

Paul Kugler

Stabilitätsverhalten von T-Profilen bei Normalkraft- u. Momentenbeanspruchung

Masterarbeit

Technische Universität Graz

Institut für Stahlbau

Betreuer:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Harald Unterweger

Mitbetreuender Assistent:

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Taras

Graz, März 2014

Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz, _____

Date

Signature

Eidesstattliche Erklärung¹

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am _____

Datum

Unterschrift

¹Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008; Genehmigung des Senates am 1.12.2008

Abstract

The Eurocode contains only a few clauses which specifically deal with the buckling design of T-sections, instead opting for a more general representation of buckling strength that is supposed to cover all types of sections. At the same time, additional information may be given in National Annexes (NA). In Austria, the NA [5] to EN 1993-1-1 [6] contains specific modifications of the standard EC3 buckling rules that apply to mono-symmetric sections; from a geometric point of view, this includes standard T-sections. However, as is shown in this thesis, even these rules are not very accurate in describing the buckling behaviour of these sections. Focusing on the buckling behaviour of T-section beam-columns, a numerical study was made for representative T-sections. The thesis describes the results taken from the numerical study, as well as the comparison with the current Eurocode 3 design rules (combined with the Austrian NA). The difficulties in developing practical buckling design rules for T-sections are due to the peculiar behaviour of these shapes: i. for one, torsional-flexural buckling is the dominant global out-of-plane buckling mode for T-sections in compression, as opposed to the similar weak-axis flexural mode present e.g. in double-symmetric I-sections; ii. in addition, for class 4 sections, the local and the global (torsional) buckling mode are sometimes hard to distinguish and do not interact in the same way as in other types of cross-sections. The current EC3 design rules are discussed in this thesis and a first proposal of alternative design rules for a quick design of T-section beam-columns was made.

Kurzfassung

Im Eurocode 3 [6] finden sich nur wenige Stellen die sich speziell mit der Tragfähigkeit von T-Profilen bei Stabilitätsgefährdung befassen. Diese Norm bevorzugt einen allgemeineren Ansatz zum Stabilitätsverhalten von Querschnitten um möglichst alle Profiltypen abzudecken. Gleichzeitig ist es erlaubt in den jeweiligen Nationalen Anhängen (NA) Zusatzregeln anzugeben. Der österreichische Nationale Anhang [5] enthält für einfach-symmetrische I-Profile einige Modifikationen der bekannten Bemessungsregeln. Geometrisch betrachtet stellen T-Profile den Extremfall eines einfach-symmetrischen I-Profiles dar. In dieser Arbeit wird jedoch gezeigt, dass sogar diese umfangreichen Zusatzregeln das Stabilitätsverhalten von T-Profilen nur sehr unzureichend beschreiben. Um die Ergebnisse laut Eurocode 3 NA [5] vergleichen zu können, wurde eine realitätsnahe numerische Untersuchung (GMNIA Analyse) für repräsentative T-Profile durchgeführt. Die Herausforderung in der Entwicklung praktischer Bemessungsregeln für T-Profile liegt in ihrem besonderen Tragverhalten. Zum einen wird bei zentrischer Normalkraftbeanspruchung gegenüber doppelt-symmetrischen Profilen Biegedrillknicken und nicht Biegeknicken um die schwache Achse maßgebend. Zum anderen sind die lokalen und globalen Beul- bzw. Knickfiguren bei Querschnittsklasse 4 (dies sind beulgefährdete Querschnitte) nur schwer zu unterscheiden und sie interagieren anders als bei doppelt-symmetrischen Profilen. Die Bemessungsregeln des Eurocode 3 NA [5] werden beschrieben und ein erstes Konzept für einen Bemessungsvorschlag zur Bemessung eines T-Profiles unter Normalkraft- u. Momentenbeanspruchung (N & M_y) erstellt.

Danksagung

Ich möchte mich bei meinen Eltern und Großeltern für die großzügige emotionale und finanzielle Unterstützung meines Studiums bedanken! Eure Hilfe musste nie erbeten werden, sondern kam immer von Herzen, das ist nicht selbstverständlich und sehr nobel.

Auch dir Dana möchte ich für die gemeinsamen Jahre danken, du hast mich immer unterstützt, mir den Rücken frei gehalten und warst immer eine verlässliche Partnerin an meiner Seite! Du bist eine wundervolle Frau und Mutter!

Inhaltsverzeichnis

Abstract	iii
Kurzfassung	iv
Danksagung	v
Verwendete Symbole und Kurzbezeichnungen	x
1 Aufgabenstellung	1
2 Ausgewählte Profile und Definitionen	3
3 Bemessung eines T-Profils nach Eurocode	5
3.1 Bestimmung der Querschnittsklasse	9
3.2 Effektiver Querschnitt - Konzept effektiver Dicke	15
3.3 Berechnungswerte	16
3.4 Berechnungsmethoden für $N_{cr,TF}$	22
3.5 Berechnungsmethoden für M_{cr}	23
4 Die GMNIA Analyse zur Ermittlung realitätsnaher Traglasten	28
4.1 Materialmodell	28
4.2 Imperfektionsannahmen	29
4.3 FEM Diskretisierung	31
5 Ergebnisse - Traglastergebnisse im Vergleich zu Eurocoderegeln	33
5.1 Reine Druckbeanspruchung	33
5.2 Reine Momentenbeanspruchung M_y	35
5.3 Kombinierte Beanspruchung = N & M_y	36

Inhaltsverzeichnis

6	Bemessungsvorschlag - Beanspruchung $N&M_y$ bei T-Profilen	52
6.1	Ergebnisvergleich - Interaktionsdiagramme	55
6.2	Anmerkungen zu den Ergebnissen	66
7	Zusammenfassung	70
	Literatur	71
	Anhang A. Klassifizierungsalgorithmen	74
A.1	Algorithmus 1	74
A.2	Algorithmus 2	78
	Anhang B. M_{cr} laut EC3 NA und AISC	81
	Anhang C. Bemessungsbeispiel laut EC3 NA	86
	Anhang D. Bemessungsbeispiel laut Vorschlag	101
	Anhang E. ABAQUS Inputfile	106
E.3	GMNIA Analyse	106
E.4	LBA Analyse	128

Abbildungsverzeichnis

2.1	Profildefinition und statisches System	3
3.1	Klassifizierung	11
3.2	Winkel und Querschnittsklassen im Interaktionsdiagramm . .	12
3.3	Einseitig gestützte druckbeanspruchte Teilflächen	17
3.4	Vergleich $\bar{\lambda}_{TF}$	23
3.5	Modellvorstellung für M_{cr}	27
4.1	Materialgesetz	29
4.2	Eigenspannungsverlauf	30
4.3	Geometrische Imperfektionen	31
4.4	FEM Netzmodell	32
5.1	T-Profile bei reiner Druckbeanspruchung	34
5.2	Biegedrillknicken von kompakten T-Profilen	35
5.3	M-N-Interaktionsdiagramm $\frac{1}{2}$ IPE300-LB10	37
5.4	M-N-Interaktionsdiagramm $\frac{1}{2}$ IPE300-LB15	37
5.5	M-N-Interaktionsdiagramm $\frac{1}{2}$ IPE300-LB20	38
5.6	M-N-Interaktionsdiagramm $\frac{1}{2}$ IPE300-LB25	38
5.7	M-N-Interaktionsdiagramm $\frac{1}{2}$ IPE600-LB10	40
5.8	M-N-Interaktionsdiagramm $\frac{1}{2}$ IPE600-LB15	40
5.9	M-N-Interaktionsdiagramm $\frac{1}{2}$ IPE600-LB20	41
5.10	M-N-Interaktionsdiagramm $\frac{1}{2}$ IPE600-LB25	41
5.11	M-N-Interaktionsdiagramm $\frac{1}{2}$ HEB360-LB10	43
5.12	M-N-Interaktionsdiagramm $\frac{1}{2}$ HEB360-LB15	43
5.13	M-N-Interaktionsdiagramm $\frac{1}{2}$ HEB360-LB20	44
5.14	M-N-Interaktionsdiagramm $\frac{1}{2}$ HEB360-LB25	44
5.15	M-N-Interaktionsdiagramm $\frac{1}{2}$ HEM500-LB10	46

Abbildungsverzeichnis

5.16	M-N-Interaktionsdiagramm	$\frac{1}{2}$ HEM500-LB15	46
5.17	M-N-Interaktionsdiagramm	$\frac{1}{2}$ HEM500-LB20	47
5.18	M-N-Interaktionsdiagramm	$\frac{1}{2}$ HEM500-LB25	47
5.19	M-N-Interaktionsdiagramm	KAIM140-LB10	48
5.20	M-N-Interaktionsdiagramm	KAIM140-LB15	48
5.21	M-N-Interaktionsdiagramm	KAIM140-LB20	49
5.22	M-N-Interaktionsdiagramm	KAIM140-LB25	49
6.1	M-N-Interaktionsdiagramm	$\frac{1}{2}$ IPE300-LB10	56
6.2	M-N-Interaktionsdiagramm	$\frac{1}{2}$ IPE300-LB15	56
6.3	M-N-Interaktionsdiagramm	$\frac{1}{2}$ IPE300-LB20	57
6.4	M-N-Interaktionsdiagramm	$\frac{1}{2}$ IPE300-LB25	57
6.5	M-N-Interaktionsdiagramm	$\frac{1}{2}$ IPE600-LB10	58
6.6	M-N-Interaktionsdiagramm	$\frac{1}{2}$ IPE600-LB15	58
6.7	M-N-Interaktionsdiagramm	$\frac{1}{2}$ IPE600-LB20	59
6.8	M-N-Interaktionsdiagramm	$\frac{1}{2}$ IPE600-LB25	59
6.9	M-N-Interaktionsdiagramm	$\frac{1}{2}$ HEB360-LB10	60
6.10	M-N-Interaktionsdiagramm	$\frac{1}{2}$ HEB360-LB15	60
6.11	M-N-Interaktionsdiagramm	$\frac{1}{2}$ HEB360-LB20	61
6.12	M-N-Interaktionsdiagramm	$\frac{1}{2}$ HEB360-LB25	61
6.13	M-N-Interaktionsdiagramm	$\frac{1}{2}$ HEM500-LB10	62
6.14	M-N-Interaktionsdiagramm	$\frac{1}{2}$ HEM500-LB15	62
6.15	M-N-Interaktionsdiagramm	$\frac{1}{2}$ HEM500-LB20	63
6.16	M-N-Interaktionsdiagramm	$\frac{1}{2}$ HEM500-LB25	63
6.17	M-N-Interaktionsdiagramm	KAIM140-LB10	64
6.18	M-N-Interaktionsdiagramm	KAIM140-LB15	64
6.19	M-N-Interaktionsdiagramm	KAIM140-LB20	65
6.20	M-N-Interaktionsdiagramm	KAIM140-LB25	65
6.21	Querschnittsklasseneinteilung		66
6.22	M-N-Interaktionsdiagramm	$\frac{1}{2}$ IPE300-LB10	69
6.23	M-N-Interaktionsdiagramm	$\frac{1}{2}$ IPE300-LB25	69

Verwendete Symbole und Kurzbezeichnungen

a) Kurzbezeichnungen

Berechnungsverfahren

GMNIA	Geometrically and materially nonlinear analysis with imperfections
LBA	Linear buckling analysis
FEM	Finite Elemente Methode

Versagensmechanismen

LTB	Lateral-torsional buckling, d. h. Biegedrillknicken
TFB	Torsional-flexural buckling, d. h. Biegedrillknicken zufolge N alleine
BDK	Biegedrillknicken
BK _{yy}	Biegeknicken um die y-Achse
BK _{zz}	Biegeknicken um die z-Achse

b) Verwendete Symbole

Schnittkraft und Spannung

M	Moment
N	Normalkraft
σ	Spannung
ψ	Kennwert zur Spannungsverteilung (Verhältnis der Randspannungen am Querschnittsteil)

Verwendete Symbole und Kurzbezeichnungen

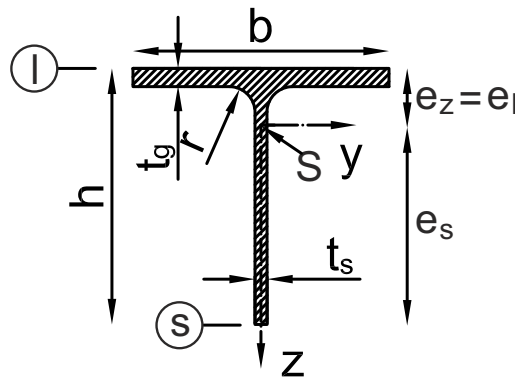
Werkstoff

E	Elastizitätsmodul
f_y	Streckgrenze
ν	Poissonzahl

Stab

L, l	Stablänge
L/B	Stablänge bezogen auf die Profilbreite
e	Stich der geometrischen Imperfektion
$\bar{\lambda}$	bezogene Schlankheit
χ	Abminderungsfaktor nach Eurocode 3
β_M	Momentenbeiwert nach Eurocode 3

Querschnitt



h	Höhe des Profils
b, B	Breite des Profils
t	Dicke (Steg bzw. Flansch)
r	Ausrundungsradius
e	Schwerpunktsabstand
l	Querschnittsrand am Flansch
s	Querschnittsrand am freien Stegende

Verwendete Symbole und Kurzbezeichnungen

A	Querschnittsfläche
W	Flächenmoment 1. Grades (Widerstandsmoment) um die y -Achse
I	Flächenmoment 2. Grades (Flächenträgheitsmoment) um die y -Achse
i	Trägheitsradius um die y -Achse
IPE	Mittelbreite I-Träger mit parallelen Flanschflächen
HEB	Breite I-Träger mit parallelen Flanschflächen (Normale Ausführung)
HEM	Breite I-Träger mit parallelen Flanschflächen (Verstärkte Ausführung)

c) Verwendete Indizes

g, f	Gurt bzw. Flansch
s, w	Steg bzw. Web
el	elastisch
pl	plastisch
R	Beanspruchbarkeit (Widerstand)
E	Beanspruchung (Einwirkung)
d	Design Wert
k	charakteristischer Wert
cr	ideale Verzweigungslast
LT	Biegedrillknicken (lateral torsional buckling)
TF	Biegedrillknicken zufolge N alleine (torsional flexural buckling)
T	Torsion
p	polar
Eff	effektiver Querschnitt, ermittelt bei konstanter Druckspannung
$EffM+$	effektiver Querschnitt, ermittelt mit der Spannungsverteilung bei rein positivem Biegemoment
$EffM-$	effektiver Querschnitt, ermittelt mit der Spannungsverteilung bei rein negativem Biegemoment

Anm.:

$M+$	positives Biegemoment bedeutet Druckspannungen in Achse s
$M-$	negatives Biegemoment bedeutet Druckspannungen in Achse l

1 Aufgabenstellung

Im Stahlbau werden häufig doppelt symmetrische Profile eingesetzt. Für diese Profile wurden dementsprechend auch die meisten Bemessungsformeln im Eurocode 3 [6] abgeleitet. In einigen Fällen kommen jedoch einfach symmetrische Profile zum Einsatz. In dieser Arbeit soll die Tragfähigkeit von T-Profilen unter Drucknormalkraft und konstanter Momentenbeanspruchung in der Symmetrieebene (M_y) untersucht werden, da T-Profile in ihrem Tragverhalten gegenüber doppelt symmetrischen Profile einige Besonderheiten aufweisen.

In der in Österreich gültigen Bemessungsnorm für den Stahlbau, dem Eurocode 3 [6], werden Bemessungsformeln bei Stabilitätsgefährdung (Biegeknicken, Biegedrillknicken) für verschiedene Stahlprofilquerschnitte angeführt. Grundsätzlich kann ein Stahlprofil so per Hand bemessen werden. Allerdings beruhen diese Formeln zum Großteil auf Untersuchungen an doppeltsymmetrischen I-Profilen und wurden für diese abgeleitet. Sie sind daher streng genommen auch nur für gewalzte oder geschweißte doppelt symmetrische I-, H- und Hohlprofile gültig. Im Österreichischen Nationalen Anhang [5] werden diese Regeln um Bemessungsformeln für einfach symmetrische I-Profile ergänzt. Da T-Profile geometrisch gesehen den Extremfall eines einfach symmetrischen I-Profils mit einseitig „verschwindendem“ Flansch darstellen, soll in dieser Arbeit untersucht werden inwieweit diese Ergänzungen auch das Tragverhalten bzw. die Tragfähigkeit eines T-Profils beschreiben.

Weiters gibt es im Eurocode [8] auch die Möglichkeit im Falle der Stabilitätsgefährdung (auch bei überlagertem lokalen Beulen) genauere Nachweise mittels einer geometrisch und materiell nichtlinearen Finiten Elemente Methode (FEM) Berechnung mit Imperfektionen (sog. „GMNIA“ - Berechnung) durchzuführen. Das gewählte GMNIA Modell ermöglicht es im Stahlbau

1 Aufgabenstellung

realitätsnahe Aussagen zur tatsächlichen Tragfähigkeit der T-Profile zu treffen. Der Vergleich der Bemessungsformeln im Österreichischen Nationalen Anhang und der realitätsnahen GMNIA Ergebnisse soll in M-N-Interaktionsdiagrammen für ausgewählte Profile und Trägerlängen beispielhaft dargestellt werden und so unwirtschaftliche Bemessungsergebnisse aufzeigen. Neue, genauere und nach Möglichkeit einfacher handzuhabende Formeln sollen auf der Grundlage dieser Ergebnisse entwickelt werden, als Basis für eventuelle weitere experimentelle und probabilistische Studien hin zur Entwicklung neuer eigener Bemessungsregeln für T-Profile.

2 Ausgewählte Profile und Definitionen

In der Baupraxis kommen gewalzte oder geschweißte T-Profile zum Einsatz, wobei bei den gewalzten Profilen häufig halbierte I-Profile verwendet werden. Ausgewählt wurden vier halbierte Walzprofile und ein geschweißtes T-Profil welches Peter Kaim in seiner Dissertation [4] anführt: $\frac{1}{2}$ IPE-300, $\frac{1}{2}$ IPE-600, $\frac{1}{2}$ HE-B-360, $\frac{1}{2}$ HE-M-500 und „Kaim-140“. Diese Profile sind unterschiedlich schlank und decken daher verschiedene Querschnittsklassen ab.

Um die Auswirkung der Schlankheit des gesamten Stabes zu untersuchen wurden von jedem Querschnitt vier verschiedene Stablängen ($L/B = 10, 15, 20$ und 25) gewählt. Das L/B Verhältnis gibt die Länge des Stabes bezogen auf die Profilbreite an.

Die Momentenrichtung spielt bei einem einfach symmetrischen Profil eine wesentliche Rolle. In dieser Arbeit bedeutet ein positives Moment, dass

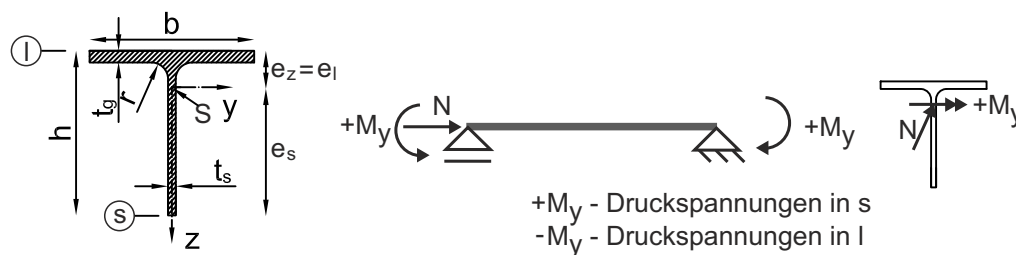

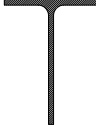





Abbildung 2.1: Profildefinition und statisches System

2 Ausgewählte Profile und Definitionen

Tabelle 2.1: Querschnittswerte der untersuchten Profile

					
	$\frac{1}{2}$ IPE-300	$\frac{1}{2}$ IPE-600	$\frac{1}{2}$ HE-B-360	$\frac{1}{2}$ HE-M-500	„Kaim-140“
A [cm ²]	26,90	78,00	90,30	172,00	39,75
h [cm]	15,00	30,00	18,00	26,20	14,00
b [cm]	15,00	22,00	30,00	30,60	14,00
t_g [cm]	1,07	1,90	2,25	4,00	1,50
t_s [cm]	0,71	1,20	1,25	2,10	1,50
r [cm]	1,50	2,40	2,70	2,70	-
e_z [cm]	3,32	7,48	3,15	5,59	4,05
I_y [cm ⁴]	509	6500	1670	7880	733,46
I_z [cm ⁴]	302	1690	5070	9580	346,52
$W_{y,l}$ [cm ³]	153,31	868,98	530,16	1409,66	181,02
$W_{y,s}$ [cm ³]	43,58	288,63	112,46	382,34	73,73
$W_{y,pl}$ [cm ³]	77,38	514,55	216,45	721,33	132,85
$N_{pl,k}$ [kN]	632,20	1833,15	2122,23	4042,34	934,13
$M_{pl,y,k}$ [kNcm]	1818	12092	5087	16952	3122

der Gurt gezogen und das freie Ende des Steges gedrückt wird. Abbildung 2.1 beschreibt das für die Untersuchungen gewählte statische System und stellt M_y in positiver Richtung wirkend dar. Das System entspricht einem beidseitig gabelgelagertem Einfeldträger. In Tabelle 2.1 werden die Querschnittswerte der in dieser Arbeit untersuchten Profile dargestellt.

3 Bemessung eines T-Profiles nach Eurocode

In diesem Kapitel soll die Bemessung eines T-Profiles laut Eurocode 3 [6] erläutert werden. Es werden zwei verschiedene Herangehensweisen gezeigt. Zum einen die Anwendung der Formeln für einfach symmetrische Profile, welche nur im Österreichischen Nationalen Anhang [5] zusätzlich angeführt werden, zum anderen die numerische Berechnung mit Hilfe der Finiten Elemente Methode (FEM).

Anm.: Nachfolgend werden direkte Auszüge der Normen schräg gedruckt. Ergänzende Kommentare seitens des Autors werden vorweg mit „Anm.“ gekennzeichnet.

Auszug aus ÖNORM B 1993-1-1, 2007 [5], Anhang B:

Für Stäbe mit einfach-symmetrischen I-, H- und rechteckigen Hohlquerschnitten dürfen, falls keine genaueren Nachweise geführt werden, die Berechnungsformeln des Verfahrens 2 (Anm.: nach Anhang B von EN 1993-1-1) in der folgenden modifizierten Form angewendet werden: Es werden im Folgenden die Berechnungsformeln für den Standardfall von zur z-Achse symmetrischen Querschnitten unter Druck und einachsiger Biegung $M_{y,Ed}$ angegeben. Wegen der Unsymmetrie des Querschnitts ist zwischen positiven und negativen Werten von $M_{y,Ed}$ zu unterscheiden. Werte $M_{y,Ed}$ mit positivem Vorzeichen sind solche, die Druck am kleineren Gurt des Querschnitts erzeugen. Bei Querschnitten der Klassen 3 und 4 sind die Biegebeanspruchbarkeiten $M_{y,Rd}$ und die Biegedrillknickschlankheiten $\bar{\lambda}_{LT}$ bzw. die zugehörigen Abminderungsfaktoren χ_{LT} auf den jeweils maßgebenden kleineren oder größeren Gurt des Querschnitts zu beziehen, siehe Bild B.1.

3 Bemessung eines T-Profiles nach Eurocode

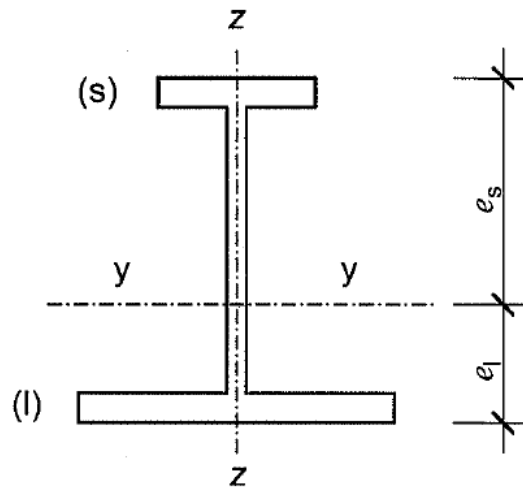


Bild B.1

Bei T-Profilen stellt der Flansch in Bezug auf diese Definition den größeren Gurt eines einfach symmetrischen I-Profiles dar. Querschnittswerte welche sich auf diese Seite des Profils beziehen haben den Index *l* für large. Querschnittswerte welche sich auf die Seite des Stegandes bei einem T-Profil bzw. auf die Seite des kleineren Gurtes bei einem einfach symmetrischen I-Profil beziehen haben den Index *s* für small.

$$W_{y,l} = \frac{I_y}{e_l} \quad (3.1)$$

$$W_{y,s} = \frac{I_y}{h - e_l} \quad (3.2)$$

Auch für M_{cr} , die Schlankheiten $\bar{\lambda}_y$, $\bar{\lambda}_z$ und $\bar{\lambda}_{LT}$ und Abminderungsfaktoren $\bar{\chi}_y$, $\bar{\chi}_z$ und $\bar{\chi}_{LT}$ ist die betrachtete Momentenrichtung von Bedeutung und wird mit dem Index *l* oder *s* gekennzeichnet. Zur Bestimmung von M_{cr} kann entweder die Formel aus [5], Kapitel 6.7.1 (2) oder z. B. die freie Software LTBeam¹ verwendet werden. In dieser Arbeit wurde die Software

¹www.cticm.com, Version 1.0.10

3 Bemessung eines T-Profiles nach Eurocode

LTBeam verwendet, da sie für T-Profile genauere Ergebnisse liefert. Die Berechnungsmethoden für M_{cr} werden in Kapitel 3.5 beschrieben.

Weiter in ÖNORM B 1993-1-1, 2007 [5], Anhang B:

(2) *verdrehweiche Stäbe*²

Für die nachfolgenden Berechnungsformeln gelten die in 6.8 angeführten Formeln für die Beiwerte k_y und k_{LT} sowie für die C_m -Beiwerte.

BDK um $y - y$:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y * N_{Rd}} + k_y * \frac{C_{my} * M_{y,Ed}}{\chi_{LT} * M_{y,Rd}} \leq 1,0 \quad (17)$$

$M_{y,Ed}$ ist mit dem Absolutwert einzusetzen. χ_{LT} ist für die Momentenrichtung von $M_{y,Ed}$ zu bestimmen. Bei Klasse 3 und 4 Querschnitten ist $M_{y,Rd}$ für den unter $M_{y,Ed}$ gedrückten Gurt zu bestimmen.

BDK um $z - z$:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_{TF} * N_{Rd}} + k_{LT} * \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT(s)} * M_{y,Rd(s)}} \leq 1,0 \quad (18)$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z * N_{Rd}} - k_{LT} * \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT(l)} * M_{y,Rd(l)}} \leq 1,0 \quad (19)$$

In die Gleichungen (18) und (19) ist $M_{y,Ed}$ vorzeichengerecht einzusetzen. (Für positive $M_{y,Ed}$ ist Gleichung (18) maßgebend. Bei negativen $M_{y,Ed}$ gilt Gleichung (18) für kleinere Werte von $M_{y,Ed}$ und Gleichung (19) für größere Werte $M_{y,Ed}$.) Falls bei Querschnitten der Klassen 3 und 4 für negative Werte von $M_{y,Ed}$ die Zugspannung im kleineren Gurt maßgebend wird, sind die Gleichungen (15) und (16) zu erfüllen.

$M_{y,Ed}$ ist mit dem Absolutwert einzusetzen.

²Anm.: Darunter fallen T- u. I-Querschnitte

3 Bemessung eines T-Profiles nach Eurocode

für $\bar{\lambda}_y \leq 1$:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} * \left(\frac{1}{\chi_y} - 2 + \bar{\lambda}_y \right) + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd(s)}} \leq 1,0 \quad (15)$$

für $\bar{\lambda}_y > 1$:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} * \left(\frac{1}{\chi_y} - 1,5 + 0,5\bar{\lambda}_y \right) + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd(s)}} \leq 1,0 \quad (16)$$

Anm.: Gleichung (15) und (16) sind dazu gedacht ein Zugversagen im kleineren Gurt eines einfach symmetrischen I-Profiles bzw. im Steg eines T-Profiles zu verhindern.

- Beiwerte aus ÖNORM B 1993-1-1, 2007 [5] Kapitel 6.8:

$$n_y = \frac{N_{Ed}}{\chi_y * N_{Rd}} \quad n_z = \frac{N_{Ed}}{\chi_z * N_{Rd}}$$

Klasse 1 und 2:

$$k_y = 1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2)n_y \leq 1 + 0,8n_y$$

$$k_{LT} = 1 - \frac{0,1\bar{\lambda}_z n_z}{C_{MLT} - 0,25} \geq 1 - \frac{0,1n_z}{C_{MLT} - 0,25}$$

Klasse 3 und 4:

$$k_y = 1 + 0,6\bar{\lambda}_y n_y \leq 1 + 0,6n_y$$

$$k_{LT} = 1 - \frac{0,05\bar{\lambda}_z n_z}{C_{MLT} - 0,25} \geq 1 - \frac{0,05n_z}{C_{MLT} - 0,25}$$

Im Anhang A.2 ist ein vollständiges Bemessungsbeispiel für ein $\frac{1}{2}$ IPE-300 Profil mit einem L/B Verhältnis von 10 angeführt.

3.1 Bestimmung der Querschnittsklasse

Die Querschnittsklasse ist maßgebend für die zu verwendenden Querschnittswerte und Formeln und daher essentiell für die Bemessung. Sie legt fest ob der plastische (Klasse 1, 2) oder der elastische Querschnittswiderstand (Klasse 3) angesetzt werden darf, oder aber auch lokales Beulen (Klasse 4) erfasst werden muss. Die normgerechte Klassifizierung eines T-Profiles ist bei weitem nicht so trivial wie es auf den ersten Blick erscheinen mag und wird deswegen im Folgenden näher beschrieben. Manche Softwarepakete bieten zwar eine automatische Querschnittsklassifizierung an, bei einfach symmetrischen Profilen ist jedoch Vorsicht geboten.

Die Klassifizierung erfolgt laut Eurocode 3 [6] Kapitel 5.5. Hier einige zusammenfassende Auszüge:

- (1) *Es werden vier Querschnittsklassen definiert:*
 - a) *Querschnitte der Klasse 1 können plastische Gelenke oder Fließzonen mit ausreichender plastischer Momententragfähigkeit und Rotationskapazität für die plastischen Berechnung ausbilden;*
 - b) *Querschnitte der Klasse 2 können die plastische Momententragfähigkeit entwickeln, haben aber aufgrund örtlichen Beulens nur eine begrenzte Rotationskapazität;*
 - c) *Querschnitte der Klasse 3 erreichen für eine elastische Spannungsverteilung die Streckgrenze in der ungünstigsten Querschnittsfaser, können aber wegen örtlichen Beulens die plastische Momententragfähigkeit nicht entwickeln;³*
 - d) *Querschnitte der Klasse 4 sind solche, bei denen örtliches Beulen vor Erreichen der Streckgrenze in einem oder mehreren Teilen des Querschnitts auftritt.*
- (2) *Bei Querschnitten der Klasse 4 dürfen effektive Breiten verwendet werden, um die Abminderung der Beanspruchbarkeit infolge lokalen Beulens zu berücksichtigen, siehe EN 1993-1-5, 5.2.2.*
- (3) *Die Klassifizierung eines Querschnittes ist vom c/t Verhältnis seiner druckbeanspruchten Teile abhängig.⁴*

³Anm.: Sie erreichen also die elastische Momententragfähigkeit.

⁴Anm.: Man unterscheidet beidseits und nur einseitig gelagerte Querschnittsteile.

3 Bemessung eines T-Profiles nach Eurocode

- (4) *Druckbeanspruchte Querschnittsteile können entweder vollständig oder teilweise unter der zu untersuchenden Einwirkungskombination Druckspannungen aufweisen.⁵*
- (5) *Die verschiedenen druckbeanspruchten Querschnittsteile (wie z. B. Steg oder Flansch)⁶ können im Allgemeinen verschiedenen Querschnittsklassen zugeordnet werden.*
- (6) *Ein Querschnitt wird durch die höchste (ungünstigste) Klasse seiner druckbeanspruchten Querschnittsteile klassifiziert.*

Wie die zitierten Punkte zeigen, gilt es die druckbeanspruchten Teile des Querschnitts herauszufinden. Hierfür ist die aktuelle Beanspruchungssituation durch Normalkraft und Moment entscheidend. Genauer gesagt ist das Verhältnis zwischen Normalkraft und Moment maßgebend. Die aktuelle Belastung muss mit diesem Verhältnis so lange gesteigert werden bis der Querschnitt voll ausgelastet ist (elastische Spannungsverteilung für Klasse 3, 4 bzw. plastische spannungsverteilung für Klasse 1, 2). So ergibt sich jene Spannungsverteilung welche für die Klassifizierung maßgebend ist. Abbildung 3.1 zeigt die Klassengrenzen für alle möglichen Spannungsverteilungen. Die Länge c wird für die Klassifizierung des Steges laut Gleichung 3.3 definiert.

$$c = h - t_g - r \quad (3.3)$$

Zuerst muss eine plastische Spannungsverteilung angenommen werden, um prüfen zu können, ob es sich um Querschnittsklasse 1 oder 2 handelt. Sind die Bedingungen für Querschnittsklasse 1 oder 2 laut Abbildung 3.1 nicht erfüllt, muss die elastische Spannungsverteilung bestimmt werden, um zwischen Klasse 3 und 4 unterscheiden zu können.

Bei reinem Druck infolge Normalkraft N kann ein T-Profil einfach klassifiziert werden. Bei reinem positiven oder negativen Moment ebenfalls, da man hier die plastische Nulllinie einfach auf Höhe der Flächenhalbierenden festlegen muss. Daraus ergibt sich für Winkel α zwischen 0 und 90 Grad im Interaktionsdiagramm (siehe Abbildung 3.2), der Bereich mit positivem Moment, für die meisten T-Profile ebenfalls dieselbe Querschnittsklasse. Sie

⁵Anm.: Einfluss des Spannungsverlaufs

⁶Anm.: werden isoliert klassifiziert

3 Bemessung eines T-Profiles nach Eurocode

Einseitig gestützte Flansche							
Gewalzte Querschnitte			Geschweißte Querschnitte				
Klasse	auf Druck beanspruchte Querschnittsteile	auf Druck und Biegung beanspruchte Querschnittsteile					
		freier Rand im Druckbereich		freier Rand im Zugbereich			
Spannungsverteilung über Querschnittsteile (Druck positiv)							
1	$clt \leq 9\varepsilon$	$clt \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha}$	$clt \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$				
2	$clt \leq 10\varepsilon$	$clt \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha}$	$clt \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$				
Spannungsverteilung über Querschnittsteile (Druck positiv)							
3	$clt \leq 14\varepsilon$	$clt \leq 21\varepsilon \sqrt{k_\sigma}$					
		Für k_σ siehe EN 1993-1-5					
$\varepsilon = \sqrt{235 / f_y}$		f_y	235	275	355	420	460
		ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Abbildung 3.1: [6], Tabelle 5.2, Klassifizierung

ist in diesem Bereich konstant. Ist die Querschnittsklasse bei reinem Druck höher als 1, wird für die Winkel zwischen 90 und 180 Grad im Interaktionsdiagramm - nunmehr liegen negative Momente M_y vor mit Druck am Flansch - durch die Zunahme des negativen Momentes und die Abnahme der Drucknormalkraft die Querschnittsklasse des Steges immer günstiger.

3 Bemessung eines T-Profiles nach Eurocode

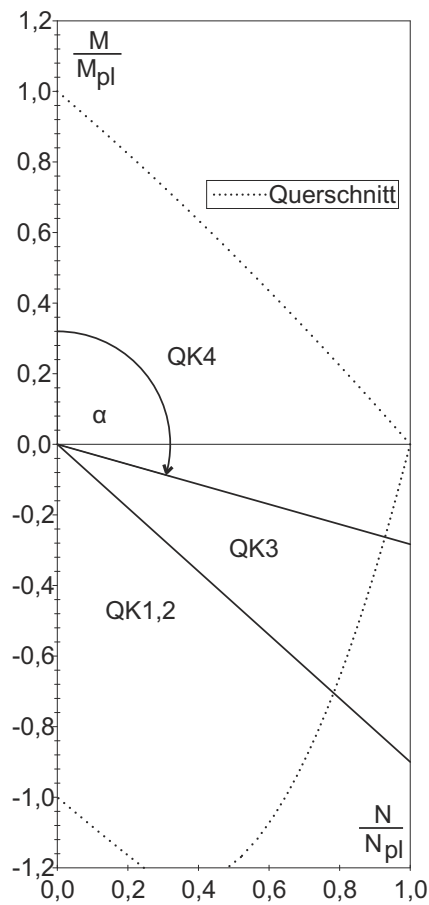


Abbildung 3.2: Winkel und Querschnittsklassen im Interaktionsdiagramm; Beispiel für $\frac{1}{2}$ IPE-300 Profil

Für einen einfach symmetrischen Querschnitt ist die Lage der plastischen Nulllinie und somit die plastische Spannungsverteilung im Bereich zwischen 90 und 180 Grad per Hand praktisch nicht zu ermitteln. In dieser Arbeit wurden die Grenzen zwischen Klasse 2 und 3 und zwischen Klasse 3 und 4 durch Computer Skripten für Mathematica⁷ bestimmt. Diese Programme sind im Anhang 7 angeführt und werden im Folgenden erklärt.

⁷Wolfram Mathematica 8, Version 8.0.4.0

3 Bemessung eines T-Profiles nach Eurocode

Die elastische Spannungsverteilung und somit die Unterscheidung zwischen Klasse 3 und 4 ist auch per Handrechnung einfach möglich und in der Beispielrechnung im Anhang A.2 beschrieben.

Klassifizierungsalgorithmen

Die Klassifizierungsalgorithmen untersuchen die Querschnittsklasse des Profilsteiges, da diese bei den meisten T-Profilen maßgebend (am ungünstigsten) ist.

Klasse 2 zu 3 Grenze

In diesem Bereich ist grundsätzlich von der plastischen Spannungsverteilung auszugehen. Ist die Querschnittsklasse des Profils bei reinem Druck höher als 2 muss der Algorithmus im Anhang A.1 angewendet werden. Dieser sucht den Winkel im Interaktionsdiagramm an welchem der Sprung von Klasse 3 (elastisches Verhalten) auf Klasse 2 (plastisches Verhalten) stattfindet. Die Fläche der Ausrundungen wird im Berührungspunkt von Steg und Gurt konzentriert, um die Berechnung zu vereinfachen. Vereinfacht gesprochen, wird ein Verhältnis M/N - dies entspricht einem Winkel α - gewählt. Iterativ werden nun verschiedenste Annahmen zur plastischen Nulllinie festgelegt und dafür die Grenztragfähigkeit N_{pl} und M_{pl} ermittelt. Stimmt das Verhältnis M_{pl}/N_{pl} mit der vorherigen Annahme M/N überein ist die maßgebende Spannungsverteilung für die Klassifizierung gefunden.

Der genaue Algorithmus beginnt mit der Ermittlung von M_{pl} . Nun wird für die Winkel α zwischen 90 und 180 Grad, dem Bereich mit negativem Moment, in gewissen Schritten das Verhältnis $v1 = (M_{pl} * \cos \alpha) / (N_{pl} * \sin \alpha)$ berechnet und die Winkel zusammen mit den entsprechenden Verhältnissen $v1$ in einer Liste gespeichert. Um die zugehörige Lage der plastischen Nulllinie für jeden dieser Winkel zu finden wird die Nulllinie so lange variiert bis das daraus resultierende M/N Verhältnis mit dem ursprünglich für diesen Winkel berechnetem Verhältnis $v1$ übereinstimmt. Da nun die Lage der plastischen Nulllinie für jeden Winkel α bekannt ist kann mit den Formeln aus

3 Bemessung eines T-Profiles nach Eurocode

Abbildung 3.1 die Querschnittsklasse der entsprechenden Winkel bestimmt werden. Beginnend bei $\alpha = 90^\circ$ wird der Winkel so lange erhöht bis das Kriterium für Klasse 2 erfüllt wird. Der Algorithmus bricht ab sobald Klasse 2 erreicht ist und gibt den zugehörigen Winkel als Grenzwinkel aus (siehe Abbildung 3.2).

Klasse 3 zu 4 Grenze

In diesem Bereich ist grundsätzlich von der elastischen Spannungsverteilung auszugehen. Ist die Querschnittsklasse des Profils bei reinem Druck höher als 3 muss zusätzlich zum ersten Algorithmus (Anhang A.1) auch der Algorithmus im Anhang A.2 angewendet werden. Dieser sucht den Winkel im Interaktionsdiagramm an welchem der Sprung von Klasse 4 (elastisches Verhalten, effektiver Querschnitt (Siehe Kapitel 3.2)) auf Klasse 3 (elastisches Verhalten am Gesamtquerschnitt) stattfindet.

Der Algorithmus variiert zuerst die Neigung der Spannungsebene in kleinen Schritten von reiner Druckbeanspruchung zu reiner negativer Momentenbeanspruchung. In jedem Schritt wird überprüft ob die Bedingung für Klasse 3 laut Abbildung 3.1 erfüllt wird. Der dafür nötige Beiwert k_σ wird laut [7] Anhang D bestimmt (Siehe Abbildung 3.3; die maximale Druckbeanspruchung ist am gestützten Rand, es sind daher die Formeln im unteren Teil der Abbildung zu verwenden). Sobald die Bedingung für Klasse 3 erfüllt wird, wird das M/N Verhältnis v_1 mit dieser Spannungsverteilung berechnet und die Variation der Spannungsebene abgebrochen. Das Verhältnis v_1 entspricht jener Spannungsverteilung an welchem der Sprung von Klasse 4 auf Klasse 3 stattfindet. Nun muss noch der entsprechende Grenzwinkel aus dem Verhältnis v_1 bestimmt werden. Hierfür wird für die Winkel $\alpha = 90$ bis 180 Grad im Interaktionsdiagramm, dem Bereich mit negativem Moment, das jeweilige M/N Verhältnis v_2 bestimmt und mit dem M/N Verhältnis v_1 für Klasse 3 verglichen. Entspricht v_1, v_2 ist auch der Grenzwinkel für den Sprung von Klasse 4 auf Klasse 3 gefunden.

3.2 Effektiver Querschnitt - Konzept effektiver Dicke

Ein Querschnitt der Klasse 4 ist so schlank, dass lokales Beulen berücksichtigt werden muss. Eine Methode zur Berücksichtigung des lokalen Beulens ist die Abminderung der Flächen des Querschnitts in den beulgefährdeten Querschnittsteilen. Der verbleibende Querschnitt (A_{Eff}) kann elastisch bis zur Fließgrenze f_y ausgenutzt werden. In [8] Kapitel 4 wird die Methode der effektiven Querschnittsgrößen behandelt. Insbesondere die Tabelle 4.2 gibt hier Auskunft über die durch lokales Beulen ausfallenden Querschnittsteile. In dieser Arbeit wird jedoch eine alternative Methode zur Querschnitts-abminderung aus [7] Anhang D gewählt (Siehe Abbildung 3.3). Der, nach dem Konzept der effektiven Dicke bestimmte Beiwert ρ wird für einseitig gestützte Querschnittsteile laut Formel 3.4 ermittelt (siehe [8] Kapitel 4.4).

$$\rho = \begin{cases} \frac{\bar{\lambda}_p^{-0.188}}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1 & \text{für } \bar{\lambda}_p \geq 0.748 \\ 1 & \text{für } \bar{\lambda}_p < 0.748 \end{cases} \quad (3.4)$$

mit:

$$\bar{\lambda}_p = \frac{c/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} \quad (3.5)$$

Der effektive Querschnitt bzw. die daraus resultierenden effektiven Querschnittswerte sind mit den zutreffenden Spannungsverteilungen (ψ Werten) zu ermitteln. Bei konstantem Druck ergibt sich ψ zu 1. Bei rein negativer oder rein positiver Momentenbeanspruchung ist ψ in Abbildung 3.3 auf Basis der Spannungsverteilung am Bruttoquerschnitt zu ermitteln. Für die Interaktionsformeln 15 bis 19 ist bei Querschnittsklasse 4 darauf zu achten, welche effektiven Querschnittswerte eingesetzt werden. Der Formelteil für Normalkraft erfordert effektive Querschnittswerte welche mit konstanter Druckbeanspruchung ($\psi = 1$; Index „Eff“) ermittelt worden sind. Der Formelteil für das Moment erfordert effektive Querschnittswerte welche bei rein negativer oder rein positiver Biegung ($\psi < 1$; Index „EffM-“ oder „EffM+“) ermittelt worden sind - siehe Bemessungsbeispiel im Anhang A.2. Tabelle

3 Bemessung eines T-Profiles nach Eurocode

Tabelle 3.1: Effektive Querschnittswerte der Klasse 4 Profile in dieser Arbeit (auf Basis der effektiven Dicke nach Abb. 3.3 ermittelt)

	A_{Eff} [cm ²]	$W_{y,s,\text{EffM}+}$ [cm ³]	$W_{y,s,\text{EffM}-}$ [cm ³]	$W_{y,l,\text{EffM}-}$ [cm ³]
$\frac{1}{2}$ IPE-300	25.532	40.301	43.590	153.169
$\frac{1}{2}$ IPE-600	69.360	208.939	288.663	868.709

3.1 zeigt die benötigten effektiven Querschnittswerte für die in dieser Arbeit gewählten Klasse 4 Profile.

3.3 Berechnungswerte

Für die Anwendung der Nachweisformeln (15) bis (19) in Abschnitt 3 werden nachfolgend die wesentlichen erforderlichen Basiswerte für die Anwendung bezüglich T-Querschnitten zusammengestellt.

a) Basiswerte

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} \quad (3.6)$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} \quad (3.7)$$

$$i_p = \sqrt{i_y^2 + i_z^2} \quad (3.8)$$

$$z_0 = e_z - \frac{t_g}{2} \quad (3.9)$$

$$i_0 = \sqrt{i_p^2 + z_0^2} \quad (3.10)$$

$$\alpha = 0,49 \quad (3.11)$$

$$\alpha_{\text{LT}} = 0,76 \quad (3.12)$$

3 Bemessung eines T-Profiles nach Eurocode

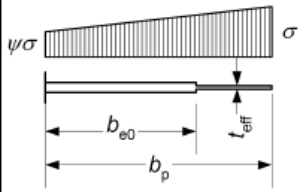
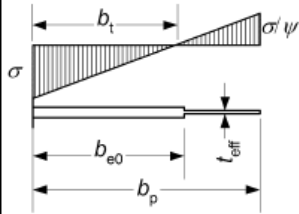
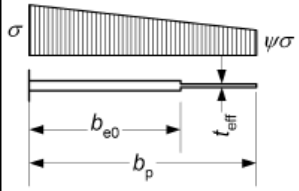
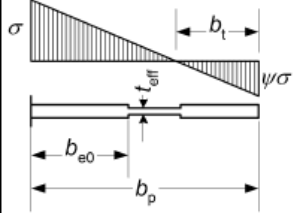
Maximale Druckbeanspruchung am freien Rand		
Spannungsverteilung	Wirksame Breite und Dicke	ideeller Beulwert
	$1 \geq \psi \geq 0$ $b_{e0} = 0,42b_p$ $t_{\text{eff}} = (1,75\rho - 0,75)t$	$1 \geq \psi \geq -2$ $k_{\sigma} = \frac{1,7}{3 + \psi}$
	$\psi < 0$ $b_{e0} = \frac{0,42b_p}{(1 - \psi)} + b_t < b_p$ $b_t = \frac{\psi b_p}{(\psi - 1)}$ $t_{\text{eff}} = (1,75\rho - 0,75 - 0,15\psi)t$	$-2 > \psi \geq -3$ $k_{\sigma} = 3,3(1 + \psi) + 1,25\psi^2$
		$\psi < -3$ $k_{\sigma} = 0,29(1 - \psi)^2$
Maximale Druckbeanspruchung am gestützten Rand		
Spannungsverteilung	Wirksame Breite und Dicke	ideeller Beulwert
	$1 \geq \psi \geq 0$ $b_{e0} = 0,42b_p$ $t_{\text{eff}} = (1,75\rho - 0,75)t$	$1 \geq \psi \geq 0$ $k_{\sigma} = \frac{1,7}{1 + 3\psi}$
	$\psi < 0$ $b_{e0} = \frac{0,42b_p}{(1 - \psi)}$ $b_t = \frac{\psi b_p}{(\psi - 1)}$ $t_{\text{eff}} = (1,75\rho - 0,75)t$	$0 \geq \psi \geq -1$ $k_{\sigma} = 1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$
		$\psi < -1$ $k_{\sigma} = 5,98(1 - \psi)^2$

Abbildung 3.3: [7], Tabelle D.1 Einseitig gestützte druckbeanspruchte Teilflächen; Anm.: hier $b_p = c$

b) Biegeknicken und Biegedrillknicken bei Normalkraft

Querschnittsklasse 1-3

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 EI_y}{l_{cr}^2} \quad (3.13)$$

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr,y}}} \quad (3.14)$$

$$\Phi_y = 0,5 \left(1 + \alpha(\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right) \quad (3.15)$$

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} \leq 1 \quad (3.16)$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 EI_z}{l_{cr}^2} \quad (3.17)$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr,z}}} \quad (3.18)$$

$$\Phi_z = 0,5 \left(1 + \alpha(\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right) \quad (3.19)$$

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} \leq 1 \quad (3.20)$$

Anm.: $N_{cr,TF}$ siehe Abschnitt 3.4.

$$\bar{\lambda}_{TF} = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr,TF}}} \quad (3.21)$$

$$\Phi_{TF} = 0,5 \left(1 + \alpha(\bar{\lambda}_{TF} - 0,2) + \bar{\lambda}_{TF}^2 \right) \quad (3.22)$$

$$\chi_{TF} = \frac{1}{\Phi_{TF} + \sqrt{\Phi_{TF}^2 - \bar{\lambda}_{TF}^2}} \leq 1 \quad (3.23)$$

3 Bemessung eines T-Profiles nach Eurocode

Querschnittsklasse 4

Bei Querschnittsklasse 4 ist der effektive Querschnitt zu berücksichtigen. $N_{cr,y}$, $N_{cr,z}$ und $N_{cr,TF}$ werden jedoch mit dem Bruttoquerschnitt bestimmt (siehe Querschnittsklasse 1-3).

$$\bar{\lambda}_{y, \text{Eff}} = \sqrt{\frac{A_{\text{Eff}} f_y}{N_{cr,y}}} \quad (3.24)$$

$$\Phi_{y, \text{Eff}} = 0,5 \left(1 + \alpha(\bar{\lambda}_{y, \text{Eff}} - 0,2) + \bar{\lambda}_{y, \text{Eff}}^2 \right) \quad (3.25)$$

$$\chi_{y, \text{Eff}} = \frac{1}{\Phi_{y, \text{Eff}} + \sqrt{\Phi_{y, \text{Eff}}^2 - \bar{\lambda}_{y, \text{Eff}}^2}} \leq 1 \quad (3.26)$$

$$\bar{\lambda}_{z, \text{Eff}} = \sqrt{\frac{A_{\text{Eff}} f_y}{N_{cr,z}}} \quad (3.27)$$

$$\Phi_{z, \text{Eff}} = 0,5 \left(1 + \alpha(\bar{\lambda}_{z, \text{Eff}} - 0,2) + \bar{\lambda}_{z, \text{Eff}}^2 \right) \quad (3.28)$$

$$\chi_{z, \text{Eff}} = \frac{1}{\Phi_{z, \text{Eff}} + \sqrt{\Phi_{z, \text{Eff}}^2 - \bar{\lambda}_{z, \text{Eff}}^2}} \leq 1 \quad (3.29)$$

$$\bar{\lambda}_{\text{TF, Eff}} = \sqrt{\frac{A_{\text{Eff}} f_y}{N_{cr, \text{TF}}}} \quad (3.30)$$

$$\Phi_{\text{TF, Eff}} = 0,5 \left(1 + \alpha(\bar{\lambda}_{\text{TF, Eff}} - 0,2) + \bar{\lambda}_{\text{TF, Eff}}^2 \right) \quad (3.31)$$

$$\chi_{\text{TF, Eff}} = \frac{1}{\Phi_{\text{TF, Eff}} + \sqrt{\Phi_{\text{TF, Eff}}^2 - \bar{\lambda}_{\text{TF, Eff}}^2}} \leq 1 \quad (3.32)$$

c) Biegedrillknicken bei Moment

Die Bestimmung von M_{cr} erfolgt laut Abschnitt 3.5.

3 Bemessung eines T-Profiles nach Eurocode

Querschnittsklasse 1-2: plastisches Verhalten

$$\bar{\lambda}_{LT,pl,s} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} f_y}{M_{cr,s}}} \quad (3.33)$$

$$\Phi_{LT,pl,s} = 0,5 \left(1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT,pl,s} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT,pl,s}^2 \right) \quad (3.34)$$

$$\chi_{LT,pl,s} = \frac{1}{\Phi_{LT,pl,s} + \sqrt{\Phi_{LT,pl,s}^2 - \bar{\lambda}_{LT,pl,s}^2}} \leq 1 \quad (3.35)$$

$$\bar{\lambda}_{LT,pl,l} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} f_y}{M_{cr,l}}} \quad (3.36)$$

$$\Phi_{LT,pl,l} = 0,5 \left(1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT,pl,l} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT,pl,l}^2 \right) \quad (3.37)$$

$$\chi_{LT,pl,l} = \frac{1}{\Phi_{LT,pl,l} + \sqrt{\Phi_{LT,pl,l}^2 - \bar{\lambda}_{LT,pl,l}^2}} \leq 1 \quad (3.38)$$

Anm.: $M_{cr,s}$ und $M_{cr,l}$ beziehen sich auf jene Momentenrichtung bei der Druckspannungen am freien Stegrand (Achse s, d. h. M+) bzw. am Flansch (Achse l, d. h. M-) auftreten.

Querschnittsklasse 3: elastisches Verhalten

$$\bar{\lambda}_{LT,s} = \sqrt{\frac{W_{y,s} f_y}{M_{cr,s}}} \quad (3.39)$$

$$\Phi_{LT,s} = 0,5 \left(1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT,s} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT,s}^2 \right) \quad (3.40)$$

$$\chi_{LT,s} = \frac{1}{\Phi_{LT,s} + \sqrt{\Phi_{LT,s}^2 - \bar{\lambda}_{LT,s}^2}} \leq 1 \quad (3.41)$$

$$\bar{\lambda}_{LT,l} = \sqrt{\frac{W_{y,l} f_y}{M_{cr,l}}} \quad (3.42)$$

3 Bemessung eines T-Profiles nach Eurocode

$$\Phi_{LT,l} = 0,5 \left(1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT,l} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT,l}^2 \right) \quad (3.43)$$

$$\chi_{LT,l} = \frac{1}{\Phi_{LT,l} + \sqrt{\Phi_{LT,l}^2 - \bar{\lambda}_{LT,l}^2}} \leq 1 \quad (3.44)$$

Querschnittsklasse 4: Biegedrillknicken + lokales Beulen

$$\bar{\lambda}_{LT,s,effM+} = \sqrt{\frac{W_{y,s,effM+} f_y}{M_{cr,s}}} \quad (3.45)$$

$$\Phi_{LT,s,effM+} = 0,5 \left(1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT,s,effM+} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT,s,effM+}^2 \right) \quad (3.46)$$

$$\chi_{LT,s,effM+} = \frac{1}{\Phi_{LT,s,effM+} + \sqrt{\Phi_{LT,s,effM+}^2 - \bar{\lambda}_{LT,s,effM+}^2}} \leq 1 \quad (3.47)$$

$$\bar{\lambda}_{LT,s,effM-} = \sqrt{\frac{W_{y,s,effM-} f_y}{M_{cr,s}}} \quad (3.48)$$

$$\Phi_{LT,s,effM-} = 0,5 \left(1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT,s,effM-} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT,s,effM-}^2 \right) \quad (3.49)$$

$$\chi_{LT,s,effM-} = \frac{1}{\Phi_{LT,s,effM-} + \sqrt{\Phi_{LT,s,effM-}^2 - \bar{\lambda}_{LT,s,effM-}^2}} \leq 1 \quad (3.50)$$

$$\bar{\lambda}_{LT,l,effM-} = \sqrt{\frac{W_{y,l,effM-} f_y}{M_{cr,l}}} \quad (3.51)$$

$$\Phi_{LT,l,effM-} = 0,5 \left(1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT,l,effM-} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT,l,effM-}^2 \right) \quad (3.52)$$

$$\chi_{LT,l,effM-} = \frac{1}{\Phi_{LT,l,effM-} + \sqrt{\Phi_{LT,l,effM-}^2 - \bar{\lambda}_{LT,l,effM-}^2}} \leq 1 \quad (3.53)$$

3.4 Berechnungsmethoden für $N_{cr,TF}$

Um $N_{cr,TF}$ bestimmen zu können, werden im Österreichischen Nationalen Anhang [5] Berechnungsformeln angeführt. Auch in der Dissertation von Peter Kaim [4] wird die analytische Lösung der kritischen Verzweigungslast für Biegedrillknicken zufolge N alleine, in anderer Schreibweise, dargestellt.

Die Formeln 3.54 bis 3.56 zeigen die Berechnung laut Nationalem Anhang [5] (hier Zusatzindex EC bei $N_{cr,TF}$):

$$c = \sqrt{\frac{I_w}{I_z} + 0.039 * \frac{I_t * l_T^2}{I_z}} \quad (3.54)$$

$$N_{cr,TF,EC} = \frac{N_{cr,z}}{\frac{c^2 + i_0^2}{2c^2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4c^2 i_p^2}{(c^2 + i_0^2)^2}} \right)} \quad (3.55)$$

$$\bar{\lambda}_{TF,EC} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr,TF,EC}}} \quad (3.56)$$

Die Formeln 3.57 bis 3.59 zeigen die Schreibweise in der Arbeit von Peter Kaim ($N_{cr,T}$ entspricht der Drillknicklast):

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \left(G I_T + \frac{\pi^2 E I_w}{L^2} \right) \quad (3.57)$$

$$N_{cr,TF} = \frac{N_{cr,z}}{2 \left(1 - \frac{z_0^2}{i_0^2} \right)} \left(1 + \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,z}} - \sqrt{\left(1 - \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,z}} \right)^2 + 4 \left(\frac{z_0^2}{i_0^2} \right) \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,z}}} \right) \quad (3.58)$$

$$\bar{\lambda}_{TF} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr,TF}}} \quad (3.59)$$

Abbildung 3.4 zeigt den Verlauf von $\bar{\lambda}_{TF}$ und damit von $N_{cr,TF}$ bezogen auf $\bar{\lambda}_z$. Die beiden Varianten der Bestimmung von $N_{cr,TF}$ nach Gleichung (3.55)

3 Bemessung eines T-Profiles nach Eurocode

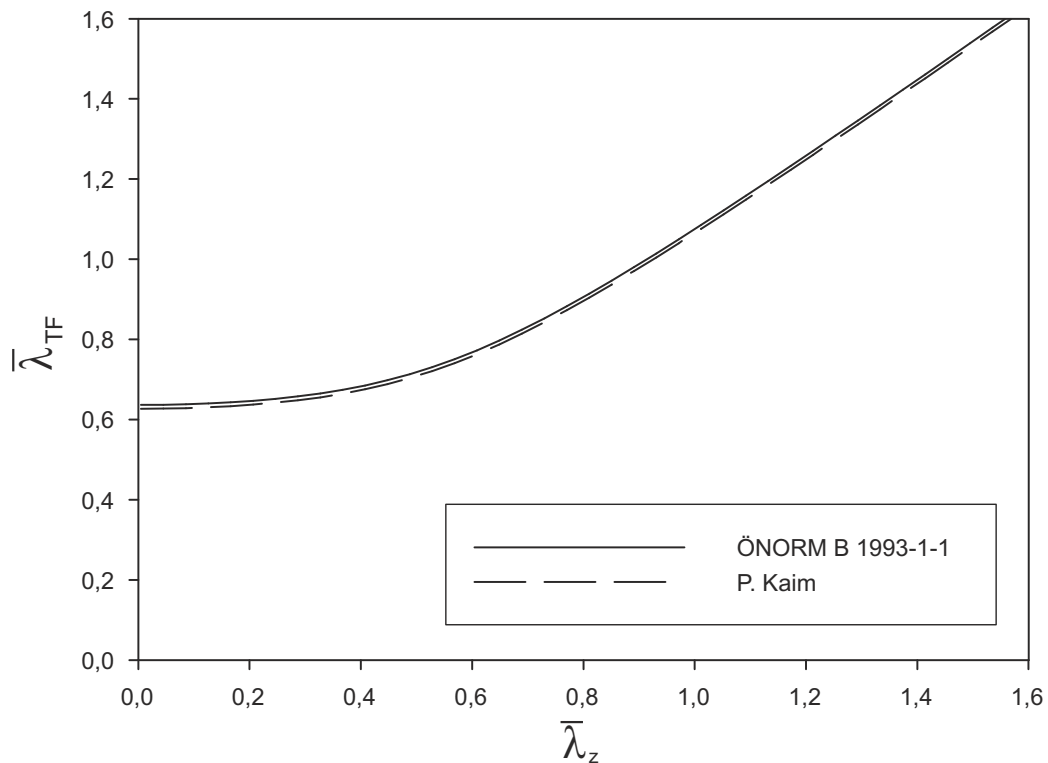


Abbildung 3.4: Vergleich $\bar{\lambda}_{TF}$

und (3.58) sind deckungsgleich.

3.5 Berechnungsmethoden für M_{cr}

Bei der Bestimmung von M_{cr} ist die Momentenrichtung zu beachten. Eine einfache und sehr genaue Möglichkeit M_{cr} zu berechnen bietet die freie Software LTBeam⁸. Im Österreichischen Nationalen Anhang [5], Kapitel 6.7.1 (2) und dem Amerikanischen Standard [1] werden Formeln angeführt, welche eine näherungsweise Bestimmung von M_{cr} ermöglichen (siehe folgende

⁸www.cticm.com, Version 1.0.10

3 Bemessung eines T-Profiles nach Eurocode

Unterüberschriften). Tabelle 3.2 zeigt die Ergebnisse von LTBeam, Tabelle 3.3 und Tabelle 3.4 die jeweiligen Abweichungen der „Handformeln“ für M_{cr} , die nachfolgend noch dargestellt sind, zu den numerisch ermittelten Ergebnissen. Die teils deutlichen Unterschiede können durch eine leichte Modifikation des Nationalen Anhangs minimiert werden. Hierzu wird die Änderung der Berechnung der Steghöhe h_s vorgeschlagen. Der Nationale Anhang schlägt die Berechnung laut Formel 3.60 vor, was dem Abstand der Gurtmittelpunkte entspricht. Als Modifikation wird die Formel 3.61 vorgeschlagen. Die Ergebnisse dieser Modifikation werden in Tabelle 3.5 bezogen auf die Werte von LTBeam dargestellt.

Im Anhang A.2 wird die Berechnung von M_{cr} laut EC3 NA und AISC für ein Profil beispielhaft gezeigt.

bei „EC NA“:

$$h_s = h - \frac{t_g}{2} - \frac{t_s}{2} \quad (3.60)$$

bei „EC NA - MOD“:

$$h_s = h - t_g - t_s - r \quad (3.61)$$

Für die untersuchten Profile ergeben sich damit folgende Werte [cm]:

	$\frac{1}{2}$ IPE-300	$\frac{1}{2}$ IPE-600	$\frac{1}{2}$ HE-B-360	$\frac{1}{2}$ HE-M-500
h_s (EC NA)	14,11	28,45	16,25	23,15
h_s (EC NA-MOD)	11,72	24,50	11,80	17,40

3 Bemessung eines T-Profiles nach Eurocode

Tabelle 3.2: M_{cr} [kNcm] laut LTBeam

L/B	$\frac{1}{2}$ IPE-300		$\frac{1}{2}$ IPE-600		$\frac{1}{2}$ HE-B-360		$\frac{1}{2}$ HE-M-500	
	M+	M-	M+	M-	M+	M-	M+	M-
10	6778,6	33585	27711	181610	86023	162860	246950	540770
15	5679,6	17593	23735	92139	63568	97717	186570	317140
20	4846,2	11548	20642	59119	50256	69464	149280	222730
25	4206,8	8496,1	18179	42804	41510	53802	124210	171220

Tabelle 3.3: $\frac{M_{cr,ECNA}}{M_{cr,LTBeam}}$

L/B	$\frac{1}{2}$ IPE-300		$\frac{1}{2}$ IPE-600		$\frac{1}{2}$ HE-B-360		$\frac{1}{2}$ HE-M-500	
	M+	M-	M+	M-	M+	M-	M+	M-
10	0,755	1,115	0,768	1,047	0,655	1,326	0,781	1,126
15	0,806	1,092	0,816	1,038	0,738	1,219	0,839	1,087
20	0,843	1,075	0,849	1,032	0,791	1,164	0,873	1,065
25	0,869	1,064	0,872	1,027	0,826	1,13	0,895	1,051

Tabelle 3.4: $\frac{M_{cr,AISC}}{M_{cr,LTBeam}}$

L/B	$\frac{1}{2}$ IPE-300		$\frac{1}{2}$ IPE-600		$\frac{1}{2}$ HE-B-360		$\frac{1}{2}$ HE-M-500	
	M+	M-	M+	M-	M+	M-	M+	M-
10	0,776	1,285	0,796	1,207	0,653	1,516	0,769	1,284
15	0,825	1,224	0,841	1,168	0,736	1,347	0,829	1,195
20	0,859	1,181	0,870	1,138	0,789	1,258	0,865	1,146
25	0,883	1,151	0,891	1,115	0,825	1,204	0,889	1,116

Tabelle 3.5: $\frac{M_{cr,ECNA,MOD}}{M_{cr,LTBeam}}$

L/B	$\frac{1}{2}$ IPE-300		$\frac{1}{2}$ IPE-600		$\frac{1}{2}$ HE-B-360		$\frac{1}{2}$ HE-M-500	
	M+	M-	M+	M-	M+	M-	M+	M-
10	0,870	0,982	0,867	0,937	0,785	1,137	0,903	0,998
15	0,905	0,989	0,903	0,950	0,844	1,092	0,931	0,998
20	0,926	0,993	0,924	0,960	0,878	1,069	0,946	0,997
25	0,941	0,996	0,937	0,967	0,900	1,054	0,956	0,997

3 Bemessung eines T-Profiles nach Eurocode

a) M_{cr} nach EC3 NA [5] 6.7.1 (2)

$$M_{cr, ECNA} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(k_z L)^2} \left(\sqrt{\left(\frac{k_z}{k_w}\right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k_z L)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z}} + (C_2 z_g - C_3 z_j)^2 - (C_2 z_g - C_3 z_j) \right)$$

mit:

C_1 Beiwert gemäß Tabelle 2 und Tabelle 3 für verschiedene Lastfälle (hier 1,0)

C_2 Beiwert gemäß Tabelle 2 und Tabelle 3 für verschiedene Lastfälle (hier 0,0)

C_3 Beiwert gemäß Tabelle 2 und Tabelle 3 für verschiedene Lastfälle (hier 1,0)

z_j Beiwert für einfach symmetrische I-Profile mit ungleichen Gurten:

$$\text{für } \psi_f \geq 0: \quad z_j = 0,8 * \psi_f * \frac{h_s}{2}$$

$$\text{für } \psi_f < 0: \quad z_j = \psi_f * \frac{h_s}{2}$$

$$\text{mit: } \psi_f = \frac{I_{fc} - I_{ft}}{I_{fc} + I_{ft}}$$

I_w Wölbwiderstand $I_w = (1 - \psi_f^2) I_z \left(\frac{h_s}{2}\right)^2$ (für T-Profile gilt $I_w = 0$)

I_{fc} Flächenträgheitsmoment des Druckgurtes um die z-Achse

I_{ft} Flächenträgheitsmoment des Zuggurtes um die z-Achse

h_s Abstand der Gurtmittelpunkte

Um diese Formel anwenden zu können, wurde der - bei einem T-Profil nicht vorhandene - 2. Gurt mit der Dicke t_w modelliert (siehe Abbildung 3.5 grau dargestellt). Damit ergeben sich Werte von ψ_f , die annähernd Werten von -1 oder +1 entsprechen. Unterschiedliche Ergebnisse für M_{cr} hinsichtlich $+M_y$ (Druck am freien Stegrand) und $-M_y$ ergeben sich nur aus dem unterschiedlichen Parameter ψ_f .

b) M_{cr} nach AISC

Das American Institute of Steel Construction gibt in [1] direkt Formeln für T-Profile an. Die unterschiedlichen Bezeichnungen der Variablen und Achsen sind hier zu beachten.

3 Bemessung eines T-Profiles nach Eurocode

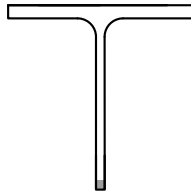


Abbildung 3.5: Modellvorstellung für M_{cr}

$$M_{cr,AISC} = \frac{\pi \sqrt{EI_y GJ}}{L_b} (B + \sqrt{1 + B^2})$$

mit:

$$\begin{aligned} B &= +2,3 \left(\frac{d}{L_b}\right) \sqrt{\frac{I_y}{J}} \text{ [bei negativem Moment]} \\ &= -2,3 \left(\frac{d}{L_b}\right) \sqrt{\frac{I_y}{J}} \text{ [bei positivem Moment]} \\ I_y &= I_z \text{ [EC]} \\ J &= I_T \text{ [EC]} \\ d &= h \text{ [EC]} \end{aligned}$$

4 Die GMNIA Analyse zur Ermittlung realitätsnaher Traglasten

In diesem Kapitel soll die Vorgehensweise bei der Berechnung der Traglast eines T-Profiles mit Hilfe der GMNIA Analyse erläutert werden. GMNIA bedeutet Geometrically and Materially Nonlinear Analysis with Imperfections, eine numerische Berechnungsmethode welche große Verformungen, nichtlineares Materialverhalten und geometrische und strukturelle Imperfektionen berücksichtigt. Normalerweise müssten numerische Untersuchungen mit Versuchen im Labor unter realen Bedingungen verglichen und kalibriert werden um zuverlässige Ergebnisse zu liefern. Das hier verwendete Modell hat sich jedoch im Stahlbau schon bewährt und kann ohne weitere Kalibrierung durch Laborversuche direkt verwendet werden. Es liefert zuverlässige, normgerechte und realitätsnahe Ergebnisse, und fand daher - für Plattenbeulen - auch Eingang in den Eurocode [8].

Die numerischen Berechnungen wurden mit der Software ABAQUS¹ durchgeführt. Im Anhang A.2 befindet sich ein ABAQUS Inputfile für die Berechnung eines $\frac{1}{2}$ IPE-300 Profiles.

4.1 Materialmodell

Es wurde durchgehend Stahl der Güte S235 und ein bilineares Materialgesetz (siehe Abb. 4.1) verwendet. Verfestigungen wurden nicht berücksichtigt.

¹Dassault Systems, Version 6.10-1

4 Die GMNIA Analyse zur Ermittlung realitätsnaher Traglasten

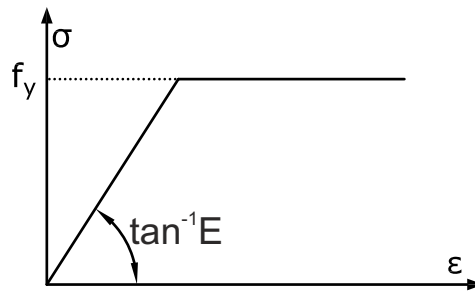


Abbildung 4.1: Materialgesetz

4.2 Imperfektionsannahmen

Strukturelle Imperfektionsannahmen

Die berücksichtigten Eigenspannungen beruhen aufgrund der fehlenden Untersuchungen für ein T-Profil auf dem modifizierten Eigenspannungsmodell eines I-Profils. Die Vorgehensweise der Bestimmung des Eigenspannungsverlaufs ist an die Herstellung eines T-Profils durch Halbieren eines gewalzten I-Profils angelehnt. Da die freigeschnittenen Spannungen nicht im Gleichgewicht sind, verformen sich die neu entstandenen T-Träger. Um diese Verformung rückgängig zu machen, wird das freigeschnittene Moment in umgekehrter Richtung am T-Profil aufgebracht. Der so entstehende Eigenspannungsverlauf eines T-Profils der allen weiteren Berechnungen zugrunde liegt, ist in Abb. 4.2 dargestellt.

Geometrische Imperfektionsannahmen

Um eine geometrische Imperfektionsform für T-Träger zu generieren, wurde folgende Vorgehensweise gewählt. Zum einen wurde der T-Träger global um eine halbe Sinus Welle mit der Amplitude $L/1000$ in Richtung der Y-Achse ausgelenkt (entspricht der Knickfigur um die z-Achse) und zusätzlich um das halbe Maß verdreht. Dabei wurden beide Verdrehungsrichtungen

4 Die GMNIA Analyse zur Ermittlung realitätsnaher Traglasten

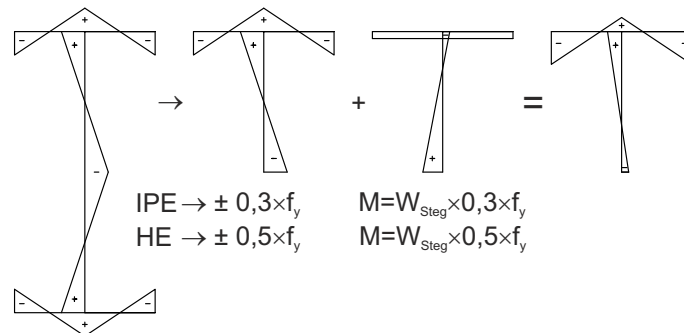


Abbildung 4.2: Eigenspannungsverlauf

untersucht (maßgebend jene die die kleinere Traglast liefert), sodass jeweils an einem Querschnittsrand (Achse l oder s) die Amplitude $L/1000$ vorlag (siehe Abbildung 4.3). Zum anderen wurde als lokale Imperfektion das freie Ende des Stegs mit einer zweiten Sinus Welle bestehend aus L/h Halbwellen überlagert. Eine Annahme für die Amplitude der lokalen Imperfektion war $h/50 * 80\%$. $h/50$ entspricht der Fertigungstoleranz, 20% darf die geometrische Imperfektion abgemindert werden, wenn die Eigenspannungen separat betrachtet werden.

Laut Eurocode [8] müssen nicht beide Imperfektionen (lokal und global) gleichzeitig voll angesetzt werden. Eine der beiden darf um 30% abgemindert werden. Die Amplitude für die lokale Imperfektionswelle wurde daher mit $h/90$ festgelegt ($h/90 \cong h/50 * 80% * 70%$), da die globale Imperfektion für die untersuchten Fälle die größeren Auswirkungen auf die Traglast besitzt.

Für die Berechnung wurden zwei Imperfektionsformen (siehe Abb. 4.3) generiert und das jeweils niedrigere Ergebnis in die Diagramme übernommen. Genau genommen gelten die gewählten Imperfektionsformen nur für Profile deren schwache Achse der z -Achse entspricht. Bei den halbierten H-Profilen (HE-B 360 und HE-M 500) ist die schwache Achse jedoch die y -Achse. Es ist daher anzunehmen, dass die GMNIA Ergebnisse für diese Profile, besonders im Bereich hoher Drucknormalkraft, geringfügig zu hoch ausfallen (hier wäre zutreffender eine globale Imperfektion in Richtung der

4 Die GMNIA Analyse zur Ermittlung realitätsnaher Traglasten

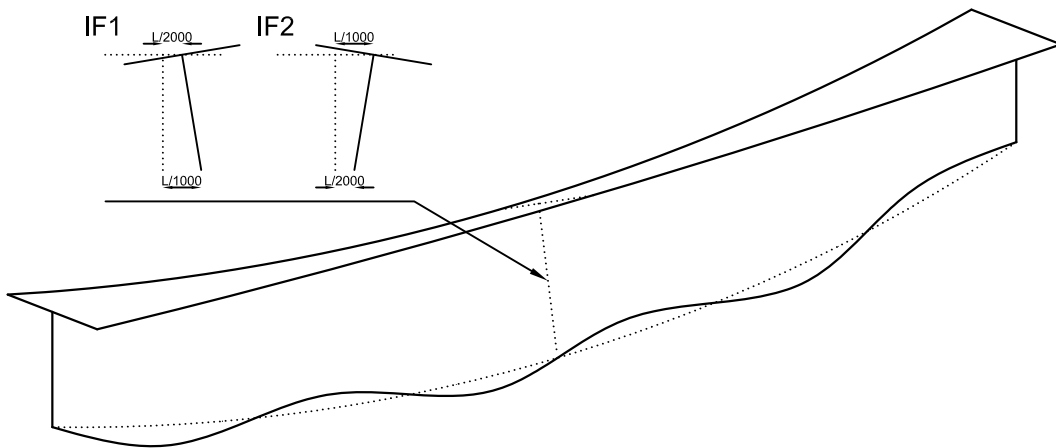


Abbildung 4.3: Geometrische Imperfektionen

z-Achse anzusetzen).

4.3 FEM Diskretisierung

Das FEM-Netz wird in Abbildung 4.4 dargestellt. Sowohl Gurt als auch Steg bestehen aus jeweils 20 Elementen. Je nach Stablänge wurde die Elementanzahl in Stablängsrichtung so gewählt, dass möglichst quadratische Elemente entstehen. Die maximale Elementanzahl in Stablänge wurde mit 1000 Elementen begrenzt. Gurt und Steg wurden als S4 Shell Elemente modelliert, die Ausrundungen als zusätzliches Beamelement. Der Schwerpunkt des Beamelementes entspricht dem Berührungspunkt von Gurtunterkante und Stegachse und stimmt somit nicht exakt dem Schwerpunkt der Ausrundungen des echten Trägers überein. Die Querschnittsfläche des Beamelementes entspricht der Querschnittsfläche der Ausrundungen, die Breite und Dicke des Beamelementes wurden so festgelegt, dass die Torsionssteifigkeit des T-Profiles unverändert bleibt.

Der T-Träger ist beidseitig gabelgelagert. Die Schwerpunktsknoten im Anfangs- und Endquerschnitt dienen als Lasteinleitungspunkt und wur-

4 Die GMNIA Analyse zur Ermittlung realitätsnaher Traglasten

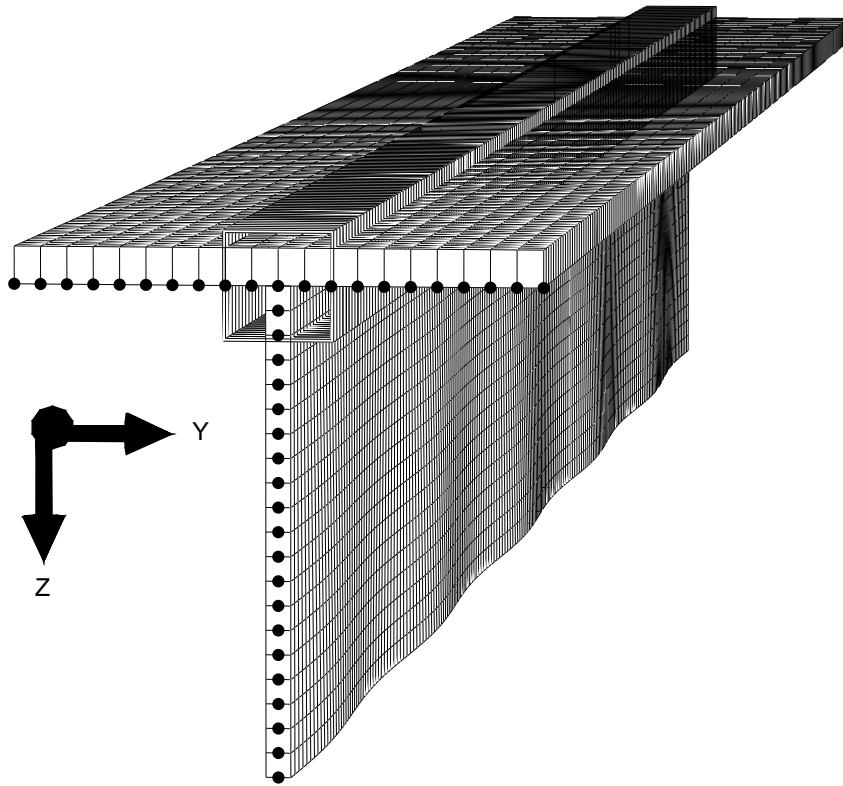


Abbildung 4.4: FEM Netzmodell ($\frac{1}{2}$ IPE-300 L/B=10)

den über eine Multi Point Constraint (MPC) mit allen anderen Knoten des jeweiligen Anfangs- oder Endquerschnitts verbunden. Das bedeutet, dass die im Schwerpunkt eingeleitete Normalkraft und das ebenfalls im Schwerpunkt angreifende Moment unmittelbar auf alle Knoten des Querschnittes übertragen wird - es liegt somit ein Flachbleiben des Querschnitts an den Stabenden vor.

5 Ergebnisse - Traglastergebnisse im Vergleich zu Eurocoderegeln

5.1 Reine Druckbeanspruchung

J. Tapley geht in seiner Master Arbeit „The Stability Behaviour of Steel T-sections under Axial Compression“ [9] auf diese Beanspruchungsart ein. Sein Vorschlag zur Verbesserung der Bemessungsergebnisse ist 1.) in der Formel 5.1 für η statt $\bar{\lambda}_{TF}$, $\bar{\lambda}_z$ zu verwenden, da dieser Wert längenabhängig ist und 2.) bei Klasse 4 Querschnitten den Term $N_{Ed} * e_N$ und folglich alle Terme und Reduktionsfaktoren in Verbindung mit Biegung wegzulassen, da sie nur äußerst geringen Einfluss haben.

$$\eta = \alpha (\bar{\lambda}_z - 0,2) \quad (5.1)$$

$$\Phi_{TF} = \frac{1}{2} \left[1 + \eta + \bar{\lambda}_{TF}^2 \right] \quad (5.2)$$

$$\chi_{TF} = \frac{1}{\Phi_{TF} + \sqrt{\Phi_{TF}^2 - \bar{\lambda}_{TF}^2}} \leq 1 \quad (5.3)$$

Abbildung 5.1 aus [11] zeigt die Ergebnisse für zwei verschiedene T-Profile auf Basis dieses Vorschlages.

5 Ergebnisse - Traglastergebnisse im Vergleich zu Eurocoderegeln

Der Vorschlag erlaubt deutlich höhere Tragfähigkeiten gegenüber den Bemessungsformeln (15) bis (19) des Eurocode NA [5] (siehe Abschnitt 3) und vereinfacht die Bemessung von Klasse 4 Querschnitten, sollte jedoch nur bei relativ dicken Klasse 1 oder 2 Flanschen verwendet werden (nur diese wurden untersucht). Bei den meisten typischen T-Profilen, wie zum Beispiel halbierten Walzprofilen, ist dies jedoch der Fall.

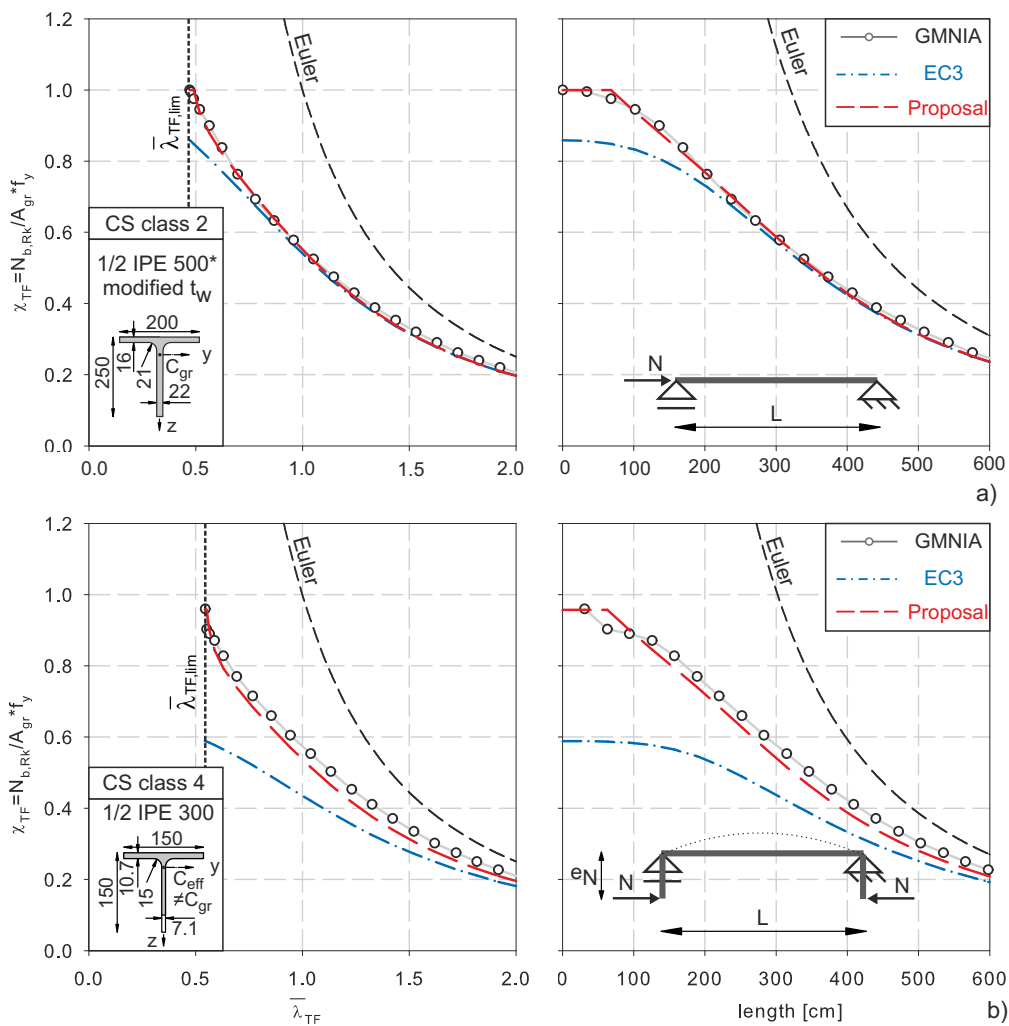


Abbildung 5.1: T-Profil bei reiner Druckbeanspruchung; (a) QK 2 (b) QK 4

5.2 Reine Momentenbeanspruchung M_y

In „Behaviour and design of members with monosymmetric cross-section“ [10] werden einige Aspekte des Tragverhaltens von T-Profilen bei Momentenbeanspruchung gezeigt. Der Hauptpunkt ist, dass typische T-Profile bei Biegebeanspruchung nicht durch Biegedrillknicken versagen. Nur sehr schmale Profile zeigen eine Tendenz durch Biegedrillknicken zu versagen, und das auch nur bei negativem Moment, d. h. Druck am Flansch (siehe Abbildung 5.2, $M(-)$). Dieses Verhalten steht in deutlichem Kontrast zu der vom EC3 geforderten Abminderung für Biegedrillknicken (Lateral-torsional buckling) mit der niedrigsten Kurve „d“.

Ein Vorschlag wäre hier für typische T-Profile, wie zum Beispiel halbierte Walzprofile mit relativ dicken Klasse 1 oder 2 Flanschen und annähernd gleicher Breite und Höhe, χ_{LT} gleich 1 zu setzen bzw. gegebenenfalls mit der Euler Kurve, d. h. Beschränkung auf die ideale Biegedrillknicklast, abzumindern, also:

$$\chi_{LT} = \min \left\{ 1, 0; \frac{1}{\lambda_{LT}^2} \right\}$$

Dies entspricht der Vorgehensweise in der amerikanischen Norm [1].

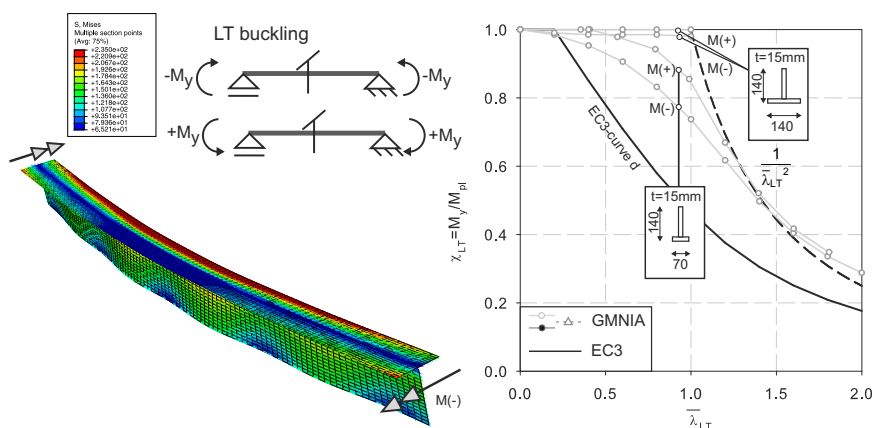


Abbildung 5.2: Biegedrillknicken von kompakten T-Profilen; Bedeutung von Momentenrichtung und Querschnittsabmessungen

5.3 Kombinierte Beanspruchung = N & M_y

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in den folgenden M-N-Interaktionsdiagrammen (Abbildung 5.3 bis 5.22) sehr kompakt und übersichtlich dargestellt. Horizontal ist die Normalkraftbeanspruchung (immer Drucknormalkraft) aufgetragen und vertikal die Momentenbeanspruchung. Positive Momente $M^{(+)}$ bedeuten Druck am freien Stegrand, wogegen negative Momente $M^{(-)}$ Druck am Flansch bedeuten. Die ausgewiesenen Tragfähigkeiten stellen charakteristische Werte der Beanspruchbarkeit dar, für proportional (gemeinsam) gesteigerte Wertepaare N/M . Alle Werte sind unabhängig von der jeweiligen Querschnittsklasse auf N_{pl} bzw. M_{pl} bezogen. Es ist Material S235 vorausgesetzt. Die äußerste, fein punktierte Linie stellt die plastische Querschnittstragfähigkeit dar. Die einzelnen etwas größeren Punkte (GM-NIA Ergebnisse) stellen die durch Stabilität verminderte Tragfähigkeit des Trägers laut realitätsnaher Traglastberechnung dar. Der graue Bereich stellt die Tragfähigkeit laut Eurocode 3 NA [5], Anhang B, d. h. nach Abschnitt 3 dieser Arbeit, dar. Die Berechnungswerte für die Interaktionsdiagramme, d. h. die Basiswerte für die Nachweisgleichungen (15) bis (19), sind in den Tabellen 5.1 bis 5.5 aufgelistet. Hervorzuheben ist, dass bei allen untersuchten T-Querschnitten die Formeln (15) und (16) nie bemessungsbestimmend sind, deshalb scheinen sie in der Legende der Abbildung 5.3 ff. auch nicht auf.

Nachfolgend werden die Interaktionsdiagramme für folgende untersuchten T-Querschnitte dargestellt: $\frac{1}{2}$ IPE-300, $\frac{1}{2}$ IPE-600, $\frac{1}{2}$ HE-B-360, $\frac{1}{2}$ HE-M-500 und „Kaim-140“;

Für jeden der untersuchten Querschnitte wurden hinsichtlich der Stablänge vier verschiedene Stabschlankheiten untersucht: $L/B = 10, 15, 20, 25$. Die Länge ist dabei immer auf die Flanschbreite B bezogen, die diesbezügliche Bezeichnung in den Abbildungen 5.3 ff. lautet: LB10 für $L/B=10$.

Die in Abbildung 5.3 und 5.4 eingetragenen Querschnittsklassen (2, 3, 4) gelten sinngemäß in allen anderen Abbildungen.

5 Ergebnisse - Traglastergebnisse im Vergleich zu Eurocoderegeln

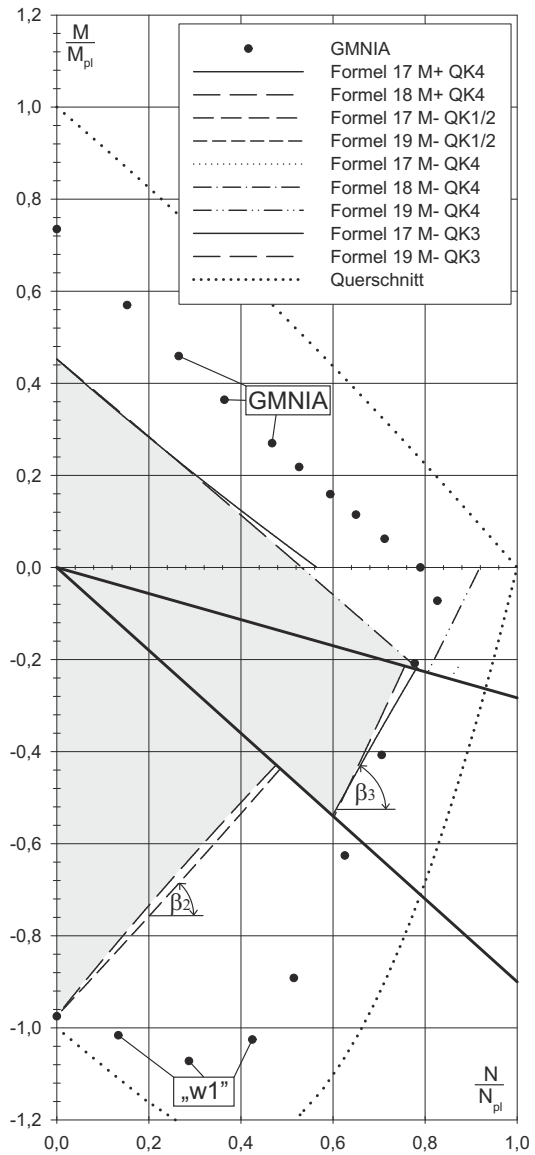


Abbildung 5.3: $\frac{1}{2}$ IPE300-LB10

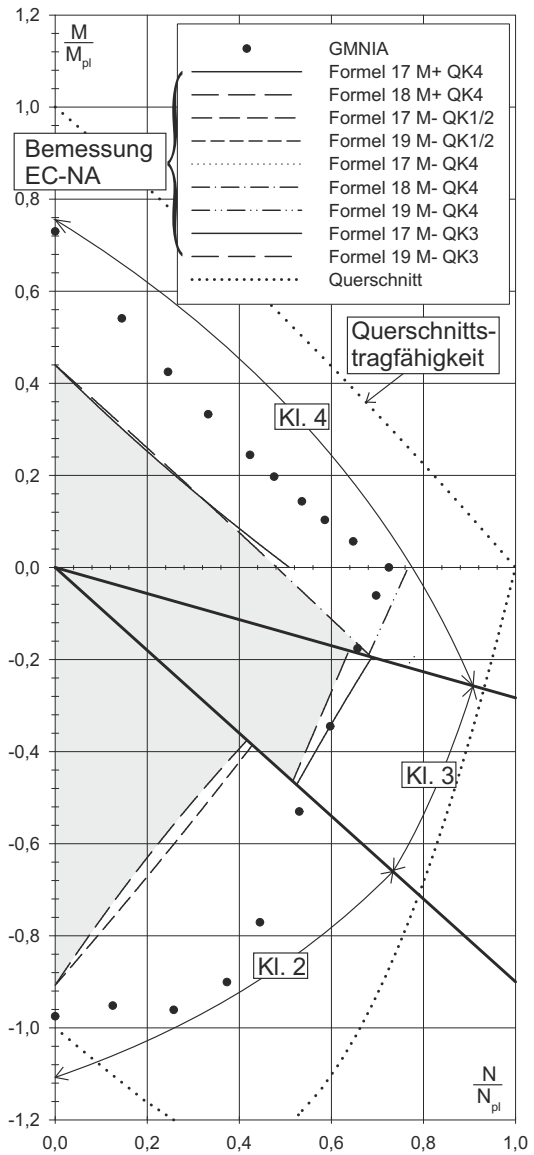


Abbildung 5.4: $\frac{1}{2}$ IPE300-LB15

5 Ergebnisse - Traglastergebnisse im Vergleich zu Eurocoderegeln

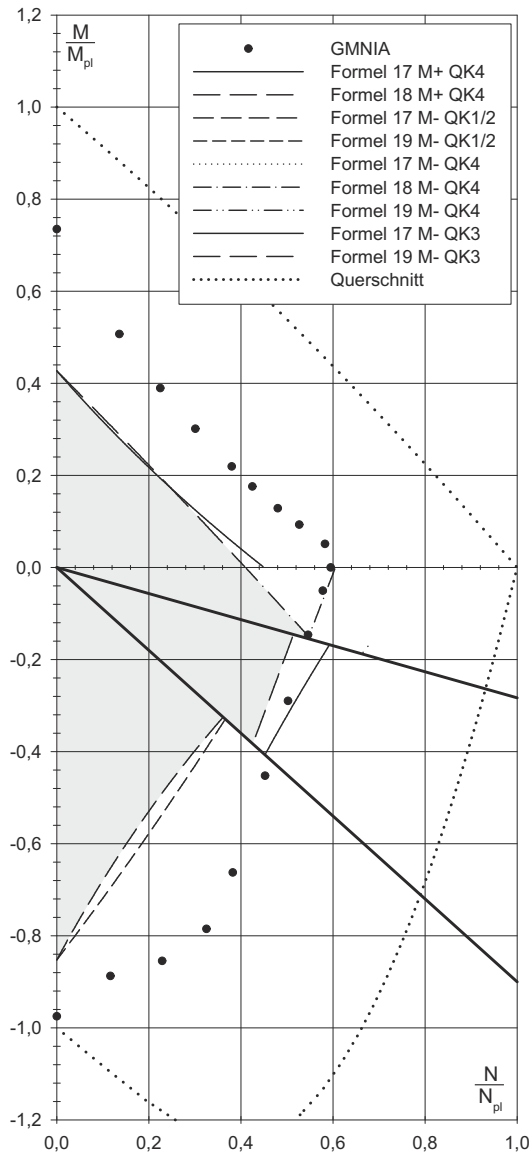


Abbildung 5.5: $\frac{1}{2}$ IPE300-LB20

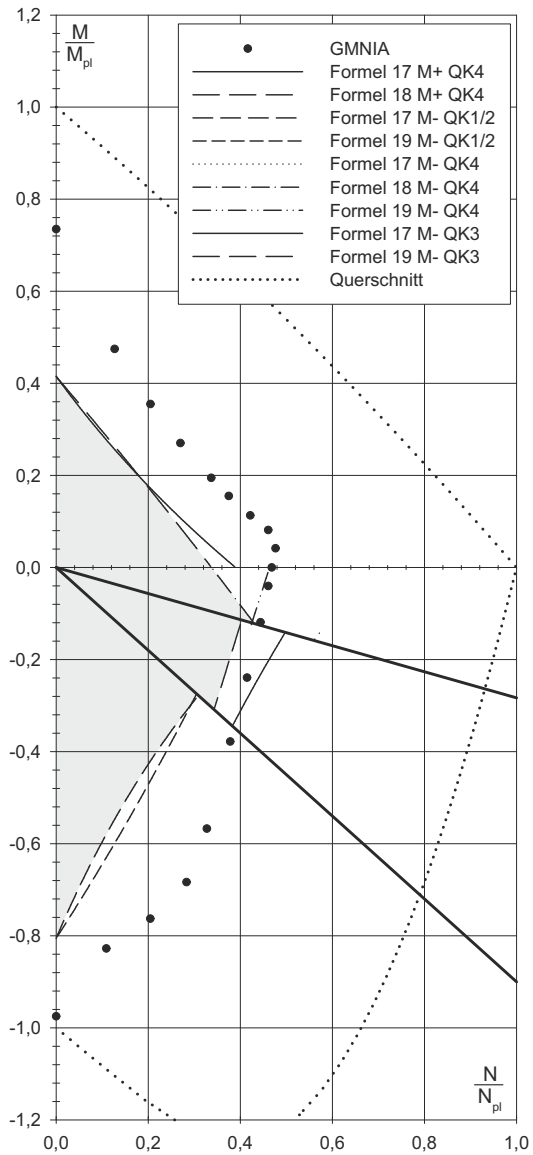


Abbildung 5.6: $\frac{1}{2}$ IPE300-LB25

5 Ergebnisse - Traglastergebnisse im Vergleich zu Eurocoderegeln

Tabelle 5.1: Beiwerte $\frac{1}{2}$ IPE300

L/B	L [m]	$\bar{\lambda}_y$	χ_y	$\bar{\lambda}_z$	χ_z	$\bar{\lambda}_{TF}$	χ_{TF}
10	1,50	0,36718	0,91454	0,47669	0,85593	0,61802	0,77466
15	2,25	0,55077	0,81416	0,71504	0,71536	0,78025	0,67456
20	3,00	0,73437	0,70331	0,95339	0,56743	0,99381	0,54354
25	3,75	0,91796	0,58884	1,19173	0,43773	1,22126	0,42375

L/B	$\bar{\lambda}_{LT,s}$	$\chi_{LT,s}$	$\bar{\lambda}_{LT,l}$	$\chi_{LT,l}$	$\bar{\lambda}_{LT,pl,s}$	$\chi_{LT,pl,s}$	$\bar{\lambda}_{LT,pl,l}$	$\chi_{LT,pl,l}$
10	0,38869	0,85853	0,32753	0,90308	0,51794	0,76675	0,23269	0,97444
15	0,42463	0,83272	0,45254	0,81284	0,56583	0,73348	0,32150	0,90753
20	0,45970	0,80776	0,55856	0,73850	0,61256	0,70148	0,39682	0,85267
25	0,49340	0,78396	0,65120	0,67542	0,65746	0,67124	0,46264	0,80568

L/B	$\bar{\lambda}_{TF,eff}$	$\chi_{TF,eff}$	$\bar{\lambda}_{LT,s,effM+}$	$\chi_{LT,s,effM+}$	$\bar{\lambda}_{LT,s,effM-}$	$\chi_{LT,s,effM-}$	$\bar{\lambda}_{LT,l,effM-}$	$\chi_{LT,l,effM-}$
10	0,60210	0,78414	0,37378	0,86931	0,38874	0,85850	0,32738	0,90320
15	0,76016	0,68717	0,40835	0,84439	0,42469	0,83268	0,45232	0,81299
20	0,96821	0,55859	0,44207	0,82028	0,45976	0,80772	0,55830	0,73868
25	1,18981	0,43866	0,47448	0,79730	0,49346	0,78391	0,65089	0,67563

5 Ergebnisse - Traglastergebnisse im Vergleich zu Eurocoderegeln

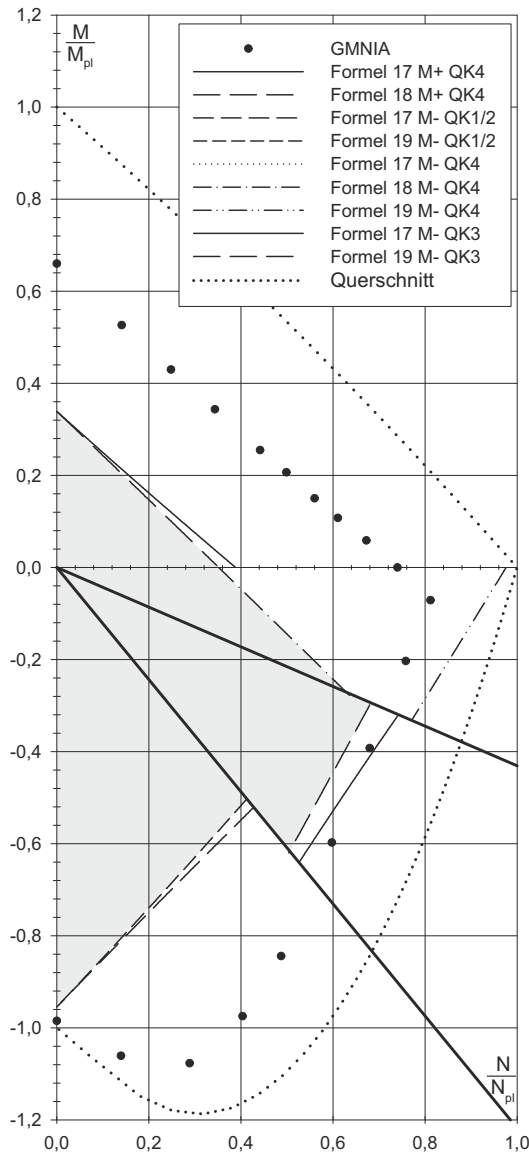


Abbildung 5.7: $\frac{1}{2}$ IPE600-LB10

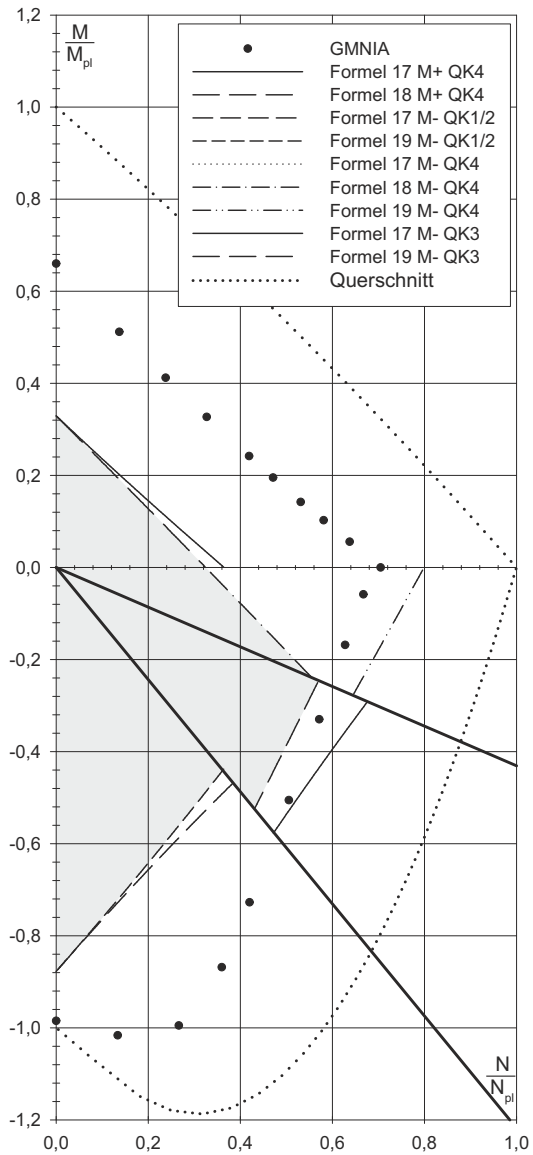


Abbildung 5.8: $\frac{1}{2}$ IPE600-LB15

5 Ergebnisse - Traglastergebnisse im Vergleich zu Eurocoderegeln

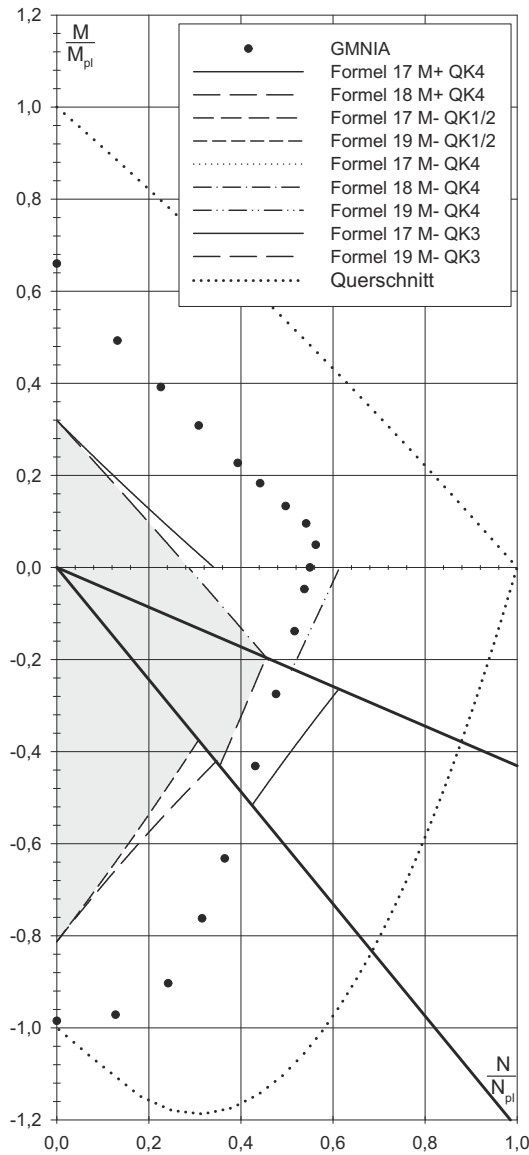


Abbildung 5.9: $\frac{1}{2}$ IPE600-LB20

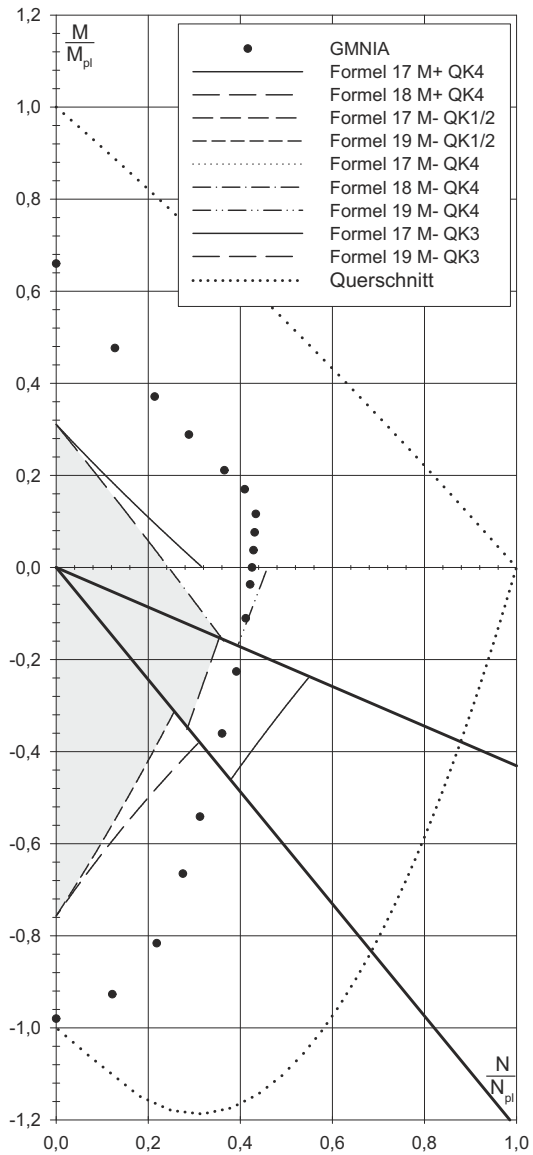


Abbildung 5.10: $\frac{1}{2}$ IPE600-LB25

5 Ergebnisse - Traglastergebnisse im Vergleich zu Eurocoderegeln

Tabelle 5.2: Beiwerte $\frac{1}{2}$ IPE600

L/B	L [m]	$\bar{\lambda}_y$	χ_y	$\bar{\lambda}_z$	χ_z	$\bar{\lambda}_{TF}$	χ_{TF}
10	2,20	0,25662	0,97121	0,50327	0,84116	0,71937	0,71266
15	3,30	0,38493	0,90526	0,75490	0,69046	0,87099	0,61775
20	4,40	0,51324	0,83556	1,00654	0,53615	1,08096	0,49447
25	5,50	0,64155	0,76049	1,25817	0,40695	1,31283	0,38345

L/B	$\bar{\lambda}_{LT,s}$	$\chi_{LT,s}$	$\bar{\lambda}_{LT,l}$	$\chi_{LT,l}$	$\bar{\lambda}_{LT,pl,s}$	$\chi_{LT,pl,s}$	$\bar{\lambda}_{LT,pl,l}$	$\chi_{LT,pl,l}$
10	0,49474	0,78301	0,33533	0,89735	0,66057	0,66917	0,25803	0,95502
15	0,53458	0,75514	0,47078	0,79991	0,71376	0,63419	0,36226	0,87767
20	0,57323	0,72838	0,58773	0,71842	0,76537	0,60122	0,45226	0,81304
25	0,61083	0,70265	0,69071	0,64923	0,81557	0,57022	0,53150	0,75728

L/B	$\bar{\lambda}_{TF,eff}$	$\chi_{TF,eff}$	$\bar{\lambda}_{LT,s,effM+}$	$\chi_{LT,s,effM+}$	$\bar{\lambda}_{LT,s,effM-}$	$\chi_{LT,s,effM-}$	$\bar{\lambda}_{LT,l,effM-}$	$\chi_{LT,l,effM-}$
10	0,67836	0,73804	0,42094	0,83536	0,49477	0,78300	0,33527	0,89739
15	0,82134	0,64876	0,45483	0,81121	0,53461	0,75512	0,47071	0,79996
20	1,01933	0,52880	0,48772	0,78796	0,57326	0,72836	0,58763	0,71849
25	1,23799	0,41604	0,51971	0,76551	0,61086	0,70263	0,69060	0,64930

5 Ergebnisse - Traglastergebnisse im Vergleich zu Eurocoderegeln

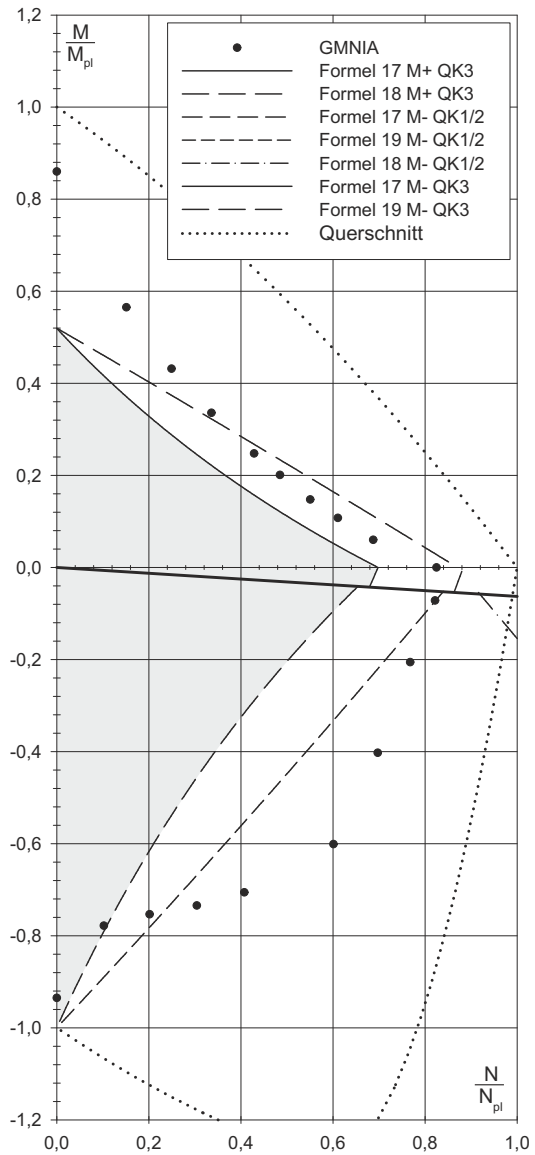


Abbildung 5.11: $\frac{1}{2}$ HEB360-LB10

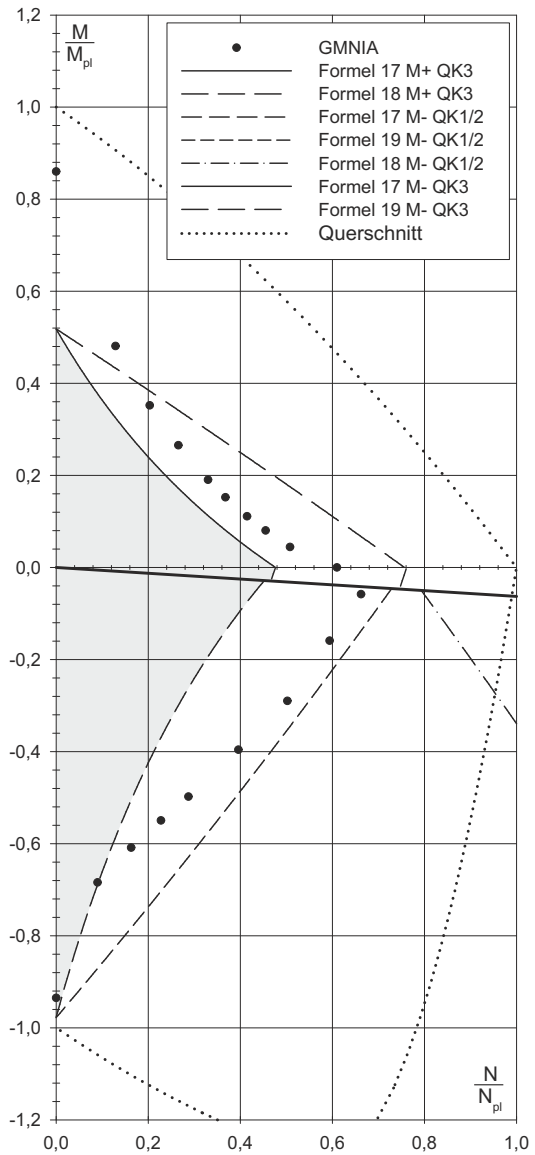


Abbildung 5.12: $\frac{1}{2}$ HEB360-LB15

5 Ergebnisse - Traglastergebnisse im Vergleich zu Eurocoderegeln

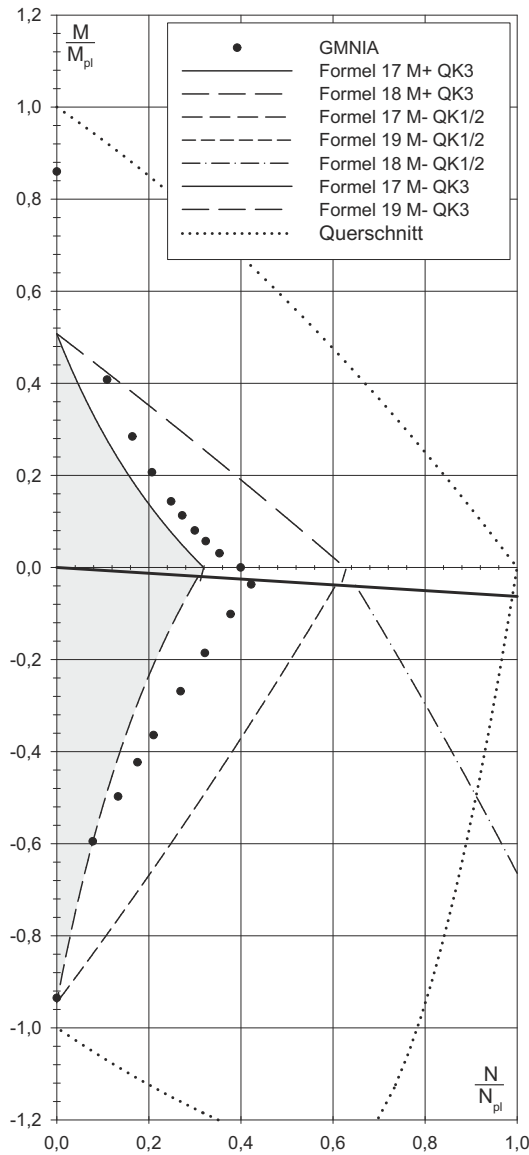


Abbildung 5.13: $\frac{1}{2}$ HEB360-LB20

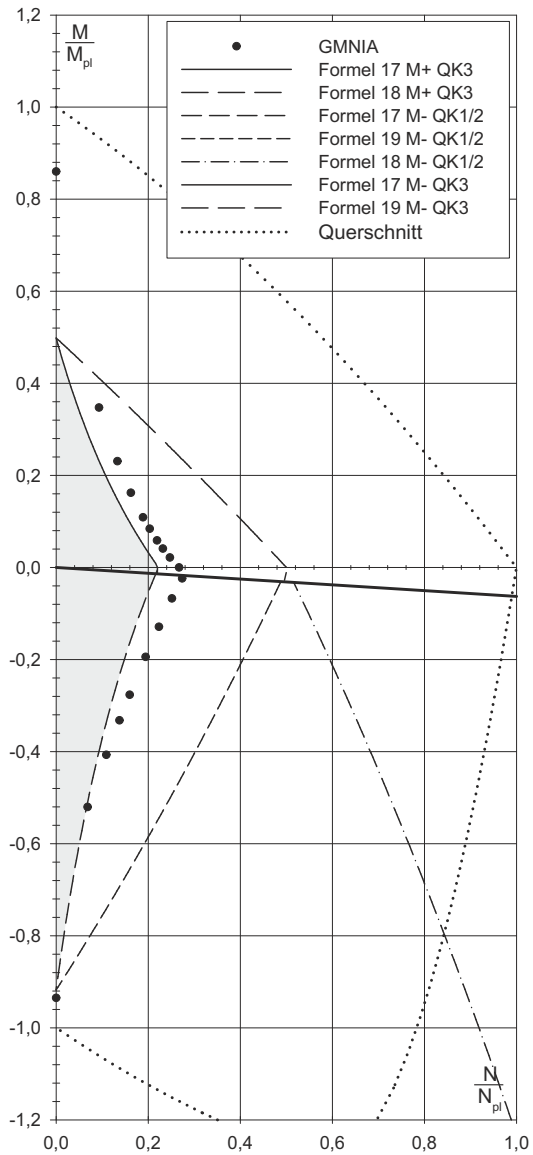


Abbildung 5.14: $\frac{1}{2}$ HEB360-LB25

5 Ergebnisse - Traglastergebnisse im Vergleich zu Eurocoderegeln

Tabelle 5.3: Beiwerte $\frac{1}{2}$ HEB360

L/B	L [m]	$\bar{\lambda}_y$	χ_y	$\bar{\lambda}_z$	χ_z	$\bar{\lambda}_{TF}$	χ_{TF}
10	3,00	0,74282	0,69803	0,42632	0,88331	0,45068	0,87017
15	4,50	1,11422	0,47674	0,63948	0,76174	0,64783	0,75669
20	6,00	1,48563	0,31924	0,85264	0,62918	0,85787	0,62591
25	7,50	1,85704	0,22257	1,06580	0,50274	1,06968	0,50061

L/B	$\bar{\lambda}_{LT,s}$	$\chi_{LT,s}$	$\bar{\lambda}_{LT,l}$	$\chi_{LT,l}$	$\bar{\lambda}_{LT,pl,s}$	$\chi_{LT,pl,s}$	$\bar{\lambda}_{LT,pl,l}$	$\chi_{LT,pl,l}$
10	0,17528	1,00000	0,27659	0,94098	0,24317	0,96637	0,17673	1,00000
15	0,20390	0,99692	0,35707	0,88146	0,28287	0,93625	0,22815	0,97795
20	0,22932	0,97705	0,42350	0,83353	0,31814	0,91000	0,27060	0,94549
25	0,25232	0,95937	0,48121	0,79254	0,35006	0,88657	0,30748	0,91790

Tabelle 5.4: Beiwerte $\frac{1}{2}$ HEM500

L/B	L [m]	$\bar{\lambda}_y$	χ_y	$\bar{\lambda}_z$	χ_z	$\bar{\lambda}_{TF}$	χ_{TF}
10	3.06	0.48139	0.85334	0.43659	0.87779	0.45057	0.87023
15	4.59	1.11422	0.47674	0.63948	0.76174	0.64783	0.75669
20	6.12	1.48563	0.31924	0.85264	0.62918	0.85787	0.62591
25	7.65	1.85704	0.22257	1.06580	0.50274	1.06968	0.50061

L/B	$\bar{\lambda}_{LT,s}$	$\chi_{LT,s}$	$\bar{\lambda}_{LT,l}$	$\chi_{LT,l}$	$\bar{\lambda}_{LT,pl,s}$	$\chi_{LT,pl,s}$	$\bar{\lambda}_{LT,pl,l}$	$\chi_{LT,pl,l}$
10	0.19075	1.00000	0.24751	0.96305	0.26200	0.95201	0.17705	1.00000
15	0.20390	0.99692	0.35707	0.88146	0.28287	0.93625	0.22815	0.97795
20	0.22932	0.97705	0.42350	0.83353	0.31814	0.91000	0.27060	0.94549
25	0.25232	0.95937	0.48121	0.79254	0.35006	0.88657	0.30748	0.91790

5 Ergebnisse - Traglastergebnisse im Vergleich zu Eurocoderegeln

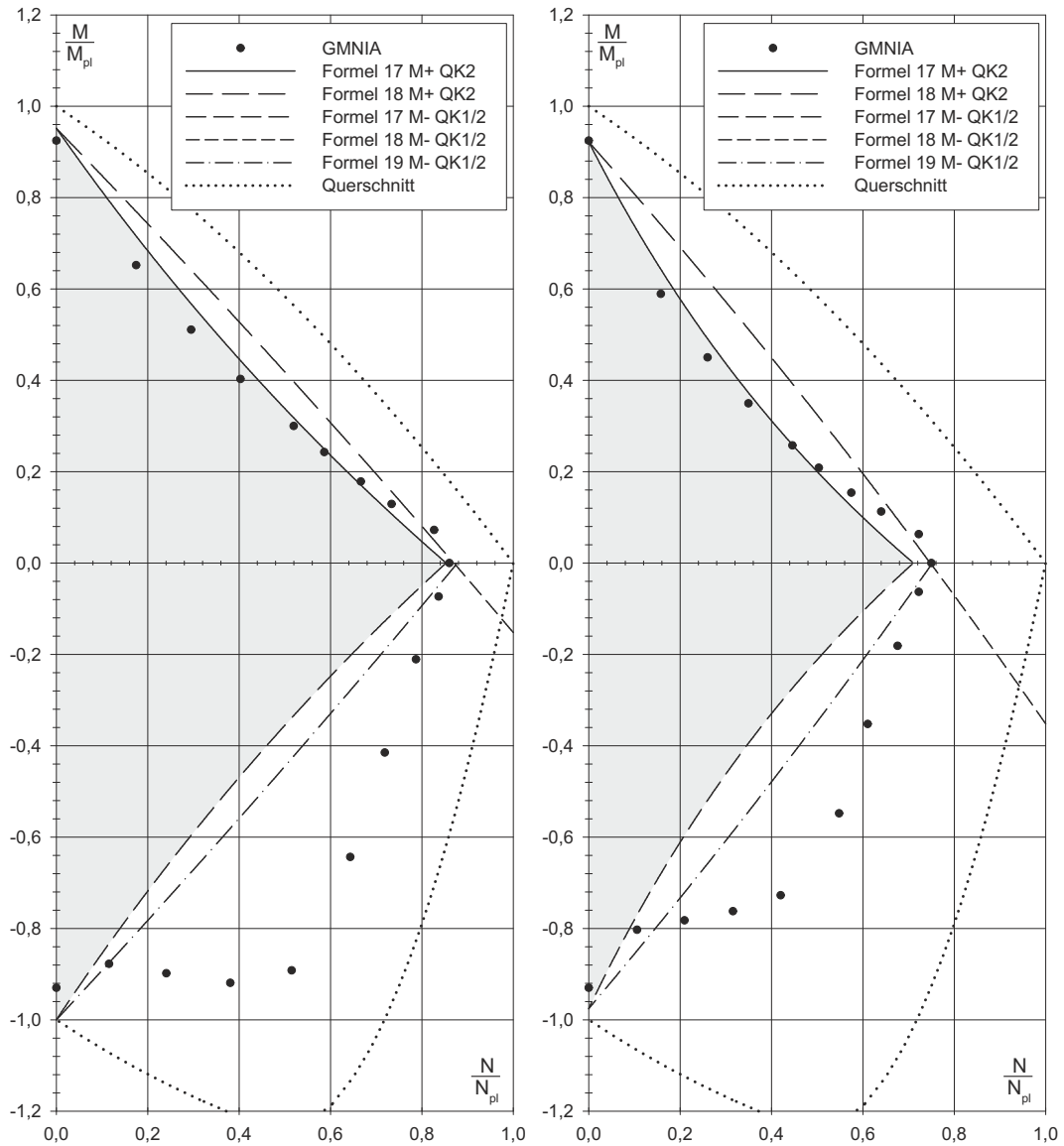
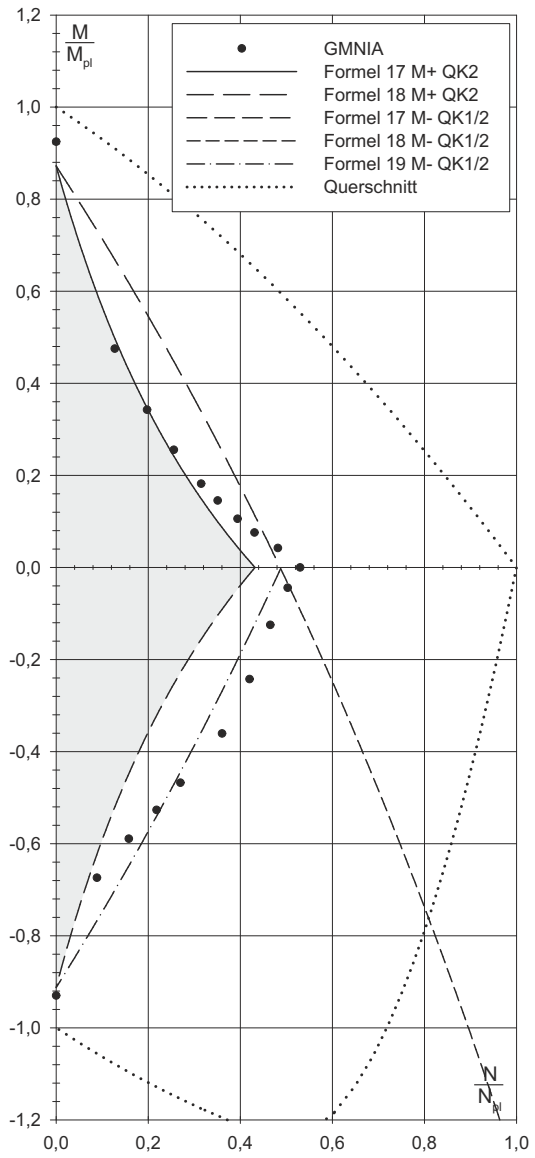
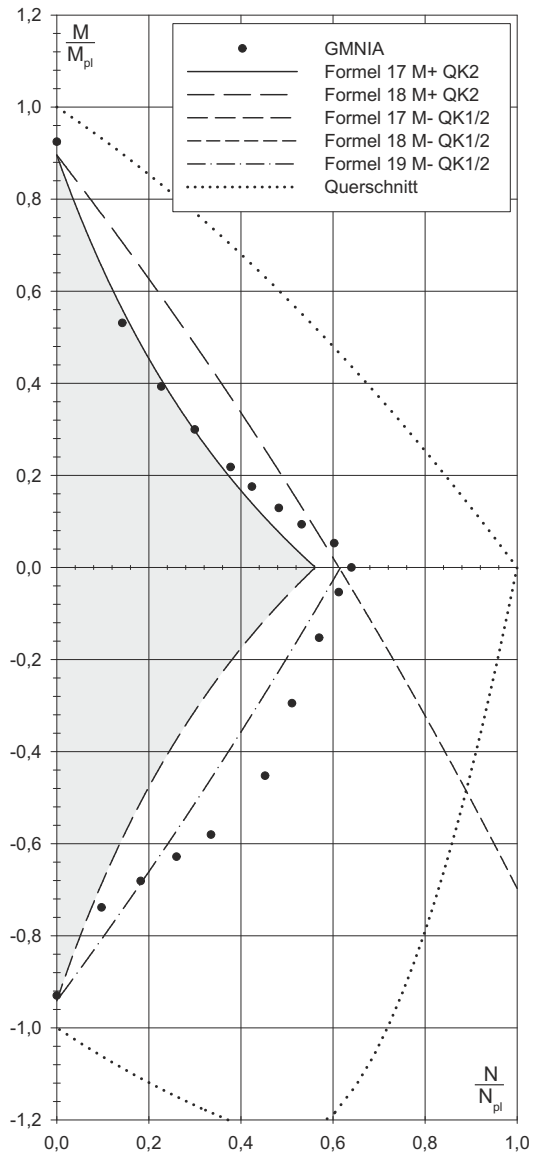


Abbildung 5.15: $\frac{1}{2}$ HEM500-LB10

Abbildung 5.16: $\frac{1}{2}$ HEM500-LB15

5 Ergebnisse - Traglastergebnisse im Vergleich zu Eurocoderegeln



5 Ergebnisse - Traglastergebnisse im Vergleich zu Eurocoderegeln

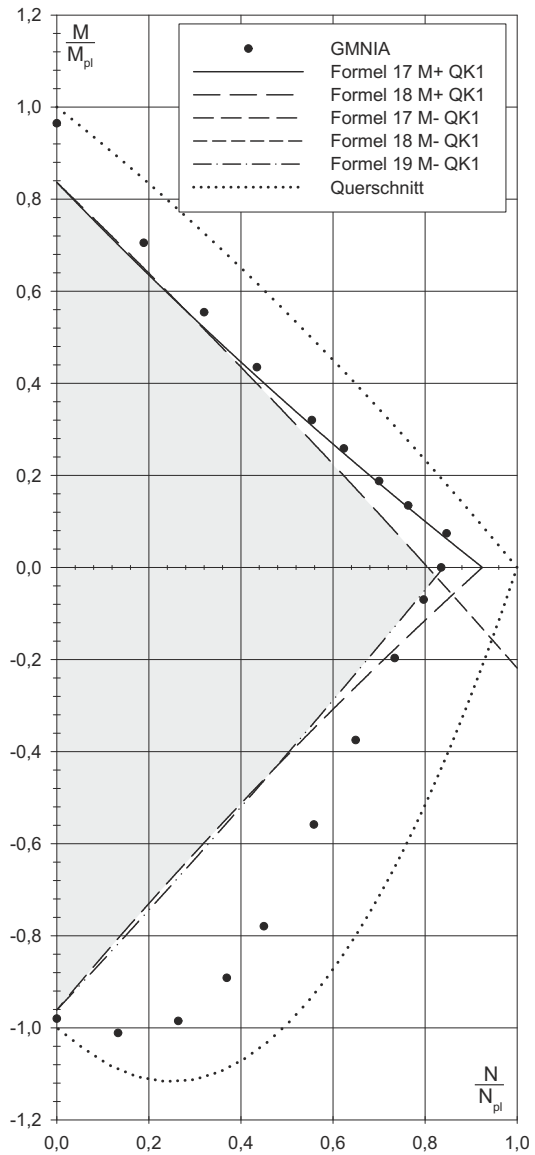


Abbildung 5.19: KAIM140-LB10

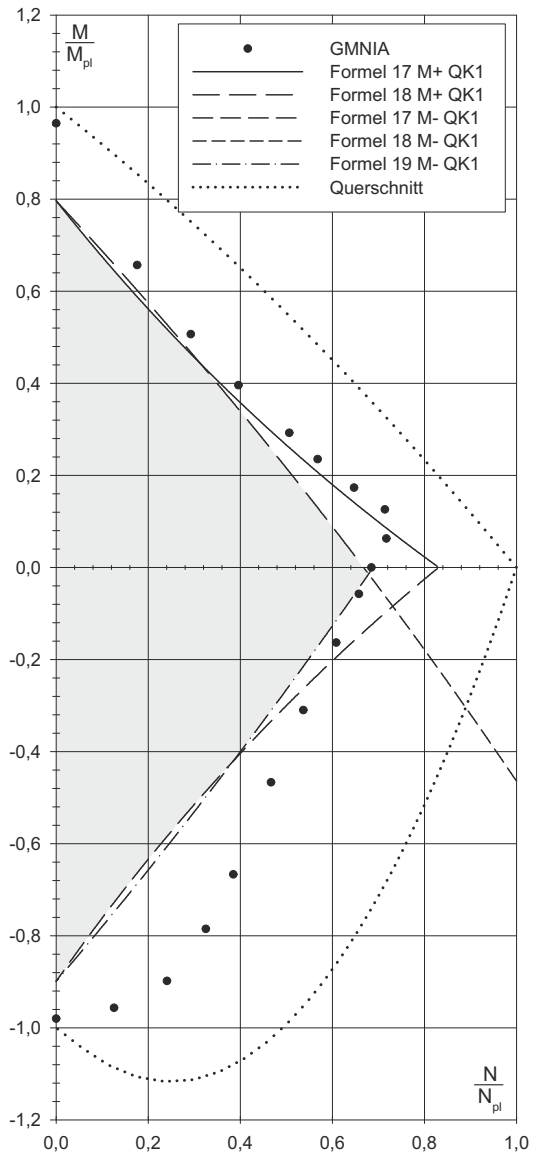


Abbildung 5.20: KAIM140-LB15

5 Ergebnisse - Traglastergebnisse im Vergleich zu Eurocoderegeln

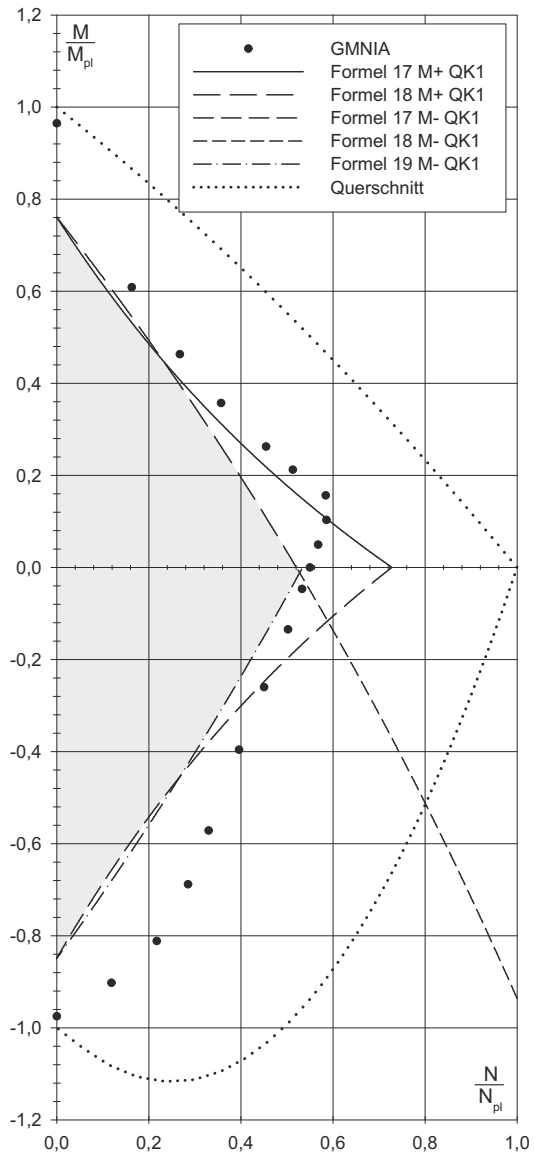


Abbildung 5.21: KAIM140-LB20

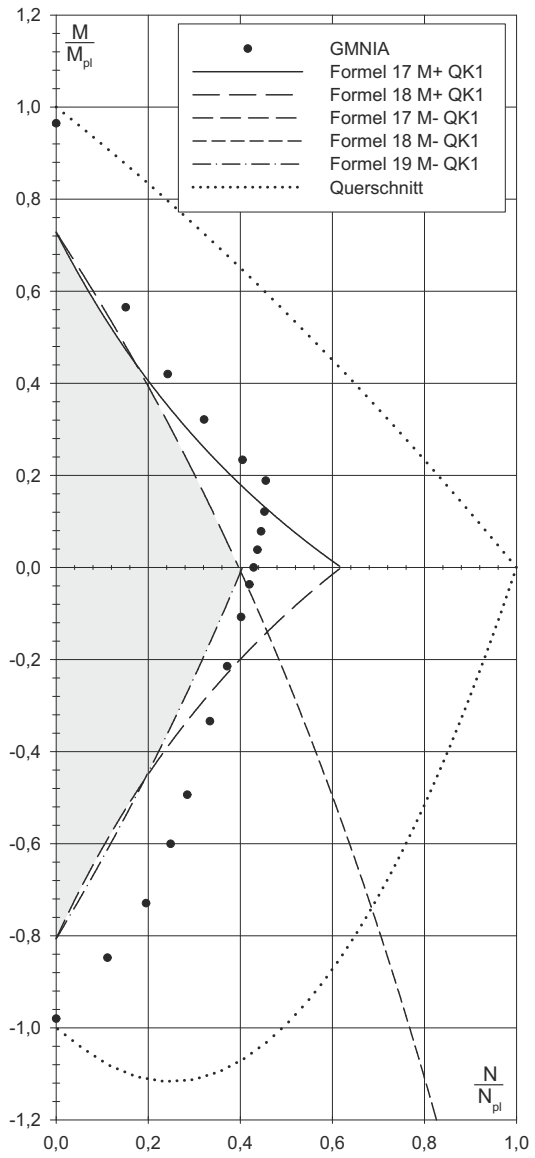


Abbildung 5.22: KAIM140-LB25

5 Ergebnisse - Traglastergebnisse im Vergleich zu Eurocoderegeln

Tabelle 5.5: Beiwerte $\frac{1}{2}$ KAIM₁₄₀

L/B	L [m]	$\bar{\lambda}_y$	χ_y	$\bar{\lambda}_z$	χ_z	$\bar{\lambda}_{TF}$	χ_{TF}
10	1,40	0.34726	0.92488	0.50522	0.84007	0.56439	0.80628
15	2,10	0.52089	0.83124	0.75783	0.68863	0.79072	0.66798
20	2,80	0.69452	0.72808	1.01044	0.53391	1.03343	0.52079
25	3,50	0.86815	0.61952	1.26305	0.40479	1.28084	0.39701

L/B	$\bar{\lambda}_{LT,s}$	$\chi_{LT,s}$	$\bar{\lambda}_{LT,l}$	$\chi_{LT,l}$	$\bar{\lambda}_{LT,pl,s}$	$\chi_{LT,pl,s}$	$\bar{\lambda}_{LT,pl,l}$	$\chi_{LT,pl,l}$
10	0.31210	0.91447	0.29116	0.93005	0.41919	0.83662	0.24957	0.96147
15	0.35381	0.88383	0.38813	0.85894	0.47520	0.79679	0.33269	0.89929
20	0.39185	0.85625	0.46848	0.80154	0.52629	0.76092	0.40157	0.84926
25	0.42693	0.83108	0.53814	0.75266	0.57340	0.72826	0.46128	0.80664

Anmerkungen zu den Ergebnissen (Abbildung 5.3 ff.)

Bei doppelt symmetrischen Profilen ist es im Stahlbau nicht möglich, dass bei Beanspruchungen infolge $N \& M_y$ M_{pl} überschritten wird. Wie die Diagramme allerdings zeigen, wird bei T-Profilen im Bereich negativer Momente mit etwas Drucknormalkraft die plastische Momententragfähigkeit überschritten.

Auffallend sind die Sprünge in der Tragfähigkeit bei Veränderung der Querschnittsklasse, vor allem da die Tragfähigkeit nach Eurocode manchmal abnimmt sobald eine „bessere“ Querschnittsklasse erreicht wird. Diese Sprünge sind jedoch relativ einfach zu erklären. Ab dem Übergang von Klasse 4 auf Klasse 3 wird statt dem effektiven Querschnitt der Bruttoquerschnitt verwendet. Dies sollte zu höheren Tragfähigkeiten führen (siehe z.B. Abbildung 5.7). Es fällt allerdings auch das Versatzmoment $N * \Delta e_z$ weg, welches im Bereich negativer Momente günstig wirkt. Dadurch ergibt sich manchmal ein Rücksprung im Interaktionsdiagramm (siehe z.B. Abbildung 5.5). Der zweite Sprung findet am Übergang von Klasse 3 auf Klasse 2 statt. Bei Klasse 3 wird $W_{y,l}$ ($M_{y,el}$ in Achse 1) verwendet. Das

5 Ergebnisse - Traglastergebnisse im Vergleich zu Eurocoderegeln

elastische Widerstandsmoment (Klasse 3) ist bei einfach symmetrischen Querschnitten größer als das plastische Widerstandsmoment $W_{y,pl}$ (Klasse 2 und 1). Dadurch springt auch hier die Tragfähigkeit unerwartet zurück (z. B. Abbildung 5.3). Die Neigung der geplotteten Formeln bei negativen Momenten und geringen Normalkräften im plastischen Bereich bei Klasse 2 und 1 (Winkel β_2 in Abbildung 5.3) ist durch das kleinere plastische Widerstandsmoment flacher als im elastischen Bereich bei Klasse 3 (Winkel β_3 in Abbildung 5.3).

Die GMNIA Ergebnisse bilden in den meisten Diagrammen im Bereich negativer Momente eine Krümmung nach außen (siehe z. B. Abbildung 5.3). Diese Krümmung folgt im Ansatz der des reinen plastischen Querschnittsversagens, ist folglich bei kürzeren Trägerlängen ausgeprägter als bei längeren Trägern. Die Formeln des EC3 NA decken dieses günstige Tragverhalten jedoch nicht ab. Manchmal übersteigt die Tragfähigkeit sogar $M_{y,pl}$ (z. B. Werte „w1“ in Abbildung 5.3), es wird jedoch nicht empfohlen diese erhöhte Momententragfähigkeit zuzulassen, da hierfür immer ausreichend Drucknormalkraft gewährleistet sein müsste. Interessanterweise decken die steileren Formeln für Querschnittsklasse 3 (Winkel β_3 in Abbildung 5.3) die GMNIA Ergebnisse in manchen Teilen besser ab als die flacheren plastischen Formeln (Winkel β_2 in Abbildung 5.3). Es ist jedoch schwierig zu sagen, wie lange die Formeln für Querschnittsklasse 3 auch in Klasse 2 genauere Ergebnisse liefern würden. Bei Abbildung 5.3 könnte man die Klasse 3 Formeln nach unten verlängern und erst bei $M/M_{y,pl} = -1$ abschneiden. Bei anderen Profilen wie z. B. in Abbildung 5.5 würde dies nicht so lange funktionieren. Es ist folglich schwierig diesen Bereich über die reine lineare Klasse 3 Interaktion hinaus allgemein abzudecken.

Laut EC3 NA wird für Querschnitte der Klassen 3 und 4 für negative Werte von $M_{y,Ed}$ die Erfüllung der Gleichungen 15 und 16 gefordert, wenn die Zugspannung im kleineren Gurt - hier der freie untere Stegrand - maßgebend wird. Sozusagen eine Begrenzung der Stahlzugspannung mit f_y . Tatsächlich wird dieser Bereich in keinem Interaktionsdiagramm dieser Arbeit erreicht. Für die untersuchten T-Profile sind diese Formeln nicht maßgebend, da in diesem Bereich immer Klasse 2 vorliegt. Im elastischen Bereich ist eine Begrenzung der Stahldruckspannung mit f_y sinnvoll (abgedeckt durch Formel (17) bis (19)), die Zugspannung mit f_y zu begrenzen erscheint nicht notwendig.

6 Bemessungsvorschlag - Beanspruchung $N&M_y$ bei T-Profilen

Um ein typisches T-Profil¹ einfacher und zutreffender bemessen zu können, wird in diesem Kapitel eine mögliche Vorgehensweise vorgeschlagen. Diese könnte als Basis für eine zukünftige verbesserte Version des Eurocodes dienen, wobei dann hierfür ergänzend noch experimentelle Versuche und statistische Überlegungen angestellt werden müssten. Die neu entwickelten Formeln decken auch nicht alle Feinheiten der GMNIA Ergebnisse ab und gelten nur für einen konstanten Momentenverlauf, liefern jedoch mit deutlich weniger Aufwand gegenüber der Vorgehensweise nach Eurocode NA (Formel (15) bis (19) nach Abschnitt 3) gute Ergebnisse.

Die Idee ist, die drei isolierten Teilbeanspruchungen (rein positives Moment $M^{(+)}$, reine Drucknormalkraft N und rein negatives Moment $M^{(-)}$) möglichst gut zu erreichen und diese Punkte des Interaktionsdiagramms dann zutreffend zu verbinden. Der Verlauf dieser Verbindungen wird ausschließlich über den Beiwert k_y gesteuert. Dieser Beiwert berücksichtigt die Vergrößerung der Momente von M^I (Th. I. O.) zu M^{II} (Th. II. O.). Auf die Anwendung von k_{LT} (Interaktion zw. Knicken infolge N und Biegedrillknicken) kann hingegen gänzlich verzichtet werden, da kein Versagen zufolge Biegedrillknicken (BDK) auftritt. Werte die hier nicht explizit angeführt werden sind Kapitel 3.3 zu entnehmen. Alle Werte und Ergebnisse entsprechen charakteristischen Werten, d. h. es wurde mit $\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1,0$ gerechnet. Im Anhang A.2 ist die Bemessung laut diesem Vorschlag für ein $\frac{1}{2}$ IPE300 Profil dargestellt.

¹Klasse 1 Gurt; halbiertes IPE, HEB oder HEA Walzprofil o. ä. geschweißtes Profil

6 Bemessungsvorschlag - Beanspruchung $N&M_y$ bei T-Profilen

a) Grenzfall 1, nur $M^{(+)}$

für QS Klasse 1 oder 2:

$$M_R^{(+)} = W_{y,pl} * f_y \quad (6.1)$$

für QS Klasse 3:

$$M_R^{(+)} = W_{y,s} * f_y \quad (6.2)$$

für QS Klasse 4:

$$M_R^{(+)} = W_{y,s,Eff} * f_y \quad (6.3)$$

b) Grenzfall 2, nur N

Analog dem Vorschlag in Kapitel 5.1 wird in der nachfolgenden Formel 6.6 $\bar{\lambda}_z$ und in Formel 6.9 $\bar{\lambda}_{z,Eff}$ eingesetzt.

für QS Klasse 1 bis 3:

$$N_R = \min[\chi_y, \chi_{TF}] * A * f_y \quad (6.4)$$

$$\chi_{TF} = \frac{1}{\Phi_{TF} + \sqrt{\Phi_{TF}^2 - \bar{\lambda}_{TF}^2}} \leq 1 \quad (6.5)$$

$$\Phi_{TF} = \frac{1}{2} \left[1 + \alpha (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_{TF}^2 \right] \quad (6.6)$$

für QS Klasse 4:

$$N_R = \min[\chi_{y,Eff}, \chi_{TF,Eff}] * A_{Eff} * f_y \quad (6.7)$$

$$\chi_{TF,Eff} = \frac{1}{\Phi_{TF,Eff} + \sqrt{\Phi_{TF,Eff}^2 - \bar{\lambda}_{TF,Eff}^2}} \leq 1 \quad (6.8)$$

$$\Phi_{TF,Eff} = \frac{1}{2} \left[1 + \alpha (\bar{\lambda}_{z,Eff} - 0,2) + \bar{\lambda}_{TF,Eff}^2 \right] \quad (6.9)$$

6 Bemessungsvorschlag - Beanspruchung N & M_y bei T-Profilen

c) Grenzfall 3, nur $M^{(-)}$

für QS Klasse 1 bis 4:

$$M_R^{(-)} = W_{y,pl} * f_y \quad (6.10)$$

Anm.: Es zeigte sich, dass bei negativen Momenten $M^{(-)}$ eine Differenzierung zwischen elastischen und plastischen Tragfähigkeiten nicht sinnvoll ist.

d) Interaktionsbeiwert k_y

für alle Querschnittsklassen:

$$k_y = 1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2)n_y \leq 1 + 0,8n_y \quad (6.11)$$

e) Interaktionsformeln

N und M_y sind in den nachfolgenden Formeln 6.12 bis 6.14 immer mit dem Absolutwert einzusetzen. In Formel 6.12 ist M_R für die jeweilige Momentenrichtung einzusetzen; in Formel 6.13 und 6.14 ist dies auch der Fall und durch $(+)$ und $(-)$ gekennzeichnet.

Insgesamt sind nunmehr nur 2 Formeln zu beachten (F1 bzw. F2).

Formel F1:

$$\frac{N}{\chi_y N_R} + k_y * \frac{M_y}{M_R} \leq 1 \quad (6.12)$$

Anm.: M_R entspricht dem zutreffenden Moment $M_R^{(+)}$ oder $M_R^{(-)}$.

Formel F2:

für positive Momente:

$$\frac{N}{\chi_{TF} N_R} + k_y * \frac{M_y}{M_R^{(+)}} \leq 1 \quad (6.13)$$

6 Bemessungsvorschlag - Beanspruchung $N&M_y$ bei T-Profilen

für negative Momente:

$$\frac{N}{\chi_{TF} N_R} + \frac{M_y}{M_R^{(-)}} \leq 1 \quad (6.14)$$

6.1 Ergebnisvergleich - Interaktionsdiagramme

Die Ergebnisse des Bemessungsvorschlages werden in Abbildung 6.1 bis 6.20 dargestellt. Die Linie F1 in den Interaktionsdiagrammen entspricht der Formel 6.12, die Linie F2 den Formeln 6.13 bzw. 6.14. Der nach dem Bemessungsvorschlag erlaubte Bereich von Wertepaaren N , $M^{(+)}$ bzw. $M^{(-)}$ entspricht dem Bereich zwischen Diagrammursprung und der jeweils nächsten (inneren) Linie F1 oder F2. Der graue Bereich stellt, wie in den Abbildungen 5.3 bis 5.22 eingetragen, den nach EC3 NA erlaubten Bereich dar.

Ergänzend sind auch wieder die zutreffenden Traglastergebnisse (GMNIA) sowie die reine Querschnittstragfähigkeit (QS plastisch) mit eingetragen.

6 Bemessungsvorschlag - Beanspruchung N & M_y bei T-Profilen

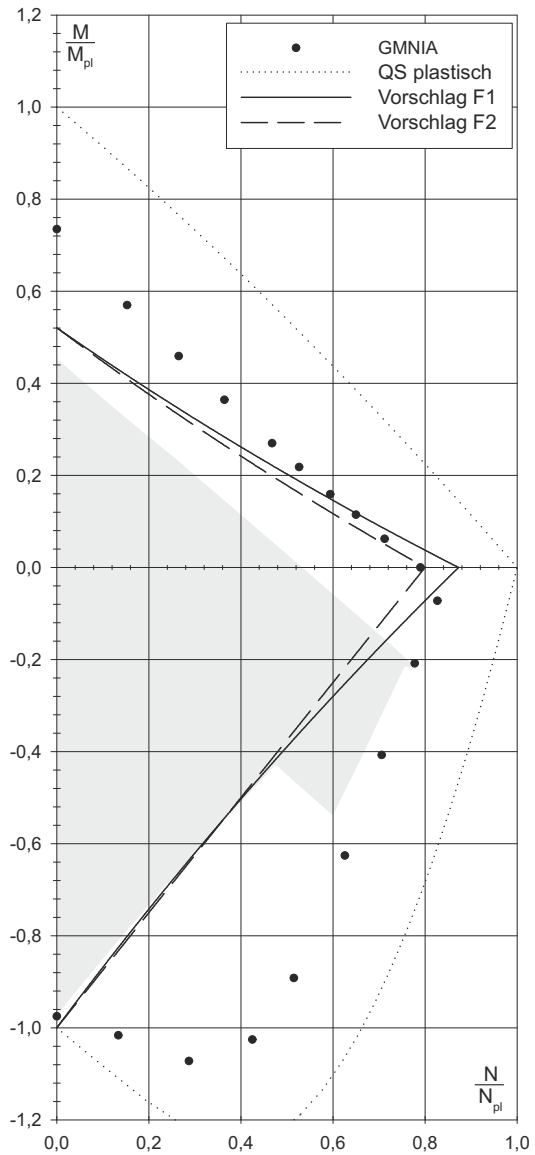


Abbildung 6.1: $\frac{1}{2}$ IPE300-LB10

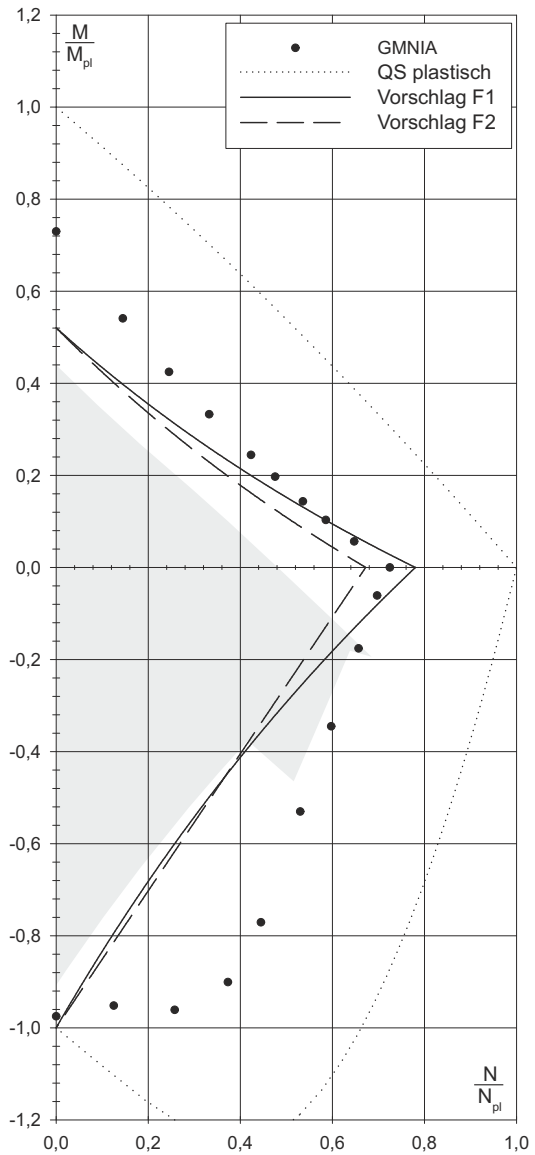


Abbildung 6.2: $\frac{1}{2}$ IPE300-LB15

6 Bemessungsvorschlag - Beanspruchung N & M_y bei T-Profilen

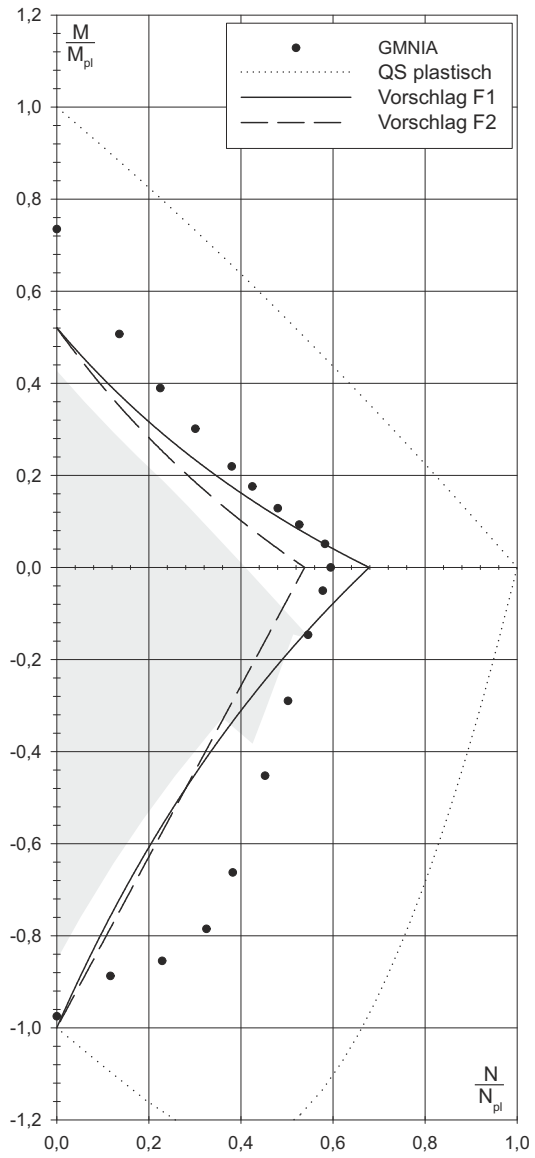


Abbildung 6.3: $\frac{1}{2}$ IPE300-LB20

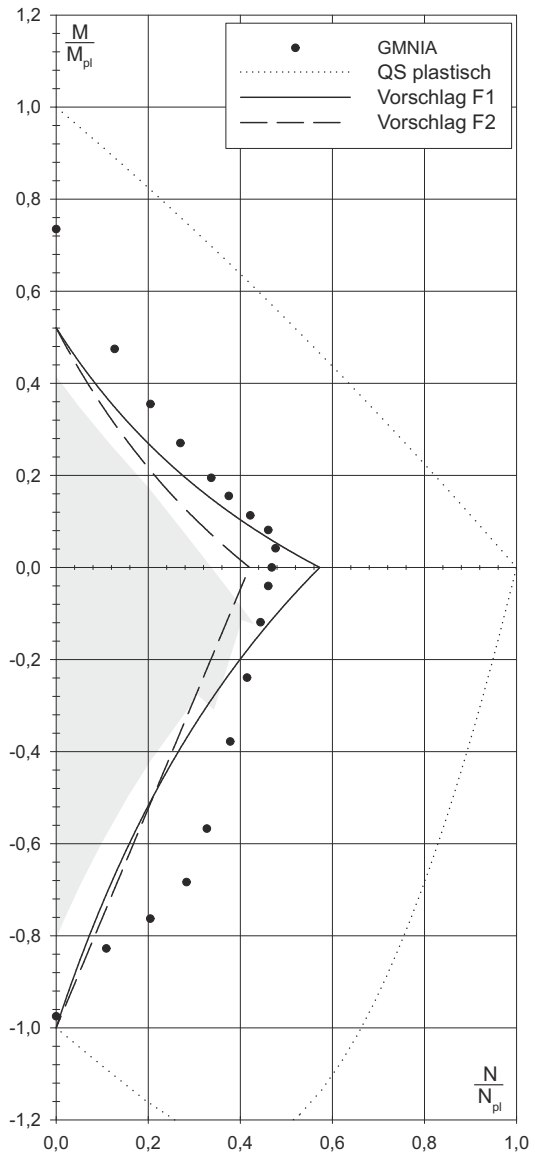


Abbildung 6.4: $\frac{1}{2}$ IPE300-LB25

6 Bemessungsvorschlag - Beanspruchung N & M_y bei T-Profilen

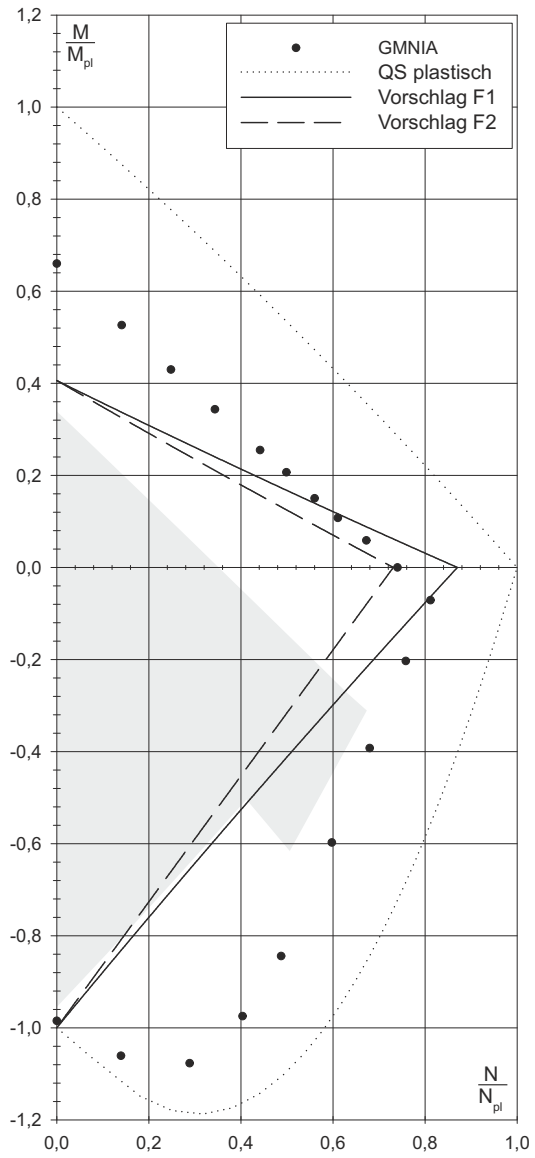


Abbildung 6.5: $\frac{1}{2}$ IPE600-LB10

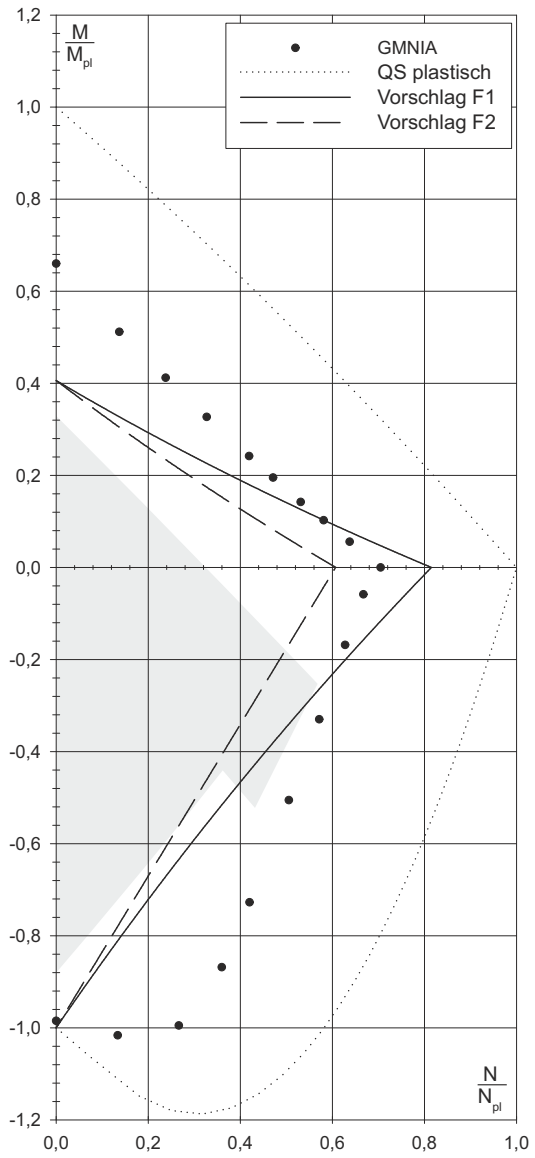


Abbildung 6.6: $\frac{1}{2}$ IPE600-LB15

6 Bemessungsvorschlag - Beanspruchung N & M_y bei T-Profilen

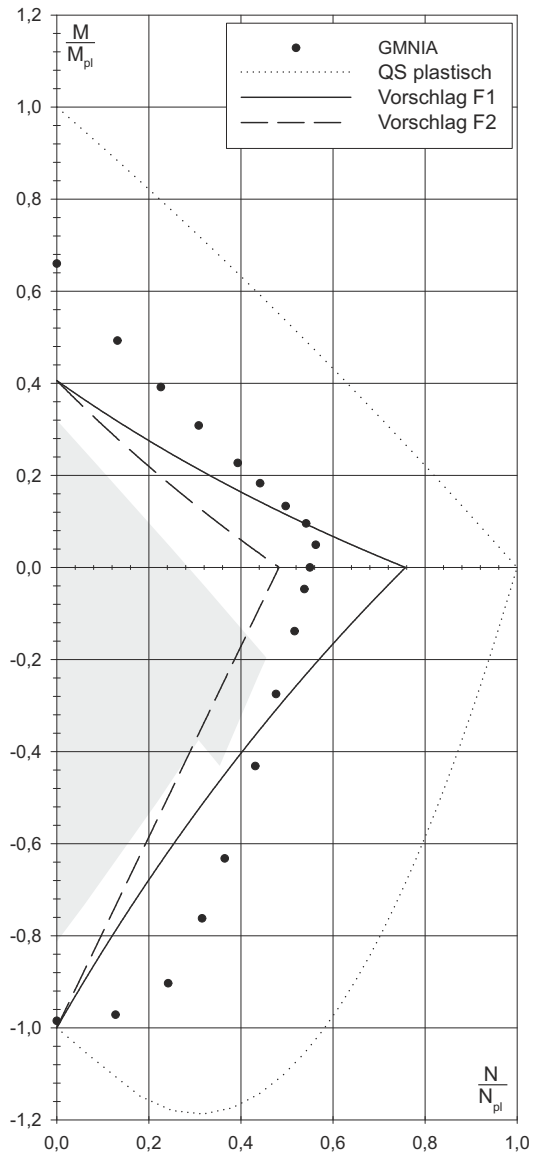


Abbildung 6.7: $\frac{1}{2}$ IPE600-LB20

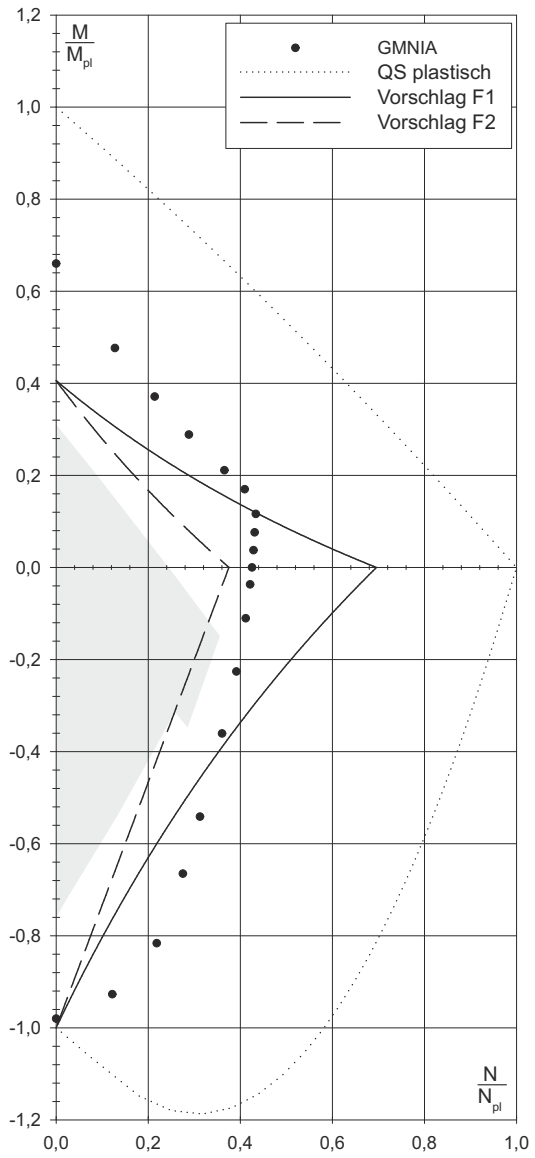


Abbildung 6.8: $\frac{1}{2}$ IPE600-LB25

6 Bemessungsvorschlag - Beanspruchung N & M_y bei T-Profilen

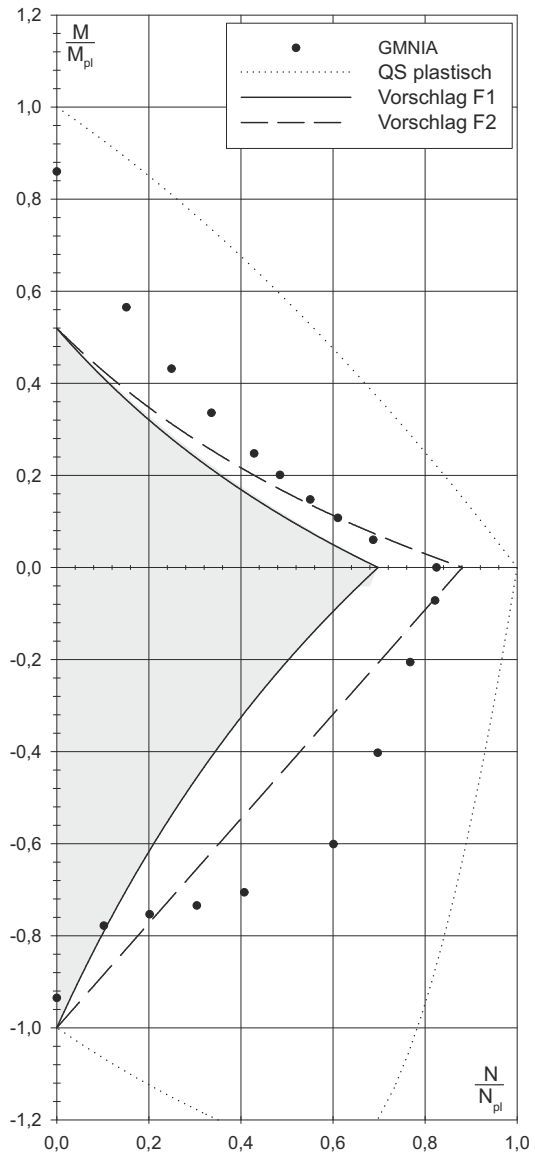


Abbildung 6.9: $\frac{1}{2}$ HEB360-LB10

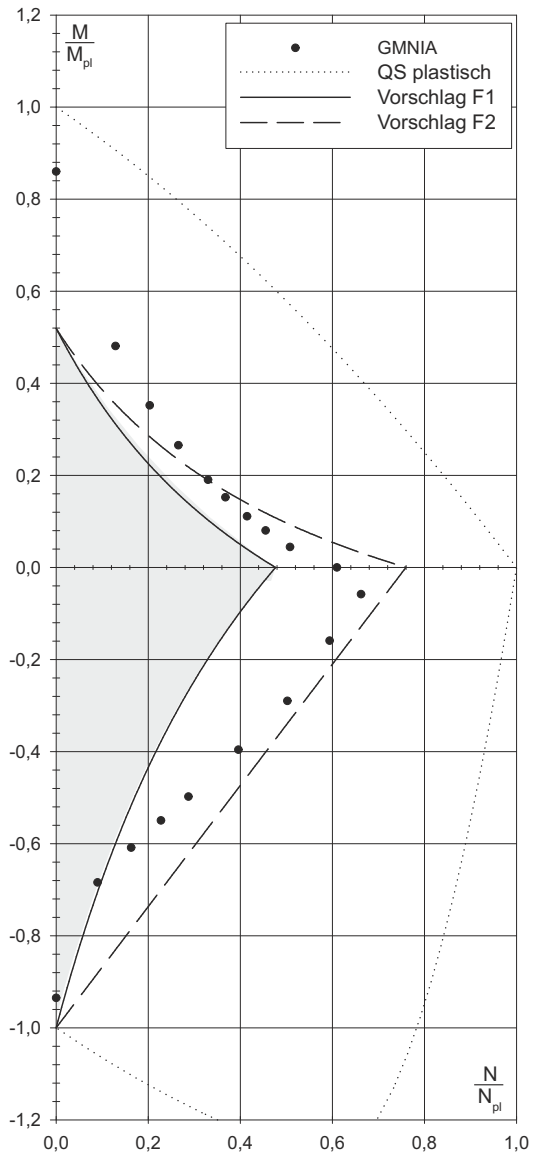


Abbildung 6.10: $\frac{1}{2}$ HEB360-LB15

6 Bemessungsvorschlag - Beanspruchung N & M_y bei T-Profilen

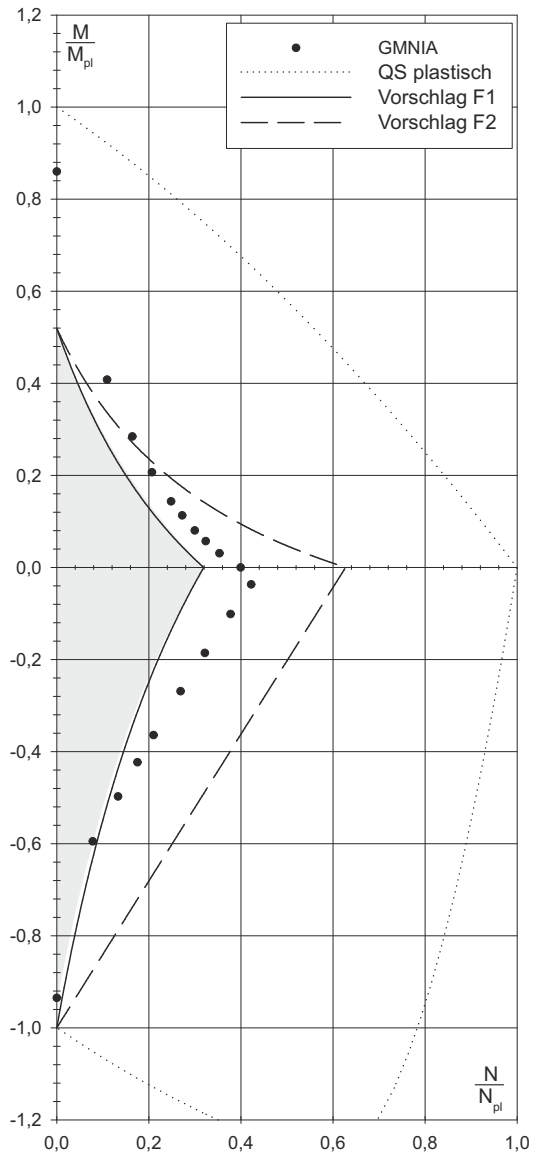


Abbildung 6.11: $\frac{1}{2}$ HEB360-LB20

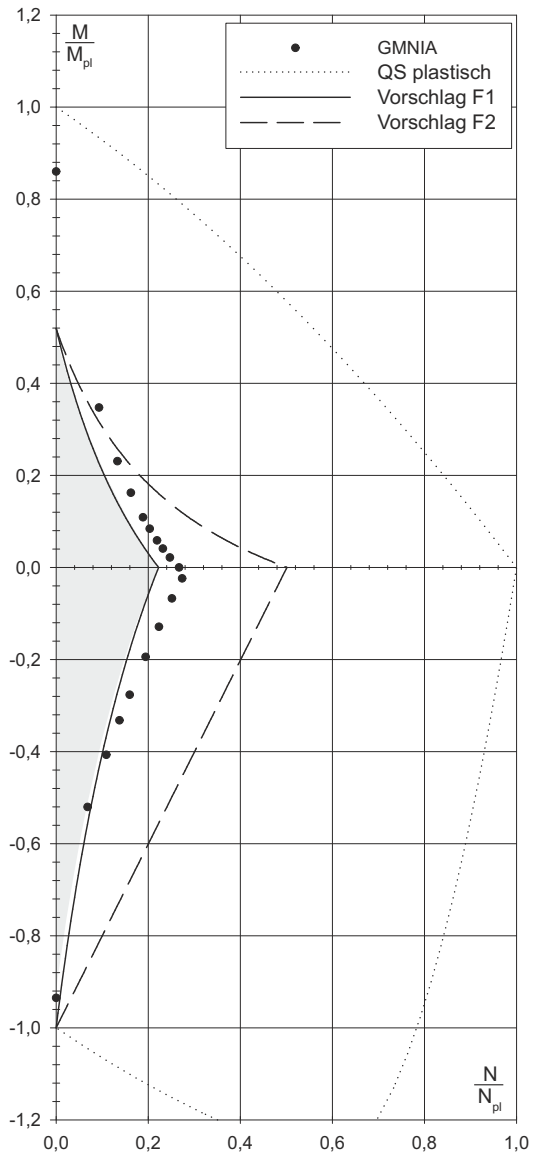
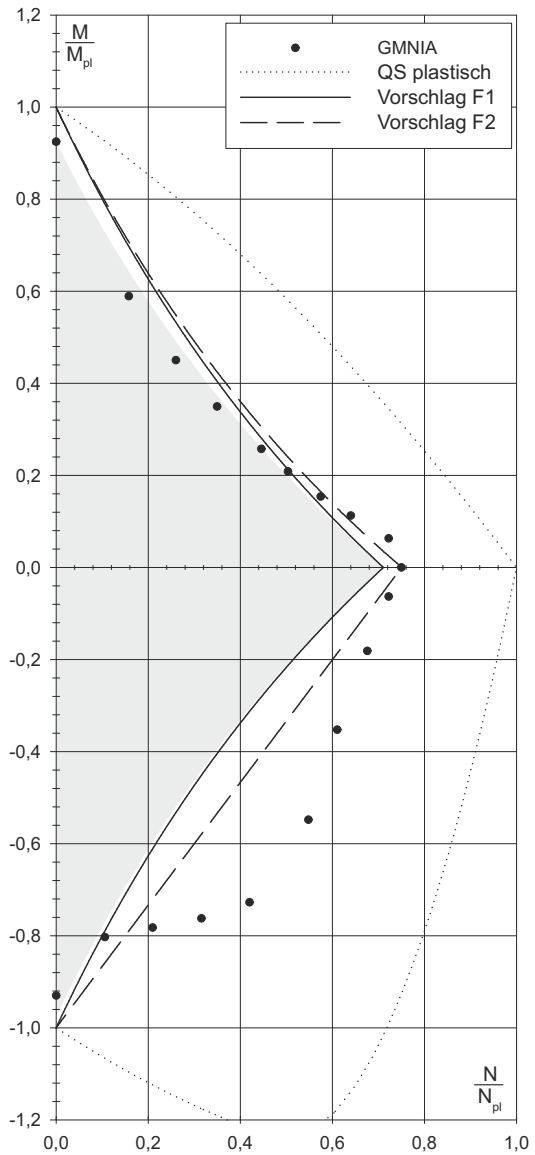
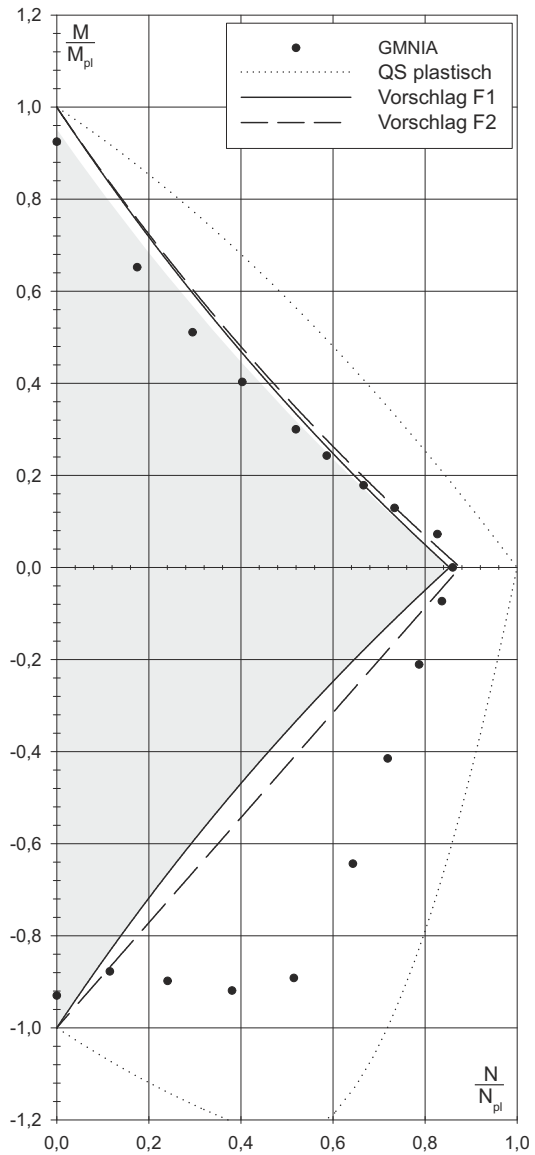


Abbildung 6.12: $\frac{1}{2}$ HEB360-LB25

6 Bemessungsvorschlag - Beanspruchung N & M_y bei T-Profilen



6 Bemessungsvorschlag - Beanspruchung N & M_y bei T-Profilen

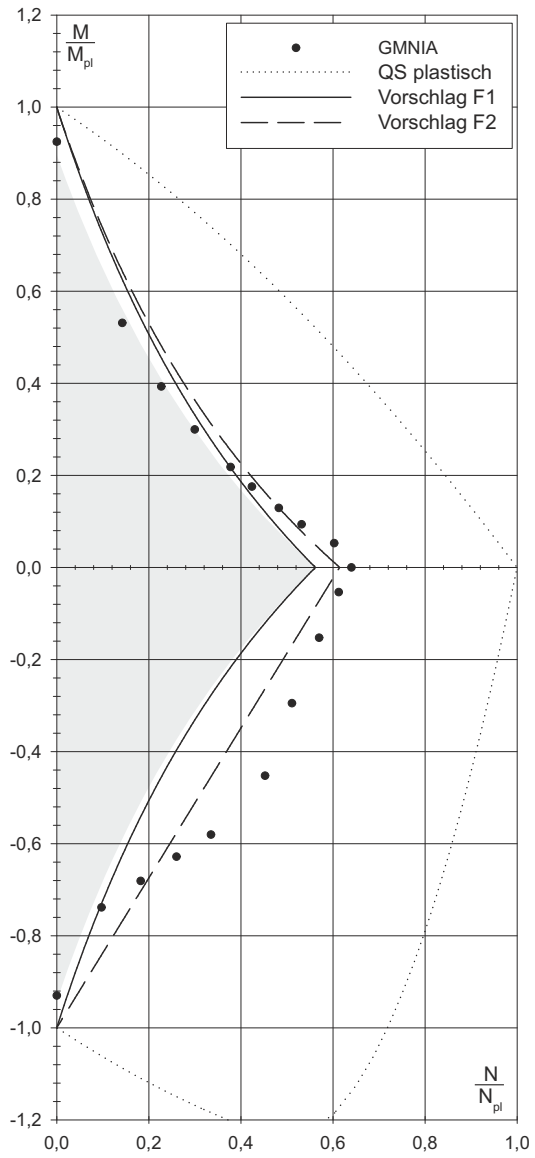


Abbildung 6.15: $\frac{1}{2}$ HEM500-LB20

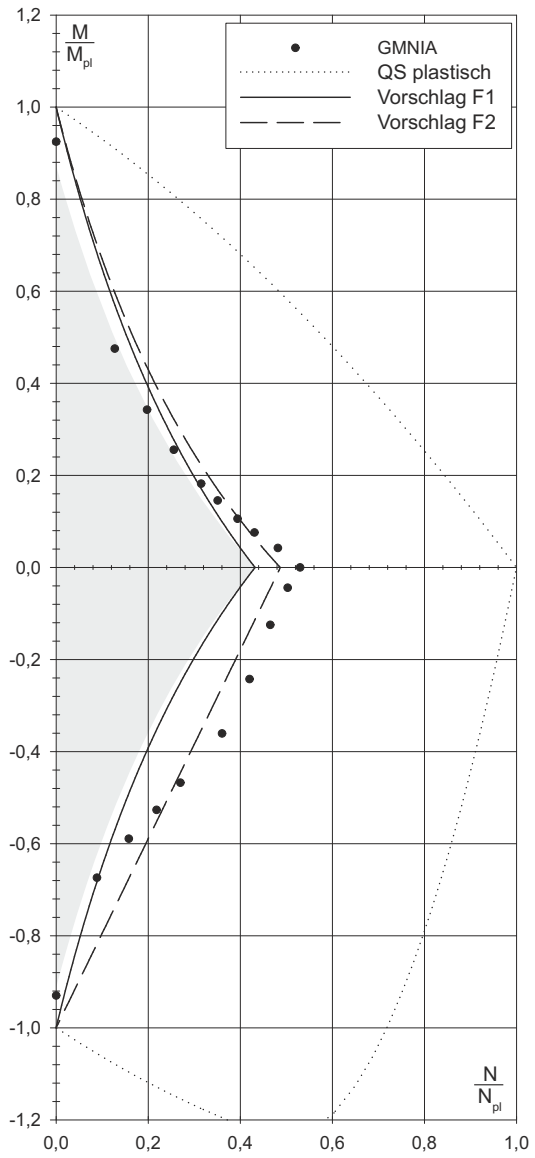


Abbildung 6.16: $\frac{1}{2}$ HEM500-LB25

6 Bemessungsvorschlag - Beanspruchung N & M_y bei T-Profilen

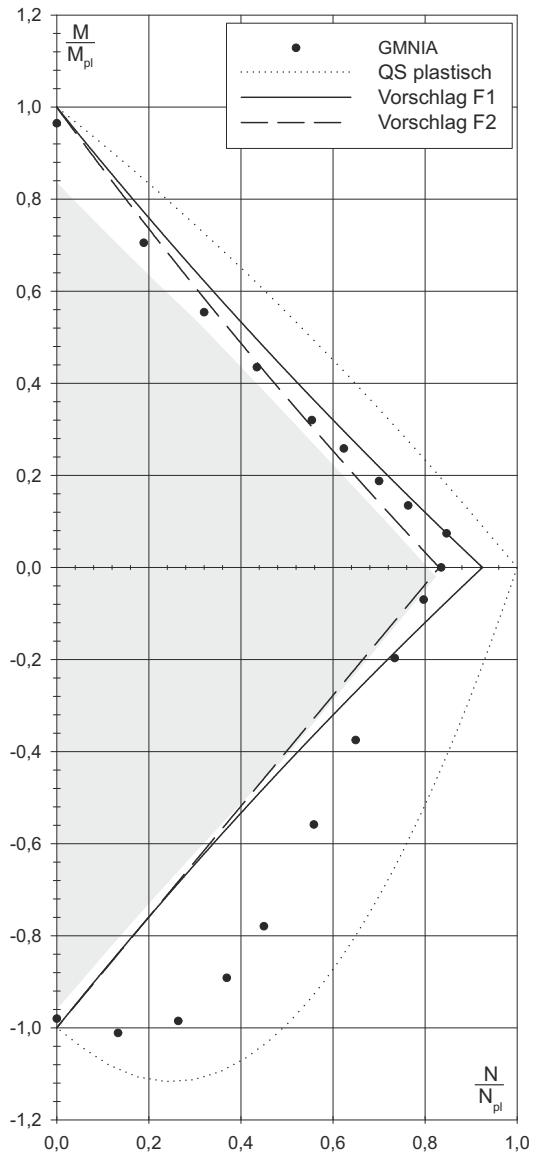


Abbildung 6.17: KAIM140-LB10

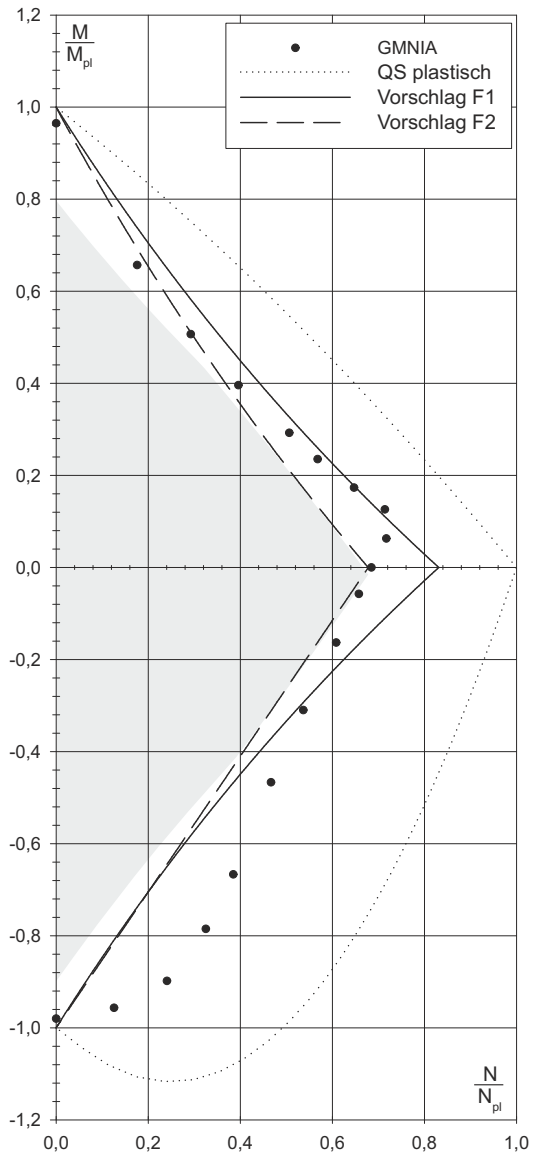


Abbildung 6.18: KAIM140-LB15

6 Bemessungsvorschlag - Beanspruchung N & M_y bei T-Profilen

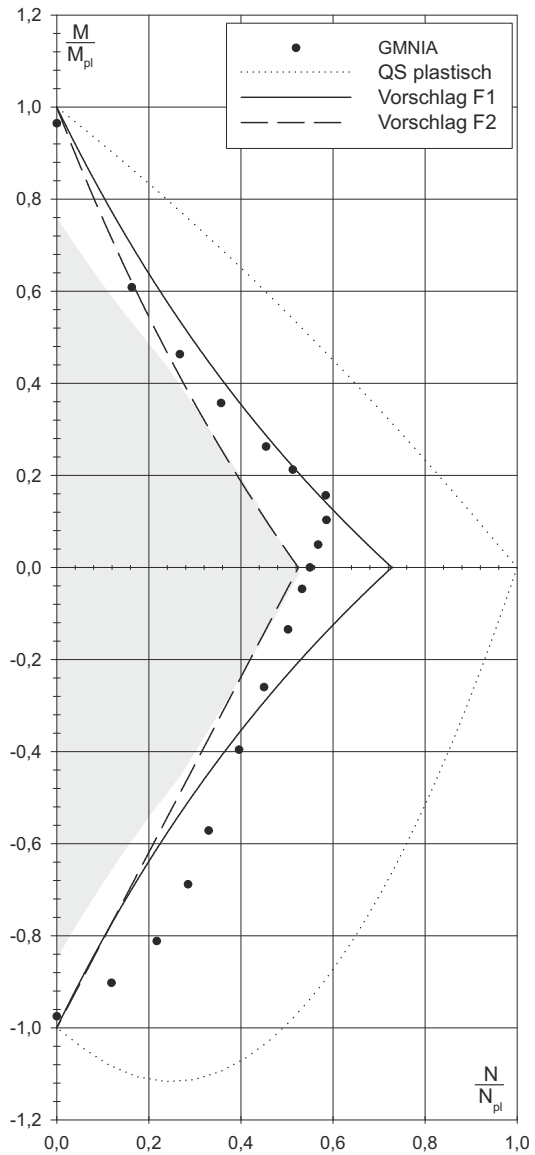


Abbildung 6.19: KAIM140-LB20

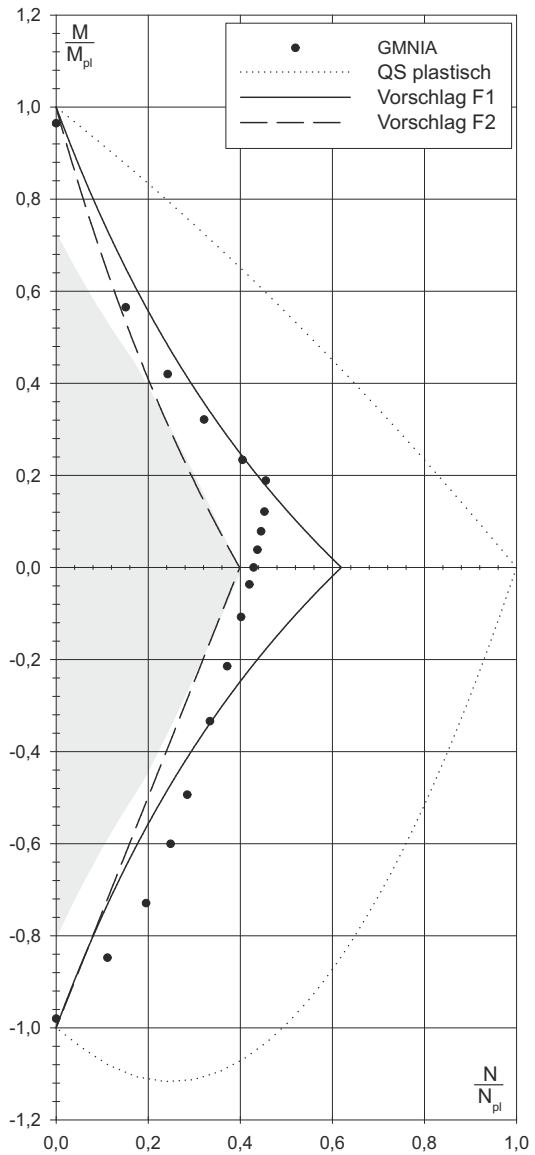


Abbildung 6.20: KAIM140-LB25

6.2 Anmerkungen zu den Ergebnissen

Die Tragfähigkeit im Grenzfall 1 (nur $M_R^{(+)}$) wird bei Klasse 3 oder Klasse 4 Profilen mit diesem Vorschlag unterschätzt (siehe Abbildung 6.1). Die Gründe hierfür liegen in der konservativen Einteilung und Bestimmung der Querschnittsklassen laut EC3. Eine Verbesserung der Einteilung der Querschnittsklassen wird zum Beispiel im EU Forschungsprojekt SEMI-COMP [3] vorgeschlagen. Abbildung 6.21 zeigt ρ bezogen auf die Schlankheit $\bar{\lambda}_p$ beispielhaft für ein $\frac{1}{2}$ IPE 300 Profil. Dabei bestimmt der Beiwert ρ unmittelbar die Querschnittstragfähigkeit zu: $M_R^{(+)} = \rho * W_{y,el} * f_y$. Das erste Plateau (für $\bar{\lambda}_p \leq 0,3$) stellt Querschnittsklasse 1 bzw. 2 mit $W_{y,pl} = \rho * W_{y,el}$ dar. Das zweite Plateau ($\rho = 1, \bar{\lambda}_p \geq 0,3$) stellt Querschnittsklasse 3 mit $W_{y,el}$ dar. Ab $\bar{\lambda}_p = 0,748$ (siehe Formel 3.4) wird ρ mit zunehmender Schlankheit $\bar{\lambda}_p$ immer geringer. Dieser Verlauf stellt die Abnahme des effektiven Querschnitts bei Querschnittsklasse 4 dar ($W_{y,el,effM+} = \rho * W_{y,el}$).

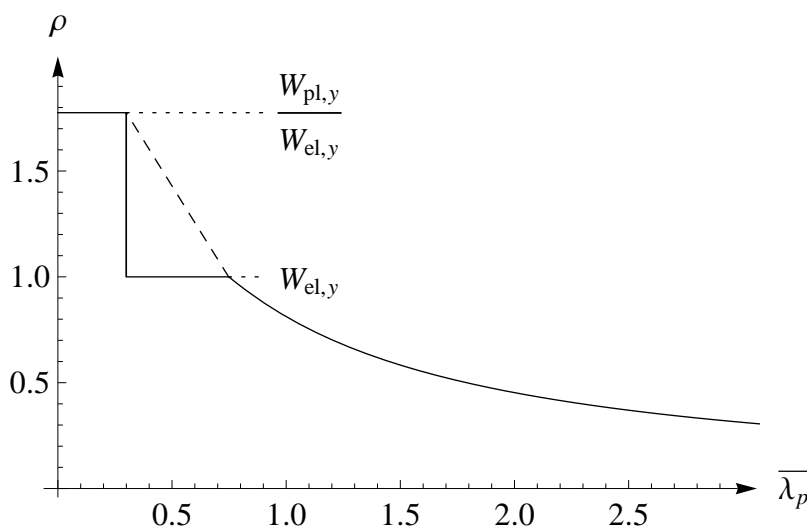


Abbildung 6.21: Verbesserungsvorschlag der Querschnittsklasseneinteilung

Abbildung 6.21 zeigt einen markanten Sprung zwischen Querschnittsklasse 1,2 (mit plastischem Widerstandsmoment) und Querschnittsklasse 3 (mit

6 Bemessungsvorschlag - Beanspruchung $N&M_y$ bei T-Profilen

elastischem Widerstandsmoment). Dieser Sprung ist eine Ursache für das Unterschätzen der Momententrägfähigkeit bei positiven Momenten und Querschnittsklasse 3 oder 4. Die GMNIA Ergebnisse in diesem Bereich (positive Momente, geringe Normalkraft, Klasse 3 oder 4) zeigen, dass es einen Übergang zwischen voll plastischem und elastischem Verhalten gibt, einen Zustand in dem bereits einige Querschnittsteile plastizieren (z. B. Abbildung 6.1 für $M^{(+)}$ alleine; GMNIA Lösung zwischen Tragfähigkeit QS-plastisch und elastischer Lösung nach Vorschlag F1 bzw. F2). Dieser Übergang kann beispielsweise durch eine lineare Interpolation erreicht werden. Die strichlierte Linie in Abbildung 6.21 zeigt diese Interpolation schematisch. Nachfolgend werden die Auswirkungen daraus exemplarisch an zwei Systemen untersucht (Profil $\frac{1}{2}$ IPE-300 mit $L/B=10$ bzw. 25).

Ein weiterer Grund für das Unterschätzen der Momententrägfähigkeit bei positiven Momenten und Klasse 3 oder 4 ist die konservative Bestimmung der Schlankheit des Profils hinsichtlich des lokalen Beulens. Wird $\bar{\lambda}_p$ mit der Formel 3.5 bestimmt, auf Basis der isolierten Betrachtung des Steges ohne Einspannungswirkung im Flansch, ergibt sich für ein $\frac{1}{2}$ IPE300 Profil ein Wert von 0,81. Wird $\bar{\lambda}_p$ hingegen genauer mit der LBA Analyse² (zusammenwirken von Steg und Flansch) und Formel 6.15 bestimmt, ergibt sich ein Wert von 0,55. Diese deutliche Abnahme der Schlankheit beruht auf der Berücksichtigung der Einspannung des Steges. Laut EC3 gilt die Formel 3.5 zwar für einseitig gehaltene Querschnittsteile, die Einspannungswirkung wird jedoch nicht berücksichtigt.

²siehe Anhang E.4

6 Bemessungsvorschlag - Beanspruchung $N&M_y$ bei T-Profilen

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} \quad (6.15)$$

mit:

$$\sigma_{cr} = \alpha_{cr} \sigma_{el}$$

σ_{cr} kritische elastische Beulspannung

α_{cr} Abminderungsfaktor bei maßgebendem Eigenwert aus LBA Analyse

σ_{el} theoretische Randspannung bei angenommener rein elastischer Spannungsverteilung mit M_E aus LBA Analyse

Die Abbildungen 6.22 und 6.23 zeigen die Resultate des Bemessungsvorschlages mit der linearen Interpolation von ρ und der genauen Bestimmung der Schlankheit $\bar{\lambda}_p$ mithilfe der LBA Analyse exemplarisch für den Querschnitt $\frac{1}{2}$ IPE-300 für $L/B=10$ und 25 . Im Vergleich mit Abbildung 6.1 und 6.2 ist die bessere Treffsicherheit bei $M^{(+)}$ erkennbar. Diese weitere Verbesserungsmöglichkeit wird jedoch nur gezeigt um zu verstehen, warum die GMNIA Ergebnisse mit dem Bemessungsvorschlag in diesem Bereich nicht erreicht werden können.

In manchen Bereichen (insbesondere bei Querschnittsklasse 3 und negativem Moment) unterschreitet der Bemessungsvorschlag die erlaubte Tragfähigkeit laut EC3 NA (Abbildung 6.1 bis 6.8). Der Grund liegt in dem deutlichen Unterschied von $W_{y,l}$ und $W_{y,pl}$.

6 Bemessungsvorschlag - Beanspruchung N & M_y bei T-Profilen

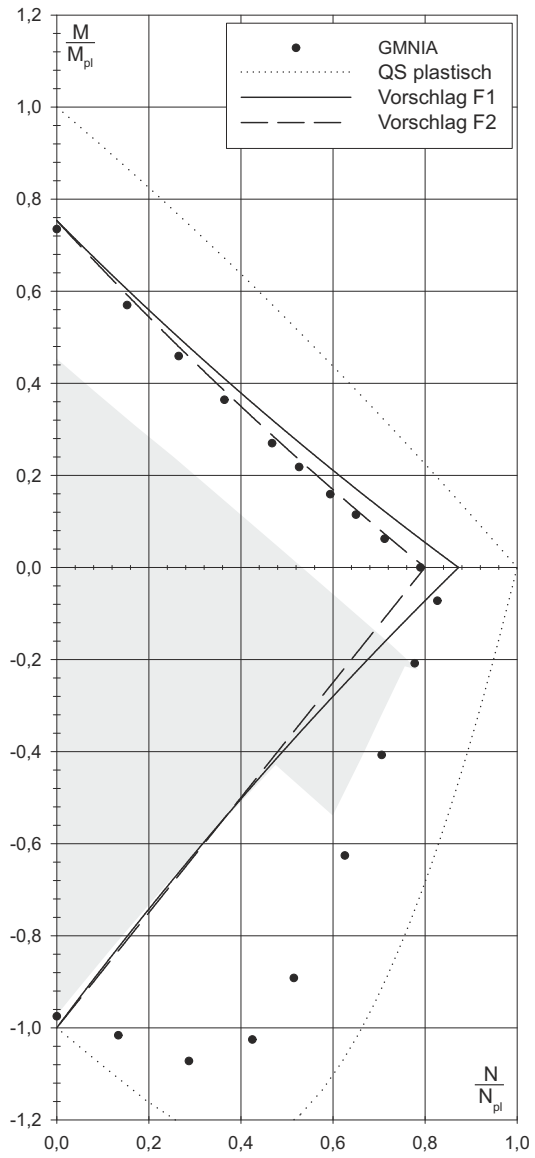


Abbildung 6.22: $\frac{1}{2}$ IPE300-LB10

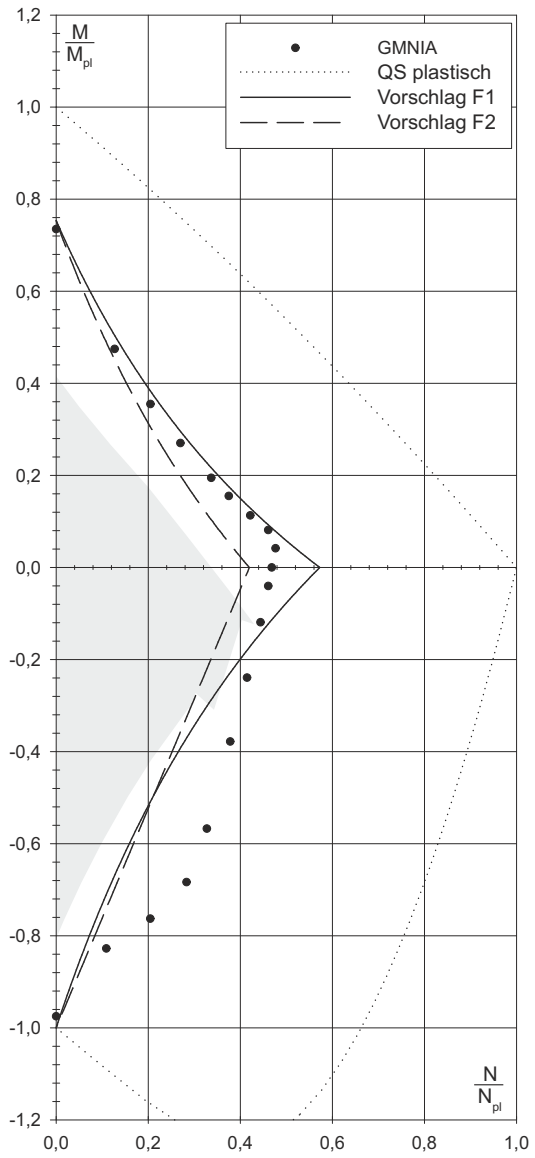


Abbildung 6.23: $\frac{1}{2}$ IPE300-LB25

7 Zusammenfassung

Wie in den das Tragverhalten zufolge N & M_y sehr gut zusammenfassend darstellenden Interaktionsdiagrammen in dieser Arbeit zu sehen ist, können T-Profile nicht einfach wie doppelt symmetrische oder einfach symmetrische I-Profile behandelt werden. Die Ergebnisse nach der aktuellen Vorgehensweise nach Eurocode NA (Gl. (15) - (19) in Abschnitt 3) sind zwar häufig konservativ, bezogen auf die tatsächliche Tragfähigkeit laut GMNIA-Berechnung, jedoch besonders bei schlanken (Klasse 3 oder 4) Profilen unwirtschaftlich und rechnerisch äußerst aufwändig zu ermitteln und damit fehleranfällig. Weiters wird durch die entsprechenden Formeln das mechanische Tragverhalten von T-Profilen nur unzureichend beschrieben. Bei Querschnittsklasse 4 muss z. B. die Momententragfähigkeit über $\chi_{LT, \text{EffM}+/-}$ gleich doppelt abgemindert werden (1. über χ_{LT} und 2. über den geforderten effektiven Querschnitt $\text{EffM}+/-$), obwohl T-Profile nur sehr geringe bis gar keine Tendenz aufweisen durch Biegedrillknicken (LTB) zu versagen. Auch das globale Biegedrillknicken (TFB) bei alleiniger Drucknormalkraft N ist für T-Profile in der aktuellen Eurocode Fassung nur unzureichend beschrieben, da die Biegedrillknickkurven auf Biegeknickkurven doppelt symmetrischer Profile beruhen. Wie die Rechenbeispiele zeigen, ist es äußerst komplex ein einfaches T-Profil normgemäß zu bemessen, ja sogar nur zu klassifizieren - die normgemäße Klassifizierung für einfach symmetrische Profile ist praktisch nur mit Computerunterstützung und entsprechenden Algorithmen möglich. Hier ist die Sinnhaftigkeit eines allgemein formulierten Ansatzes für alle Profilformen (obwohl er hauptsächlich auf Untersuchungen doppelt-symmetrischer Profile beruht) zu hinterfragen. Der Bemessungsvorschlag in dieser Arbeit ist hier als ein erster Ansatz hinsichtlich einer verbesserten und vor allem auch einfacheren Bemessung von T-Profilen zu sehen. Hier ist sicherlich noch erheblicher numerischer und experimenteller Forschungsbedarf gegeben und geplant, jedoch zeigen die Ergebnisse bereits auf, dass eine deutliche Verbesserung prinzipiell möglich ist.

Literatur

- [1] AISC. *Specification for Structural Steel Buildings. ANSI/AISC 360-10 An American National Standard*. Juni 2010.
- [2] R. Greiner, P. Kaim und A. Taras. „Stabilitätsnachweis von Stäben mit einfachsymmetrischen Querschnitten – Eurocode-konforme Regelungen im österreichischen Nationalen Anhang zur EN 1993-1-1“. In: *Stahlbau 80 (2011), Heft 5 (2011)*.
- [3] R. Greiner u. a. *SEMI-COMP: Plastic member capacity of semi-compact steel sections — a more economic design. Final report*. 2009.
- [4] P. Kaim. „Spatial buckling behaviour of steel members under bending and compression“. Dissertation. Institut für Stahlbau, Holzbau und Flächentragwerke. Technische Universität Graz. Heft 12, 2004.
- [5] ÖNORM B 1993-1-1. *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten. Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln*. Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1993-1-1, nationale Erläuterungen und nationale Ergänzungen. Feb. 2007.
- [6] ÖNORM EN 1993-1-1. *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten. Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. Okt. 2006.
- [7] ÖNORM EN 1993-1-3. *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten. Teil 1-3: Allgemeine Regeln – Ergänzende Regeln für kaltgeformte Bauteile und Bleche*. Dez. 2010.
- [8] ÖNORM EN 1993-1-5. *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten. Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile*. Apr. 2007.
- [9] J. Tapley. „The Stability Behaviour of Steel T-sections under Axial Compression“. Master’s Thesis. Institut für Stahlbau und Flächentragwerke. Technische Universität Graz, 2014.

Literatur

- [10] A. Taras, M. Gonzales Puig und H. Unterweger. „Behaviour and design of members with monosymmetric cross-section“. In: *Proc. of the ICE - Structures and Buildings* 166 (8 5/2013).
- [11] A. Taras u. a. „On the Stability behaviour and design of T-Section beam-columns“. In: *Eurosteel 2014*. 9/2014.

Appendix

Anhang A.

Klassifizierungsalgorithmen

A.1 Algorithmus 1

Mathematica¹ Skript zur Bestimmung des Winkels im M-N-Interaktionsdiagramm der den Sprung von Klasse 3 auf Klasse 2 darstellt. Folgende Werte gelten für ein $\frac{1}{2}$ IPE-300 Profil. Die Fläche der Ausrundungen wurde bei der Bestimmung von M_{pl} und der plastischen Nulllinienlage auf den Verbindungspunkt von Steg und Flansch konzentriert.

In:

```
h = 15;  
b = 15;  
ts = 0.71;  
tg = 1.07;  
r = 1.5;  
Ages = 26.9;  
fy = 23.5;
```

In:

```
hs = h - tg;  
c = hs - r;
```

In:

```
Ar = Ages - (hs * ts + b * tg);  
Npl = Ages * fy;
```

¹Wolfram Mathematica 8, Version 8.0.4.0

In:
$$e_z = \frac{h_s * t_s * \left(t_g + \frac{h_s}{2} \right) + b * t_g * \frac{t_g}{2} + A_r * t_g}{A_{ges}}$$

Out: 3.31161

In: ListM = List[];

ListX = List[];

Ermittlung von M_{pl} durch Variation der plastischen Nulllinie
Plastische Nulllinie im Gurt

In: ink = t_g / 1000;

For[i = 0, i <= 1000, i++,

x = ink * i;

$$W = h_s * t_s * \left(\frac{h_s}{2} + (t_g - x) \right) + \frac{x^2}{2} * b + b * \frac{(t_g - x)^2}{2} + A_r * (t_g - x);$$

M_{aktuell} = f_y * W;

ListM = Append [ListM, M_{aktuell}];

ListX = Append [ListX, x];

];

Plastische Nulllinie im Steg

In: ink = (h_s) / 1000;

For[i = 0, i <= 1000, i++,

x = ink * i;

$$W = b * t_g * \left(\frac{t_g}{2} + x \right) + \frac{x^2}{2} * t_s + t_s * \frac{(h_s - x)^2}{2} + A_r * x;$$

M_{aktuell} = f_y * W;

ListM = Append [ListM, M_{aktuell}];

ListX = Append [ListX, x + t_g];

];

M_{pl} = Min[ListM]

x_{M_{pl}} = ListX[[Position[ListM, Min[ListM]][[1]]][[1]]];

Out: 1810.02

In: ListWinkel = List[];

```
ListNulllinienlage = List[];
```

```
ListQSKlasse = List[];
```

Bestimmung der Lage der plastischen Nulllinie bei den entsprechenden Winkeln im Interaktionsdiagramm.

In: For[winkelGrad = 90.01, winkelGrad < 180, winkelGrad = winkelGrad + 0.01,

```
ListM = List[];
```

```
ListN = List[];
```

```
ListX = List[];
```

```
ListVerhältnis = List[];
```

```
ListDelta = List[];
```

```
winkel = winkelGrad/180 * Pi;
```

```
Mw = Mpl * Cos[winkel];
```

```
Nw = Npl * Sin[winkel];
```

```
verhältnis =  $\frac{M_w}{N_w}$ ;
```

(*Plastische Nulllinie im Gurt*)

```
ink = tg / 1000;
```

```
For[i = 0, i <= 1000, i++,
```

```
x = ink * i;
```

```
Au = x * b;
```

```
Ao = Ages - Au;
```

```
An = Ao - Au;
```

```
Fn = An * fy;
```

```
W = hs * ts *  $\left(\frac{h_s}{2} + (t_g - x)\right) + \frac{x^2}{2} * b + b * \frac{(t_g - x)^2}{2} + A_r * (t_g - x)$ ;
```

```
My = fy * W - Fn * (ez - x);
```

```
ListM = Append [ListM, My];
```

```
ListN = Append [ListN, Fn];
```

```
ListX = Append [ListX, x];
```

```
ListVerhältnis = Append [ListVerhältnis, My / Fn];
```

```
ListDelta = Append [ListDelta, My / Fn / verhältnis];
```

```
];
```


(*Plastische Nulllinie im Steg*)

ink = $(h_s)/1000$;

For[i = 0, i <= 1000, i++,

x = ink * i;

$A_u = t_g * b + x * t_s + A_r$;

$A_o = A_{ges} - A_u$;

$A_n = A_o - A_u$;

$F_n = A_n * f_y$;

$W = b * t_g * \left(\frac{t_g}{2} + x \right) + \frac{x^2}{2} * t_s + t_s * \frac{(h_s - x)^2}{2} + A_r * x$;

$e_n = e_z - x - t_g$;

$M_y = f_y * W - F_n * e_n$;

ListM = Append [ListM, M_y];

ListN = Append [ListN, F_n];

ListX = Append [ListX, $x + t_g$];

ListVerhältnis = Append [ListVerhältnis, M_y / F_n];

ListDelta = Append [ListDelta, $M_y / F_n / \text{verhältnis}$];

];

(*Position x der plastischen Nulllinie die dem angegebenen Winkel entspricht : *)

$x = \text{ListX}[\text{Position}[\text{ListDelta}, \text{Min}[\text{Select}[\text{ListDelta}, \# \geq 1 \&]]][[1]]][[1]]$;

ListWinkel = Append [ListWinkel, winkelGrad];

ListNulllinienlage = Append [ListNulllinienlage, x];

If [$h - x \geq c$,

(*then*)

ListQSKlasse = Append [ListQSKlasse, 1],

(*else*)

$a = \frac{c - (h - x)}{c}$;

If $\left[\frac{c}{t_s} \leq \frac{9}{a * \sqrt{a}} \right$,

(*then*)

ListQSKlasse = Append [ListQSKlasse, 1],

```

(*else*)
If  $\left[ \frac{c}{t_s} \leq \frac{10}{a * \sqrt{a}} \right,$ 
(*then*)
    ListQSKlasse = Append[ListQSKlasse, 2];
    Break[,,
(*else*)
    ListQSKlasse = Append[ListQSKlasse, 3];
    ]
    ]
];
];

```

In: Last[ListWinkel]

Out: 131.2

Bei diesem Winkel ist der Sprung von QS Klasse 3 auf QS Klasse 2.

A.2 Algorithmus 2

Mathematica² Skript zur Bestimmung des Winkels im M-N-Interaktionsdiagramm der den Sprung von Klasse 4 auf Klasse 3 darstellt. Folgende Werte gelten für ein $\frac{1}{2}$ IPE-300 Profil.

In:

```

h:=15;
b:=15;
ts:= 0.71;
tg:= 1.07;
r:= 1.5;
Ages = 26.90;

```

²Wolfram Mathematica 8, Version 8.0.4.0

```

fy = 23.5;
Iy := 509;
Mpl = 1818;

In: hs = h - tg;
    c = hs - r;

In: Npl = Ages * fy;

In: Wy,l = Iy / ez;

In: ez = 3.32;

In: ListQK = List[];
    ListPsi = List[];
    Listkσ = List[];
    ListN = List[];
    ListMzug = List[];

Variation der Neigung der Spannungsebene.

In: For [σN = fy, σN ≥ 0, σN = σN - fy / 10000,
σo = fy;
σu = fy - (σo - σN) / ez * h;
σc = (σo - σN) / ez * (ez - tg - r) + σN;
ψ = σu / σc;
ListPsi = Append[ListPsi, ψ];
If [ψ ≤ 1 && ψ ≥ 0, kσ = 1.7 / (1 + 3ψ)];
If [ψ < 0 && ψ ≥ -1, kσ = 1.7 - 5ψ + 17.1ψ²];
If [ψ < -1, kσ = 5.98(1 - ψ)²];
Listkσ = Append[Listkσ, √kσ];

If [c / ts ≤ 21 * √kσ, ListQK = Append[ListQK, 3], ListQK = Append[ListQK, 4]];

```

```

ListN = Append [ListN,  $\sigma_N * A_{ges}$ ];
ListMzug = Append [ListMzug,  $-\frac{(\sigma_o - \sigma_N) * I_y}{e_z}$ ];
If[Last[ListQK] == 3,
verhältnis =  $\frac{Last[ListMzug]}{Last[ListN]}$ ;
Break[];
];
];
];

```

In: Last[ListPsi]

Out: 0.481867

In: Last [Listk_σ]

Out: 0.833742

In: ListVerhältnis = List[];

ListDelta = List[];

ListWinkel = List[];

For[winkelGrad = 90.01, winkelGrad < 180, winkelGrad = winkelGrad + 0.01,

winkel = winkelGrad/180 * Pi;

$M_w = M_{pl} * \text{Cos}[winkel]$;

$N_w = N_{pl} * \text{Sin}[winkel]$;

$v = \frac{M_w}{N_w}$;

ListVerhältnis = Append[ListVerhältnis, v];

ListDelta = Append[ListDelta, Abs[Abs[v] - Abs[verhältnis]]];

ListWinkel = Append[ListWinkel, winkelGrad];

];

In: ListWinkel[[Position[ListDelta, Min[ListDelta]][[1]]][[1]]]

Out: 105.81

Ab diesem Winkel ist der Sprung von QS Klasse4 auf QS Klasse 3.

Anhang B. M_{cr} laut EC3 NA und AISC

Folgendes Mathematica³ Skript zeigt die Anwendung der Formeln aus [5] und [1] für ein $\frac{1}{2}$ IPE-300 Profil. Die Ergebnisse für die anderen Profile und ein Verbesserungsvorschlag werden im Kapitel 3.5 gezeigt.

```
In: h:=15;  
b:=15;  
t_s:= 0.71;  
t_g:= 1.07;  
r:= 1.5;  
I_z:=302;  
I_t:=10.10;  
  
In: E:=21000;  
G :=  $\frac{1}{2 * (1.3)}$  * E;  
  
In: M_cr[lb_]:= {  
6778.6 lb==10  
5679.6 lb==15  
4846.2 lb==20  
4206.8 lb==25  
M+:
```

³Wolfram Mathematica 8, Version 8.0.4.0

```

In:  $I_{fc} = \frac{t_s^3 * t_s}{12};$ 
 $I_{ft} = \frac{b^3 * t_g}{12};$ 

In:  $\psi = 1;$ 

In:  $C_1 = 1;$ 
 $C_2 = 0;$ 
 $C_3 = 1;$ 
 $I_w = 0;$ 
 $k_w = 1;$ 
 $k_z = 1;$ 

In:  $\psi_f = \frac{I_{fc} - I_{ft}}{I_{fc} + I_{ft}};$ 
 $z_g = 0;$ 
If [ $\psi_f \geq 0$ , faktor = 0.8, faktor = 1.0];
 $z_j = \text{faktor} * \psi_f * \frac{h - \frac{t_g}{2} - \frac{t_s}{2}}{2}$ 

Out: -7.05401

In: lb = 10;

In: McrTIPE300MpEC = List[];
McrTIPE300MpLTBeam = List[];
McrTIPE300MpAISC = List[];
TIPE300MpECLTBeam = List[];
TIPE300MpAISCLTBeam = List[];

In: Do[
 $L = lb * b;$ 
 $M_{cr, EC} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(k_z L)^2} \left( \sqrt{\left(\frac{k_z}{k_w}\right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k_z L)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g - C_3 z_j)^2} - (C_2 z_g - C_3 z_j) \right);$ 
McrTIPE300MpEC = Append [McrTIPE300MpEC,  $M_{cr, EC}$ ];
McrTIPE300MpLTBeam = Append [McrTIPE300MpLTBeam,  $M_{cr}[lb]$ ];
TIPE300MpECLTBeam = Append [TIPE300MpECLTBeam,  $\frac{M_{cr, EC}}{M_{cr}[lb]}$ ];

```

$$B = -2.3 \left(\frac{h}{L} \right) \sqrt{\frac{I_z}{I_t}};$$

$$M_{cr, AISC} = \frac{\pi \sqrt{E * I_z * G * I_t}}{L} (B + \sqrt{1 + B^2});$$

$$\text{McrTIPE300MpAISC} = \text{Append} [\text{McrTIPE300MpAISC}, M_{cr, AISC}];$$

$$\text{TIPE300MpAISCLTBeam} = \text{Append} \left[\text{TIPE300MpAISCLTBeam}, \frac{M_{cr, AISC}}{M_{cr}[\text{lb}]} \right];$$

$$\text{lb} = \text{lb} + 5;$$

$$, \{4\};$$

In: McrTIPE300MpEC

Out: {5115.54, 4579.84, 4083.14, 3654.97}

In: McrTIPE300MpLTBeam

Out: {6778.6, 5679.6, 4846.2, 4206.8}

In: McrTIPE300MpAISC

Out: {5259.1, 4685.45, 4161.18, 3713.94}

In: TIPE300MpECLTBeam

Out: {0.754661, 0.806367, 0.842544, 0.868824}

In: TIPE300MpAISCLTBeam

Out: {0.775839, 0.824962, 0.858647, 0.882842}

M-:

In: $M_{cr}[\text{lb}_.] := \begin{cases} 33585 & \text{lb} == 10 \\ 17593 & \text{lb} == 15 \\ 11548 & \text{lb} == 20 \\ 8496.1 & \text{lb} == 25 \end{cases}$

```

In:  $I_{ft} = \frac{t_s^3 * t_s}{12};$ 
 $I_{fc} = \frac{b^3 * t_g}{12};$ 

In:  $\psi_f = \frac{I_{fc} - I_{ft}}{I_{fc} + I_{ft}};$ 
 $z_g = 0;$ 
If [ $\psi_f \geq 0$ , faktor = 0.8, faktor = 1.0];
 $z_j = \text{faktor} * \psi_f * \frac{h - \frac{t_g}{2} - \frac{t_s}{2}}{2}$ 

Out: 5.64321

In: lb = 10;

In: McrTIPE300MmEC = List[];
McrTIPE300MmLTBeam = List[];
McrTIPE300MmAISC = List[];
TIPE300MmECLTBeam = List[];
TIPE300MmAISCLTBeam = List[];

In: Do[
L = lb * b;
 $M_{cr, EC} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{(k_z L)^2} \left( \sqrt{\left(\frac{k_z}{k_w}\right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k_z L)^2 G I_t}{\pi^2 E I_z} + (C_2 z_g - C_3 z_j)^2 - (C_2 z_g - C_3 z_j)} \right);$ 
McrTIPE300MmEC = Append [McrTIPE300MmEC,  $M_{cr, EC}$ ];
McrTIPE300MmLTBeam = Append [McrTIPE300MmLTBeam,  $M_{cr}[lb]$ ];
TIPE300MmECLTBeam = Append [TIPE300MmECLTBeam,  $\frac{M_{cr, EC}}{M_{cr}[lb]}$ ];
 $B = 2.3 \left(\frac{h}{L}\right) \sqrt{\frac{I_z}{I_t}};$ 
 $M_{cr, AISC} = \frac{\pi \sqrt{E * I_z * G * I_t}}{L} (B + \sqrt{1 + B^2});$ 
McrTIPE300MmAISC = Append [McrTIPE300MmAISC,  $M_{cr, AISC}$ ];
TIPE300MmAISCLTBeam = Append [TIPE300MmAISCLTBeam,  $\frac{M_{cr, AISC}}{M_{cr}[lb]}$ ];
lb = lb + 5;
, {4}];

In: McrTIPE300MmEC

```


Out: {37456.6, 19206.1, 12418.2, 9040.2}

In: McrTIPE300MmLTBeam

Out: {33585, 17593, 11548, 8496.1}

In: McrTIPE300MmAISC

Out: {43151.8, 21526.7, 13634.4, 9776.78}

In: TIPE300MmECLTBeam

Out: {1.11528, 1.09169, 1.07535, 1.06404}

In: TIPE300MmAISCLTBeam

Out: {1.28485, 1.22359, 1.18067, 1.15074}

Anhang C. Bemessungsbeispiel laut EC3 NA

Folgendes Beispiel zeigt den kompletten Nachweisvorgang für ein 1,5 Meter langes $\frac{1}{2}$ IPE-300 Stahlprofil und einer Belastung von $N = 0,75N_{pl}$ und $M = -0.20M_{pl}$ laut EC3 NA.

Querschnittswerte

In: $h = 15;$
 $b = 15;$
 $t_s = 0.71;$
 $t_g = 1.07;$
 $r = 1.5;$
 $A = 26.9;$
 $e_z = 3.32;$
 $I_y = 509;$
 $i_y = 4.35;$
 $I_z = 302;$
 $i_z = 3.35;$
 $i_p = 5.49;$
 $I_t = 10.10;$
 $N_{pl} = 632.3;$
 $M_{ply} = 1810$
 $M_{plz} = 1472;$

$$W_y = 43.58;$$

$$W_z = 40.27;$$

$$W_{pl,y} = 77.38;$$

Out: 1810

$$In: W_{y,s} = \frac{I_y}{h - e_z}$$

Out: 43.5788

$$In: W_{y,l} = \frac{I_y}{e_z}$$

Out: 153.313

$$In: \alpha = 0.49;$$

$$\alpha_{LT} = 0.76;$$

$$In: N_{Ek} = 0.75 * N_{pl};$$

$$M_{Ek} = -0.20 * M_{ply};$$

$$In: EModul = 21000;$$

$$GModul = \frac{1}{2 * (1.3)} * EModul;$$

$$f_y = 23.5;$$

$$In: \beta = 1;$$

$$In: z_0 = \left(e_z - \frac{t_g}{2} \right);$$

$$In: i_0 = \sqrt{i_p^2 + z_0^2};$$

$$In: \lambda_1 = \text{Pi} * \sqrt{\frac{EModul}{f_y}};$$

Klassifizierung

Ansetzen einer elastischen Spannungsverteilung:

In: $\sigma_N = \frac{N_{EK}}{A}$

Out: 17.6292

In: $\sigma_{Mo} = -\frac{M_{EK}}{I_y} * (e_z - t_g - r)$

Out: 0.533399

In: $\sigma_{Mu} = \frac{M_{EK}}{I_y} * (h - e_z)$

Out: -8.3068

In: $\sigma_o = \sigma_N + \sigma_{Mo}$

Out: 18.1626

In: $\sigma_u = \sigma_N + \sigma_{Mu}$

Out: 9.32238

In: $\psi = \frac{\sigma_u}{\sigma_o}$

Out: 0.513274

In: $k_\sigma = \frac{1.7}{1 + 3\psi}$

Out: 0.669338

In: If $\left[\frac{h - t_g - r}{t_s} \leq 21 * \sqrt{k_\sigma}, \text{Klasse} = 3, \text{Klasse} = 4 \right];$

In: Klasse

Out: 4

Bestimmung der ψ Werte und des Effektiven QS It 1993-1-3 Anhang D

ψ_{Eff} wird mit konstanter Druckspannungsverteilung bestimmt.

$\psi_{\text{EffM-}}$ wird bei reiner Biegung (M-) und der daraus resultierenden Spannungsverteilung bestimmt.

$\psi_{\text{EffM+}}$ wird bei reiner Biegung (M+) und der daraus resultierenden Spannungsverteilung bestimmt.

In: $\psi_{\text{Eff}} = 1;$

$$k_{\sigma, \text{Eff}} = \frac{1.7}{3 + \psi_{\text{Eff}}}$$

Out: 0.425

In: $b_p = h - t_g - r;$
 $\overline{\lambda}_{p, \text{Eff}} = \frac{\frac{b_p}{t_s}}{28.4 * \sqrt{k_{\sigma, \text{Eff}}}}$

Out: 0.945584

In: $\text{If} \left[\overline{\lambda}_{p, \text{Eff}} > 0.748, \rho_{\text{Eff}} = \frac{\overline{\lambda}_{p, \text{Eff}} - 0.188}{\overline{\lambda}_{p, \text{Eff}}^2}, \rho_{\text{Eff}} = 1 \right]$

Out: 0.847287

In: $b_{\text{eo, Eff}} = 0.42 * b_p;$
 $t_{\text{Eff}} = (1.75 * \rho_{\text{Eff}} - 0.75) * t_s$

Out: 0.520254

In: $b_p - b_{\text{eo, Eff}}$

Out: 7.2094

In: $A_{\text{Eff}} = A - (b_p - b_{\text{eo, Eff}}) * (t_s - t_{\text{Eff}})$

Out: 25.532

Bestimmung von e_z und $e_{z, \text{Eff}}$

In: $A_{\text{Gurt}} = b * t_g;$

$A_{\text{Steg}} = (h - t_g) * t_s;$

$A_{\text{Ausrundungen}} = 2 * r^2 - \frac{r^2 * \text{Pi}}{2};$

$A_{\text{Ausfall, Eff}} = (b_p - b_{\text{eo, Eff}}) * (t_s - t_{\text{Eff}});$

$z_{\text{Gurt}} = t_g / 2;$

$z_{\text{Steg}} = (h - t_g) / 2 + t_g;$

$z_{\text{Ausrundungen}} = t_g + r - \frac{2 * \left(r^2 * 0.5 * r - \frac{r^2 \text{Pi}}{4} * \frac{4r}{3\text{Pi}} \right)}{A_{\text{Ausrundungen}}};$

$z_{\text{Ausfall, Eff}} = (b_p - b_{\text{eo, Eff}}) / 2 + b_{\text{eo, Eff}} + r + t_g;$

$e_z = \frac{A_{\text{Gurt}} * z_{\text{Gurt}} + A_{\text{Steg}} * z_{\text{Steg}} + A_{\text{Ausrundungen}} * z_{\text{Ausrundungen}} - A_{\text{Ausfall, Eff}} * z_{\text{Ausfall, Eff}}}{A_{\text{Gurt}} + A_{\text{Steg}} + A_{\text{Ausrundungen}}}$

Out: 3.32313

In: $e_{z, \text{Eff}} = \frac{A_{\text{Gurt}} * z_{\text{Gurt}} + A_{\text{Steg}} * z_{\text{Steg}} + A_{\text{Ausrundungen}} * z_{\text{Ausrundungen}} - A_{\text{Ausfall, Eff}} * z_{\text{Ausfall, Eff}}}{A_{\text{Gurt}} + A_{\text{Steg}} + A_{\text{Ausrundungen}} + A_{\text{Ausfall, Eff}}}$

Out: 2.61102

In: $\Delta e_z = e_z - e_{z, \text{Eff}};$

In: $I_{y, \text{Eff}} = I_y - \frac{(t_s - t_{\text{Eff}}) * (b_p - b_{\text{eo, Eff}})^3}{12} - (t_s - t_{\text{Eff}}) * (b_p - b_{\text{eo, Eff}}) * \left(h - e_{z, \text{Eff}} - \frac{(b_p - b_{\text{eo, Eff}})}{2} \right)^2$

Out: 397.519

In: $I_{z, \text{Eff}} = I_z - \frac{(t_s - t_{\text{Eff}})^3 * (b_p - b_{\text{eo, Eff}})}{12} - (t_s - t_{\text{Eff}}) * (b_p - b_{\text{eo, Eff}}) * \left(\frac{t_s}{2} - \frac{(t_s - t_{\text{Eff}})}{4} \right)^2$

Out: 301.866

In: $I_{t, \text{Eff}} = I_t - \frac{1}{3} (b_p - b_{\text{eo, Eff}}) (t_s - t_{\text{Eff}})^3$

Out: 10.0836

In: $\psi_{\text{EffM}} = -\frac{h - e_z}{e_z - t_g - r}$

Out: -15.5044

$$\begin{aligned} \text{In: } & \text{If } \left[\psi_{\text{EffM-}} \leq 1 \&\& \psi_{\text{EffM-}} \geq 0, k_{\sigma, \text{EffM-}} = \frac{1.7}{1 + 3\psi_{\text{EffM-}}} \right]; \\ & \text{If } \left[\psi_{\text{EffM-}} < 0 \&\& \psi_{\text{EffM-}} \geq -1, k_{\sigma, \text{EffM-}} = 1.7 - 5\psi_{\text{EffM-}} + 17.1\psi_{\text{EffM-}}^2 \right]; \\ & \text{If } \left[\psi_{\text{EffM-}} < -1, k_{\sigma, \text{EffM-}} = 5.98(1 - \psi_{\text{EffM-}})^2 \right]; \end{aligned}$$

$$\text{In: } b_p = h - t_g - r;$$

$$\begin{aligned} \text{In: } & \frac{\overline{\lambda_{p, \text{EffM-}}}}{28.4 * \sqrt{k_{\sigma, \text{EffM-}}}} = \frac{\frac{b_p}{t_s}}{\sqrt{k_{\sigma, \text{EffM-}}}}; \\ & \text{If } \left[\overline{\lambda_{p, \text{EffM-}}} > 0.748, \rho_{\text{EffM-}} = \frac{\overline{\lambda_{p, \text{EffM-}}} - 0.188}{\overline{\lambda_{p, \text{EffM-}}}^2}, \rho_{\text{EffM-}} = 1 \right] \end{aligned}$$

Out: 1

$$\text{In: } b_{\text{eo, EffM-}} = \frac{0.42 * b_p}{1 - \psi_{\text{EffM-}}}$$

Out: 0.316315

$$\text{In: } b_{t, \text{EffM-}} = \frac{\psi_{\text{EffM-}} * b_p}{\psi_{\text{EffM-}} - 1}$$

Out: 11.6769

$$\text{In: } t_{\text{EffM-}} = (1.75 * \rho_{\text{EffM-}} - 0.75) * t_s$$

Out: 0.71

$$\begin{aligned} \text{In: } & A_{\text{Ausfall, EffM-}} = (b_p - b_{\text{eo, EffM-}} - b_{t, \text{EffM-}}) * (t_s - t_{\text{EffM-}}); \\ & z_{\text{Ausfall, EffM-}} = (b_p - b_{\text{eo, EffM-}} - b_{t, 2}) / 2 + b_{\text{eo, EffM-}} + r + t_g; \end{aligned}$$

$$\text{In: } e_{z, \text{EffM-}} = \frac{A_{\text{Gurt}} * z_{\text{Gurt}} + A_{\text{Steg}} * z_{\text{Steg}} + A_{\text{Ausrundungen}} * z_{\text{Ausrundungen}} - A_{\text{Ausfall, EffM-}} * z_{\text{Ausfall, EffM-}}}{A_{\text{Gurt}} + A_{\text{Steg}} + A_{\text{Ausrundungen}} + A_{\text{Ausfall, EffM-}}}$$

Out: 3.32313

$$\begin{aligned} \text{In: } & I_{y, \text{EffM-}} = I_y - \frac{(t_s - t_{\text{EffM-}}) * (b_p - b_{\text{eo, EffM-}} - b_{t, \text{EffM-}})^3}{12} - \\ & (t_s - t_{\text{EffM-}}) * (b_p - b_{\text{eo, EffM-}} - b_{t, \text{EffM-}}) * \left(b_{\text{eo, EffM-}} - e_{z, \text{EffM-}} + \frac{(b_p - b_{\text{eo, EffM-}} - b_{t, \text{EffM-}})}{2} + r + t_g \right)^2 \end{aligned}$$

Out: 509.

$$In: I_{z, \text{EffM-}} = I_z - \frac{(t_s - t_{\text{EffM-}})^3 * (b_p - b_{\text{eo, EffM-}} - b_{t, \text{EffM-}})}{12} - (t_s - t_{\text{EffM-}}) * (b_p - b_{\text{eo, EffM-}} - b_{t, \text{EffM-}}) * \left(\frac{t_s}{2} - \frac{(t_s - t_{\text{EffM-}})}{4} \right)^2$$

Out: 302.

$$In: I_{t, \text{EffM-}} = I_t - \frac{1}{3} (b_p - b_{\text{eo, EffM-}}) (t_s - t_{\text{EffM-}})^3$$

Out: 10.1

$$In: W_{y,s, \text{EffM-}} = \frac{I_{y, \text{EffM-}}}{h - e_{z, \text{EffM-}}}$$

Out: 43.5905

$$In: W_{y,l, \text{EffM-}} = \frac{I_{y, \text{EffM-}}}{e_{z, \text{EffM-}}}$$

Out: 153.169

$$In: \psi_{\text{EffM+}} = -\frac{e_z - t_g - r}{h - e_z}$$

Out: -0.0644977

$$In: \text{If} \left[\psi_{\text{EffM+}} \leq 1 \& \psi_{\text{EffM+}} \geq -2, k_{\sigma, \text{EffM+}} = \frac{1.7}{3 + \psi_{\text{EffM+}}} \right];$$
$$\text{If} \left[\psi_{\text{EffM+}} < -2 \& \psi_{\text{EffM+}} \geq -3, k_{\sigma, \text{EffM+}} = 3.3 (1 + \psi_{\text{EffM+}}) + 1.25 \psi_{\text{EffM+}}^2 \right];$$
$$\text{If} \left[\psi_{\text{EffM+}} < -3, k_{\sigma, \text{EffM+}} = 0.29 (1 - \psi_{\text{EffM+}})^2 \right];$$

$$In: \overline{\lambda_{p, \text{EffM+}}} = \frac{b_p}{28.4 * \sqrt{k_{\sigma, \text{EffM+}}}};$$
$$\text{If} \left[\overline{\lambda_{p, \text{EffM+}}} > 0.748, \rho_{\text{EffM+}} = \frac{\overline{\lambda_{p, \text{EffM+}}} - 0.188}{\overline{\lambda_{p, \text{EffM+}}}^2}, \rho_{\text{EffM+}} = 1 \right]$$

Out: 0.947986

$$In: b_{t, \text{EffM+}} = \frac{\psi_{\text{EffM+}} * b_p}{\psi_{\text{EffM+}} - 1}$$

Out: 0.753131

In: If $\left[\frac{0.42 * b_p}{1 - \psi_{\text{EffM}+}} + b_{t,\text{EffM}+} < b_p, b_{\text{eo,EffM}+} = \frac{0.42 * b_p}{1 - \psi_{\text{EffM}+}} + b_{t,\text{EffM}+}, b_{\text{eo,EffM}+} = b_p \right];$

Out: 0.652242

In: $A_{\text{Ausfall,EffM}+} = (b_p - b_{\text{eo,EffM}+}) * (t_s - t_{\text{EffM}+});$
 $z_{\text{Ausfall,EffM}+} = (b_p - b_{\text{eo,EffM}+}) / 2 + b_{\text{eo,EffM}+} + r + t_g;$

In: $e_{z,\text{EffM}+} = \frac{A_{\text{Gurt}} * z_{\text{Gurt}} + A_{\text{Steg}} * z_{\text{Steg}} + A_{\text{Ausrundungen}} * z_{\text{Ausrundungen}} - A_{\text{Ausfall,EffM}+} * z_{\text{Ausfall,EffM}+}}{A_{\text{Gurt}} + A_{\text{Steg}} + A_{\text{Ausrundungen}} + A_{\text{Ausfall,EffM}+}}$

Out: 3.10908

In: $I_{y,\text{EffM}+} = I_y - \frac{(t_s - t_{\text{EffM}+}) * (b_p - b_{\text{eo,EffM}+})^3}{12} - (t_s - t_{\text{EffM}+}) * (b_p - b_{\text{eo,EffM}+}) * \left(h - e_{z,\text{EffM}+} - \frac{(b_p - b_{\text{eo,EffM}+})}{2} \right)^2$

Out: 479.212

In: $I_{z,\text{EffM}+} = I_z - \frac{(t_s - t_{\text{EffM}+})^3 * (b_p - b_{\text{eo,EffM}+})}{12} - (t_s - t_{\text{EffM}+}) * (b_p - b_{\text{eo,EffM}+}) * \left(\frac{t_s}{2} - \frac{(t_s - t_{\text{EffM}+})}{4} \right)^2$

Out: 301.955

In: $I_{t,\text{EffM}+} = I_t - \frac{1}{3} (b_p - b_{\text{eo,EffM}+}) (t_s - t_{\text{EffM}+})^3$

Out: 10.0996

In: $W_{y,s,\text{EffM}+} = \frac{I_{y,\text{EffM}+}}{h - e_{z,\text{EffM}+}}$

Out: 40.3007

In: $W_{y,l,\text{EffM}+} = \frac{I_{y,\text{EffM}+}}{e_{z,\text{EffM}+}}$

Out: 154.133

Bestimmung der Schlankheiten und der Abminderungsfaktoren

$$\text{In: } M_{\text{cr},l}[\text{lb}_-] := \begin{cases} 33585 & \text{lb}==10 \\ 17593 & \text{lb}==15 \\ 11548 & \text{lb}==20 \\ 8496.1 & \text{lb}==25 \end{cases}$$

$$\text{In: } M_{\text{cr},s}[\text{lb}_-] := \begin{cases} 6778.6 & \text{lb}==10 \\ 5679.6 & \text{lb}==15 \\ 4846.2 & \text{lb}==20 \\ 4206.8 & \text{lb}==25 \end{cases}$$

$$\text{In: } \text{lb} = 10;$$

$$\text{In: } l_{\text{cr}} = \beta * \text{lb} * b;$$

$$l_T = \beta * \text{lb} * b;$$

$$N_{\text{cr},y} = \frac{\text{Pi}^2 * \text{EModul} * I_y}{l_{\text{cr}}^2};$$

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{\text{cr},y}}}$$

$$\text{Out: } 0.367183$$

$$\text{In: } \Phi = 0.5 * (1 + \alpha (\bar{\lambda}_y - 0.2) + \bar{\lambda}_y^2);$$

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_y^2}}$$

$$\text{Out: } 0.914544$$

$$\text{In: } \bar{\lambda}_{y,\text{Eff}} = \sqrt{\frac{A_{\text{Eff}} * f_y}{N_{\text{cr},y}}}$$

$$\text{Out: } 0.357725$$

In: $\Phi = 0.5 * (1 + \alpha (\bar{\lambda}_{y, \text{Eff}} - 0.2) + \bar{\lambda}_{y, \text{Eff}}^2);$

$$\chi_{y, \text{Eff}} = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_{y, \text{Eff}}^2}}$$

Out: 0.919463

In: $N_{cr, z} = \frac{\text{Pi}^2 * \text{EModul} * I_z}{l_{cr}^2};$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr, z}}}$$

Out: 0.476693

In: $\Phi = 0.5 * (1 + \alpha (\bar{\lambda}_z - 0.2) + \bar{\lambda}_z^2);$

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_z^2}}$$

Out: 0.855932

In:
$$\bar{\lambda}_{z, \text{Eff}} = \sqrt{\frac{A_{\text{Eff}} * f_y}{N_{cr, z}}}$$

Out: 0.464414

In: $\Phi = 0.5 * (1 + \alpha (\bar{\lambda}_{z, \text{Eff}} - 0.2) + \bar{\lambda}_{z, \text{Eff}}^2);$

$$\chi_{z, \text{Eff}} = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_{z, \text{Eff}}^2}}$$

Out: 0.862679

In:
$$\bar{\lambda}_{\text{LT}, \text{pl}, s} = \sqrt{\frac{W_{\text{pl}, y} * f_y}{M_{cr, s} [\text{lb}]}}$$

Out: 0.517939

In: $\Phi_{\text{LT}, \text{pl}, s} = 0.5 * (1 + \alpha_{\text{LT}} (\bar{\lambda}_{\text{LT}, \text{pl}, s} - 0.2) + \bar{\lambda}_{\text{LT}, \text{pl}, s}^2);$

$$\chi_{\text{LT}, \text{pl}, s} = \frac{1}{\Phi_{\text{LT}, \text{pl}, s} + \sqrt{\Phi_{\text{LT}, \text{pl}, s}^2 - \bar{\lambda}_{\text{LT}, \text{pl}, s}^2}}$$

Out: 0.766751

In: If $[\chi_{LT,pl,s} > 1, \chi_{LT,pl,s} = 1]$

$$\text{In: } \bar{\lambda}_{LT,pl,l} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} * f_y}{M_{cr,l}[\text{lb}]}}$$

Out: 0.232689

$$\text{In: } \Phi_{LT,pl,l} = 0.5 * (1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT,pl,l} - 0.2) + \bar{\lambda}_{LT,pl,l}^2);$$
$$\chi_{LT,pl,l} = \frac{1}{\Phi_{LT,pl,l} + \sqrt{\Phi_{LT,pl,l}^2 - \bar{\lambda}_{LT,pl,l}^2}}$$

Out: 0.974443

In: If $[\chi_{LT,pl,l} > 1, \chi_{LT,pl,l} = 1]$

$$\text{In: } \bar{\lambda}_{LT,s} = \sqrt{\frac{W_{y,s} * f_y}{M_{cr,s}[\text{lb}]}}$$

Out: 0.388688

$$\text{In: } \Phi_{LT,s} = 0.5 * (1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT,s} - 0.2) + \bar{\lambda}_{LT,s}^2);$$
$$\chi_{LT,s} = \frac{1}{\Phi_{LT,s} + \sqrt{\Phi_{LT,s}^2 - \bar{\lambda}_{LT,s}^2}}$$

Out: 0.858535

In: If $[\chi_{LT,s} > 1, \chi_{LT,s} = 1]$

$$\text{In: } \bar{\lambda}_{LT,l} = \sqrt{\frac{W_{y,l} * f_y}{M_{cr,l}[\text{lb}]}}$$

Out: 0.32753

$$\text{In: } \Phi_{LT,l} = 0.5 * (1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT,l} - 0.2) + \bar{\lambda}_{LT,l}^2);$$
$$\chi_{LT,l} = \frac{1}{\Phi_{LT,l} + \sqrt{\Phi_{LT,l}^2 - \bar{\lambda}_{LT,l}^2}}$$

Out: 0.903081

In: If [$\chi_{LT,l} > 1, \chi_{LT,l} = 1$]

$$\text{In: } \bar{\lambda}_{LT,s, \text{EffM-}} = \sqrt{\frac{W_{y,s, \text{EffM-}} * f_y}{M_{cr,s} [\text{lb}]}}$$

Out: 0.38874

$$\text{In: } \Phi_{LT,s, \text{EffM-}} = 0.5 * (1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT,s, \text{EffM-}} - 0.2) + \bar{\lambda}_{LT,s, \text{EffM-}}^2);$$
$$\chi_{LT,s, \text{EffM-}} = \frac{1}{\Phi_{LT,s, \text{EffM-}} + \sqrt{\Phi_{LT,s, \text{EffM-}}^2 - \bar{\lambda}_{LT,s, \text{EffM-}}^2}}$$

Out: 0.858497

In: If [$\chi_{LT,s, \text{EffM-}} > 1, \chi_{LT,s, \text{EffM-}} = 1$]

$$\text{In: } \bar{\lambda}_{LT,s, \text{EffM+}} = \sqrt{\frac{W_{y,s, \text{EffM+}} * f_y}{M_{cr,s} [\text{lb}]}}$$

Out: 0.373783

$$\text{In: } \Phi_{LT,s, \text{EffM+}} = 0.5 * (1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT,s, \text{EffM+}} - 0.2) + \bar{\lambda}_{LT,s, \text{EffM+}}^2);$$
$$\chi_{LT,s, \text{EffM+}} = \frac{1}{\Phi_{LT,s, \text{EffM+}} + \sqrt{\Phi_{LT,s, \text{EffM+}}^2 - \bar{\lambda}_{LT,s, \text{EffM+}}^2}}$$

Out: 0.869312

In: If [$\chi_{LT,s, \text{EffM+}} > 1, \chi_{LT,s, \text{EffM+}} = 1$]

$$\text{In: } \bar{\lambda}_{LT,l, \text{EffM-}} = \sqrt{\frac{W_{y,l, \text{EffM-}} * f_y}{M_{cr,l} [\text{lb}]}}$$

Out: 0.327376

$$\text{In: } \Phi_{LT,l, \text{EffM-}} = 0.5 * (1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT,l, \text{EffM-}} - 0.2) + \bar{\lambda}_{LT,l, \text{EffM-}}^2);$$
$$\chi_{LT,l, \text{EffM-}} = \frac{1}{\Phi_{LT,l, \text{EffM-}} + \sqrt{\Phi_{LT,l, \text{EffM-}}^2 - \bar{\lambda}_{LT,l, \text{EffM-}}^2}}$$

Out: 0.903195

In: If [$\chi_{LT, l, EffM-} > 1, \chi_{LT, l, EffM-} = 1$]

$$In: \bar{\lambda}_{LT, l, EffM+} = \sqrt{\frac{W_{y, l, EffM+} * f_y}{M_{cr, l} [lb]}}$$

Out: 0.328404

$$In: \Phi_{LT, l, EffM+} = 0.5 * \left(1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT, l, EffM+} - 0.2) + \bar{\lambda}_{LT, l, EffM+}^2 \right);$$

$$\chi_{LT, l, EffM+} = \frac{1}{\Phi_{LT, l, EffM+} + \sqrt{\Phi_{LT, l, EffM+}^2 - \bar{\lambda}_{LT, l, EffM+}^2}}$$

Out: 0.902438

In: If [$\chi_{LT, l, EffM+} > 1, \chi_{LT, l, EffM+} = 1$]

$$In: N_{cr, T, Kaim} = \frac{1}{i_0^2} * (GModul * I_t);$$

$$N_{cr, TF, Kaim} = \frac{N_{cr, z}}{2 \left(1 - \frac{z_0^2}{i_0^2} \right)} * \left(1 + \frac{N_{cr, T, Kaim}}{N_{cr, z}} - \sqrt{\left(1 - \frac{N_{cr, T, Kaim}}{N_{cr, z}} \right)^2 + 4 * \left(\frac{z_0^2}{i_0^2} \right) * \frac{N_{cr, T, Kaim}}{N_{cr, z}}} \right);$$

$$\bar{\lambda}_{TF, Kaim} = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr, TF, Kaim}}}$$

Out: 0.618016

$$In: \Phi = 0.5 * \left(1 + \alpha (\bar{\lambda}_{TF, Kaim} - 0.2) + \bar{\lambda}_{TF, Kaim}^2 \right);$$

$$\chi_{TF} = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_{TF, Kaim}^2}}$$

Out: 0.774655

$$In: \bar{\lambda}_{TF, Kaim, Eff} = \sqrt{\frac{A_{Eff} * f_y}{N_{cr, TF, Kaim}}}$$

Out: 0.602097

$$In: \Phi = 0.5 * \left(1 + \alpha (\bar{\lambda}_{TF, Kaim, Eff} - 0.2) + \bar{\lambda}_{TF, Kaim, Eff}^2 \right);$$

$$\chi_{TF, Eff} = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_{TF, Kaim, Eff}^2}}$$

Out: 0.784141

Interaktion lt. ÖN B 1993-1-1:2007-02

In: $k_y = 1 + 0.6 * \bar{\lambda}_{y, \text{Eff}} * \frac{N_{\text{Ek}}}{\chi_{y, \text{Eff}} * A_{\text{Eff}} * f_y};$
 If $\left[k_y > 1 + 0.6 * \frac{N_{\text{Ek}}}{\chi_{y, \text{Eff}} * A_{\text{Eff}} * f_y}, k_y = 1 + 0.6 * \frac{N_{\text{Ek}}}{\chi_{y, \text{Eff}} * A_{\text{Eff}} * f_y} \right]$

In: $k_{\text{LT}} = 1 - \frac{0.05 * \bar{\lambda}_{z, \text{Eff}} * \frac{N_{\text{Ek}}}{\chi_{z, \text{Eff}} * A_{\text{Eff}} * f_y}}{1 - 0.25};$
 If $\left[k_{\text{LT}} < \frac{0.05 * \frac{N_{\text{Ek}}}{\chi_{z, \text{Eff}} * A_{\text{Eff}} * f_y}}{1 - 0.25}, k_{\text{LT}} = \frac{0.05 * \frac{N_{\text{Ek}}}{\chi_{z, \text{Eff}} * A_{\text{Eff}} * f_y}}{1 - 0.25} \right]$

In: M_{Ek}

Out: -362.

In: $N_{\text{Ek}} * \Delta e_z$

Out: 337.699

In: $M_{\text{Ek}} + N_{\text{Ek}} * \Delta e_z$

Out: -24.3007

In: If $[M_{\text{Ek}} + N_{\text{Ek}} * \Delta e_z > 0,$
 $\text{erg17} = \frac{N_{\text{Ek}}}{\chi_{y, \text{Eff}} * A_{\text{Eff}} * f_y} + k_y * \frac{\text{Abs}[M_{\text{Ek}} + N_{\text{Ek}} * \Delta e_z]}{\chi_{\text{LT}, s, \text{EffM}+} * f_y * W_{y, s, \text{EffM}+}}$
 ,
 $\text{erg17} = \frac{N_{\text{Ek}}}{\chi_{y, \text{Eff}} * A_{\text{Eff}} * f_y} + k_y * \frac{\text{Abs}[M_{\text{Ek}} + N_{\text{Ek}} * \Delta e_z]}{\chi_{\text{LT}, l, \text{EffM}-} * f_y * W_{y, l, \text{EffM}-}}$
]

Out: 0.868455

In: $\text{erg18} = \frac{N_{\text{Ek}}}{\chi_{\text{TF}, \text{Eff}} * A_{\text{Eff}} * f_y} + k_{\text{LT}} * \frac{M_{\text{Ek}} + N_{\text{Ek}} * \Delta e_z}{\chi_{\text{LT}, s, \text{EffM}+} * f_y * W_{y, s, \text{EffM}+}}$

Out: 0.979266

<i>In:</i>	$\text{erg19} = \frac{N_{\text{Ek}}}{\chi_{z,\text{Eff}} * A_{\text{Eff}} * f_y} - k_{\text{LT}} * \frac{M_{\text{Ek}} + N_{\text{Ek}} * \Delta e_z}{\chi_{\text{LT}, l, \text{EffM}} * f_y * W_{y, l, \text{EffM}}}$
<i>Out:</i>	0.923445
<i>In:</i>	<p>If [$\bar{\lambda}_{y, \text{Eff}} \leq 1$,</p> $\text{erg15} = \frac{N_{\text{Ek}}}{A_{\text{Eff}} * f_y} * \left(\frac{1}{\chi_{y, \text{Eff}}} - 2 + \bar{\lambda}_{y, \text{Eff}} \right) + \frac{\text{Abs} [M_{\text{Ek}} + N_{\text{Ek}} * \Delta e_z]}{f_y * W_{y, s, \text{EffM}}};$ <p>erg1516 = erg15;</p> <p>, (* Else → $\bar{\lambda}_y > 1$*)</p> $\text{erg16} = \frac{N_{\text{Ek}}}{A_{\text{Eff}} * f_y} * \left(\frac{1}{\chi_{y, \text{Eff}}} - 1.5 + 0.5 * \bar{\lambda}_{y, \text{Eff}} \right) + \frac{\text{Abs} [M_{\text{Ek}} + N_{\text{Ek}} * \Delta e_z]}{f_y * W_{y, s, \text{EffM}}};$ <p>erg1516 = erg16;</p> <p>]</p> <p>erg1516</p>
<i>Out:</i>	-0.414683
<i>In:</i>	If[erg17 ≤ 1&&erg18 ≤ 1&&erg19 ≤ 1&&erg1516 ≤ 1, Nachweis erfüllt, Nachweisnicht erfüllt]
<i>Out:</i>	erfülltNachweis

Anhang D. Bemessungsbeispiel laut Vorschlag

Folgendes Mathematica⁴ Skript zeigt den Nachweisvorgang für ein 1,5 Meter langes $\frac{1}{2}$ IPE-300 Stahlprofil und einer Belastung von $N = 0.6N_{pl}$ und $M_y = 0.1M_{pl}$ nach dem Bemessungsvorschlag in Kapitel 6.

```
Querschnittswerte

In: h = 15;
    b = 15;
    t_s = 0.71;
    t_g = 1.07;
    r = 1.5;
    A = 26.9;
    e_z = 3.32;
    I_y = 509;
    I_z = 302;
    i_p = 5.49;
    I_t = 10.10;
    W_{pl,y} = 77.38;

In: W_{y,s} = \frac{I_y}{h - e_z};

In: \alpha = 0.49;
```

⁴Wolfram Mathematica 8, Version 8.0.4.0

In: EModul = 21000;
 $G_{\text{Modul}} = \frac{1}{2 * (1.3)} * E_{\text{Modul}};$
 $f_y = 23.5;$

In: $N_{p1} = A * f_y;$

In: $z_0 = \left(e_z - \frac{t_g}{2} \right);$

In: $i_0 = \sqrt{i_p^2 + z_0^2};$

In: $N_E = 0.6 N_{p1};$
 $M_{y,E} = 0.1 * W_{p1,y} * f_y;$

Klassifizierung der Eckpunkte und effektive Querschnittswerte

$M^{(+)}$

In: $\sigma_o = \frac{f_y}{h - e_z} (t_g + r - e_z);$
 $\sigma_u = f_y;$
 $\psi = \frac{\sigma_o}{\sigma_u};$
 If $\left[\psi \geq -2 \& \& \psi \leq 1, k_{\sigma} = \frac{1.7}{3 + \psi}, \right.$
 If $\left[\psi < -2 \& \& \psi \geq -3, k_{\sigma} = 3.3(1 + \psi) + 1.25\psi^2, \right.$
 If $\left[\psi < -3, k_{\sigma} = 0.29(1 - \psi)^2 \right]$
];
];
 If $\left[\frac{h - t_g - r}{t_s} \leq 21 * \sqrt{k_{\sigma}}, \text{Klasse} = 3, \text{Klasse} = 4 \right];$
 Klasse

In: 4

In: $b_p = h - t_g - r;$
 $\bar{\lambda}_p = \frac{b_p}{28.4 * \sqrt{k_{\sigma}}};$

$$\text{If } \left[\bar{\lambda}_p > 0.748, \rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0.188}{\lambda_p^2}, \rho = 1 \right];$$

$$b_t = \frac{\psi * b_p}{\psi - 1};$$

$$\text{If } \left[\frac{0.42 * b_p}{1 - \psi} + b_t < b_p, b_{eo} = \frac{0.42 * b_p}{1 - \psi} + b_t, b_{eo} = b_p \right];$$

$$t_{\text{Eff}} = (1.75 * \rho - 0.75 - 0.15\psi) * t_s;$$

$$A_{\text{Gurt}} = b * t_g;$$

$$A_{\text{Steg}} = (h - t_g) * t_s;$$

$$A_{\text{Ausrundungen}} = 2 * r^2 - \frac{r^2 * \text{Pi}}{2};$$

$$A_{\text{Ausfall}} = (b_p - b_{eo}) * (t_s - t_{\text{Eff}});$$

$$z_{\text{Gurt}} = t_g / 2;$$

$$z_{\text{Steg}} = (h - t_g) / 2 + t_g;$$

$$z_{\text{Ausrundungen}} = t_g + r - \frac{2 * \left(r^2 * 0.5 * r - \frac{r^2 * \text{Pi}}{4} * \frac{4r}{3\text{Pi}} \right)}{A_{\text{Ausrundungen}}};$$

$$z_{\text{Ausfall}} = (b_p - b_{eo}) / 2 + b_{eo} + r + t_g;$$

$$e_{z,\text{Eff}} = \frac{A_{\text{Gurt}} * z_{\text{Gurt}} + A_{\text{Steg}} * z_{\text{Steg}} + A_{\text{Ausrundungen}} * z_{\text{Ausrundungen}} - A_{\text{Ausfall}} * z_{\text{Ausfall}}}{A_{\text{Gurt}} + A_{\text{Steg}} + A_{\text{Ausrundungen}} + A_{\text{Ausfall}}};$$

$$I_{y,\text{Eff}} = I_y - \frac{(t_s - t_{\text{Eff}}) * (b_p - b_{eo})^3}{12} - (t_s - t_{\text{Eff}}) * (b_p - b_{eo}) * \left(h - e_{z,\text{Eff}} - \frac{(b_p - b_{eo})}{2} \right)^2;$$

$$W_{y,s,\text{Eff}} = \frac{I_{y,\text{Eff}}}{h - e_z}$$

Out: 40.2962

N

In: $\psi = 1;$
 $k_\sigma = \frac{1.7}{3 + \psi};$
 If $\left[\frac{h - t_g - r}{t_s} \leq 21 * \sqrt{k_\sigma}, \text{Klasse} = 3, \text{Klasse} = 4 \right];$
 Klasse

In: 4

In: $b_p = h - t_g - r;$
 $\bar{\lambda}_p = \frac{\frac{b_p}{t_s}}{28.4 * \sqrt{k_\sigma}};$

$$\text{If } \left[\bar{\lambda}_p > 0.748, \rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0.188}{\lambda_p^2}, \rho = 1 \right];$$

$$b_{eo} = 0.42 * b_p;$$

$$t_{\text{Eff}} = (1.75 * \rho - 0.75) * t_s;$$

$$b_p - b_{eo};$$

$$A_{\text{Eff}} = A - (b_p - b_{eo}) * (t_s - t_{\text{Eff}})$$

Out: 25.532

Beiwerte

In: lb = 10;

In: lb = 10;

$$l_{cr} = lb * b;$$

$$N_{cr,y} = \frac{\text{Pi}^2 * \text{EModul} * I_y}{l_{cr}^2};$$

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr,y}}};$$

$$\Phi = 0.5 * (1 + \alpha (\bar{\lambda}_y - 0.2) + \bar{\lambda}_y^2);$$

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_y^2}};$$

$$N_{cr,z} = \frac{\text{Pi}^2 * \text{EModul} * I_z}{l_{cr}^2};$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr,z}}};$$

$$\Phi = 0.5 * (1 + \alpha (\bar{\lambda}_z - 0.2) + \bar{\lambda}_z^2);$$

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_z^2}};$$

$$N_{cr,T,Kaim} = \frac{1}{i_0^2} * (\text{GModul} * I_t);$$

$$N_{cr,TF,Kaim} = \frac{N_{cr,z}}{2 \left(1 - \frac{z_0^2}{i_0^2}\right)} * \left(1 + \frac{N_{cr,T,Kaim}}{N_{cr,z}} - \sqrt{\left(1 - \frac{N_{cr,T,Kaim}}{N_{cr,z}}\right)^2 + 4 * \left(\frac{z_0^2}{i_0^2}\right) * \frac{N_{cr,T,Kaim}}{N_{cr,z}}}\right);$$

$$\bar{\lambda}_{TF,Kaim} = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr,TF,Kaim}}};$$

$$\Phi = 0.5 * (1 + \alpha (\bar{\lambda}_z - 0.2) + \bar{\lambda}_{TF,Kaim}^2);$$

$$\chi_{TF} = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_{TF,Kaim}^2}};$$

$$\bar{\lambda}_{y,\text{Eff}} = \sqrt{\frac{A_{\text{Eff}} * f_y}{N_{\text{cr}, y}}};$$

$$\Phi = 0.5 * \left(1 + \alpha (\bar{\lambda}_{y,\text{Eff}} - 0.2) + \bar{\lambda}_{y,\text{Eff}}^2 \right);$$

$$\chi_{y,\text{Eff}} = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_{y,\text{Eff}}^2}};$$

$$\bar{\lambda}_{z,\text{Eff}} = \sqrt{\frac{A_{\text{Eff}} * f_y}{N_{\text{cr}, z}}};$$

$$\Phi = 0.5 * \left(1 + \alpha (\bar{\lambda}_{z,\text{Eff}} - 0.2) + \bar{\lambda}_{z,\text{Eff}}^2 \right);$$

$$\chi_{z,\text{Eff}} = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_{z,\text{Eff}}^2}};$$

$$\bar{\lambda}_{\text{TF, Kaim, Eff}} = \sqrt{\frac{A_{\text{Eff}} * f_y}{N_{\text{cr, TF, Kaim}}}};$$

$$\Phi = 0.5 * \left(1 + \alpha (\bar{\lambda}_{z,\text{Eff}} - 0.2) + \bar{\lambda}_{\text{TF, Eff}}^2 \right);$$

$$\chi_{\text{TF, Eff}} = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_{\text{TF, Eff}}^2}};$$

vorgeschlagene Interaktionsnachweise

In: $n_y = \frac{N_E}{\chi_y * A_{\text{Eff}} * f_y};$
 $k_y = 1 + (\bar{\lambda}_y - 0.2) n_y;$
 If $[k_y > 1 + 0.8n_y, k_y = 1 + 0.8n_y];$

In: $f_1 = \frac{N_E}{\chi_{y, \text{Eff}} * A_{\text{Eff}} * f_y} + k_y * \frac{M_{y,E}}{f_y * W_{y,s,\text{Eff}}}$

Out: $0.901736 \leq 1$

In: $f_2 = \frac{N_E}{\chi_{\text{TF, Eff}} * A_{\text{Eff}} * f_y} + k_y * \frac{M_{y,E}}{f_y * W_{y,s,\text{Eff}}}$

Out: $0.9643 \leq 1$

Anhang E. ABAQUS Inputfile

Die notwendigen ABAQUS Inputfiles wurden mittels eines eigens dafür entwickelten JAVA Programmes generiert. Als Beispiel wird das Inputfile für ein $\frac{1}{2}$ IPE-300 Profil mit einem L/B Verhältnis von 10 gezeigt (B=15cm, L=150cm).

E.3 GMNIA Analyse

```
1 *****
2 ***HEADING*****
3 *****
4 *Heading
5 Paul Kugler Master Thesis 2013
6 Model of a warm rolled T beam
7 T-IPE-300 L=150.0cm
8 All dimensions in cm and kN
9 File createad on Tue Dec 03 22:58:03 CET 2013
10 *****
11 ***PARAMETER DEFINITION*****
12 *****
13 *Parameter
14 ** max(nodes_x) = 999
15 nodes_x=200
16 ** max(nodes_y) = 99
17 nodes_y=20
18 ** max(nodes_z) = 99
19 nodes_z=20
20 beamLength=150.0
21 beamWidth=15.0
22 beamHeight=15.0
23 tf=1.07
24 tw=0.71
25 hw=13.93
26 EMod=21000
27 Poiss=0.3
28 fy=23.5
29 ** Box a and t
30 bt=0.07869
31 ba=3.14647
32 ** Centre of Gravity
33 COG=2.2411
34 Npl=1810.04
35 NEd=3620.08
36 Npl=632.29
37 *****
38 *****INITIAL STRESS DISTRIBUTION*****
39 *****
```

```

40 ***FLANGE*****
41 IS_F1=-7.231734869043898
42 IS_F2=-5.8217348690438975
43 IS_F3=-4.411734869043897
44 IS_F4=-3.001734869043898
45 IS_F5=-1.5917348690438977
46 IS_F6=-0.18173486904389763
47 IS_F7=1.2282651309561021
48 IS_F8=2.6382651309561025
49 IS_F9=4.048265130956102
50 IS_F10=5.458265130956101
51 IS_F11=5.458265130956103
52 IS_F12=4.048265130956103
53 IS_F13=2.6382651309561025
54 IS_F14=1.2282651309561037
55 IS_F15=-0.181734869043897
56 IS_F16=-1.591734869043897
57 IS_F17=-3.0017348690438967
58 IS_F18=-4.411734869043897
59 IS_F19=-5.821734869043897
60 IS_F20=-7.231734869043896
61 ***WEB*****
62 IS_W1=6.091673263075811
63 IS_W2=5.608187572751866
64 IS_W3=5.124701882427923
65 IS_W4=4.641216192103977
66 IS_W5=4.1577305017800334
67 IS_W6=3.6742448114560924
68 IS_W7=3.190759121132145
69 IS_W8=2.7072734308082036
70 IS_W9=2.2237877404842594
71 IS_W10=1.7403020501603144
72 IS_W11=1.2568163598363713
73 IS_W12=0.7733306695124265
74 IS_W13=0.28984497918848257
75 IS_W14=-0.19364071113546083
76 IS_W15=-0.6771264014594056
77 IS_W16=-1.1606120917833493
78 IS_W17=-1.6440977821072937
79 IS_W18=-2.1275834724312377
80 IS_W19=-2.611069162755176
81 IS_W20=-3.094554853079125
82 *****
83 *****NODES*****
84 *****
85 *** Bauteile: 1=Flange, 2=Web, 3=Box
86 *****
87 *** Flange Nodes (Node Number: X Bauteil, Y Columns (0-99), Z Rows (0-999), X0YYZZZ)
88 *** Reference Node
89 RNF=10010000
90 RNB=10010200
91 *** Node Flange Front Left (Column = 0, Row = 0)
92 NFFL=10000000
93 **** NFFLy=-beamWidth/2
94 NFFLy=-7.5
95 *** Node Flange Front Right (Column = nodes_y, Row = 0)
96 NFFR=10020000
97 **** NFFLy+=beamWidth/2
98 NFFRy=7.5
99 *** Node Flange Back Left (Column = 0, Row = nodes_x)
100 NFBL=10000200
101 **** NFBLy=NFFLy
102 NFBLy=NFFLy
103 *** Node Flange Back Right (Column = nodes_y, Row = nodes_x)
104 NFBR=10020200
105 **** NFBRy=NFFRy
106 NFBRy=NFFRy
107 *** Beam Nodes (Node Number: X Bauteil, Z Rows (0-999), X000ZZZ)
108 *** Node Beam Front
109 NBF=20000000
110 *** Node Beam Back
111 NBB=20000200
112 *****
113 *** Web Nodes (Node Number: X Bauteil, Y Height (0-999), Z Rows (0-999), X0YYZZZ)
114 *** Node Web Front Top (Height = 0, Row = 0)

```

```

115 NWFT=30000000
116 *** Node Web Front Bottom (Height = nodes_z, Row = 0)
117 NWFB=30020000
118 *** Node Web Back Top (Height = 0, Row = nodes_x)
119 NWBT=30000200
120 *** Node Web Back Bottom (Height = nodes_z, Row = nodes_x)
121 NWBB=30020200
122 *** Node Web Front Center Of Gravity
123 NWFCOG=31000000
124 *** Node Web Back Center Of Gravity
125 NWBCOG=32000000
126 *****
127 *** Nodes for TFront and TBack (1 under NWFT and 1 under NWBT)
128 *** Node Web Front Under Top
129 NWFUT=30001000
130 *** Node Web Back Under Top
131 NWBUT=30001200
132 *****
133 *****ELEMENTS *****
134 *****
135 *** Nodes Flange Element 1
136 NFE11=NFFL
137 NFE12=10001000
138 NFE13=10001001
139 NFE14=10000001
140 *** Nodes Beam Element 1
141 NBE11=NBF
142 NBE12=20000001
143 *** Nodes Web Element 1
144 NWE11=NWFT
145 NWE12=NWFUT
146 NWE13=30001001
147 NWE14=30000001
148 *** Flange Start Element (Element Number: X Bauteil, Y Column (0-99), Z Rows (0-999), XYZZZZ)
149 FSE=100000
150 *** Web Start Element (Element Number: X Bauteil, Y Column (0-99), Z Rows (0-999), XYZZZZ)
151 WSE=200000
152 *****
153 *****PART FLANGE*****
154 *****
155 *Part, name=flange
156 *Node, NSet=NSetFlangeLeft
157 <NFFL>,0,-7.5,0
158 10000001,0.75,-7.4985075,7.462500000001704E-4
159 10000002,1.5,-7.49703,0.0014850000000001806
160 10000003,2.25,-7.4955675,0.0022162500000000307
161 10000004,3.0,-7.49412,0.00294000000000001647
162 10000005,3.75,-7.4926875,0.0036562500000001386
163 10000006,4.5,-7.49127,0.0043649999999999952
164 10000007,5.25,-7.4898675,0.005066250000000005
165 10000008,6.0,-7.48848,0.0057599999999999987
166 10000009,6.75,-7.4871075,0.006446250000000209
167 10000010,7.5,-7.48575,0.0071249999999999826
168 10000011,8.25,-7.4844075,0.0077962500000000171
169 10000012,9.0,-7.48308,0.0084599999999999912
170 10000013,9.75,-7.4817675,0.0091162499999999937
171 10000014,10.5,-7.48047,0.0097649999999999802
172 10000015,11.25,-7.4791875,0.010406249999999995
173 10000016,12.0,-7.47792,0.0110399999999999939
174 10000017,12.75,-7.4766675,0.0116662500000000211
175 10000018,13.5,-7.47543,0.0122849999999999988
176 10000019,14.25,-7.4742075,0.0128962499999999831
177 10000020,15.0,-7.473,0.0135000000000000068
178 10000021,15.75,-7.4718075,0.0140962500000000143
179 10000022,16.5,-7.47063,0.0146885000000000059
180 10000023,17.25,-7.4694675,0.0152662499999999815
181 10000024,18.0,-7.46832,0.0158399999999999854
182 10000025,18.75,-7.4671875,0.0164062500000000178
183 10000026,19.5,-7.46607,0.0169649999999999897
184 10000027,20.25,-7.4649675,0.01751624999999999
185 10000028,21.0,-7.46388,0.0180600000000000187
186 10000029,21.75,-7.4628075,0.018596249999999987
187 10000030,22.5,-7.46175,0.0191249999999999837
188 10000031,23.25,-7.4607075,0.0196462500000000087
189 10000032,24.0,-7.45968,0.0201600000000000178

```


190 10000033,24.75,-7.4586675,0.020666250000000108
191 10000034,25.5,-7.45767,0.02116499999999988
192 10000035,26.25,-7.4566875,0.021656249999999932
193 10000036,27.0,-7.45572,0.022139999999999826
194 10000037,27.75,-7.4547675,0.02261625000000004
195 10000038,28.5,-7.45383,0.02308500000000022
196 10000039,29.25,-7.4529075,0.02354624999999988
197 10000040,30.0,-7.452,0.02400000000000002
198 10000041,30.75,-7.4511075,0.02444625000000003
199 10000042,31.5,-7.45023,0.024884999999999824
200 10000043,32.25,-7.4493675,0.02531624999999993
201 10000044,33.0,-7.44852,0.025739999999999874
202 10000045,33.75,-7.4476875,0.026156250000000103
203 10000046,34.5,-7.44687,0.026565000000000172
204 10000047,35.25,-7.4460675,0.02696625000000008
205 10000048,36.0,-7.44528,0.02735999999999983
206 10000049,36.75,-7.4445075,0.02774624999999986
207 10000050,37.5,-7.44375,0.028125000000000178
208 10000051,38.25,-7.4430075,0.02849624999999989
209 10000052,39.0,-7.44228,0.028859999999999886
210 10000053,39.75,-7.4415675,0.029216250000000166
211 10000054,40.5,-7.44087,0.02956499999999984
212 10000055,41.25,-7.4401875,0.0299062499999998
213 10000056,42.0,-7.43952,0.030240000000000045
214 10000057,42.75,-7.4388675,0.030566250000000128
215 10000058,43.5,-7.43823,0.03088500000000005
216 10000059,44.25,-7.4376075,0.031196249999999814
217 10000060,45.0,-7.437,0.03149999999999986
218 10000061,45.75,-7.4364075,0.03179625000000019
219 10000062,46.5,-7.43583,0.03208499999999992
220 10000063,47.25,-7.4352675,0.03236624999999993
221 10000064,48.0,-7.43472,0.03263999999999978
222 10000065,48.75,-7.4341875,0.032906249999999915
223 10000066,49.5,-7.43367,0.03316499999999989
224 10000067,50.25,-7.4331675,0.03341625000000015
225 10000068,51.0,-7.43268,0.03365999999999998
226 10000069,51.75,-7.4322075,0.03389625000000018
227 10000070,52.5,-7.43175,0.03412499999999996
228 10000071,53.25,-7.4313075,0.03434625000000002
229 10000072,54.0,-7.43088,0.034559999999999924
230 10000073,54.75,-7.4304675,0.03476625000000011
231 10000074,55.5,-7.43007,0.0349650000000000135
232 10000075,56.25,-7.4296875,0.03515625
233 10000076,57.0,-7.42932,0.035340000000000015
234 10000077,57.75,-7.4289675,0.03551625000000014
235 10000078,58.5,-7.42863,0.03568499999999997
236 10000079,59.25,-7.4283075,0.03584625000000008
237 10000080,60.0,-7.428,0.03600000000000003
238 10000081,60.75,-7.4277075,0.036146249999999824
239 10000082,61.5,-7.42743,0.03628499999999999
240 10000083,62.25,-7.4271675,0.03641624999999982
241 10000084,63.0,-7.42692,0.03654000000000002
242 10000085,63.75,-7.4266875,0.03665625000000006
243 10000086,64.5,-7.42647,0.03676499999999994
244 10000087,65.25,-7.4262675,0.03686625000000001
245 10000088,66.0,-7.42608,0.0369600000000000104
246 10000089,66.75,-7.4259075,0.03704624999999995
247 10000090,67.5,-7.42575,0.037125000000000075
248 10000091,68.25,-7.4256075,0.03719625000000004
249 10000092,69.0,-7.42548,0.03725999999999985
250 10000093,69.75,-7.4253675,0.03731624999999994
251 10000094,70.5,-7.42527,0.03736499999999987
252 10000095,71.25,-7.4251875,0.037406250000000085
253 10000096,72.0,-7.42512,0.037440000000000014
254 10000097,72.75,-7.4250675,0.037466250000000034
255 10000098,73.5,-7.42503,0.037485000000000021
256 10000099,74.25,-7.4250075,0.03749624999999979
257 10000100,75.0,-7.425,0.037500000000000009
258 10000101,75.75,-7.4250075,0.03749624999999979
259 10000102,76.5,-7.42503,0.037485000000000021
260 10000103,77.25,-7.4250675,0.037466250000000034
261 10000104,78.0,-7.42512,0.037440000000000014
262 10000105,78.75,-7.4251875,0.037406250000000085
263 10000106,79.5,-7.42527,0.03736499999999987
264 10000107,80.25,-7.4253675,0.03731624999999994

265 10000108,81.0,-7.42548,0.03725999999999985
266 10000109,81.75,-7.4256075,0.03719625000000004
267 10000110,82.5,-7.42575,0.037125000000000075
268 10000111,83.25,-7.4259075,0.03704624999999995
269 10000112,84.0,-7.42608,0.036960000000000104
270 10000113,84.75,-7.4262675,0.0368662500000001
271 10000114,85.5,-7.42647,0.03676499999999994
272 10000115,86.25,-7.4266875,0.03665625000000006
273 10000116,87.0,-7.42692,0.03654000000000002
274 10000117,87.75,-7.4271675,0.03641624999999982
275 10000118,88.5,-7.42743,0.03628499999999999
276 10000119,89.25,-7.4277075,0.036146249999999824
277 10000120,90.0,-7.428,0.03600000000000003
278 10000121,90.75,-7.4283075,0.03584625000000008
279 10000122,91.5,-7.42863,0.03568499999999997
280 10000123,92.25,-7.4289675,0.03551625000000014
281 10000124,93.0,-7.42932,0.03534000000000015
282 10000125,93.75,-7.4296875,0.03515625
283 10000126,94.5,-7.43007,0.034965000000000135
284 10000127,95.25,-7.4304675,0.03476625000000011
285 10000128,96.0,-7.43088,0.034559999999999924
286 10000129,96.75,-7.4313075,0.03434625000000002
287 10000130,97.5,-7.43175,0.03412499999999996
288 10000131,98.25,-7.4322075,0.03389625000000018
289 10000132,99.0,-7.43268,0.03365999999999998
290 10000133,99.75,-7.4331675,0.03341625000000015
291 10000134,100.5,-7.43367,0.03316499999999998
292 10000135,101.25,-7.4341875,0.032906249999999915
293 10000136,102.0,-7.43472,0.032639999999999978
294 10000137,102.75,-7.4352675,0.03236624999999993
295 10000138,103.5,-7.43583,0.03208499999999992
296 10000139,104.25,-7.4364075,0.03179625000000019
297 10000140,105.0,-7.437,0.03149999999999986
298 10000141,105.75,-7.4376075,0.031196249999999814
299 10000142,106.5,-7.43823,0.03088500000000005
300 10000143,107.25,-7.4388675,0.030566250000000128
301 10000144,108.0,-7.43952,0.030240000000000045
302 10000145,108.75,-7.4401875,0.02990624999999998
303 10000146,109.5,-7.44087,0.029564999999999984
304 10000147,110.25,-7.4415675,0.029216250000000166
305 10000148,111.0,-7.44228,0.028859999999999986
306 10000149,111.75,-7.4430075,0.028496249999999989
307 10000150,112.5,-7.44375,0.028125000000000178
308 10000151,113.25,-7.4445075,0.02774624999999986
309 10000152,114.0,-7.44528,0.027359999999999983
310 10000153,114.75,-7.4460675,0.02696625000000008
311 10000154,115.5,-7.44687,0.026565000000000172
312 10000155,116.25,-7.4476875,0.026156250000000103
313 10000156,117.0,-7.44852,0.0257399999999999874
314 10000157,117.75,-7.4493675,0.02531624999999993
315 10000158,118.5,-7.45023,0.024884999999999824
316 10000159,119.25,-7.4511075,0.024446250000000003
317 10000160,120.0,-7.452,0.02400000000000002
318 10000161,120.75,-7.4529075,0.023546249999999988
319 10000162,121.5,-7.45383,0.023085000000000022
320 10000163,122.25,-7.4547675,0.02261625000000004
321 10000164,123.0,-7.45572,0.0221399999999999826
322 10000165,123.75,-7.4566875,0.021656249999999932
323 10000166,124.5,-7.45767,0.021164999999999988
324 10000167,125.25,-7.4586675,0.020666250000000108
325 10000168,126.0,-7.45968,0.020160000000000178
326 10000169,126.75,-7.4607075,0.019646250000000087
327 10000170,127.5,-7.46175,0.0191249999999999837
328 10000171,128.25,-7.4628075,0.018596249999999987
329 10000172,129.0,-7.46388,0.018060000000000187
330 10000173,129.75,-7.4649675,0.01751624999999999
331 10000174,130.5,-7.46607,0.0169649999999999897
332 10000175,131.25,-7.4671875,0.016406250000000178
333 10000176,132.0,-7.46832,0.0158399999999999854
334 10000177,132.75,-7.4694675,0.0152662499999999815
335 10000178,133.5,-7.47063,0.014685000000000059
336 10000179,134.25,-7.4718075,0.014096250000000143
337 10000180,135.0,-7.473,0.013500000000000068
338 10000181,135.75,-7.4742075,0.0128962499999999831
339 10000182,136.5,-7.47543,0.012284999999999988

```

340 10000183,137.25,-7.4766675,0.0116662500000000211
341 10000184,138.0,-7.47792,0.0110399999999999999
342 10000185,138.75,-7.4791875,0.0104062499999999995
343 10000186,139.5,-7.48047,0.00976499999999999802
344 10000187,140.25,-7.4817675,0.0091162499999999937
345 10000188,141.0,-7.48308,0.0084599999999999912
346 10000189,141.75,-7.4844075,0.0077962500000000171
347 10000190,142.5,-7.48575,0.0071249999999999826
348 10000191,143.25,-7.4871075,0.0064462500000000209
349 10000192,144.0,-7.48848,0.0057599999999999987
350 10000193,144.75,-7.4898675,0.005066250000000005
351 10000194,145.5,-7.49127,0.0043649999999999952
352 10000195,146.25,-7.4926875,0.00365625000000001386
353 10000196,147.0,-7.49412,0.00294000000000001647
354 10000197,147.75,-7.4955675,0.00221625000000000307
355 10000198,148.5,-7.49703,0.001485000000000001806
356 10000199,149.25,-7.4985075,7.4625000000001704E-4
357 <NFBL>,150.0,-7.5,0
358 *Node, NSet=NSetFlangeMiddle
359 <RNF>,0,0,0
360 10010001,0.75,0.00149250000000000001,0.0
361 10010002,1.5,0.002970000000000000004,0.0
362 10010003,2.25,0.0044325,0.0
363 10010004,3.0,0.00588,0.0
364 10010005,3.75,0.0073125,0.0
365 10010006,4.5,0.00873,0.0
366 10010007,5.25,0.01013250000000000001,0.0
367 10010008,6.0,0.0115199999999999999,0.0
368 10010009,6.75,0.01289250000000000001,0.0
369 10010010,7.5,0.01425000000000000002,0.0
370 10010011,8.25,0.0155924999999999999,0.0
371 10010012,9.0,0.01692,0.0
372 10010013,9.75,0.0182325,0.0
373 10010014,10.5,0.01953000000000000002,0.0
374 10010015,11.25,0.02081249999999999998,0.0
375 10010016,12.0,0.02208000000000000002,0.0
376 10010017,12.75,0.0233325,0.0
377 10010018,13.5,0.02457,0.0
378 10010019,14.25,0.0257924999999999996,0.0
379 10010020,15.0,0.02700000000000000003,0.0
380 10010021,15.75,0.0281925,0.0
381 10010022,16.5,0.02937,0.0
382 10010023,17.25,0.0305324999999999997,0.0
383 10010024,18.0,0.03168,0.0
384 10010025,18.75,0.0328124999999999994,0.0
385 10010026,19.5,0.03393,0.0
386 10010027,20.25,0.0350325,0.0
387 10010028,21.0,0.03612000000000000006,0.0
388 10010029,21.75,0.0371925,0.0
389 10010030,22.5,0.03825,0.0
390 10010031,23.25,0.0392924999999999994,0.0
391 10010032,24.0,0.04032,0.0
392 10010033,24.75,0.0413324999999999994,0.0
393 10010034,25.5,0.04233,0.0
394 10010035,26.25,0.0433125000000000004,0.0
395 10010036,27.0,0.04428,0.0
396 10010037,27.75,0.0452325,0.0
397 10010038,28.5,0.0461699999999999996,0.0
398 10010039,29.25,0.0470925,0.0
399 10010040,30.0,0.048,0.0
400 10010041,30.75,0.0488925,0.0
401 10010042,31.5,0.04977,0.0
402 10010043,32.25,0.0506325000000000004,0.0
403 10010044,33.0,0.05148,0.0
404 10010045,33.75,0.0523125,0.0
405 10010046,34.5,0.05313,0.0
406 10010047,35.25,0.0539325,0.0
407 10010048,36.0,0.05472000000000000005,0.0
408 10010049,36.75,0.0554925,0.0
409 10010050,37.5,0.0562499999999999994,0.0
410 10010051,38.25,0.0569924999999999995,0.0
411 10010052,39.0,0.05772,0.0
412 10010053,39.75,0.0584325,0.0
413 10010054,40.5,0.0591299999999999995,0.0
414 10010055,41.25,0.0598125,0.0

```

415 10010056,42.0,0.06048,0.0
416 10010057,42.75,0.0611325,0.0
417 10010058,43.5,0.06177,0.0
418 10010059,44.25,0.0623925,0.0
419 10010060,45.0,0.063,0.0
420 10010061,45.75,0.0635925,0.0
421 10010062,46.5,0.06417,0.0
422 10010063,47.25,0.0647325,0.0
423 10010064,48.0,0.06528,0.0
424 10010065,48.75,0.0658125,0.0
425 10010066,49.5,0.06633,0.0
426 10010067,50.25,0.066832499999999999,0.0
427 10010068,51.0,0.06732,0.0
428 10010069,51.75,0.0677925,0.0
429 10010070,52.5,0.06825,0.0
430 10010071,53.25,0.0686925,0.0
431 10010072,54.0,0.06912000000000001,0.0
432 10010073,54.75,0.0695325,0.0
433 10010074,55.5,0.069929999999999999,0.0
434 10010075,56.25,0.0703125,0.0
435 10010076,57.0,0.07068,0.0
436 10010077,57.75,0.0710325,0.0
437 10010078,58.5,0.07137,0.0
438 10010079,59.25,0.071692499999999999,0.0
439 10010080,60.0,0.07200000000000001,0.0
440 10010081,60.75,0.0722925,0.0
441 10010082,61.5,0.07257,0.0
442 10010083,62.25,0.0728325,0.0
443 10010084,63.0,0.073079999999999999,0.0
444 10010085,63.75,0.073312499999999999,0.0
445 10010086,64.5,0.07353,0.0
446 10010087,65.25,0.073732499999999999,0.0
447 10010088,66.0,0.07392,0.0
448 10010089,66.75,0.074092499999999999,0.0
449 10010090,67.5,0.07425,0.0
450 10010091,68.25,0.0743925,0.0
451 10010092,69.0,0.074519999999999999,0.0
452 10010093,69.75,0.0746325,0.0
453 10010094,70.5,0.07473,0.0
454 10010095,71.25,0.0748125,0.0
455 10010096,72.0,0.07488,0.0
456 10010097,72.75,0.0749325,0.0
457 10010098,73.5,0.07497,0.0
458 10010099,74.25,0.0749925,0.0
459 10010100,75.0,0.075,0.0
460 10010101,75.75,0.074992499999999999,0.0
461 10010102,76.5,0.07497,0.0
462 10010103,77.25,0.0749325,0.0
463 10010104,78.0,0.07488,0.0
464 10010105,78.75,0.0748125,0.0
465 10010106,79.5,0.07473,0.0
466 10010107,80.25,0.0746325,0.0
467 10010108,81.0,0.07452,0.0
468 10010109,81.75,0.07439250000000001,0.0
469 10010110,82.5,0.07425000000000001,0.0
470 10010111,83.25,0.074092499999999999,0.0
471 10010112,84.0,0.07392,0.0
472 10010113,84.75,0.073732499999999999,0.0
473 10010114,85.5,0.07353,0.0
474 10010115,86.25,0.073312499999999999,0.0
475 10010116,87.0,0.073079999999999999,0.0
476 10010117,87.75,0.07283250000000001,0.0
477 10010118,88.5,0.07257000000000001,0.0
478 10010119,89.25,0.07229250000000001,0.0
479 10010120,90.0,0.07200000000000001,0.0
480 10010121,90.75,0.071692499999999999,0.0
481 10010122,91.5,0.071369999999999999,0.0
482 10010123,92.25,0.0710325,0.0
483 10010124,93.0,0.07068,0.0
484 10010125,93.75,0.070312499999999999,0.0
485 10010126,94.5,0.069929999999999999,0.0
486 10010127,95.25,0.0695325,0.0
487 10010128,96.0,0.06912,0.0
488 10010129,96.75,0.0686925,0.0
489 10010130,97.5,0.068249999999999999,0.0

```

490 10010131,98.25,0.06779249999999999,0.0
491 10010132,99.0,0.06732,0.0
492 10010133,99.75,0.06683249999999999,0.0
493 10010134,100.5,0.06633,0.0
494 10010135,101.25,0.06581249999999999,0.0
495 10010136,102.0,0.06528,0.0
496 10010137,102.75,0.0647325,0.0
497 10010138,103.5,0.06417,0.0
498 10010139,104.25,0.06359249999999999,0.0
499 10010140,105.0,0.063,0.0
500 10010141,105.75,0.06239249999999999,0.0
501 10010142,106.5,0.06176999999999999,0.0
502 10010143,107.25,0.0611325,0.0
503 10010144,108.0,0.06047999999999999,0.0
504 10010145,108.75,0.0598125,0.0
505 10010146,109.5,0.05912999999999999,0.0
506 10010147,110.25,0.0584325,0.0
507 10010148,111.0,0.05771999999999999,0.0
508 10010149,111.75,0.05699249999999999,0.0
509 10010150,112.5,0.05624999999999999,0.0
510 10010151,113.25,0.05549249999999999,0.0
511 10010152,114.0,0.05471999999999999,0.0
512 10010153,114.75,0.05393249999999999,0.0
513 10010154,115.5,0.05312999999999999,0.0
514 10010155,116.25,0.0523125,0.0
515 10010156,117.0,0.05148000000000000,0.0
516 10010157,117.75,0.05063250000000000,0.0
517 10010158,118.5,0.04976999999999999,0.0
518 10010159,119.25,0.0488925,0.0
519 10010160,120.0,0.04799999999999999,0.0
520 10010161,120.75,0.0470925,0.0
521 10010162,121.5,0.04616999999999999,0.0
522 10010163,122.25,0.0452325,0.0
523 10010164,123.0,0.04427999999999999,0.0
524 10010165,123.75,0.0433125,0.0
525 10010166,124.5,0.04232999999999999,0.0
526 10010167,125.25,0.0413325,0.0
527 10010168,126.0,0.04031999999999999,0.0
528 10010169,126.75,0.0392925,0.0
529 10010170,127.5,0.03824999999999999,0.0
530 10010171,128.25,0.03719249999999999,0.0
531 10010172,129.0,0.03612000000000000,0.0
532 10010173,129.75,0.03503250000000000,0.0
533 10010174,130.5,0.03392999999999999,0.0
534 10010175,131.25,0.03281249999999999,0.0
535 10010176,132.0,0.03168,0.0
536 10010177,132.75,0.03053249999999999,0.0
537 10010178,133.5,0.02936999999999999,0.0
538 10010179,134.25,0.02819250000000000,0.0
539 10010180,135.0,0.02700000000000000,0.0
540 10010181,135.75,0.02579249999999999,0.0
541 10010182,136.5,0.02456999999999999,0.0
542 10010183,137.25,0.02333249999999999,0.0
543 10010184,138.0,0.02207999999999999,0.0
544 10010185,138.75,0.02081249999999999,0.0
545 10010186,139.5,0.01952999999999999,0.0
546 10010187,140.25,0.01823249999999999,0.0
547 10010188,141.0,0.01691999999999999,0.0
548 10010189,141.75,0.01559249999999999,0.0
549 10010190,142.5,0.01424999999999999,0.0
550 10010191,143.25,0.01289249999999999,0.0
551 10010192,144.0,0.01151999999999999,0.0
552 10010193,144.75,0.01013249999999999,0.0
553 10010194,145.5,0.00873,0.0
554 10010195,146.25,0.00731249999999999,0.0
555 10010196,147.0,0.00587999999999999,0.0
556 10010197,147.75,0.00443250000000000,0.0
557 10010198,148.5,0.00296999999999999,0.0
558 10010199,149.25,0.00149249999999999,0.0
559 <RNB>,150.0,0.0
560 *Node, NSet=NSetFlangeRight
561 <NFFR>,0,7.5,0
562 10020001,0.75,7.5014925,-7.462500000001704E-4
563 10020002,1.5,7.50297,-0.0014850000000001806
564 10020003,2.25,7.5044325,-0.0022162500000000307

```

565 10020004,3.0,7.50588,-0.0029400000000001647
566 10020005,3.75,7.5073125,-0.0036562500000001386
567 10020006,4.5,7.50873,-0.004364999999999952
568 10020007,5.25,7.5101325,-0.005066250000000005
569 10020008,6.0,7.51152,-0.005759999999999987
570 10020009,6.75,7.5128925,-0.006446250000000209
571 10020010,7.5,7.51425,-0.007124999999999826
572 10020011,8.25,7.5155925,-0.007796250000000171
573 10020012,9.0,7.51692,-0.008459999999999912
574 10020013,9.75,7.5182325,-0.009116249999999937
575 10020014,10.5,7.51953,-0.009764999999999802
576 10020015,11.25,7.5208125,-0.010406249999999955
577 10020016,12.0,7.52208,-0.011039999999999939
578 10020017,12.75,7.5233325,-0.011666250000000211
579 10020018,13.5,7.52457,-0.012284999999999988
580 10020019,14.25,7.5257925,-0.012896249999999831
581 10020020,15.0,7.527,-0.013500000000000068
582 10020021,15.75,7.5281925,-0.014096250000000143
583 10020022,16.5,7.52937,-0.014685000000000059
584 10020023,17.25,7.5305325,-0.015266249999999815
585 10020024,18.0,7.53168,-0.015839999999999854
586 10020025,18.75,7.5328125,-0.016406250000000178
587 10020026,19.5,7.53393,-0.016964999999999897
588 10020027,20.25,7.5350325,-0.017516249999999999
589 10020028,21.0,7.53612,-0.0180600000000000187
590 10020029,21.75,7.5371925,-0.018596249999999987
591 10020030,22.5,7.53825,-0.019124999999999837
592 10020031,23.25,7.5392925,-0.019646250000000087
593 10020032,24.0,7.54032,-0.0201600000000000178
594 10020033,24.75,7.5413325,-0.020666250000000108
595 10020034,25.5,7.54233,-0.021164999999999988
596 10020035,26.25,7.5433125,-0.021656249999999932
597 10020036,27.0,7.54428,-0.022139999999999926
598 10020037,27.75,7.5452325,-0.022616250000000004
599 10020038,28.5,7.54617,-0.0230850000000000022
600 10020039,29.25,7.5470925,-0.023546249999999988
601 10020040,30.0,7.548,-0.024000000000000002
602 10020041,30.75,7.5488925,-0.024446250000000003
603 10020042,31.5,7.54977,-0.024884999999999824
604 10020043,32.25,7.5506325,-0.02531624999999993
605 10020044,33.0,7.55148,-0.025739999999999874
606 10020045,33.75,7.5523125,-0.026156250000000103
607 10020046,34.5,7.55313,-0.0265650000000000172
608 10020047,35.25,7.5539325,-0.026966250000000008
609 10020048,36.0,7.55472,-0.027359999999999983
610 10020049,36.75,7.5554925,-0.027746249999999986
611 10020050,37.5,7.55625,-0.0281250000000000178
612 10020051,38.25,7.5569925,-0.028496249999999989
613 10020052,39.0,7.55772,-0.028859999999999986
614 10020053,39.75,7.5584325,-0.029216250000000166
615 10020054,40.5,7.55913,-0.029564999999999984
616 10020055,41.25,7.5598125,-0.02990624999999998
617 10020056,42.0,7.56048,-0.0302400000000000045
618 10020057,42.75,7.5611325,-0.030566250000000128
619 10020058,43.5,7.56177,-0.030885000000000005
620 10020059,44.25,7.5623925,-0.031196249999999814
621 10020060,45.0,7.563,-0.031499999999999986
622 10020061,45.75,7.5635925,-0.031796250000000019
623 10020062,46.5,7.56417,-0.032084999999999992
624 10020063,47.25,7.5647325,-0.032366249999999993
625 10020064,48.0,7.56528,-0.032639999999999978
626 10020065,48.75,7.5658125,-0.032906249999999915
627 10020066,49.5,7.56633,-0.033164999999999989
628 10020067,50.25,7.5668325,-0.033416250000000015
629 10020068,51.0,7.56732,-0.033659999999999998
630 10020069,51.75,7.5677925,-0.033896250000000018
631 10020070,52.5,7.56825,-0.034124999999999996
632 10020071,53.25,7.5686925,-0.034346250000000002
633 10020072,54.0,7.56912,-0.034559999999999924
634 10020073,54.75,7.5695325,-0.034766250000000011
635 10020074,55.5,7.56993,-0.0349650000000000135
636 10020075,56.25,7.5703125,-0.03515625
637 10020076,57.0,7.57068,-0.035340000000000015
638 10020077,57.75,7.5710325,-0.035516250000000014
639 10020078,58.5,7.57137,-0.035684999999999997

640 10020079,59.25,7.5716925,-0.03584625000000008
641 10020080,60.0,7.572,-0.03600000000000003
642 10020081,60.75,7.5722925,-0.036146249999999824
643 10020082,61.5,7.57257,-0.03628499999999999
644 10020083,62.25,7.5728325,-0.03641624999999982
645 10020084,63.0,7.57308,-0.03654000000000002
646 10020085,63.75,7.5733125,-0.03665625000000006
647 10020086,64.5,7.57353,-0.03676499999999994
648 10020087,65.25,7.5737325,-0.03686625000000001
649 10020088,66.0,7.57392,-0.0369600000000000104
650 10020089,66.75,7.5740925,-0.03704624999999995
651 10020090,67.5,7.57425,-0.037125000000000075
652 10020091,68.25,7.5743925,-0.03719625000000004
653 10020092,69.0,7.57452,-0.03725999999999985
654 10020093,69.75,7.5746325,-0.03731624999999994
655 10020094,70.5,7.57473,-0.03736499999999987
656 10020095,71.25,7.5748125,-0.037406250000000085
657 10020096,72.0,7.57488,-0.037440000000000014
658 10020097,72.75,7.5749325,-0.037466250000000034
659 10020098,73.5,7.57497,-0.037485000000000021
660 10020099,74.25,7.5749925,-0.03749624999999979
661 10020100,75.0,7.575,-0.03750000000000009
662 10020101,75.75,7.5749925,-0.03749624999999979
663 10020102,76.5,7.57497,-0.037485000000000021
664 10020103,77.25,7.5749325,-0.037466250000000034
665 10020104,78.0,7.57488,-0.037440000000000014
666 10020105,78.75,7.5748125,-0.037406250000000085
667 10020106,79.5,7.57473,-0.03736499999999987
668 10020107,80.25,7.5746325,-0.03731624999999994
669 10020108,81.0,7.57452,-0.03725999999999985
670 10020109,81.75,7.5743925,-0.03719625000000004
671 10020110,82.5,7.57425,-0.037125000000000075
672 10020111,83.25,7.5740925,-0.03704624999999995
673 10020112,84.0,7.57392,-0.0369600000000000104
674 10020113,84.75,7.5737325,-0.03686625000000001
675 10020114,85.5,7.57353,-0.03676499999999994
676 10020115,86.25,7.5733125,-0.03665625000000006
677 10020116,87.0,7.57308,-0.03654000000000002
678 10020117,87.75,7.5728325,-0.03641624999999982
679 10020118,88.5,7.57257,-0.03628499999999999
680 10020119,89.25,7.5722925,-0.036146249999999824
681 10020120,90.0,7.572,-0.03600000000000003
682 10020121,90.75,7.5716925,-0.03584625000000008
683 10020122,91.5,7.57137,-0.03568499999999997
684 10020123,92.25,7.5710325,-0.035516250000000014
685 10020124,93.0,7.57068,-0.035340000000000015
686 10020125,93.75,7.5703125,-0.03515625
687 10020126,94.5,7.56993,-0.0349650000000000135
688 10020127,95.25,7.5695325,-0.034766250000000011
689 10020128,96.0,7.56912,-0.034559999999999924
690 10020129,96.75,7.5686925,-0.03434625000000002
691 10020130,97.5,7.56825,-0.03412499999999996
692 10020131,98.25,7.5677925,-0.033896250000000018
693 10020132,99.0,7.56732,-0.03365999999999998
694 10020133,99.75,7.5668325,-0.033416250000000015
695 10020134,100.5,7.56633,-0.033164999999999989
696 10020135,101.25,7.5658125,-0.032906249999999915
697 10020136,102.0,7.56528,-0.032639999999999978
698 10020137,102.75,7.5647325,-0.03236624999999993
699 10020138,103.5,7.56417,-0.032084999999999992
700 10020139,104.25,7.5635925,-0.031796250000000019
701 10020140,105.0,7.563,-0.031499999999999986
702 10020141,105.75,7.5623925,-0.0311962499999999814
703 10020142,106.5,7.56177,-0.030885000000000005
704 10020143,107.25,7.5611325,-0.0305662500000000128
705 10020144,108.0,7.56048,-0.0302400000000000045
706 10020145,108.75,7.5598125,-0.02990624999999998
707 10020146,109.5,7.55913,-0.029564999999999984
708 10020147,110.25,7.5584325,-0.0292162500000000166
709 10020148,111.0,7.55772,-0.0288599999999999886
710 10020149,111.75,7.5569925,-0.028496249999999989
711 10020150,112.5,7.55625,-0.0281250000000000178
712 10020151,113.25,7.5554925,-0.027746249999999986
713 10020152,114.0,7.55472,-0.027359999999999983
714 10020153,114.75,7.5539325,-0.026966250000000008

```

715 10020154,115.5,7.55313,-0.026565000000000172
716 10020155,116.25,7.5523125,-0.026156250000000103
717 10020156,117.0,7.55148,-0.025739999999999874
718 10020157,117.75,7.5506325,-0.025316249999999993
719 10020158,118.5,7.54977,-0.024884999999999824
720 10020159,119.25,7.5488925,-0.024446250000000003
721 10020160,120.0,7.548,-0.024000000000000002
722 10020161,120.75,7.5470925,-0.02354624999999988
723 10020162,121.5,7.54617,-0.023085000000000022
724 10020163,122.25,7.5452325,-0.022616250000000004
725 10020164,123.0,7.54428,-0.022139999999999826
726 10020165,123.75,7.5433125,-0.021656249999999932
727 10020166,124.5,7.54233,-0.02116499999999988
728 10020167,125.25,7.5413325,-0.020666250000000108
729 10020168,126.0,7.54032,-0.020160000000000178
730 10020169,126.75,7.5392925,-0.019646250000000087
731 10020170,127.5,7.53825,-0.019124999999999837
732 10020171,128.25,7.5371925,-0.01859624999999987
733 10020172,129.0,7.53612,-0.018060000000000187
734 10020173,129.75,7.5350325,-0.01751624999999999
735 10020174,130.5,7.53393,-0.016964999999999897
736 10020175,131.25,7.5328125,-0.016406250000000178
737 10020176,132.0,7.53168,-0.015839999999999854
738 10020177,132.75,7.5305325,-0.015266249999999815
739 10020178,133.5,7.52937,-0.014685000000000059
740 10020179,134.25,7.5281925,-0.014096250000000143
741 10020180,135.0,7.527,-0.013500000000000068
742 10020181,135.75,7.5257925,-0.012896249999999831
743 10020182,136.5,7.52457,-0.012284999999999888
744 10020183,137.25,7.5233325,-0.011666250000000211
745 10020184,138.0,7.52208,-0.011039999999999939
746 10020185,138.75,7.5208125,-0.01040624999999995
747 10020186,139.5,7.51953,-0.009764999999999802
748 10020187,140.25,7.5182325,-0.009116249999999937
749 10020188,141.0,7.51692,-0.008459999999999912
750 10020189,141.75,7.5155925,-0.007796250000000171
751 10020190,142.5,7.51425,-0.007124999999999826
752 10020191,143.25,7.5128925,-0.006446250000000209
753 10020192,144.0,7.51152,-0.005759999999999987
754 10020193,144.75,7.5101325,-0.00506625000000005
755 10020194,145.5,7.50873,-0.004364999999999952
756 10020195,146.25,7.5073125,-0.0036562500000001386
757 10020196,147.0,7.50588,-0.0029400000000001647
758 10020197,147.75,7.5044325,-0.002216250000000307
759 10020198,148.5,7.50297,-0.0014850000000001806
760 10020199,149.25,7.5014925,-7.462500000001704E-4
761 <NFBF>,150.0,7.5,0
762 *Nfill, Nset=NSetFlangeLeftNodes
763 NSetFlangeLeft,NSetFlangeMiddle,10,1000
764 *Nfill, Nset=NSetFlangeRightNodes
765 NSetFlangeMiddle,NSetFlangeRight,10,1000
766 *Nset,NSET=NSetFlangeAll
767 NSetFlangeLeftNodes, NSetFlangeRightNodes
768 *Nset,NSET=NSetFlangeFront,Generate
769 <NFPL>,<NFFR>,1000
770 *Nset,NSET=NSetFlangeBack,Generate
771 <NFBL>,<NFBR>,1000
772 *Element, Type=S4
773 <FSE>,<NFE11>,<NFE12>,<NFE13>,<NFE14>
774 *Elgen, Elset=ESetFlangeAll
775 <FSE>,<nodes_y>,1000,1000,<nodes_x>,1,1
776 *shell section, elset=ESetFlangeAll, material=steel, offset=-.5
777 <tf>,5
778 *end part
779 *****
780 *****PART BEAM*****
781 *****
782 *Part, name=beam
783 *Node, Nset=NSetBeam
784 <NBF>,0,0,0
785 20000001,0.75,0.001492500000000001,0
786 20000002,1.5,0.0029700000000000004,0
787 20000003,2.25,0.0044325,0
788 20000004,3.0,0.00588,0
789 20000005,3.75,0.0073125,0

```


790 20000006,4.5,0.00873,0
791 20000007,5.25,0.010132500000000001,0
792 20000008,6.0,0.011519999999999999,0
793 20000009,6.75,0.012892500000000001,0
794 20000010,7.5,0.014250000000000002,0
795 20000011,8.25,0.015592499999999999,0
796 20000012,9.0,0.01692,0
797 20000013,9.75,0.0182325,0
798 20000014,10.5,0.019530000000000002,0
799 20000015,11.25,0.020812499999999998,0
800 20000016,12.0,0.022080000000000002,0
801 20000017,12.75,0.0233325,0
802 20000018,13.5,0.02457,0
803 20000019,14.25,0.025792499999999996,0
804 20000020,15.0,0.027000000000000003,0
805 20000021,15.75,0.0281925,0
806 20000022,16.5,0.02937,0
807 20000023,17.25,0.030532499999999997,0
808 20000024,18.0,0.03168,0
809 20000025,18.75,0.032812499999999994,0
810 20000026,19.5,0.03393,0
811 20000027,20.25,0.0350325,0
812 20000028,21.0,0.036120000000000006,0
813 20000029,21.75,0.0371925,0
814 20000030,22.5,0.03825,0
815 20000031,23.25,0.039292499999999994,0
816 20000032,24.0,0.04032,0
817 20000033,24.75,0.041332499999999994,0
818 20000034,25.5,0.04233,0
819 20000035,26.25,0.043312500000000004,0
820 20000036,27.0,0.04428,0
821 20000037,27.75,0.0452325,0
822 20000038,28.5,0.046169999999999996,0
823 20000039,29.25,0.0470925,0
824 20000040,30.0,0.048,0
825 20000041,30.75,0.0488925,0
826 20000042,31.5,0.04977,0
827 20000043,32.25,0.050632500000000004,0
828 20000044,33.0,0.05148,0
829 20000045,33.75,0.0523125,0
830 20000046,34.5,0.05313,0
831 20000047,35.25,0.0539325,0
832 20000048,36.0,0.054720000000000005,0
833 20000049,36.75,0.0554925,0
834 20000050,37.5,0.056249999999999994,0
835 20000051,38.25,0.056992499999999995,0
836 20000052,39.0,0.05772,0
837 20000053,39.75,0.0584325,0
838 20000054,40.5,0.059129999999999995,0
839 20000055,41.25,0.0598125,0
840 20000056,42.0,0.06048,0
841 20000057,42.75,0.0611325,0
842 20000058,43.5,0.06177,0
843 20000059,44.25,0.0623925,0
844 20000060,45.0,0.063,0
845 20000061,45.75,0.0635925,0
846 20000062,46.5,0.06417,0
847 20000063,47.25,0.0647325,0
848 20000064,48.0,0.06528,0
849 20000065,48.75,0.0658125,0
850 20000066,49.5,0.06633,0
851 20000067,50.25,0.066832499999999999,0
852 20000068,51.0,0.06732,0
853 20000069,51.75,0.0677925,0
854 20000070,52.5,0.06825,0
855 20000071,53.25,0.0686925,0
856 20000072,54.0,0.069120000000000001,0
857 20000073,54.75,0.0695325,0
858 20000074,55.5,0.069929999999999999,0
859 20000075,56.25,0.0703125,0
860 20000076,57.0,0.07068,0
861 20000077,57.75,0.0710325,0
862 20000078,58.5,0.07137,0
863 20000079,59.25,0.071692499999999999,0
864 20000080,60.0,0.072000000000000001,0

865 20000081,60.75,0.0722925,0
866 20000082,61.5,0.07257,0
867 20000083,62.25,0.0728325,0
868 20000084,63.0,0.0730799999999999,0
869 20000085,63.75,0.0733124999999999,0
870 20000086,64.5,0.07353,0
871 20000087,65.25,0.0737324999999999,0
872 20000088,66.0,0.07392,0
873 20000089,66.75,0.0740924999999999,0
874 20000090,67.5,0.07425,0
875 20000091,68.25,0.0743925,0
876 20000092,69.0,0.0745199999999999,0
877 20000093,69.75,0.0746325,0
878 20000094,70.5,0.07473,0
879 20000095,71.25,0.0748125,0
880 20000096,72.0,0.07488,0
881 20000097,72.75,0.0749325,0
882 20000098,73.5,0.07497,0
883 20000099,74.25,0.0749925,0
884 20000100,75.0,0.075,0
885 20000101,75.75,0.0749924999999999,0
886 20000102,76.5,0.07497,0
887 20000103,77.25,0.0749325,0
888 20000104,78.0,0.07488,0
889 20000105,78.75,0.0748125,0
890 20000106,79.5,0.07473,0
891 20000107,80.25,0.0746325,0
892 20000108,81.0,0.07452,0
893 20000109,81.75,0.0743925000000001,0
894 20000110,82.5,0.0742500000000001,0
895 20000111,83.25,0.0740924999999999,0
896 20000112,84.0,0.07392,0
897 20000113,84.75,0.0737324999999999,0
898 20000114,85.5,0.07353,0
899 20000115,86.25,0.0733124999999999,0
900 20000116,87.0,0.0730799999999999,0
901 20000117,87.75,0.0728325000000001,0
902 20000118,88.5,0.0725700000000001,0
903 20000119,89.25,0.0722925000000001,0
904 20000120,90.0,0.0720000000000001,0
905 20000121,90.75,0.0716924999999999,0
906 20000122,91.5,0.0713699999999999,0
907 20000123,92.25,0.0710325,0
908 20000124,93.0,0.07068,0
909 20000125,93.75,0.0703124999999999,0
910 20000126,94.5,0.0699299999999999,0
911 20000127,95.25,0.0695325,0
912 20000128,96.0,0.06912,0
913 20000129,96.75,0.0686925,0
914 20000130,97.5,0.0682499999999999,0
915 20000131,98.25,0.0677924999999999,0
916 20000132,99.0,0.06732,0
917 20000133,99.75,0.0668324999999999,0
918 20000134,100.5,0.06633,0
919 20000135,101.25,0.0658124999999999,0
920 20000136,102.0,0.06528,0
921 20000137,102.75,0.0647325,0
922 20000138,103.5,0.06417,0
923 20000139,104.25,0.0635924999999999,0
924 20000140,105.0,0.063,0
925 20000141,105.75,0.0623924999999999,0
926 20000142,106.5,0.0617699999999999,0
927 20000143,107.25,0.0611325,0
928 20000144,108.0,0.0604799999999999,0
929 20000145,108.75,0.0598125,0
930 20000146,109.5,0.0591299999999999,0
931 20000147,110.25,0.0584325,0
932 20000148,111.0,0.0577199999999999,0
933 20000149,111.75,0.0569924999999999,0
934 20000150,112.5,0.0562499999999999,0
935 20000151,113.25,0.0554924999999999,0
936 20000152,114.0,0.0547199999999999,0
937 20000153,114.75,0.0539324999999999,0
938 20000154,115.5,0.0531299999999999,0
939 20000155,116.25,0.0523125,0

```

940 20000156,117.0,0.051480000000000005,0
941 20000157,117.75,0.050632500000000004,0
942 20000158,118.5,0.0497699999999999995,0
943 20000159,119.25,0.0488925,0
944 20000160,120.0,0.047999999999999999,0
945 20000161,120.75,0.0470925,0
946 20000162,121.5,0.0461699999999999996,0
947 20000163,122.25,0.0452325,0
948 20000164,123.0,0.044279999999999999,0
949 20000165,123.75,0.0433125,0
950 20000166,124.5,0.042329999999999999,0
951 20000167,125.25,0.0413325,0
952 20000168,126.0,0.0403199999999999995,0
953 20000169,126.75,0.0392925,0
954 20000170,127.5,0.038249999999999999,0
955 20000171,128.25,0.0371924999999999998,0
956 20000172,129.0,0.0361200000000000006,0
957 20000173,129.75,0.035032500000000001,0
958 20000174,130.5,0.0339299999999999998,0
959 20000175,131.25,0.0328124999999999994,0
960 20000176,132.0,0.03168,0
961 20000177,132.75,0.0305324999999999994,0
962 20000178,133.5,0.0293699999999999997,0
963 20000179,134.25,0.0281925000000000002,0
964 20000180,135.0,0.0270000000000000003,0
965 20000181,135.75,0.0257924999999999993,0
966 20000182,136.5,0.024569999999999999,0
967 20000183,137.25,0.023332499999999999,0
968 20000184,138.0,0.022079999999999999,0
969 20000185,138.75,0.02081249999999999984,0
970 20000186,139.5,0.0195299999999999995,0
971 20000187,140.25,0.0182324999999999995,0
972 20000188,141.0,0.016919999999999999,0
973 20000189,141.75,0.01559249999999999981,0
974 20000190,142.5,0.0142499999999999997,0
975 20000191,143.25,0.0128924999999999998,0
976 20000192,144.0,0.0115199999999999999,0
977 20000193,144.75,0.0101324999999999997,0
978 20000194,145.5,0.00873,0
979 20000195,146.25,0.00731249999999999935,0
980 20000196,147.0,0.00587999999999999955,0
981 20000197,147.75,0.00443250000000000001,0
982 20000198,148.5,0.002969999999999999787,0
983 20000199,149.25,0.00149249999999999969,0
984 <NBB>,150.0,0,0
985 *Element, Type=B31
986 <NBE11>,<NBE11>,<NBE12>
987 *Elgen, Elset=ESetBeam
988 <NBF>,<nodes_x>,1,1
989 *Beam Section, elset=ESetBeam, material=steel,section=box
990 <ba>,<ba>,<bt>,<bt>,<bt>,<bt>
991 *end part
992 *****
993 *****PART WEB *****
994 *****
995 *Part, name=web
996 *Node, NSet=NSetWebTop
997 <NWFT>,0,0,0
998 30000001,0.75,0.00149250000000000001,0
999 30000002,1.5,0.00297000000000000004,0
1000 30000003,2.25,0.0044325,0
1001 30000004,3.0,0.00588,0
1002 30000005,3.75,0.0073125,0
1003 30000006,4.5,0.00873,0
1004 30000007,5.25,0.01013250000000000001,0
1005 30000008,6.0,0.0115199999999999999,0
1006 30000009,6.75,0.01289250000000000001,0
1007 30000010,7.5,0.01425000000000000002,0
1008 30000011,8.25,0.0155924999999999999,0
1009 30000012,9.0,0.01692,0
1010 30000013,9.75,0.0182325,0
1011 30000014,10.5,0.01953000000000000002,0
1012 30000015,11.25,0.0208124999999999998,0
1013 30000016,12.0,0.02208000000000000002,0
1014 30000017,12.75,0.0233325,0

```

1015 30000018,13.5,0.02457,0
1016 30000019,14.25,0.025792499999999999,0
1017 30000020,15.0,0.027000000000000003,0
1018 30000021,15.75,0.0281925,0
1019 30000022,16.5,0.02937,0
1020 30000023,17.25,0.030532499999999997,0
1021 30000024,18.0,0.03168,0
1022 30000025,18.75,0.032812499999999994,0
1023 30000026,19.5,0.03393,0
1024 30000027,20.25,0.0350325,0
1025 30000028,21.0,0.036120000000000006,0
1026 30000029,21.75,0.0371925,0
1027 30000030,22.5,0.03825,0
1028 30000031,23.25,0.039292499999999994,0
1029 30000032,24.0,0.04032,0
1030 30000033,24.75,0.041332499999999994,0
1031 30000034,25.5,0.04233,0
1032 30000035,26.25,0.043312500000000004,0
1033 30000036,27.0,0.04428,0
1034 30000037,27.75,0.0452325,0
1035 30000038,28.5,0.046169999999999996,0
1036 30000039,29.25,0.0470925,0
1037 30000040,30.0,0.048,0
1038 30000041,30.75,0.0488925,0
1039 30000042,31.5,0.04977,0
1040 30000043,32.25,0.050632500000000004,0
1041 30000044,33.0,0.05148,0
1042 30000045,33.75,0.0523125,0
1043 30000046,34.5,0.05313,0
1044 30000047,35.25,0.0539325,0
1045 30000048,36.0,0.054720000000000005,0
1046 30000049,36.75,0.0554925,0
1047 30000050,37.5,0.056249999999999994,0
1048 30000051,38.25,0.056992499999999995,0
1049 30000052,39.0,0.05772,0
1050 30000053,39.75,0.0584325,0
1051 30000054,40.5,0.059129999999999995,0
1052 30000055,41.25,0.0598125,0
1053 30000056,42.0,0.06048,0
1054 30000057,42.75,0.0611325,0
1055 30000058,43.5,0.06177,0
1056 30000059,44.25,0.0623925,0
1057 30000060,45.0,0.063,0
1058 30000061,45.75,0.0635925,0
1059 30000062,46.5,0.06417,0
1060 30000063,47.25,0.0647325,0
1061 30000064,48.0,0.06528,0
1062 30000065,48.75,0.0658125,0
1063 30000066,49.5,0.06633,0
1064 30000067,50.25,0.066832499999999999,0
1065 30000068,51.0,0.06732,0
1066 30000069,51.75,0.0677925,0
1067 30000070,52.5,0.06825,0
1068 30000071,53.25,0.0686925,0
1069 30000072,54.0,0.069120000000000001,0
1070 30000073,54.75,0.0695325,0
1071 30000074,55.5,0.069929999999999999,0
1072 30000075,56.25,0.0703125,0
1073 30000076,57.0,0.07068,0
1074 30000077,57.75,0.0710325,0
1075 30000078,58.5,0.07137,0
1076 30000079,59.25,0.071692499999999999,0
1077 30000080,60.0,0.072000000000000001,0
1078 30000081,60.75,0.0722925,0
1079 30000082,61.5,0.07257,0
1080 30000083,62.25,0.0728325,0
1081 30000084,63.0,0.073079999999999999,0
1082 30000085,63.75,0.073312499999999999,0
1083 30000086,64.5,0.07353,0
1084 30000087,65.25,0.073732499999999999,0
1085 30000088,66.0,0.07392,0
1086 30000089,66.75,0.074092499999999999,0
1087 30000090,67.5,0.07425,0
1088 30000091,68.25,0.0743925,0
1089 30000092,69.0,0.074519999999999999,0

1090 30000093,69.75,0.0746325,0
1091 30000094,70.5,0.07473,0
1092 30000095,71.25,0.0748125,0
1093 30000096,72.0,0.07488,0
1094 30000097,72.75,0.0749325,0
1095 30000098,73.5,0.07497,0
1096 30000099,74.25,0.0749925,0
1097 30000100,75.0,0.075,0
1098 30000101,75.75,0.0749924999999999,0
1099 30000102,76.5,0.07497,0
1100 30000103,77.25,0.0749325,0
1101 30000104,78.0,0.07488,0
1102 30000105,78.75,0.0748125,0
1103 30000106,79.5,0.07473,0
1104 30000107,80.25,0.0746325,0
1105 30000108,81.0,0.07452,0
1106 30000109,81.75,0.07439250000000001,0
1107 30000110,82.5,0.07425000000000001,0
1108 30000111,83.25,0.07409249999999999,0
1109 30000112,84.0,0.07392,0
1110 30000113,84.75,0.07373249999999999,0
1111 30000114,85.5,0.07353,0
1112 30000115,86.25,0.07331249999999999,0
1113 30000116,87.0,0.07307999999999999,0
1114 30000117,87.75,0.07283250000000001,0
1115 30000118,88.5,0.07257000000000001,0
1116 30000119,89.25,0.07229250000000001,0
1117 30000120,90.0,0.07200000000000001,0
1118 30000121,90.75,0.07169249999999999,0
1119 30000122,91.5,0.07136999999999999,0
1120 30000123,92.25,0.0710325,0
1121 30000124,93.0,0.07068,0
1122 30000125,93.75,0.07031249999999999,0
1123 30000126,94.5,0.06992999999999999,0
1124 30000127,95.25,0.0695325,0
1125 30000128,96.0,0.06912,0
1126 30000129,96.75,0.0686925,0
1127 30000130,97.5,0.06824999999999999,0
1128 30000131,98.25,0.06779249999999999,0
1129 30000132,99.0,0.06732,0
1130 30000133,99.75,0.06683249999999999,0
1131 30000134,100.5,0.06633,0
1132 30000135,101.25,0.06581249999999999,0
1133 30000136,102.0,0.06528,0
1134 30000137,102.75,0.0647325,0
1135 30000138,103.5,0.06417,0
1136 30000139,104.25,0.06359249999999999,0
1137 30000140,105.0,0.063,0
1138 30000141,105.75,0.06239249999999999,0
1139 30000142,106.5,0.06176999999999999,0
1140 30000143,107.25,0.0611325,0
1141 30000144,108.0,0.06047999999999999,0
1142 30000145,108.75,0.0598125,0
1143 30000146,109.5,0.05912999999999999,0
1144 30000147,110.25,0.0584325,0
1145 30000148,111.0,0.05771999999999999,0
1146 30000149,111.75,0.05699249999999999,0
1147 30000150,112.5,0.05624999999999999,0
1148 30000151,113.25,0.05549249999999999,0
1149 30000152,114.0,0.05471999999999999,0
1150 30000153,114.75,0.05393249999999999,0
1151 30000154,115.5,0.05312999999999999,0
1152 30000155,116.25,0.0523125,0
1153 30000156,117.0,0.05148000000000000,0
1154 30000157,117.75,0.05063250000000000,0
1155 30000158,118.5,0.04976999999999999,0
1156 30000159,119.25,0.0488925,0
1157 30000160,120.0,0.04799999999999999,0
1158 30000161,120.75,0.0470925,0
1159 30000162,121.5,0.04616999999999999,0
1160 30000163,122.25,0.0452325,0
1161 30000164,123.0,0.04427999999999999,0
1162 30000165,123.75,0.0433125,0
1163 30000166,124.5,0.04232999999999999,0
1164 30000167,125.25,0.0413325,0

```

1165 30000168,126.0,0.040319999999999995,0
1166 30000169,126.75,0.0392925,0
1167 30000170,127.5,0.038249999999999999,0
1168 30000171,128.25,0.037192499999999998,0
1169 30000172,129.0,0.036120000000000006,0
1170 30000173,129.75,0.035032500000000001,0
1171 30000174,130.5,0.033929999999999998,0
1172 30000175,131.25,0.032812499999999994,0
1173 30000176,132.0,0.03168,0
1174 30000177,132.75,0.030532499999999994,0
1175 30000178,133.5,0.029369999999999997,0
1176 30000179,134.25,0.028192500000000002,0
1177 30000180,135.0,0.027000000000000003,0
1178 30000181,135.75,0.025792499999999993,0
1179 30000182,136.5,0.024569999999999999,0
1180 30000183,137.25,0.023332499999999999,0
1181 30000184,138.0,0.022079999999999999,0
1182 30000185,138.75,0.020812499999999984,0
1183 30000186,139.5,0.019529999999999995,0
1184 30000187,140.25,0.018232499999999995,0
1185 30000188,141.0,0.016919999999999999,0
1186 30000189,141.75,0.015592499999999981,0
1187 30000190,142.5,0.014249999999999997,0
1188 30000191,143.25,0.012892499999999998,0
1189 30000192,144.0,0.011519999999999999,0
1190 30000193,144.75,0.010132499999999997,0
1191 30000194,145.5,0.00873,0
1192 30000195,146.25,0.0073124999999999935,0
1193 30000196,147.0,0.0058799999999999955,0
1194 30000197,147.75,0.004432500000000001,0
1195 30000198,148.5,0.00296999999999999787,0
1196 30000199,149.25,0.0014924999999999969,0
1197 <NWB>,150.0,0,0
1198 *Node, NSet=NSetWebBottom
1199 <NFB>,0,0,13.9300000000000001
1200 30020001,0.75,0.027197578866782403,13.9300000000000001
1201 30020002,1.5,0.05376896368492242,13.9300000000000001
1202 30020003,2.25,0.07913264068190985,13.9300000000000001
1203 30020004,3.0,0.10273609516037946,13.9300000000000001
1204 30020005,3.75,0.12406941624365118,13.9300000000000001
1205 30020006,4.5,0.14267785257381133,13.9300000000000001
1206 30020007,5.25,0.1581730097993774,13.9300000000000001
1207 30020008,6.0,0.1702424141332388,13.9300000000000001
1208 30020009,6.75,0.17865720649433633,13.9300000000000001
1209 30020010,7.5,0.18327777777777778,13.9300000000000001
1210 30020011,8.25,0.18405720649433632,13.9300000000000001
1211 30020012,9.0,0.1810424141332388,13.9300000000000001
1212 30020013,9.75,0.1743730097993774,13.9300000000000001
1213 30020014,10.5,0.16427785257381133,13.9300000000000001
1214 30020015,11.25,0.15106941624365122,13.9300000000000001
1215 30020016,12.0,0.1351360951603795,13.9300000000000001
1216 30020017,12.75,0.11693264068190987,13.9300000000000001
1217 30020018,13.5,0.09696896368492244,13.9300000000000001
1218 30020019,14.25,0.07579757886678241,13.9300000000000001
1219 30020020,15.0,0.054000000000000003,13.9300000000000001
1220 30020021,15.75,0.03217242113321762,13.9300000000000001
1221 30020022,16.5,0.010911036315077602,13.9300000000000001
1222 30020023,17.25,-0.009202640681909846,13.9300000000000001
1223 30020024,18.0,-0.02761609516037944,13.9300000000000001
1224 30020025,18.75,-0.043819416243651196,13.9300000000000001
1225 30020026,19.5,-0.05735785257381129,13.9300000000000001
1226 30020027,20.25,-0.0678430097993774,13.9300000000000001
1227 30020028,21.0,-0.07496241413323877,13.9300000000000001
1228 30020029,21.75,-0.07848720649433633,13.9300000000000001
1229 30020030,22.5,-0.07827777777777778,13.9300000000000001
1230 30020031,23.25,-0.07428720649433634,13.9300000000000001
1231 30020032,24.0,-0.06656241413323878,13.9300000000000001
1232 30020033,24.75,-0.05524300979937735,13.9300000000000001
1233 30020034,25.5,-0.04055785257381135,13.9300000000000001
1234 30020035,26.25,-0.02281941624365122,13.9300000000000001
1235 30020036,27.0,-0.0024160951603794945,13.9300000000000001
1236 30020037,27.75,0.020197359318090233,13.9300000000000001
1237 30020038,28.5,0.04451103631507754,13.9300000000000001
1238 30020039,29.25,0.06997242113321757,13.9300000000000001
1239 30020040,30.0,0.09599999999999996,13.9300000000000001

```

1240 30020041,30.75,0.12199757886678236,13.930000000000001
1241 30020042,31.5,0.1473689636849224,13.930000000000001
1242 30020043,32.25,0.1715326406819097,13.930000000000001
1243 30020044,33.0,0.1939360951603794,13.930000000000001
1244 30020045,33.75,0.21406941624365117,13.930000000000001
1245 30020046,34.5,0.2314778525738113,13.930000000000001
1246 30020047,35.25,0.24577300979937733,13.930000000000001
1247 30020048,36.0,0.2566424141332388,13.930000000000001
1248 30020049,36.75,0.2638572064943363,13.930000000000001
1249 30020050,37.5,0.26727777777777778,13.930000000000001
1250 30020051,38.25,0.2668572064943363,13.930000000000001
1251 30020052,39.0,0.2626424141332388,13.930000000000001
1252 30020053,39.75,0.25477300979937734,13.930000000000001
1253 30020054,40.5,0.24347785257381133,13.930000000000001
1254 30020055,41.25,0.22906941624365132,13.930000000000001
1255 30020056,42.0,0.21193609516037948,13.930000000000001
1256 30020057,42.75,0.19253264068190978,13.930000000000001
1257 30020058,43.5,0.17136896368492247,13.930000000000001
1258 30020059,44.25,0.1489975788667823,13.930000000000001
1259 30020060,45.0,0.12600000000000006,13.930000000000001
1260 30020061,45.75,0.10297242113321751,13.930000000000001
1261 30020062,46.5,0.08051103631507764,13.930000000000001
1262 30020063,47.25,0.05919735931809007,13.930000000000001
1263 30020064,48.0,0.0395839048396206,13.930000000000001
1264 30020065,48.75,0.022180583756348737,13.930000000000001
1265 30020066,49.5,0.007442147426188567,13.930000000000001
1266 30020067,50.25,-0.004243009799377445,13.930000000000001
1267 30020068,51.0,-0.012562414133238747,13.930000000000001
1268 30020069,51.75,-0.017287206494336294,13.930000000000001
1269 30020070,52.5,-0.01827777777777778,13.930000000000001
1270 30020071,53.25,-0.015487206494336353,13.930000000000001
1271 30020072,54.0,-0.008962414133238783,13.930000000000001
1272 30020073,54.75,0.0011569902006226263,13.930000000000001
1273 30020074,55.5,0.014642147426188773,13.930000000000001
1274 30020075,56.25,0.031180583756348662,13.930000000000001
1275 30020076,57.0,0.050383904839620505,13.930000000000001
1276 30020077,57.75,0.0717973593180902,13.930000000000001
1277 30020078,58.5,0.09491103631507751,13.930000000000001
1278 30020079,59.25,0.11917242113321737,13.930000000000001
1279 30020080,60.0,0.14399999999999993,13.930000000000001
1280 30020081,60.75,0.16879757886678246,13.930000000000001
1281 30020082,61.5,0.19296896368492233,13.930000000000001
1282 30020083,62.25,0.21593264068190965,13.930000000000001
1283 30020084,63.0,0.23713609516037937,13.930000000000001
1284 30020085,63.75,0.2560694162436512,13.930000000000001
1285 30020086,64.5,0.2722778525738111,13.930000000000001
1286 30020087,65.25,0.2853730097993773,13.930000000000001
1287 30020088,66.0,0.29504241413323873,13.930000000000001
1288 30020089,66.75,0.3010572064943363,13.930000000000001
1289 30020090,67.5,0.30327777777777776,13.930000000000001
1290 30020091,68.25,0.30165720649433636,13.930000000000001
1291 30020092,69.0,0.2962424141332388,13.930000000000001
1292 30020093,69.75,0.28717300979937754,13.930000000000001
1293 30020094,70.5,0.2746778525738115,13.930000000000001
1294 30020095,71.25,0.2590694162436514,13.930000000000001
1295 30020096,72.0,0.24073609516037953,13.930000000000001
1296 30020097,72.75,0.2201326406819098,13.930000000000001
1297 30020098,73.5,0.19776896368492225,13.930000000000001
1298 30020099,74.25,0.17419757886678236,13.930000000000001
1299 30020100,75.0,0.15000000000000008,13.930000000000001
1300 30020101,75.75,0.12577242113321782,13.930000000000001
1301 30020102,76.5,0.1021110363150774,13.930000000000001
1302 30020103,77.25,0.07959735931809035,13.930000000000001
1303 30020104,78.0,0.058783904839620635,13.930000000000001
1304 30020105,78.75,0.04018058375634878,13.930000000000001
1305 30020106,79.5,0.024242147426188576,13.930000000000001
1306 30020107,80.25,0.011356990200622724,13.930000000000001
1307 30020108,81.0,0.0018375858667612488,13.930000000000001
1308 30020109,81.75,-0.004087206494336304,13.930000000000001
1309 30020110,82.5,-0.006277777777777771,13.930000000000001
1310 30020111,83.25,-0.004687206494336377,13.930000000000001
1311 30020112,84.0,6.375858667611867E-4,13.930000000000001
1312 30020113,84.75,0.00955699020062259,13.930000000000001
1313 30020114,85.5,0.021842147426188785,13.930000000000001
1314 30020115,86.25,0.037180583756349,13.930000000000001

1315 30020116,87.0,0.055183904839620435,13.930000000000001
1316 30020117,87.75,0.07539735931809018,13.930000000000001
1317 30020118,88.5,0.09731103631507776,13.930000000000001
1318 30020119,89.25,0.12037242113321736,13.930000000000001
1319 30020120,90.0,0.14399999999999999,13.930000000000001
1320 30020121,90.75,0.1675975788667824,13.930000000000001
1321 30020122,91.5,0.19056896368492254,13.930000000000001
1322 30020123,92.25,0.21233264068191013,13.930000000000001
1323 30020124,93.0,0.23233609516037937,13.930000000000001
1324 30020125,93.75,0.2500694162436512,13.930000000000001
1325 30020126,94.5,0.2650778525738114,13.930000000000001
1326 30020127,95.25,0.2769730097993773,13.930000000000001
1327 30020128,96.0,0.28544241413323873,13.930000000000001
1328 30020129,96.75,0.29025720649433634,13.930000000000001
1329 30020130,97.5,0.29127777777777775,13.930000000000001
1330 30020131,98.25,0.28845720649433637,13.930000000000001
1331 30020132,99.0,0.28184241413323863,13.930000000000001
1332 30020133,99.75,0.2715730097993776,13.930000000000001
1333 30020134,100.5,0.25787785257381124,13.930000000000001
1334 30020135,101.25,0.24106941624365136,13.930000000000001
1335 30020136,102.0,0.2215360951603796,13.930000000000001
1336 30020137,102.75,0.19973264068190985,13.930000000000001
1337 30020138,103.5,0.1761689636849228,13.930000000000001
1338 30020139,104.25,0.1513975788667821,13.930000000000001
1339 30020140,105.0,0.12600000000000014,13.930000000000001
1340 30020141,105.75,0.10057242113321813,13.930000000000001
1341 30020142,106.5,0.07571103631507795,13.930000000000001
1342 30020143,107.25,0.051997359318089895,13.930000000000001
1343 30020144,108.0,0.029988390483962063,13.930000000000001
1344 30020145,108.75,0.010180583756348782,13.930000000000001
1345 30020146,109.5,-0.006957852573811388,13.930000000000001
1346 30020147,110.25,-0.02104300979937726,13.930000000000001
1347 30020148,111.0,-0.031762414133238936,13.930000000000001
1348 30020149,111.75,-0.038887206494336274,13.930000000000001
1349 30020150,112.5,-0.042277777777777782,13.930000000000001
1350 30020151,113.25,-0.041887206494336374,13.930000000000001
1351 30020152,114.0,-0.03776241413323886,13.930000000000001
1352 30020153,114.75,-0.030043009799377407,13.930000000000001
1353 30020154,115.5,-0.01895785257381126,13.930000000000001
1354 30020155,116.25,-0.004819416243651398,13.930000000000001
1355 30020156,117.0,0.011983904839620432,13.930000000000001
1356 30020157,117.75,0.030997359318090625,13.930000000000001
1357 30020158,118.5,0.05171103631507716,13.930000000000001
1358 30020159,119.25,0.07357242113321731,13.930000000000001
1359 30020160,120.0,0.09599999999999982,13.930000000000001
1360 30020161,120.75,0.1183975788667824,13.930000000000001
1361 30020162,121.5,0.14016896368492254,13.930000000000001
1362 30020163,122.25,0.16073264068190912,13.930000000000001
1363 30020164,123.0,0.17953609516037933,13.930000000000001
1364 30020165,123.75,0.19606941624365118,13.930000000000001
1365 30020166,124.5,0.20987785257381106,13.930000000000001
1366 30020167,125.25,0.22057300979937727,13.930000000000001
1367 30020168,126.0,0.22784241413323872,13.930000000000001
1368 30020169,126.75,0.23145720649433632,13.930000000000001
1369 30020170,127.5,0.23127777777777778,13.930000000000001
1370 30020171,128.25,0.22725720649433623,13.930000000000001
1371 30020172,129.0,0.219442414133239,13.930000000000001
1372 30020173,129.75,0.2079730097993774,13.930000000000001
1373 30020174,130.5,0.19307785257381155,13.930000000000001
1374 30020175,131.25,0.1750694162436514,13.930000000000001
1375 30020176,132.0,0.1543360951603796,13.930000000000001
1376 30020177,132.75,0.13133264068191036,13.930000000000001
1377 30020178,133.5,0.10656896368492232,13.930000000000001
1378 30020179,134.25,0.08059757886678216,13.930000000000001
1379 30020180,135.0,0.05400000000000018,13.930000000000001
1380 30020181,135.75,0.02737242113321816,13.930000000000001
1381 30020182,136.5,0.0013110363150774587,13.930000000000001
1382 30020183,137.25,-0.023602640681909613,13.930000000000001
1383 30020184,138.0,-0.04681609516037935,13.930000000000001
1384 30020185,138.75,-0.0678194162436512,13.930000000000001
1385 30020186,139.5,-0.08615785257381106,13.930000000000001
1386 30020187,140.25,-0.10144300979937751,13.930000000000001
1387 30020188,141.0,-0.11336241413323858,13.930000000000001
1388 30020189,141.75,-0.12168720649433637,13.930000000000001
1389 30020190,142.5,-0.12627777777777778,13.930000000000001


```

1390 30020191,143.25,-0.12708720649433636,13.930000000000001
1391 30020192,144.0,-0.12416241413323884,13.930000000000001
1392 30020193,144.75,-0.11764300979937743,13.930000000000001
1393 30020194,145.5,-0.10775785257381126,13.930000000000001
1394 30020195,146.25,-0.09481941624365145,13.930000000000001
1395 30020196,147.0,-0.07921609516037918,13.930000000000001
1396 30020197,147.75,-0.0614026406819104,13.930000000000001
1397 30020198,148.5,-0.041888963684922384,13.930000000000001
1398 30020199,149.25,-0.02122757886678327,13.930000000000001
1399 <NWBBS>,150.0,0,13.930000000000001
1400 *Node
1401 <NWFPCOG>,0,0,<COG>
1402 <NWBFCOG>,150.0,0,<COG>
1403 *Nfill, NSet=NSetWebAll
1404 NSetWebTop, NSetWebBottom,<nodes_z>,1000
1405 *Nset,NSET=NSetWebFront,generate
1406 <NWFUT>,<NWFBS>,1000
1407 *Nset,NSET=NSetWebBack,generate
1408 <NWBUT>,<NWBBS>,1000
1409 *Element, Type=S4
1410 <WSE>,<NWE11>,<NWE12>,<NWE13>,<NWE14>
1411 *Elgen, Elset=ESetWebAll
1412 <WSE>,<nodes_z>,1000,1000,<nodes_x>,1,1
1413 *shell section, elset=ESetWebAll, material=steel
1414 <tw>,5
1415 *end part
1416 *****
1417 *** ASSEMBLY *****
1418 *****
1419 *Assembly, name=TCS
1420 ***** INSTANCES *****
1421 *Instance, name=web, part=web
1422 0,0,0
1423 *End Instance
1424 *Instance, name=beam, part=beam
1425 0,0,0
1426 *End Instance
1427 *Instance, name=flange, part=flange
1428 0,0,0
1429 *End Instance
1430 ***** SET DEFINITION *****
1431 *Nset, nset=NSetTFront
1432 web.NSetWebFront,flange.NSetFlangeFront
1433 *Nset, nset=NSetTBack
1434 web.NSetWebBack,flange.NSetFlangeBack
1435 ***** MPC *****
1436 *MPC
1437 Tie, web.NSetWebTop, flange.NSetFlangeMiddle
1438 Tie, beam.NSetBeam, web.NSetWebTop
1439 Beam, NSetTFront, web.<NWFPCOG>
1440 Beam, NSetTBack, web.<NWBFCOG>
1441 *End Assembly
1442 *****
1443 *** MATERIAL DEFINITION *****
1444 *****
1445 ***** STEEL *****
1446 *Material, name=steel
1447 *elastic
1448 <EMod>,<Pois>
1449 *plastic
1450 <fy>,0
1451 *****
1452 *** INITIAL STRESS DEFINITION *****
1453 *****
1454 ***** FLANGE *****
1455 *Elset,elset=ES_FL1,internal,instance=flange,generate
1456 100000,100199,1
1457 *Elset,elset=ES_FL2,internal,instance=flange,generate
1458 101000,101199,1
1459 *Elset,elset=ES_FL3,internal,instance=flange,generate
1460 102000,102199,1
1461 *Elset,elset=ES_FL4,internal,instance=flange,generate
1462 103000,103199,1
1463 *Elset,elset=ES_FL5,internal,instance=flange,generate
1464 104000,104199,1

```

```

1465 *Elset , elset=ES_FL6 , internal , instance=flange , generate
1466 105000 , 105199 , 1
1467 *Elset , elset=ES_FL7 , internal , instance=flange , generate
1468 106000 , 106199 , 1
1469 *Elset , elset=ES_FL8 , internal , instance=flange , generate
1470 107000 , 107199 , 1
1471 *Elset , elset=ES_FL9 , internal , instance=flange , generate
1472 108000 , 108199 , 1
1473 *Elset , elset=ES_FL10 , internal , instance=flange , generate
1474 109000 , 109199 , 1
1475 *Elset , elset=ES_FL11 , internal , instance=flange , generate
1476 110000 , 110199 , 1
1477 *Elset , elset=ES_FL12 , internal , instance=flange , generate
1478 111000 , 111199 , 1
1479 *Elset , elset=ES_FL13 , internal , instance=flange , generate
1480 112000 , 112199 , 1
1481 *Elset , elset=ES_FL14 , internal , instance=flange , generate
1482 113000 , 113199 , 1
1483 *Elset , elset=ES_FL15 , internal , instance=flange , generate
1484 114000 , 114199 , 1
1485 *Elset , elset=ES_FL16 , internal , instance=flange , generate
1486 115000 , 115199 , 1
1487 *Elset , elset=ES_FL17 , internal , instance=flange , generate
1488 116000 , 116199 , 1
1489 *Elset , elset=ES_FL18 , internal , instance=flange , generate
1490 117000 , 117199 , 1
1491 *Elset , elset=ES_FL19 , internal , instance=flange , generate
1492 118000 , 118199 , 1
1493 *Elset , elset=ES_FL20 , internal , instance=flange , generate
1494 119000 , 119199 , 1
1495 *****WEB*****
1496 *Elset , elset=ES_W1 , internal , instance=web , generate
1497 200000 , 200199 , 1
1498 *Elset , elset=ES_W2 , internal , instance=web , generate
1499 201000 , 201199 , 1
1500 *Elset , elset=ES_W3 , internal , instance=web , generate
1501 202000 , 202199 , 1
1502 *Elset , elset=ES_W4 , internal , instance=web , generate
1503 203000 , 203199 , 1
1504 *Elset , elset=ES_W5 , internal , instance=web , generate
1505 204000 , 204199 , 1
1506 *Elset , elset=ES_W6 , internal , instance=web , generate
1507 205000 , 205199 , 1
1508 *Elset , elset=ES_W7 , internal , instance=web , generate
1509 206000 , 206199 , 1
1510 *Elset , elset=ES_W8 , internal , instance=web , generate
1511 207000 , 207199 , 1
1512 *Elset , elset=ES_W9 , internal , instance=web , generate
1513 208000 , 208199 , 1
1514 *Elset , elset=ES_W10 , internal , instance=web , generate
1515 209000 , 209199 , 1
1516 *Elset , elset=ES_W11 , internal , instance=web , generate
1517 210000 , 210199 , 1
1518 *Elset , elset=ES_W12 , internal , instance=web , generate
1519 211000 , 211199 , 1
1520 *Elset , elset=ES_W13 , internal , instance=web , generate
1521 212000 , 212199 , 1
1522 *Elset , elset=ES_W14 , internal , instance=web , generate
1523 213000 , 213199 , 1
1524 *Elset , elset=ES_W15 , internal , instance=web , generate
1525 214000 , 214199 , 1
1526 *Elset , elset=ES_W16 , internal , instance=web , generate
1527 215000 , 215199 , 1
1528 *Elset , elset=ES_W17 , internal , instance=web , generate
1529 216000 , 216199 , 1
1530 *Elset , elset=ES_W18 , internal , instance=web , generate
1531 217000 , 217199 , 1
1532 *Elset , elset=ES_W19 , internal , instance=web , generate
1533 218000 , 218199 , 1
1534 *Elset , elset=ES_W20 , internal , instance=web , generate
1535 219000 , 219199 , 1
1536 *****SET STRESS*****
1537 *Initial conditions , type=stress
1538 ES_FL1 , <IS_F1 >
1539 ES_FL2 , <IS_F2 >

```

```

1540 ES_FL3,<IS_F3>
1541 ES_FL4,<IS_F4>
1542 ES_FL5,<IS_F5>
1543 ES_FL6,<IS_F6>
1544 ES_FL7,<IS_F7>
1545 ES_FL8,<IS_F8>
1546 ES_FL9,<IS_F9>
1547 ES_FL10,<IS_F10>
1548 ES_FL11,<IS_F11>
1549 ES_FL12,<IS_F12>
1550 ES_FL13,<IS_F13>
1551 ES_FL14,<IS_F14>
1552 ES_FL15,<IS_F15>
1553 ES_FL16,<IS_F15>
1554 ES_FL17,<IS_F17>
1555 ES_FL18,<IS_F18>
1556 ES_FL19,<IS_F19>
1557 ES_FL20,<IS_F20>
1558 ES_W1,<IS_W1>
1559 ES_W2,<IS_W2>
1560 ES_W3,<IS_W3>
1561 ES_W4,<IS_W4>
1562 ES_W5,<IS_W5>
1563 ES_W6,<IS_W6>
1564 ES_W7,<IS_W7>
1565 ES_W8,<IS_W8>
1566 ES_W9,<IS_W9>
1567 ES_W10,<IS_W10>
1568 ES_W11,<IS_W11>
1569 ES_W12,<IS_W12>
1570 ES_W13,<IS_W13>
1571 ES_W14,<IS_W14>
1572 ES_W15,<IS_W15>
1573 ES_W16,<IS_W16>
1574 ES_W17,<IS_W17>
1575 ES_W18,<IS_W18>
1576 ES_W19,<IS_W19>
1577 ES_W20,<IS_W20>
1578 *****
1579 ***BOUNDARY CONDITIONS*****
1580 *****
1581 *Boundary
1582 ** (forces x,y,z = 1,2,3 | moments mx,my,mz = 4,5,6)
1583 web.<NWFCOG>,1
1584 web.<NWFCOG>,2
1585 web.<NWFCOG>,3
1586 web.<NWFCOG>,4
1587 web.<NWBCOG>,2
1588 web.<NWBCOG>,3
1589 web.<NWBCOG>,4
1590 *****
1591 ***STEP LOAD*****
1592 *****
1593 *Step,NLgeom,inc=100
1594 *STATIC
1595 0.01,,0.0001,0.01
1596 *cload
1597 web.<NWBCOG>,1,-2235.48
1598 web.<NWFCOG>,5,6399.46
1599 web.<NWBCOG>,5,-6399.46
1600 *end step

```

E.4 LBA Analyse

Die LBA Analyse dient in dieser Arbeit dazu, die Schlankheit $\bar{\lambda}_p$ genauer zu bestimmen (siehe Kapitel 6.2).

```
1 *****
2 ***HEADING*****
3 *****
4
5 *Heading
6 Paul Kugler Master Thesis 2013
7 Model of a warm rolled T beam
8 T-IPE-300 L=150.0cm
9 All dimensions in cm and kN
10 File createad on Tue Dec 03 22:58:03 CET 2013
11
12 *****
13 ***PARAMETER DEFINITION*****
14 *****
15 *Parameter
16 ** max(nodes_x) = 999
17 nodes_x=200
18 ** max(nodes_y) = 99
19 nodes_y=20
20 ** max(nodes_z) = 99
21 nodes_z=20
22 beamLength=150.0
23 beamWidth=15.0
24 beamHeight=15.0
25 tf=1.0699999999999999
26 tw=0.71
27 hw=13.930000000000001
28 EMod=21000
29 Poiss=0.3
30 fy=23.5
31 ** Box a and t
32 bt=0.07869770698297893
33 ba=3.1464753517635002
34 ** Centre of Gravity
35 COG=2.2411049943474994
36 COG_calc_real=3.323130650305494
37 COG_calc_model=2.2411049943474994
38 COG_table_real=3.3200000000000003
39 COG_table_model=2.2500000000000004
40 ** M plastisch
41 Npl=1810.041996109388
42 MEd=3620.083992218776
43 Npl=632.29119422072
44 *****NODES*****
45 ** Bauteile: 1=Flange, 2=Web, 3=Box
46 *** Flange Nodes (Node Number: X Bauteil, Y Columns (0-99), Z Rows (0-999), X00YZZZ)
47 *** Reference Node
48 RNF=10010000
49 RNB=10010200
50 *** Node Flange Front Left (Column = 0, Row = 0)
51 NFFL=10000000
52 **** NFFLy=-beamWidth/2
53 NFFLy=-7.5
54 *** Node Flange Front Right (Column = nodes_y, Row = 0)
55 NFFR=10020000
56 **** NFFLy=+beamWidth/2
57 NFFRy=7.5
58 *** Node Flange Back Left (Column = 0, Row = nodes_x)
59 NFBL=10000200
60 **** NFBLy=NFFLy
61 NFBLy=NFFLy
62 *** Node Flange Back Right (Column = nodes_y, Row = nodes_x)
63 NFBR=10020200
64 **** NFBRy=NFFRy
65 NFBRy=NFFRy
66 ** Beam Nodes (Node Number: X Bauteil, Z Rows (0-999), X000ZZZ)
```

```

67 *** Node Beam Front
68 NBF=20000000
69 *** Node Beam Back
70 NBB=20000200
71 *** Web Nodes (Node Number: X Bauteil, Y Height (0-999), Z Rows (0-999), X0YYYYZZ)
72 *** Node Web Front Top (Height = 0, Row = 0)
73 NWFT=30000000
74 *** Node Web Front Bottom (Height = nodes_z, Row = 0)
75 NWFB=30020000
76 *** Node Web Back Top (Height = 0, Row = nodes_x)
77 NWBT=30000200
78 *** Node Web Back Bottom (Height = nodes_z, Row = nodes_x)
79 NWBB=30020200
80 *** Node Web Front Center Of Gravity
81 NWFCOG=31000000
82 *** Node Web Back Center Of Gravity
83 NWBCOG=32000000
84 *** Nodes for TFront and TBack (1 under NWFT and 1 under NWBT)
85 *** Node Web Front Under Top
86 NWFUT=30001000
87 *** Node Web Back Under Top
88 NWBUT=30001200
89 *****ELEMENTS*****
90 *** Nodes Flange Element 1
91 NFE11=NFFL
92 NFE12=10001000
93 NFE13=10001001
94 NFE14=10000001
95 *** Nodes Beam Element 1
96 NBE11=NBF
97 NBE12=20000001
98 *** Nodes Web Element 1
99 NWE11=NWFT
100 NWE12=NWFUT
101 NWE13=30001001
102 NWE14=30000001
103 *** Flange Start Element (Element Number: X Bauteil, Y Column (0-99), Z Rows (0-999), XYYZZZ)
104 FSE=100000
105 *** Web Start Element (Element Number: X Bauteil, Y Column (0-99), Z Rows (0-999), XYYZZZ)
106 WSE=200000
107 *****PART FLANGE*****
108 *Part, name=flange
109 *Node, NSet=NSetFlangeLeft
110 <NFFL>,0,-7.5,0
111 <NFBL>,150.0,-7.5,0
112 *Ngen, NSet=NSetFlangeLeft
113 <NFFL>,<NFBL>,1
114 *Node, NSet=NSetFlangeMiddle
115 <RNF>,0,0,0
116 <RNB>,150.0,0,0
117 *Ngen, NSet=NSetFlangeMiddle
118 <RNF>,<RNB>,1
119 *Node, NSet=NSetFlangeRight
120 <NFPR>,0,7.5,0
121 <NFBR>,150.0,7.5,0
122 *Ngen, NSet=NSetFlangeRight
123 <NFPR>,<NFBR>,1
124 *Nfill, Nset=NSetFlangeLeftNodes
125 NSetFlangeLeft,NSetFlangeMiddle,10,1000
126 *Nfill, Nset=NSetFlangeRightNodes
127 NSetFlangeMiddle,NSetFlangeRight,10,1000
128 *Nset,NSET=NSetFlangeAll
129 NSetFlangeLeftNodes, NSetFlangeRightNodes
130 *Nset,NSET=NSetFlangeFront,Generate
131 <NFFL>,<NFPR>,1000
132 *Nset,NSET=NSetFlangeBack,Generate
133 <NFBL>,<NFBR>,1000
134 *Element, Type=S4
135 <FSE>,<NFE11>,<NFE12>,<NFE13>,<NFE14>
136 *Elgen, Elset=ESetFlangeAll
137 <FSE>,<nodes_y>,1000,1000,<nodes_x>,1,1
138 *shell section, elset=ESetFlangeAll, material=steel, offset=-.5
139 <tf>,5
140 *end part
141 *****PART BEAM*****

```

```

142 *Part, name=beam
143 *Node, NSet=NSetBeam
144 <NBF>,0,0,0
145 <NBB>,150.0,0,0
146 *Ngen, NSet=NSetBeam
147 <NBF>,<NBB>,1
148 *Element, Type=B31
149 <NBE11>,<NBE11>,<NBE12>
150 *Elgen, Elset=ESetBeam
151 <NBF>,<nodes_x>,1,1
152 *Beam Section, elset=ESetBeam, material=steel,section=box
153 <ba>,<ba>,<bt>,<bt>,<bt>,<bt>
154 *end part
155 *****PART WEB*****
156 *Part, name=web
157 *Node, NSet=NSetWebTop
158 <NWFT>,0,0,0
159 <NWBT>,150.0,0,0
160 *Ngen, NSet=NSetWebTop
161 <NWFT>,<NWBT>,1
162 *Node, NSet=NSetWebBottom
163 <NWFB>,0,0,13.930000000000001
164 <NWBB>,150.0,0,13.930000000000001
165 *Ngen, NSet=NSetWebBottom
166 <NWFB>,<NWBB>,1
167 *Node
168 <NWFCOG>,0,0,<COG>
169 <NWBCOG>,150.0,0,<COG>
170 *Nfill, NSet=NSetWebAll
171 NSetWebTop, NSetWebBottom,<nodes_z>,1000
172 *Nset,NSET=NSetWebFront,generate
173 <NWFUT>,<NWFB>,1000
174 *Nset,NSET=NSetWebBack,generate
175 <NWBT>,<NWBB>,1000
176 *Element, Type=S4
177 <WSE>,<NWE11>,<NWE12>,<NWE13>,<NWE14>
178 *Elgen, Elset=ESetWebAll
179 <WSE>,<nodes_z>,1000,1000,<nodes_x>,1,1
180 *shell section, elset=ESetWebAll, material=steel
181 <tw>,5
182 *end part
183 *****
184 *** ASSEMBLY*****
185 *****
186 *Assembly, name=TCS
187 *****INSTANCES*****
188 *Instance, name=web, part=web
189 0,0,0
190 *End Instance
191 *Instance, name=beam, part=beam
192 0,0,0
193 *End Instance
194 *Instance, name=flange, part=flange
195 0,0,0
196 *End Instance
197 *****SET DEFINITION*****
198 *Nset, nset=NSetTFront
199 web.NSetWebFront,flange.NSetFlangeFront
200 *Nset, nset=NSetTBack
201 web.NSetWebBack,flange.NSetFlangeBack
202 *****MPC*****
203 *MPC
204 Tie, web.NSetWebTop, flange.NSetFlangeMiddle
205 Tie, beam.NSetBeam, web.NSetWebTop
206 Beam, NSetTFront, web.<NWFCOG>
207 Beam, NSetTBack, web.<NWBCOG>
208 *End Assembly
209 *****
210 *** MATERIAL DEFINITION*****
211 *****
212 *****STEEL*****
213 *Material, name=steel
214 *elastic
215 <EMod>,<Poiss>
216 *plastic

```

```

217 <fy>,0
218 **36,0.06
219 **22.09,0.06
220 **0.1,0.0601
221 ***no empty here
222 *****
223 ***BOUNDARY CONDITIONS*****
224 *****
225 ***no empty here
226 *Boundary
227 ** Beidseitig gabelgelagerter Einfeldtraeger
228 ** (forces x,y,z = 1,2,3 | moments mx,my,mz = 4,5,6)
229 web.<NWFCOG>,1
230 web.<NWFCOG>,2
231 web.<NWFCOG>,3
232 web.<NWFCOG>,4
233 web.<NWBCOG>,2
234 web.<NWBCOG>,3
235 web.<NWBCOG>,4
236 *****
237 ***STEP LOAD*****
238 *****
239 *Step,NLgeom,inc=100
240 *BUCKLE, EIGENSOLVER=LANCZOS
241 5,0
242 *cload
243 web.<NWBCOG>,1,-0.0
244 web.<NWFCOG>,5,9050.20998054694
245 web.<NWBCOG>,5,-9050.20998054694
246 *end step

```