13,20	10,00	17,00	32,20	1,89	7,50	0,08	0,68	3,35	0,71	1,89	0,52	3,35
T150-10-40-380	19,00	4,00	15,00	5,80	13,20	15,00	9,50	32,20	3,39	3,75	0,16	0,39	4,00	0,52	3,39	0,46	6,00
T150-5-40-380	19,00	4,00	15,00	5,80	13,20	30,00	9,50	32,20	3,39	3,75	0,16	0,57	3,00	0,52	3,39	0,46	6,00
T150-15-40-380	19,00	4,00	15,00	5,80	13,20	10,00	9,50	32,20	3,39	3,75	0,16	0,35	3,00	0,52	3,39	0,46	6,00
T150-30-40-380	19,00	4,00	15,00	5,80	13,20	5,00	9,50	32,20	3,39	3,75	0,16	0,29	3,00	0,52	3,39	0,46	6,00
T350-10-40-380	19,00	4,00	35,00	5,80	13,20	35,00	19,50	32,20	1,65	8,75	0,07	0,80	1,95	0,80	1,65	0,55	2,92
T350-20-40-380	19,00	4,00	35,00	5,80	13,20	17,50	19,50	32,20	1,65	8,75	0,07	0,76	1,95	0,80	1,65	0,55	2,92
T350-30-40-380	19,00	4,00	35,00	5,80	13,20	11,67	19,50	32,20	1,65	8,75	0,07	0,72	1,95	0,80	1,65	0,55	2,92
T350-5-40-380	19,00	4,00	35,00	5,80	13,20	70,00	19,50	32,20	1,65	8,75	0,07	0,82	1,95	0,80	1,65	0,55	2,92
T350-7-40-380	19,00	4,00	35,00	5,80	13,20	46,67	19,50	32,20	1,65	8,75	0,07	0,67	1,95	0,80	1,65	0,55	2,92
T350-15-40-380	19,00	4,00	35,00	5,80	13,20	23,33	19,50	32,20	1,65	8,75	0,07	0,78	1,95	0,80	1,65	0,55	2,92
T200-10-50-380	19,00	5,00	20,00	11,40	4,60	20,00	12,50	20,60	1,65	4,00	0,19	1,04	2,28	0,80	1,65	0,48	4,56
T150-10-50-380	19,00	5,00	15,00	11,40	4,60	15,00	10,00	20,60	2,06	3,00	0,26	0,88	2,85	0,67	2,06	0,46	5,70
T350-10-50-380	19,00	5,00	35,00	11,40	4,60	35,00	20,00	20,60	1,03	7,00	0,11	1,21	1,90	1,37	1,03	0,55	2,85
T150-5-100-380	19,00	10,00	15,00	7,00	12,00	30,00	12,50	31,00	2,48	1,50	0,41	0,63	2,48	0,59	2,48	0,487	4,56

Bezeichnung	w [cm]	a ₃ [cm]	b _f [cm]	a ₁ [cm]	a ₄ [cm]	b _f /t _f [-]	c [cm]	a [cm]	a/c [-]	b _f /a ₃ [-]	R [-]	k _{σ,num} [-]	α _{num} [-]	k _{σ,a} [-]	α _a [-]	k _{σ,v} [-]	α _v [-]
T150-10-100-380	19,00	10,00	15,00	7,00	12,00	15,00	12,50	31,00	2,48	1,50	0,41	0,58	2,48	0,59	2,48	0,48	4,56
T200-5-120-380	19,00	12,00	20,00	7,00	12,00	40,00	16,00	31,00	1,94	1,67	0,37	0,95	1,94	0,70	1,94	0,51	3,56
T200-10-120-380	19,00	12,00	20,00	7,00	12,00	20,00	16,00	31,00	1,94	1,67	0,37	0,90	1,94	0,70	1,94	0,51	3,56
T200-20-120-380	19,00	12,00	20,00	7,00	12,00	10,00	16,00	31,00	1,94	1,67	0,37	0,79	1,94	0,70	1,94	0,51	3,56
T300-5-120-380	19,00	12,00	30,00	7,00	12,00	60,00	21,00	31,00	1,48	2,50	0,25	1,39	1,48	0,89	1,48	0,57	2,71
T300-10-120-380	19,00	12,00	30,00	7,00	12,00	30,00	21,00	31,00	1,48	2,50	0,25	1,34	1,48	0,89	1,48	0,57	2,71
T300-15-120-380	19,00	12,00	30,00	7,00	12,00	20,00	21,00	31,00	1,48	2,50	0,25	1,27	1,48	0,89	1,48	0,57	2,71
T300-20-120-380	19,00	12,00	30,00	7,00	12,00	15,00	21,00	31,00	1,48	2,50	0,25	1,23	1,48	0,89	1,48	0,57	2,71
T300-30-120-380	19,00	12,00	30,00	7,00	12,00	10,00	21,00	31,00	1,48	2,50	0,25	1,34	1,48	0,89	1,48	0,57	2,71
T300-7-120-380	19,00	12,00	30,00	7,00	12,00	40,00	21,00	31,00	1,48	2,50	0,25	1,37	1,48	0,89	1,48	0,57	2,71
T150-5-120-380	19,00	12,00	15,00	7,00	12,00	30,00	13,50	31,00	2,30	1,25	0,49	0,73	2,30	0,62	2,30	0,49	4,22
T150-10-120-380	19,00	12,00	15,00	7,00	12,00	15,00	13,50	31,00	2,30	1,25	0,49	0,68	2,30	0,62	2,30	0,49	4,22
T350-5-120-380	19,00	12,00	35,00	7,00	12,00	70,00	23,50	31,00	1,32	2,92	0,21	1,50	1,32	1,00	1,32	0,60	2,43
T350-10-120-380	19,00	12,00	35,00	7,00	12,00	35,00	23,50	31,00	1,32	2,92	0,21	1,47	1,32	1,00	1,32	0,60	2,43
T350-15-120-380	19,00	12,00	35,00	7,00	12,00	23,33	23,50	31,00	1,32	2,92	0,21	1,43	1,32	1,00	1,32	0,60	2,43
T350-20-120-380	19,00	12,00	35,00	7,00	12,00	17,50	23,50	31,00	1,32	2,92	0,21	1,38	1,32	1,00	1,32	0,60	2,43
T350-30-120-380	19,00	12,00	35,00	7,00	12,00	11,67	23,50	31,00	1,32	2,92	0,21	1,28	1,32	1,00	1,32	0,60	2,43
W150-5-40-155	7,75	4,00	15,00	5,39	2,36	30,00	9,60	10,11	1,05	3,75	0,20	1,24	1,61	1,33	1,05	0,60	2,42
W150-10-40-155	7,75	4,00	15,00	5,39	2,36	15,00	9,60	10,11	1,05	3,75	0,20	1,19	1,61	1,33	1,05	0,60	2,42
W150-15-40-155	7,75	4,00	15,00	5,39	2,36	10,00	9,60	10,11	1,05	3,75	0,20	1,10	1,61	1,33	1,05	0,60	2,42
W150-20-40-155	7,75	4,00	15,00	5,39	2,36	7,50	9,60	10,11	1,05	3,75	0,20	1,01	1,61	1,33	1,05	0,60	2,42
W150-30-40-155	7,75	4,00	15,00	5,39	2,36	5,00	9,60	10,11	1,05	3,75	0,20	0,86	1,61	1,33	1,05	0,60	2,42
W350-5-40-155	7,75	4,00	35,00	5,39	2,36	70,00	19,60	10,11	0,52	8,75	0,09	1,39	1,19	4,19	0,52	1,14	1,19
W350-10-40-155	7,75	4,00	35,00	5,39	2,36	35,00	19,60	10,11	0,52	8,75	0,09	1,34	1,19	4,19	0,52	1,14	1,19
W350-15-40-155	7,75	4,00	35,00	5,39	2,36	23,33	19,60	10,11	0,52	8,75	0,09	1,29	1,38	4,19	0,52	1,14	1,19
W350-20-40-155	7,75	4,00	35,00	5,39	2,36	17,50	19,60	10,11	0,52	8,75	0,09	1,24	1,19	4,19	0,52	1,14	1,19
W350-30-40-155	7,75	4,00	35,00	5,39	2,36	11,67	19,60	10,11	0,52	8,75	0,09	1,13	1,19	4,19	0,52	1,14	1,19
W150-5-100-155	7,75	10,00	15,00	5,95	1,80	30,00	12,60	9,55	0,76	1,50	0,54	2,38	1,23	2,17	0,76	0,72	1,85
W150-10-100-155	7,75	10,00	15,00	5,95	1,80	15,00	12,60	9,55	0,76	1,50	0,54	2,28	1,23	2,17	0,76	0,72	1,85
W150-15-100-155	7,75	10,00	15,00	5,95	1,80	10,00	12,60	9,55	0,76	1,50	0,54	2,13	1,23	2,17	0,76	0,72	1,85
W350-10-100-155	7,75	10,00	35,00	5,95	1,80	35,00	22,60	9,55	0,42	3,50	0,23	2,31	1,03	6,03	0,42	1,37	1,03
W350-15-100-155	7,75	10,00	35,00	5,95	1,80	23,33	22,60	9,55	0,42	3,50	0,23	2,23	1,03	6,03	0,42	1,37	1,03
W350-20-100-155	7,75	10,00	35,00	5,95	1,80	17,50	22,60	9,55	0,42	3,50	0,23	2,13	1,03	6,03	0,42	1,37	1,03
W350-30-100-155	7,75	10,00	35,00	5,95	1,80	11,67	22,60	9,55	0,42	3,50	0,23	1,71	1,03	6,03	0,42	1,37	1,03
W150-5-40-380	19,00	4,00	15,00	13,50	5,40	30,00	9,60	24,30	2,53	3,75	0,21	0,31	3,96	0,59	2,53	0,46	5,94
W150-10-40-380	19,00	4,00	15,00	13,50	5,40	15,00	9,60	24,30	2,53	3,75	0,21	0,30	3,96	0,59	2,53	0,46	5,94
W150-15-40-380	19,00	4,00	15,00	13,50	5,40	10,00	9,60	24,30	2,53	3,75	0,21	0,29	3,96	0,59	2,53	0,46	5,94
W150-20-40-380	19,00	4,00	15,00	13,50	5,40	7,50	9,60	24,30	2,53	3,75	0,21	0,28	3,96	0,59	2,53	0,46	5,94

Bezeichnung	w [cm]	a ₃ [cm]	b _f [cm]	a ₁ [cm]	a ₄ [cm]	b _f /t _f [-]	c [cm]	a [cm]	a/c [-]	b _f /a ₃ [-]	R [-]	k _{σ,num} [-]	α _{num} [-]	k _{σ,a} [-]	α _a [-]	k _{σ,v} [-]	α _v [-]
W150-30-40-380	19,00	4,00	15,00	13,50	5,40	5,00	9,60	24,30	2,53	3,75	0,21	0,27	3,96	0,59	2,53	0,46	5,94
W350-5-40-380	19,00	4,00	35,00	13,50	5,40	70,00	19,60	24,30	1,24	8,75	0,09	0,83	2,91	1,08	1,24	0,55	2,91
W350-10-40-380	19,00	4,00	35,00	13,50	5,40	35,00	19,60	24,30	1,24	8,75	0,09	0,82	2,91	1,08	1,24	0,55	2,91
W350-15-40-380	19,00	4,00	35,00	13,50	5,40	23,33	19,60	24,30	1,24	8,75	0,09	0,81	2,91	1,08	1,24	0,55	2,91
W350-20-40-380	19,00	4,00	35,00	13,50	5,40	17,50	19,60	24,30	1,24	8,75	0,09	0,79	2,91	1,08	1,24	0,55	2,91
W350-30-40-380	19,00	4,00	35,00	13,50	5,40	11,67	19,60	24,30	1,24	8,75	0,09	0,76	2,91	1,08	1,24	0,55	2,91
W350-5-100-380	19,00	10,00	35,00	14,60	4,40	70,00	22,60	23,40	1,04	3,50	0,23	1,25	1,04	1,36	1,04	0,59	2,52
W350-10-100-380	19,00	10,00	35,00	14,60	4,40	35,00	22,60	23,40	1,04	3,50	0,23	1,26	1,04	1,36	1,04	0,59	2,52
W350-15-100-380	19,00	10,00	35,00	14,60	4,40	23,33	22,60	23,40	1,04	3,50	0,23	1,24	1,04	1,36	1,04	0,59	2,52
W350-20-100-380	19,00	10,00	35,00	14,60	4,40	17,50	22,60	23,40	1,04	3,50	0,23	1,21	1,04	1,36	1,04	0,59	2,52
W350-30-100-380	19,00	10,00	35,00	14,60	4,40	11,67	22,60	23,40	1,04	3,50	0,23	1,78	1,04	1,36	1,04	0,59	2,52

Anlage A5 – Untersuchungen zum Kapitel 6

Tabelle A5-1: Querschnittswerte der Parameterstudie

Träger	l	b _f	t _f	h _w	t _w	i _y	i _z	I _T	I _{w,min}	c _w	I _w	f _{y,f}	E _f
	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm ⁴]	[cm ⁶]	[kNcm ²]	[cm ⁶]	[kN/cm ²]	[kN/cm ²]
A1000-10100-4	370	10	1	100	0,2	35,71	2,04	6,93	425212	55916	431077	25	21800
A1000-20100-4	370	10	2	100	0,2	41,64	2,36	53,60	867173	211642	889375	25	21800
A1000-40100-4	370	10	4	100	0,2	46,51	2,58	426,93	1802847	327645	1837217	25	21800
A1000-10100-6	570	10	1	100	0,2	35,71	2,04	6,93	425212	55916	434248	25	21800
A1000-20100-6	570	10	2	100	0,2	41,64	2,36	53,60	867173	211642	901375	25	21800
A1000-40100-6	570	10	4	100	0,2	46,51	2,58	426,93	1802847	327645	1855795	25	21800
A1000-10100-12	1170	10	1	100	0,2	35,71	2,04	6,93	425212	55916	443760	25	21800
A1000-20100-12	1170	10	2	100	0,2	41,64	2,36	53,60	867173	211642	937377	25	21800
A1000-40100-12	1170	10	4	100	0,2	46,51	2,58	426,93	1802847	327645	1911530	25	21800
A1000-10100-24	2370	10	1	100	0,2	35,71	2,04	6,93	425212	55916	462783	25	21800
A1000-20100-24	2370	10	2	100	0,2	41,64	2,36	53,60	867173	211642	1009381	25	21800
A1000-40100-24	2370	10	4	100	0,2	46,51	2,58	426,93	1802847	327645	2023000	25	21800
A1000-10250-4	370	25	1	100	0,2	42,68	6,10	16,93	6641446	113187	6653319	25	21800
A1000-20250-4	370	25	2	100	0,2	46,56	6,59	133,60	13547048	280008	13576421	25	21800
A1000-10250-6	570	25	1	100	0,2	42,68	6,10	16,93	6641446	113187	6659737	25	21800
A1000-20250-6	570	25	2	100	0,2	46,56	6,59	133,60	13547048	280008	13592298	25	21800
A1000-40250-6	570	25	4	100	0,2	49,58	6,88	1066,93	28166847	344569	28222530	25	21800
A1000-10250-12	1170	25	1	100	0,2	42,68	6,10	16,93	6641446	113187	6678991	25	21800
A1000-20250-12	1170	25	2	100	0,2	46,56	6,59	133,60	13547048	280008	13639930	25	21800
A1000-40250-12	1170	25	4	100	0,2	49,58	6,88	1066,93	28166847	344569	28281144	25	21800
A1000-10250-24	2370	25	1	100	0,2	42,68	6,10	16,93	6641446	113187	6717499	25	21800
A1000-20250-24	2370	25	2	100	0,2	46,56	6,59	133,60	13547048	280008	13735193	25	21800
A1000-40250-24	2370	25	4	100	0,2	49,58	6,88	1066,93	28166847	344569	28398372	25	21800

Träger	l	b _f	t _f	h _w	t _w	i _y	i _z	I _T	I _{w,min}	c _w	I _w	f _{y,f}	E _f
	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm ⁴]	[cm ⁶]	[kNcm ²]	[cm ⁶]	[kN/cm ²]	[kN/cm ²]
A1000-10350-4	370	35	1	100	0,2	44,54	8,91	23,60	18223831	140621	18238583	25	21800
A1000-20350-4	370	35	2	100	0,2	47,71	9,45	186,93	37172798	298367	37204097	25	21800
A1000-40350-4	370	35	4	100	0,2	50,24	9,76	1493,60	77289514	347993	77326018	25	21800
A1000-10350-6	570	35	1	100	0,2	44,54	8,91	23,60	18223831	140621	18246556	25	21800
A1000-20350-6	570	35	2	100	0,2	47,71	9,45	186,93	37172798	298367	37221015	25	21800
A1000-40350-6	570	35	4	100	0,2	50,24	9,76	1493,60	77289514	347993	77345750	25	21800
A1000-10350-12	1170	35	1	100	0,2	44,54	8,91	23,60	18223831	140621	18270477	25	21800
A1000-20350-12	1170	35	2	100	0,2	47,71	9,45	186,93	37172798	298367	37271770	25	21800
A1000-40350-12	1170	35	4	100	0,2	50,24	9,76	1493,60	77289514	347993	77404947	25	21800
A1000-10350-24	2370	35	1	100	0,2	44,54	8,91	23,60	18223831	140621	18318319	25	21800
A1000-20350-24	2370	35	2	100	0,2	47,71	9,45	186,93	37172798	298367	37373279	25	21800
A1000-40350-24	2370	35	4	100	0,2	50,24	9,76	1493,60	77289514	347993	77523340	25	21800
B1000-10100-4	370	10	1	100	0,25	33,67	1,93	7,19	425374	57725	431429	25	21800
B1000-10100-6	570	10	1	100	0,25	33,67	1,93	7,19	425374	57725	434702	25	21800
B1000-10100-12	1170	10	1	100	0,25	33,67	1,93	7,19	425374	57725	444522	25	21800
B1000-10100-24	2370	10	1	100	0,25	33,67	1,93	7,19	425374	57725	464161	25	21800
B1000-10250-6	570	25	1	100	0,25	41,23	5,89	17,19	6641608	120853	6661138	25	21800
B1000-10250-12	1170	25	1	100	0,25	41,23	5,89	17,19	6641608	120853	6681696	25	21800
B1000-10250-24	2370	25	1	100	0,25	41,23	5,89	17,19	6641608	120853	6722813	25	21800
B1000-10350-4	370	35	1	100	0,25	43,35	8,67	23,85	18223994	152652	18240007	25	21800
B1000-10350-6	570	35	1	100	0,25	43,35	8,67	23,85	18223994	152652	18248662	25	21800
B1000-10350-12	1170	35	1	100	0,25	43,35	8,67	23,85	18223994	152652	18274630	25	21800
B1000-10350-24	2370	35	1	100	0,25	43,35	8,67	23,85	18223994	152652	18326564	25	21800
B1000-20100-4	370	10	2	100	0,25	40,01	2,26	53,85	867339	240124	892528	25	21800
B1000-20100-6	570	10	2	100	0,25	40,01	2,26	53,85	867339	240124	906143	25	21800
B1000-20100-12	1170	10	2	100	0,25	40,01	2,26	53,85	867339	240124	946990	25	21800
B1000-20100-24	2370	10	2	100	0,25	40,01	2,26	53,85	867339	240124	1028684	25	21800

Träger	l	b _f	t _f	h _w	t _w	i _y	i _z	I _T	I _{w,min}	c _w	I _w	f _{y,f}	E _f
	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm ⁴]	[cm ⁶]	[kNcm ²]	[cm ⁶]	[kN/cm ²]	[kN/cm ²]
B1000-20250-6	570	25	2	100	0,25	45,62	6,46	133,85	13547214	332129	13600887	25	21800
B1000-20250-12	1170	25	2	100	0,25	45,62	6,46	133,85	13547214	332129	13657384	25	21800
B1000-20250-24	2370	25	2	100	0,25	45,62	6,46	133,85	13547214	332129	13770380	25	21800
B1000-20350-4	370	35	2	100	0,25	46,98	9,31	187,19	37172964	358277	37210547	25	21800
B1000-20350-6	570	35	2	100	0,25	46,98	9,31	187,19	37172964	358277	37230862	25	21800
B1000-20350-12	1170	35	2	100	0,25	46,98	9,31	187,19	37172964	358277	37291808	25	21800
B1000-20350-24	2370	35	2	100	0,25	46,98	9,31	187,19	37172964	358277	37413700	25	21800
B1000-40100-4	370	10	4	100	0,25	45,39	2,52	427,19	1803019	401342	1845119	25	21800
B1000-40100-6	570	10	4	100	0,25	45,39	2,52	427,19	1803019	401342	1867877	25	21800
B1000-40100-12	1170	10	4	100	0,25	45,39	2,52	427,19	1803019	401342	1936148	25	21800
B1000-40100-24	2370	10	4	100	0,25	45,39	2,52	427,19	1803019	401342	2072691	25	21800
B1000-40250-6	570	25	4	100	0,25	49,03	6,80	1067,19	28167019	427035	28236029	25	21800
B1000-40250-12	1170	25	4	100	0,25	49,03	6,80	1067,19	28167019	427035	28308671	25	21800
B1000-40250-24	2370	25	4	100	0,25	49,03	6,80	1067,19	28167019	427035	28453955	25	21800
B1000-40350-4	370	35	4	100	0,25	49,82	9,68	1493,85	77289685	432307	77335034	25	21800
B1000-40350-6	570	35	4	100	0,25	49,82	9,68	1493,85	77289685	432307	77359547	25	21800
B1000-40350-12	1170	35	4	100	0,25	49,82	9,68	1493,85	77289685	432307	77433086	25	21800
B1000-40350-24	2370	35	4	100	0,25	49,82	9,68	1493,85	77289685	432307	77580164	25	21800
C1000-20250-6	570	25	2	100	0,3	44,73	6,33	134,23	13547460	379183	13608737	25	21800
V6a	570	25	2	100	0,3	44,73	6,33	134,23	13547460	379183	13608737	25	21800
V6b	570	25	2	100	0,3	44,73	6,33	134,23	13547460	379183	13608737	25	21800
V6c	570	25	2	100	0,3	44,73	6,33	134,23	13547460	379183	13608737	25	21800
V5b	570	25	2	100	0,25	45,62	6,46	133,85	13547214	332129	13600887	25	21800

Tabelle A5-2: Biegedrillknick- und Gurtbeulmomente

Träger	I	F _u	M _y	z _p	ζ	c ²	M _{cr}	M _{pl,y}	λ _{Lt}	χ _{Lt}
	[cm]	[kN]	[kNcm]	[cm]	[-]	[cm ²]	[kNcm]	[kNcm]	[-]	[-]
A1000-10100-4	370	125	10000	81,00	1,30	2807,45	8922,19	25250,00	1,68	0,40
A1000-20100-4	370	255	20400	82,00	1,30	3525,95	21225,00	51000,00	1,55	0,40
A1000-40100-4	370	255	20400	84,00	1,30	6174,37	64157,34	104000,00	1,27	0,20
A1000-10100-6	570	37,2	4836	81,00	1,30	3131,35	4101,91	25250,00	2,48	0,19
A1000-20100-6	570	86,2	11206	82,00	1,30	4740,69	11232,74	51000,00	2,13	0,22
A1000-40100-6	570	224	29120	84,00	1,30	10897,18	40478,65	104000,00	1,60	0,28
A1000-10100-12	1170	6,14	1719,2	81,00	1,30	4881,51	1371,50	25250,00	4,29	0,07
A1000-20100-12	1170	18,2	5096	82,00	1,30	11394,50	4996,69	51000,00	3,19	0,10
A1000-40100-12	1170	61,2	17136	84,00	1,30	37052,69	21118,66	104000,00	2,22	0,16
A1000-10100-24	2370	1,51	875,8	81,00	1,30	11884,80	629,33	25250,00	6,33	0,03
A1000-20100-24	2370	4,8	2784	82,00	1,30	38245,20	2636,70	51000,00	4,40	0,05
A1000-40100-24	2370	17,7	10266	84,00	1,30	143305,62	11251,26	104000,00	3,04	0,10
A1000-10250-4	370	506	40480	81,00	1,30	2589,53	130554,72	63125,00	0,70	0,64
A1000-20250-4	370	827	66160	82,00	1,30	2743,59	271544,13	127500,00	0,69	0,52
A1000-10250-6	570	346	44980	81,00	1,30	2639,66	55872,25	63125,00	1,06	0,71
A1000-20250-6	570	673	87490	82,00	1,30	2934,71	120791,47	127500,00	1,03	0,69
A1000-40250-6	570	933	121290	84,00	1,30	4007,18	304617,75	260000,00	0,92	0,47
A1000-10250-12	1170	63,4	17752	81,00	1,30	2911,80	14350,63	63125,00	2,10	0,28
A1000-20250-12	1170	143	40040	82,00	1,30	3988,26	36496,94	127500,00	1,87	0,31
A1000-40250-12	1170	383	107240	84,00	1,30	8183,14	122885,70	260000,00	1,45	0,41
A1000-10250-24	2370	10,9	6322	81,00	1,30	4003,83	4490,54	63125,00	3,75	0,10
A1000-20250-24	2370	29,7	17226	82,00	1,30	8256,18	15220,80	127500,00	2,89	0,14
A1000-40250-24	2370	105	60900	84,00	1,30	25163,34	63333,60	260000,00	2,03	0,23

Träger	I	F _u	M _y	z _p	ζ	c ²	M _{cr}	M _{pl,y}	λ _{Lt}	χ _{Lt}
	[cm]	[kN]	[kNcm]	[cm]	[-]	[cm ²]	[kNcm]	[kNcm]	[-]	[-]
A1000-10350-4	370	325	26000	81,00	1,30	2569,95	356036,25	88375,00	0,50	0,29
A1000-20350-4	370	703	56240	82,00	1,30	2673,02	729559,91	178500,00	0,49	0,32
A1000-40350-4	370	910	72800	84,00	1,30	2984,27	1571397,75	364000,00	0,48	0,20
A1000-10350-6	570	643	83590	81,00	1,30	2595,28	151218,58	88375,00	0,76	0,95
A1000-20350-6	570	865	112450	82,00	1,30	2770,11	316409,08	178500,00	0,75	0,63
A1000-40350-6	570	933	121290	84,00	1,30	3368,08	729324,81	364000,00	0,71	0,33
A1000-10350-12	1170	133	37240	81,00	1,30	2733,09	37424,39	88375,00	1,54	0,42
A1000-20350-12	1170	283	79240	82,00	1,30	3306,22	86497,07	178500,00	1,44	0,44
A1000-40350-12	1170	676	189280	84,00	1,30	5497,73	252397,11	364000,00	1,20	0,52
A1000-10350-24	2370	23,7	13746	81,00	1,30	3286,94	10566,41	88375,00	2,89	0,16
A1000-20350-24	2370	63	36540	82,00	1,30	5480,28	31046,80	178500,00	2,40	0,20
A1000-40350-24	2370	192	111360	84,00	1,30	14158,92	119827,61	364000,00	1,74	0,31
B1000-10100-4	370	127	10160	81,00	1,30	2816,62	8949,02	25250,00	1,68	0,40
B1000-10100-6	570	37,8	4914	81,00	1,30	3152,19	4125,11	25250,00	2,47	0,19
B1000-10100-12	1170	6,29	1761,2	81,00	1,30	4965,57	1389,70	25250,00	4,26	0,07
B1000-10100-24	2370	1,2	696	81,00	1,30	12222,34	641,55	25250,00	6,27	0,03
B1000-10250-6	570	349	45370	81,00	1,30	2641,37	55902,91	63125,00	1,06	0,72
B1000-10250-12	1170	63,4	17752	81,00	1,30	2917,98	14375,34	63125,00	2,10	0,28
B1000-10250-24	2370	10,9	6322	81,00	1,30	4027,15	4510,76	63125,00	3,74	0,10
B1000-10350-4	370	468	37440	81,00	1,30	2570,31	356080,63	88375,00	0,50	0,42
B1000-10350-6	570	738	95940	81,00	1,30	2596,00	151254,06	88375,00	0,76	1,09
B1000-10350-12	1170	133	37240	81,00	1,30	2735,55	37451,83	88375,00	1,54	0,42
B1000-10350-24	2370	23,8	13804	81,00	1,30	3295,85	10589,09	88375,00	2,89	0,16
B1000-20100-4	370	259	20720	82,00	1,30	3538,80	21289,68	51000,00	1,55	0,41
B1000-20100-6	570	87,5	11375	82,00	1,30	4763,74	11276,14	51000,00	2,13	0,22
B1000-20100-12	1170	18,5	5180	82,00	1,30	11461,85	5017,68	51000,00	3,19	0,10
B1000-20100-24	2370	4,87	2824,6	82,00	1,30	38462,76	2646,23	51000,00	4,39	0,06

Träger	I	F _u	M _y	z _p	ζ	c ²	M _{cr}	M _{pl,y}	λ _{Lt}	χ _{Lt}
	[cm]	[kN]	[kNcm]	[cm]	[-]	[cm ²]	[kNcm]	[kNcm]	[-]	[-]
B1000-20250-6	570	610	79300	82,00	1,30	2936,94	120866,57	127500,00	1,03	0,62
B1000-20250-12	1170	143	40040	82,00	1,30	3994,17	36539,12	127500,00	1,87	0,31
B1000-20250-24	2370	29,8	17284	82,00	1,30	8273,53	15243,54	127500,00	2,89	0,14
B1000-20350-4	370	822	65760	82,00	1,30	2673,56	729681,38	178500,00	0,49	0,37
B1000-20350-6	570	1060	137800	82,00	1,30	2771,01	316493,66	178500,00	0,75	0,77
B1000-20350-12	1170	284	79520	82,00	1,30	3308,56	86545,77	178500,00	1,44	0,45
B1000-20350-24	2370	63,1	36598	82,00	1,30	5486,98	31075,10	178500,00	2,40	0,21
B1000-40100-4	370	259	20720	84,00	1,30	6187,67	64265,08	104000,00	1,27	0,20
B1000-40100-6	570	230	29900	84,00	1,30	10919,09	40538,37	104000,00	1,60	0,29
B1000-40100-12	1170	62,2	17416	84,00	1,30	37106,43	21139,25	104000,00	2,22	0,17
B1000-40100-24	2370	17	9860	84,00	1,30	143449,98	11258,62	104000,00	3,04	0,09
B1000-40250-6	570	1150	149500	84,00	1,30	4008,76	304712,90	260000,00	0,92	0,58
B1000-40250-12	1170	383	107240	84,00	1,30	8187,04	122928,01	260000,00	1,45	0,41
B1000-40250-24	2370	105	60900	84,00	1,30	25173,87	63350,63	260000,00	2,03	0,23
B1000-40350-4	370	1140	91200	84,00	1,30	2984,62	1571552,21	364000,00	0,48	0,25
B1000-40350-6	570	1180	153400	84,00	1,30	3368,67	729427,39	364000,00	0,71	0,42
B1000-40350-12	1170	684	191520	84,00	1,30	5499,18	252447,25	364000,00	1,20	0,53
B1000-40350-24	2370	192	111360	84,00	1,30	14162,82	119849,89	364000,00	1,74	0,31
C1000-20250-6	570	795	103350	82,00	1,30	2939,32	120947,16	127500,00	1,03	0,81
V6a	570	810	105300	82,00	1,30	2939,32	120947,16	127500,00	1,03	0,83
V6b	570	780	101400	82,00	1,30	2939,32	120947,16	127500,00	1,03	0,80
V6c	570	795	103350	82,00	1,30	2939,32	120947,16	127500,00	1,03	0,81
V5b	514	590	27260	82,00	1,30	2936,94	120866,57	127500,00	1,03	0,53