

Masterarbeit

Thema

Beultragfähigkeit längsausgesteifter Teilfelder mit endenden Längssteifen

verfasst von

Patrick Kassin

eingereicht am

Institut für Stahlbau und Flächentragwerke

Technische Universität Graz

Betreuer:

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

Graz, im Oktober 2011

Eidesstattliche Erklärung

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.

Ich versichere, dass ich diese Arbeit bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin oder einem Beurteiler) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

Patrick Kassin

Graz, im Oktober 2011

Danksagung

Mein Dank gilt den MitarbeiterInnen des Instituts für Stahlbau und Flächentragwerke. Insbesondere danke ich dem Institutsvorstand, Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Harald Unterweger, für die tatkräftige Betreuung und abschließende Begutachtung meiner Arbeit.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei all den Menschen, die mich auf meinem bisherigen Lebensweg begleitet und unterstützt haben.

Zitat

» Die Menschen bauen zu viele Mauern und zu wenig Brücken. «

(Sir *Isaac Newton*, englischer Physiker, Mathematiker und Astronom [1643–1727])

Kurzfassung

Bei schlanken, längsausgesteiften Vollwandträgern, welche beispielsweise im Stahl- und Verbundbrückenbau Verwendung finden, laufen die Längssteifen oft nicht durch, sondern ändern ihre Lage an den Quersteifen. Im Grenzfall liegt ein durch Quersteifen begrenztes Teilfeld mit beidseits endenden Längssteifen vor. Damit ergibt sich eine zusätzliche Biegebeanspruchung für die einseitig an die Trägerstege angeschlossenen Längssteifen. Das Hauptziel der Arbeit ist es, aufzuzeigen, inwiefern sich die Beultragfähigkeit des Teilfeldes gegenüber dem Fall durchlaufender Längssteifen reduziert. Für repräsentative Systemgeometrien und Belastungsverhältnisse werden mittels einer geometrisch und materiell nichtlinearen FE-Analyse mit geometrischen Ersatzimperfectionen die tatsächlichen Beultragfähigkeiten ermittelt und jenen durchlaufender Längssteifen gegenübergestellt. Anschließend wird versucht, das Ingenieurmodell des Eurocode EN 1993-1-5 zur Ermittlung der Beultragfähigkeit um den Biegeeffekt der Längssteifen zu ergänzen. Die reale Biegewirkung der Längssteifenquerschnitte auf Basis einer linearen FE-Analyse wird mit der berechneten Biegewirkung des Ingenieurmodells verglichen. Letztendlich führt die zusätzliche Biegebeanspruchung zum Vorschlag einer reduzierten Tragfähigkeit für das sogenannte knickstabähnliche Verhalten. Die damit erzielbaren Ergebnisse werden den numerisch ermittelten Beultragfähigkeiten gegenübergestellt. Das Ingenieurmodell bietet die Möglichkeit einer effizienten Abschätzung des Effekts der an Teilfeldrändern endenden Längssteifen.

Abstract

At thin, longitudinally stiffened plate girders which are, for example, used in steel and composite bridge constructions the longitudinal stiffeners often are not continuous rather changing their position at transverse stiffeners. In the borderline case, there is a panel between transverse stiffeners with ending longitudinal stiffeners on both sides. This results in additional bending stresses of the longitudinal stiffeners, which are attached on only one side of the web plate. The main aim of this work is to show to what extent the buckling resistance of the panel decreases compared to the case with continuous longitudinal stiffeners. Actual limit loads for representative system geometries and loading conditions are determined by use of a geometrical and material nonlinear finite element analysis with geometrical equivalent imperfections and compared to those of continuous longitudinal stiffeners. Subsequently an attempt is being made to supplement the engineering model of the Eurocode EN 1993-1-5 for determining the buckling resistance about the additional bending effect of longitudinal stiffeners. The real bending effect of the longitudinal stiffener cross-sections based on a linear finite element analysis is compared with the calculated bending effect of the engineering model. Ultimately, the additional bending stress leads to the suggestion of a reduced load carrying capacity for the behaviour – similar to the one of conventional panels. The achievable results are compared with the numerically determined buckling resistances. The engineering model provides the possibility for an efficient estimate of the load carrying capacity of panels with ending longitudinal stiffeners.



Bezeichnungen, Symbole und Abkürzungen	V
1 Einleitung und Motivation	1
2 Zielsetzung	3
3 Struktur und Umfang	4
4 Vorgehensweise und Ergebnisse der numerischen Traglastanalyse und des Ingenieurmodells	7
4.1 Numerische Traglastanalyse	7
4.1.1 Einflüsse auf die FE-Modellierung	7
4.1.2 Lineare Analyse (LA)	8
4.1.3 Lineare Beulanalyse (LBA)	9
4.1.4 Geometrisch und materiell nichtlineare Analyse mit Ersatzimperfektionen (GMNIA)	10
4.2 Ingenieurmodell zur Tragfähigkeitsabschätzung und Ergebnisvergleich zu nichtlinearen FE-Lösungen	12
4.2.1 Ingenieurmodell für endende Längssteifen – Überblick	12
4.2.2 Biegewirkung an den endenden Längssteifen im Vergleich zur FE-Berechnung	15
4.2.3 Knickstabähnliches Verhalten χ_c (bzw. χ_c^*) des „Ersatzstabes“ endender Längssteifen für die untersuchten Systeme	17
4.2.4 Plattenartiges Verhalten ρ_p des längsausgesteiften Teilfeldes für die untersuchten Systeme mit endenden Längssteifen	20
4.2.5 Beultragfähigkeit $\rho_c \cdot f_y$ des längsausgesteiften Teilfeldes mit endenden Längssteifen im Vergleich zur FE-Berechnung	22
Literaturverzeichnis	XII

Anhang A – Numerische Traglastanalyse

1 Grundlagen	A1
2 Untersuchte Systeme	A4
2.1 System S1, S2 und S3	A5
2.2 System S4	A6
2.3 Längssteifenausbildung	A7
2.3.1 System S1, S2 und S3	A7
2.3.2 System S4	A9

2.4	Quersteifenausbildung.....	A10
3	FE-Modellierung	A11
3.1	FE-Modell	A11
3.1.1	Verwendetes FE-Netz	A11
3.1.2	Verwendete Elementtypen	A13
3.1.3	Randbedingungen, Lagerung und Kopplungen	A14
3.1.4	Materialgüte	A15
3.1.5	Lastannahme	A15
3.2	Imperfektionsansatz.....	A17
3.2.1	Geometrische Ersatzimperfektionen.....	A17
3.2.2	Maßgebende Kombination und Skalierung der geometrischen Ersatzimperfektionen	A19
4	Erläuterungen zur Systemberechnung	A20
4.1	Einfluss der Randfeldstützung	A20
4.1.1	Starre Stützung – <i>Variante 1</i>	A20
4.1.2	Stützung durch fiktive Längssteifen ohne Dehnsteifigkeit	A21
4.1.2.1	Idente Längssteifen-Biegesteifigkeit in den Randfeldern – <i>Variante 2</i>	A21
4.1.2.2	Reduzierte Längssteifen-Biegesteifigkeit in den Randfeldern – <i>Variante 3</i>	A22
4.1.3	Stützung der Randfelder ohne Längssteifen – <i>Variante 4</i>	A22
4.1.4	Schlussfolgerung zur Stützungsverfahren der Randfelder.....	A23
4.2	Einfluss der Quersteifengeometrie	A26
4.2.1	Schlussfolgerung zur Quersteifenausbildung.....	A27
5	Ergebnisse der FE-Studie	A28
5.1	System S1	A31
5.1.1	System S1: $\alpha = 1,5 [-] / t_{LSt} = 8 [mm] / \psi = 1,0 [-] /$ <i>Variante 1 bis 4</i>	A31
5.1.1.1	Lineare Analyse (LA)	A31
5.1.1.2	Lineare Beulanalyse (LBA)	A42
5.1.1.3	Nichtlineare Traglastberechnung (GMNIA)	A54
5.1.2	System S1: $\alpha = 1,5 [-] / t_{LSt} = 10 [mm] / \psi = 1,0 [-] /$ <i>Variante 2</i>	A60
5.1.2.1	Lineare Analyse (LA)	A60
5.1.2.2	Lineare Beulanalyse (LBA)	A63
5.1.2.3	Nichtlineare Traglastberechnung (GMNIA)	A66
5.2	System S2	A68
5.2.1	System S2: $\alpha = 1,5 [-] / t_{LSt} = 8 [mm] / \psi = 1,0 [-] /$ <i>Variante 2</i>	A68
5.2.1.1	Lineare Analyse (LA)	A68
5.2.1.2	Lineare Beulanalyse (LBA)	A71
5.2.1.3	Nichtlineare Traglastberechnung (GMNIA)	A73
5.2.2	System S2: $\alpha = 1,5 [-] / t_{LSt} = 10 [mm] / \psi = 1,0 [-] /$ <i>Variante 2</i>	A75

5.2.2.1	Lineare Analyse (LA)	A75
5.2.2.2	Lineare Beulanalyse (LBA)	A78
5.2.2.3	Nichtlineare Traglastberechnung (GMNIA)	A80
5.3	System S3	A82
5.3.1	System S3: $\alpha = 1,5 [-]$ / $t_{LSt} = 8 [mm]$ / $\psi = 1,0 [-]$ / <i>Variante 2</i>	A82
5.3.1.1	Lineare Analyse (LA)	A82
5.3.1.2	Lineare Beulanalyse (LBA)	A85
5.3.1.3	Nichtlineare Traglastberechnung (GMNIA)	A87
5.4	System S4	A89
5.4.1	System S4: $\alpha = 0,86 [-]$ / $t_{LSt} = 6 [mm]$ / $\psi = 0 [-]$ / <i>Variante 2</i>	A89
5.4.1.1	Lineare Analyse (LA)	A89
5.4.1.2	Lineare Beulanalyse (LBA)	A92
5.4.1.3	Nichtlineare Traglastberechnung (GMNIA)	A96
6	Ergebnisvergleich zwischen Systemen mit endenden und durchlaufenden Längssteifen	A98
6.1	Numerische Traglastanalyse	A98
6.1.1	Lineare Beulanalyse (LBA)	A98
6.1.2	Geometrisch und materiell nichtlineare Analyse mit Ersatzimperfektionen (GMNIA)	A100

**Anhang B –
Erfassung der Biegewirkung
endender Längssteifen
mit einfachen Modellen**

1	Grundlagen	B1
2	Vorgehensweise	B3
2.1	Längssteife mit anteiliger Stegblechmitwirkung – <i>Modell 1</i>	B4
2.2	Längssteife mit vollständiger Stegblechmitwirkung – <i>Modell 2</i>	B6
3	Ergebnisse der Rechenmodelle – elastische Biegespannungen in den Längssteifen	B8
3.1	System S1	B8
3.1.1	System S1: $t_{LSt} = 8 [mm]$	B8
3.1.2	System S1: $t_{LSt} = 10 [mm]$	B16
3.2	System S2	B21
3.2.1	System S2: $t_{LSt} = 8 [mm]$	B21
3.2.2	System S2: $t_{LSt} = 10 [mm]$	B26

3.3	System S3: $t_{LSt} = 8$ [mm].....	B31
3.4	System S4: $t_{LSt} = 6$ [mm].....	B36
4	Ergebnisvergleich zwischen den Rechenmodellen und der linearen FE-Analyse bzgl. den Biegespannungen in den Längssteifen.....	B39

**Anhang C –
Ingenieurmodell –
Biegeknick- und Beulnachweis
mit endenden Längssteifen**

1	Grundlagen	C1
2	Vorgehensweise.....	C3
3	Ergebnisse des Ingenieurmodells	C4
3.1	System S1	C4
3.1.1	System S1: $t_{LSt} = 8$ [mm].....	C4
3.1.1.1	Anteilige Stegblechmitwirkung (<i>Modell 1</i>).....	C5
3.1.1.2	Vollständige Stegblechmitwirkung (<i>Modell 2</i>).....	C18
3.1.2	System S1: $t_{LSt} = 10$ [mm] / <i>Modell 1</i>	C25
3.2	System S2	C31
3.2.1	System S2: $t_{LSt} = 8$ [mm] / <i>Modell 1</i>	C31
3.2.2	System S2: $t_{LSt} = 10$ [mm] / <i>Modell 1</i>	C37
3.3	System S3: $t_{LSt} = 8$ [mm] / <i>Modell 1</i>	C43
3.4	System S4: $t_{LSt} = 6$ [mm] / <i>Modell 1</i>	C49
4	Ergebnisvergleich zwischen dem Ingenieurmodell und der nichtlinearen FE-Analyse	C59

**Anhang D –
Berechnungseingabe der
numerischen Traglastanalyse
mit ABAQUS**

1	Grundlagen	D1
2	Parametrisierte Eingabe	D2

Bezeichnungen, Symbole und Abkürzungen

▪ Materialkennwerte

E	Elastizitätsmodul bzw. <i>Youngscher</i> Modul (Stahl: $E = 210000[\text{N/mm}^2]$)
f_y	Fließspannung bzw. Streckgrenze (S355: $f_y = 355[\text{N/mm}^2]$)
ε	Beiwert zur Ermittlung des bezogenen Schlankheitsgrades $\bar{\lambda}_c$ (S355: $\varepsilon = \sqrt{235 / f_y[\text{N/mm}^2]} = 0,8136 [-]$)
ν	Querkontraktionszahl (Stahl: $\nu = 0,3[-]$)

▪ Faktoren und Beiwerte

C_{my}	äquivalenter Momentenbeiwert für das Biegemoment $\Delta M = N \cdot e_m$ des Biegeknick-Nachweises (für endende Längssteifen: $C_{my} = 1,0[-]$)
$f_{\sigma, \text{LSt}}$	Faktor zur Berücksichtigung der Differenz zwischen der mittleren Normalspannung am Ersatzstab und jener im Stegblech des Beobachtungsfeldes für <i>Modell 1</i> (jeweils ohne Exzentrizitätswirkung)
k_y	Beiwert für den Biegemomentenanteil des Biegeknick-Nachweises
n_y	Beiwert für den Normalkraftanteil des Biegeknick-Nachweises
Δ	Faktorendifferenz
Φ	Funktion der Knickspannungslinie zur Bestimmung des Abminderungsfaktors $\chi_{c, dl}$ für knickstabähnliches Verhalten
α_{cr}	der kleinste Faktor für die Vergrößerung der Bemessungslasten, um die elastische Verzweigungslast für das gesamte einwirkende Spannungsfeld zu erreichen
α_e	modifizierter Imperfektionsbeiwert für ausgesteifte Blechfelder
$\alpha_{ult, k}$	der kleinste Faktor für die Vergrößerung der Bemessungslasten, um den charakteristischen Wert der Beanspruchbarkeit am kritischen Punkt des Blechfeldes zu erreichen
χ_c	Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung des knickstabähnlichen Verhaltens
χ_c^*	Abminderungsbeiwert zur Berücksichtigung des knickstabähnlichen Verhaltens unter Berücksichtigung der Differenz der mittleren Normalspannung zwischen dem Ersatzstab und dem Stegblech des Beobachtungsfeldes (jeweils ohne Exzentrizitätswirkung)
$\chi_{c, dl}$	Abminderungsbeiwert zur Berücksichtigung des knickstabähnlichen Verhaltens durchlaufender Längssteifen nach vereinfachtem Bemessungsansatz gemäß der zugehörigen Knickspannungslinie

γ_{M1}	Teilsicherheitsfaktor für die Beanspruchbarkeit von Bauteilen bei Stabilitätsversagen
ρ_c	Abminderungsfaktor zur Ermittlung der resultierenden Beultragfähigkeit, welcher sich aus dem knickstabähnlichen und plattenartigen Verhalten zusammensetzt
ρ_p, ρ	Abminderungsfaktor für plattenartiges Verhalten
$\rho_{p,dl}$	Abminderungsfaktor für plattenartiges Verhalten unter Berücksichtigung der tatsächlichen Eigenwerte $\phi_{cr,dl}$ durchlaufender Längssteifen gemäß der linearen Beulanalyse (LBA)
$\rho_{p,end}$	Abminderungsfaktor für plattenartiges Verhalten unter Berücksichtigung der tatsächlichen Eigenwerte $\phi_{cr,end}$ endender Längssteifen gemäß der linearen Beulanalyse (LBA)
ξ	Verhältniszahl, die das Verhältnis der elastischen kritischen Plattenbeulspannung $\sigma_{cr,p}$ des Beulfeldes zur elastischen kritischen Knickspannung $\sigma_{cr,c}$ des Ersatzstabes ausdrückt ($\xi = \sigma_{cr,p}/\sigma_{cr,c} - 1$ [-])
ψ	Randspannungsverhältnis des Beulfeldes bezogen auf die größte Druckspannung σ_o am oberen Stegblechrand ($\sigma_u = \psi \cdot \sigma_o$ [N/mm ²])
Ψ_{LSt}	Spannungsverhältnis in der Achse des Steifenaußengurtes bzw. –außenrandes (Achse o) der Längssteife bezogen auf die größte Druckspannung $\sigma_{m,ges}$ im Stegblech (Achse m)
α	Imperfektionsbeiwert der maßgebenden Knickspannungslinie ($\alpha = 0,49$ [-] für KSPL c)

▪ **System- und Querschnittsgrößen**

a, a_{QSt}	Teilfeldlänge
$A_{Bf,ges}$	Gesamtquerschnittsfläche des Beobachtungsfeldes mit Längssteifen
A_i	Querschnittsfläche
A_{LSt}	Querschnittsfläche der Längssteife
$A_{LSt,br}$	Bruttoquerschnittsfläche der Längssteife (Steife und anteilig mitwirkender Steg)
$A_{LSt,ges}$	Gesamtquerschnittsfläche der Längssteife (Steife und vollständig mitwirkender Steg)
$A_{Rf,br}$	Bruttoquerschnittsfläche des Randfeldes
$A_{Rf,ges}$	Querschnittsfläche des Randfeldes je Steifenquerschnitt
$A_{Steg,br}$	Bruttoquerschnittsfläche des Steges im Beobachtungsfeld
$A_{Steg,ges}$	Gesamtquerschnittsfläche des Steges im Beobachtungsfeld
$A_{s',1}$	effektive Querschnittsfläche des Ersatzdruckstabes

b	Teilfeldbreite (Steghöhe)
b_{br}	mitwirkende „Bruttobreite“ des Steges an der Längssteife
b_{EF}	Einzelfeldbreite
$b_{EF,a}$	mitwirkende wirksame Breite des Steges für das außenliegende Einzelfeld der Längssteife
$b_{EF,i}$	mitwirkende wirksame Breite des Steges für das innenliegende Einzelfeld der Längssteife
b_{eff}	effektive Stegbreite ($b_{eff} = b_{br}$ bzw. b_{ges} [mm] je nach Rechenmodell)
b_{ges}	mitwirkende „Gesamtbreite“ des Steges je Längssteifenquerschnitt
e_0	Ausmitte durch eigenmode-konforme Ersatzimperfection
e_m	Abstand der Schwerachse des Längssteifenquerschnittes zur Schwerachse des Stegbleches (= Schwerachse des Randfeldes)
$e_{m,1}$	Ausmitte der Schwerachse des Längssteifenbruttoquerschnittes zur Schwerachse des Stegbleches (<i>Modell 1</i>)
$e_{m,2}$	Ausmitte der Schwerachse des Längssteifengesamtquerschnittes zur Schwerachse des Stegbleches (<i>Modell 2</i>)
h_{LSt}	Längssteifenhöhe
h_{QSt}	Quersteifenhöhe
h_{QSt}^*	Höhe der Flachsteife der alternativen Quersteifenbauform
i	Trägheitsradius des Brutto-/Gesamtquerschnittes (je nach Rechenmodell)
I_{ges}	Flächenmoment 2. Grades bzgl. der starken Achse der betreffenden Systemkomponente (Längssteife, Quersteife)
$I_{LSt,br}$	Flächenmoment 2. Grades bzgl. der starken Achse des Längssteifenbruttoquerschnittes (Steife und anteilig mitwirkender Steg)
$I_{LSt,ges}$	Flächenmoment 2. Grades bzgl. der starken Achse des Längssteifengesamtquerschnittes (Steife und vollständig mitwirkender Steg)
$I_{s\ell,1}$	Flächenmoment 2. Grades unter Ansatz der Bruttoquerschnittsfläche der als Ersatzdruckstab betrachteten Steife und der angrenzenden mittragenden Blechstreifen bezogen auf Knicken senkrecht zur Blechebene
I_T	St. Venantsches Torsionsträgheitsmoment
I_y	Flächenmoment 2. Grades bzgl. der globalen y-Achse
I_z	Flächenmoment 2. Grades bzgl. der globalen z-Achse
$I_{z,Rf}$	Biegesteifigkeit bzgl. der globalen z-Achse der Krafteinleitungssteife des Randfeldes
$k_{\sigma,p,glob}$	Beulwert des mittleren Teilfeldes
$k_{\sigma,p,lok}$	Beulwert des maßgebenden Einzelfeldes
L_{cr}	Knicklänge des Ersatzstabes ($L_{cr} = a_{QSt}$ [mm])
S_{ges}	Schwerpunkt des Längssteifenquerschnittes (Steife und effektiver Steg)
S_{LSt}	Schwerpunkt der Längssteife

$S_{LSt,br}$	Schwerpunkt des Längssteifenbruttoquerschnittes (Steife und anteilig mitwirkender Steg)
$S_{LSt,ges}$	Schwerpunkt des Längssteifengesamtquerschnittes (Steife und vollständig mitwirkender Steg)
t_{LSt}	Längssteifenblechdicke
t_{LSt}^*	Stegblechdicke des „verschmierten“ Längssteifenquerschnittes
t_{QSt}^*	Blechdicke der Flachsteife der alternativen Quersteifenbauform
t_{Rf}	Stegblechdicke des Randfeldes
t_w	Stegblechdicke des Beobachtungsfeldes
W_m	Widerstandsmoment des Längssteifenquerschnittes in Achse m (Stegachse)
W_o	Widerstandsmoment des Längssteifenquerschnittes in Achse o (Achse des Längssteifenaußengurtes (trapezförmige Hohlsteife))
x, y, z	globale Richtungen
x_{LSt}	abgewinkelte Länge der Längssteifen
$\bar{\lambda}_p$	bezogener Plattenschlankheitsgrad
$\bar{\lambda}_c$	bezogener Schlankheitsgrad des Ersatzdruckstabes
\bar{x}_{LSt}	Lage der Längssteifen über die Steghöhe
\bar{x}	Lage des Vertikalschnittes I im mittleren Beobachtungsfeld
α	Seitenverhältnis des Beulfeldes, Beulfeldgeometrie ($\alpha = a/b[-]$)
$\phi_{cr,dl}$	globaler Eigenwert der linearen Beulanalyse mit durchlaufenden Längssteifen
$\phi_{cr,end}$	globaler Eigenwert der linearen Beulanalyse mit endenden Längssteifen
$\phi_{cr,glob}$	globaler Eigenwert der linearen Beulanalyse
$\phi_{cr,lok}$	lokaler Eigenwert der linearen Beulanalyse
ζ	Abstand des Einzelschwerpunkts zum Bezugspunkt

▪ **Schnittgrößen, Verformungen, Spannungen**

$M_{R,fy}$	Biegemomententragfähigkeit des Längssteifenquerschnittes
$M_{R,LSt,m}$	größtmögliche auf den Längssteifenquerschnitt einwirkende Biegemomentenbeanspruchung beim Biegeknick-Nachweis einfach-symmetrischer Querschnitte
$M_{y,Ed}$	Bemessungswert des einwirkenden Biegemomentes in lokaler y-Achse
N_1, N_2	Einzeldruckkräfte, die im FE-Modell jeweils am oberen bzw. unteren Systemrand eingeleitet werden

N_{Ed}	Bemessungswert der einwirkenden Normalkraft
N_{ges,f_y}	Drucknormalkraft, welche am oberen und unteren Stegblechrand eingeleitet wird und im mittleren Beobachtungsfeld die Fließgrenze f_y als Druckspannung liefert
$N_{ges,f_y/10}$	Drucknormalkraft, welche am oberen und unteren Stegblechrand eingeleitet wird und im mittleren Beobachtungsfeld 10% der Fließgrenze f_y als Druckspannung liefert
N_{Mi}	auf den Längssteifenquerschnitt einwirkende Drucknormalkraft (N_{M1} für <i>Modell 1</i> bzw. N_{M2} für <i>Modell 2</i>)
N_{R,f_y}	Querschnittswiderstand des Längssteifenquerschnittes bzgl. der Drucknormalkraft
N_{Ref,f_y}	Drucknormalkraft, welche am oberen und unteren Stegblechrand eingeleitet wird und im mittleren Beobachtungsfeld unter reiner Normalkraftbeanspruchung (ohne ΔM) entsprechend der Randspannungsverteilung ψ als Spannungsniveau $\sigma_{m,N,GMNIA}$ die Fließspannung $f_y = 355$ [N/mm ²] im oberen Stegblechrand herbeiführt
$N_{Ref,f_y/10}$	Drucknormalkraft, welche am oberen und unteren Stegblechrand eingeleitet wird und im mittleren Beobachtungsfeld unter reiner Normalkraftbeanspruchung (ohne ΔM) entsprechend der Randspannungsverteilung ψ als Spannungsniveau $\sigma_{m,N,LA}$ 10% der Fließspannung f_y (= 35,50 [N/mm ²]) im oberen Stegblechrand herbeiführt
u_y	Verformung aus der Stegblechebene (globale y-Richtung)
$u_{y,max,Bf}$	maximale Verformung des Beobachtungsfeldes aus der Stegblechebene gemäß der linearen Analyse
$u_{y,max,LSt}$	maximale Verformung der Längssteife aus der Stegblechebene gemäß der linearen Analyse
$\Delta M, M_{m,Mi}$	auf den Längssteifenquerschnitt einwirkendes Zusatzmoment infolge des Effekts der an den Teilfeldrändern endenden Längssteifen ($M_{m,M1}$ für <i>Modell 1</i> bzw. $M_{m,M2}$ für <i>Modell 2</i>)
σ_{11}	Gesamtspannung (aus N und ΔM) gemäß der linearen Analyse
$\sigma_{cr,c}$	elastische kritische Knickspannung der Längssteife
$\sigma_{cr,p}$	elastische kritische Plattenbeulspannung
$\sigma_{cr,s\ell}$	Knickspannung der nahe am höchstbelasteten Druckrand gelegenen Längssteife
σ_E	<i>Eulersche</i> Bezugsspannung

$$\left(\sigma_E = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot t^2}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot b^2} = 190000 \cdot \left(\frac{t}{b} \right)^2 \text{ [N/mm}^2\text{]} \right)$$

$\sigma_{LSt,br}$	Gesamtspannung des Längssteifenbruttoquerschnittes (Steife und anteilig mitwirkender Steg)
$\sigma_{LSt,ges}$	Gesamtspannung des Längssteifengesamtquerschnittes (Steife und vollständig mitwirkender Steg)
$\sigma_{LSt,N}$	Normalspannungsanteil in der Längssteife
$\sigma_{LSt,\Delta M}$	Biegespannungsanteil in der Längssteife
$\sigma_{m,ges}$	Gesamtspannung in Achse m (Stegblech im Beobachtungsfeld)
$\sigma_{m,N}, \sigma_N$	Normalspannungsanteil in Achse m (Stegblech im Beobachtungsfeld)
$\sigma_{m,\Delta M}$	Biegespannungsanteil in Achse m (Stegblech im Beobachtungsfeld)
σ_o	einwirkende Druckspannung an der Stegoberkante der Randfelder
$\sigma_{o,ges}$	Gesamtspannung in Achse o ($\sigma_{o,ges} = \psi_{LSt} \cdot \sigma_{m,ges}$ [N/mm ²])
$\sigma_{o,N}$	Normalspannungsanteil in Achse o
$\sigma_{o,\Delta M}$	Biegespannungsanteil in Achse o
σ_{Rf}	Nennspannung der Randfelder
σ_{Rm}	mittlere Randspannung
σ_{Ro}	obere Randspannung
σ_{Ru}	untere Randspannung
σ_u	Druckspannung an der Stegunterkante der Randfelder ($\sigma_u = \psi \cdot \sigma_o$ [N/mm ²])
σ_v	Vergleichsspannung

▪ **Abkürzungen**

Abb.	Abbildung
Bf	Beobachtungsfeld bzw. mittleres Teilfeld
BK-NW	Biegeknick-Nachweis
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
d. h.	das heißt
dl.	durchlaufend
EF	Eigenform
El.	Element
end.	endend
End-QSt	Quersteife am vertikalen Trägerende
EW	Eigenwert
FE	Finite-Elemente

Gl.	Gleichung
glob	global
GMNIA	Geometrisch und materiell nichtlineare Analyse mit Ersatzimperfektionen
HT	Hauptträger
KSPL	Knickspannungslinie
LA	Lineare Analyse
LBA	Lineare Beulanalyse
lok	lokal
LSF	Laststeigerungsfaktor
LSt	Längssteife
lt.	laut
maßg.	maßgebend
mitw.	mitwirkend
n. v.	nicht vorhanden
OG	Obergurt
QS	Querschnitt
QSt	Quersteife
Rfst.	Randfeldstützung
SF	Skalierfaktor der geometrischen Ersatzimperfektion
Tab.	Tabelle
tats.	tatsächlich
UG	Untergurt
vgl.	vergleiche

Anmerkung:

Weitere Bezeichnungen, Symbole und Abkürzungen, welche dieses Verzeichnis nicht beinhaltet, sind bei Verwendung unmittelbar erläutert.



1 Einleitung und Motivation

Diese Arbeit befasst sich mit der Ermittlung der Beultragfähigkeit von schlanken, längsausgesteiften Vollwandträgern deren durch Quersteifen begrenzte Teilfelder endende Längssteifen aufweisen. Dies stellt den Grenzfall der möglichen Ausführung dar und ist beispielsweise im Stahl- und Verbundbrückenbau anzutreffen. Wie Abb. 1.1 und Abb. 1.2 schematisch zeigen, liegt tatsächlich meist nur an einem Teilfeldrand dieser Sachverhalt vor. Bei endenden Längssteifen erfolgt die Lasteinleitung infolge der fehlenden Torsionssteifigkeit der Quersteifen nahezu ausschließlich über das Stegblech. Endende Längssteifen erfahren dadurch eine zusätzliche Biegebeanspruchung. Das auftretende Zusatzmoment ΔM ergibt sich aus der exzentrischen Schwerpunktlage des Längssteifenquerschnittes zur Stegblechebene (siehe Abb. 1.1) und zieht möglicherweise eine Traglastminderung für das längsausgesteifte Teilfeld nach sich.

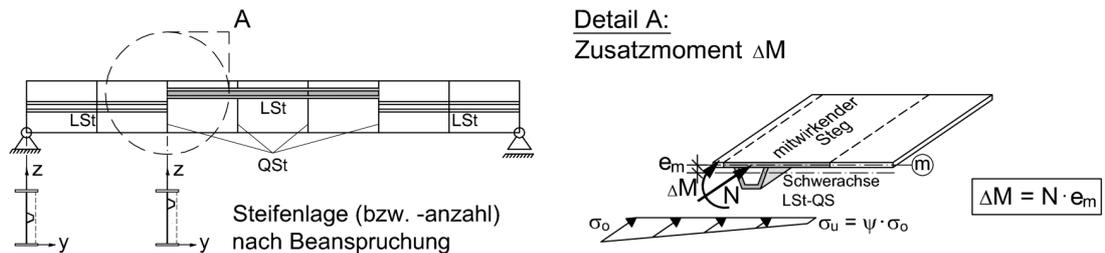
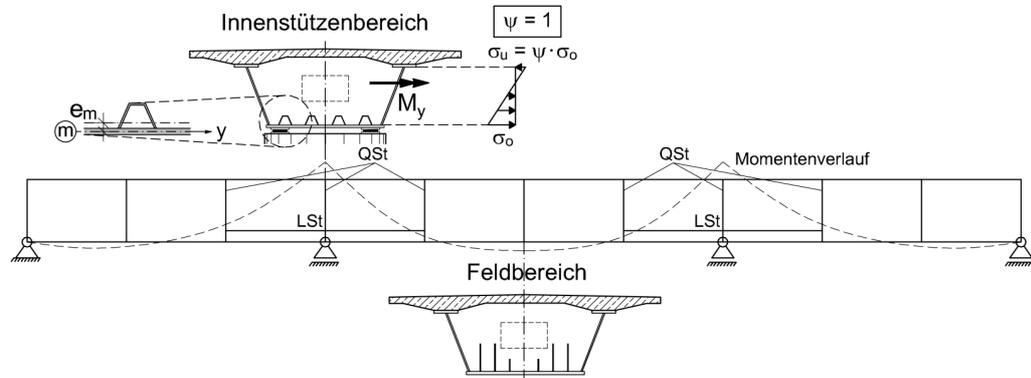


Abb. 1.1: Effekt der an Teilfeldrändern endenden Längssteifen

Die nachfolgende Abb. 1.2 zeigt zwei Anwendungsbeispiele für endende Längssteifen im Innenstützenbereich bei a.) einem Kastenquerschnitt (Untergurtblech) und bei b.) einem offenen Querschnitt mit zwei Hauptträgern (Stegblech).

a.) Untergurtblech:



b.) Stegblech:

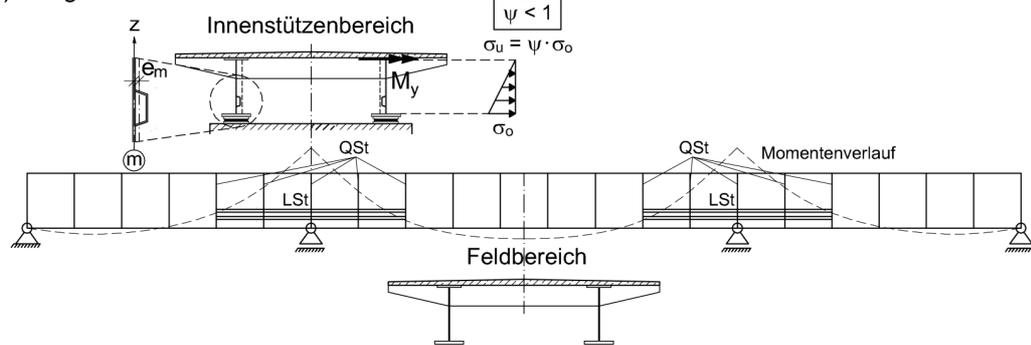


Abb. 1.2: Endende Längssteifen im Innenstützenbereich von Verbundtragwerken:
a.) Untergurtblech b.) Stegblech

Für den Untergurt liegt eine konstante ($\psi = 1,0 [-]$), für den Steg eine veränderliche Normalspannungsverteilung ($\psi < 1,0 [-]$) vor.

Die Größe des Zusatzmomentes ΔM steht in Abhängigkeit von der Ausführungsart der Längssteifen (Bauform und -höhe, Blechdicke). Anhand von ausgewählten Systemen werden diese geometrischen Einflussgrößen und die unmittelbare Auswirkung auf die Beultragfähigkeit des längsausgesteiften Teilfeldes untersucht.

2 Zielsetzung

Das primäre Ziel dieser Arbeit ist es, die Auswirkungen endender Längssteifen auf die resultierende Beultragfähigkeit von Teilfeldern – anhand praktischer Beispiele – zu quantifizieren und mit den Bemessungsvorschriften des Eurocode zu vergleichen. Im Gegensatz zu vielen praktischen Ausführungen (vgl. Abb. 1.1 und Abb. 1.2) wird jedoch jener Grenzfall betrachtet, der die geringsten Beultragfähigkeiten für ein Teilfeld liefert – die Längssteifen des betrachteten Teilfeldes enden an beiden Quersteifen.

Ein weiteres Ziel liegt in der Erstellung eines sogenannten Ingenieurmodells, welches den Effekt endender Längssteifen bei der Nachweisführung der Beultragfähigkeit von dünnwandigen, längsausgesteiften Biegeträgern erfasst. Dieses vereinfachte Rechenmodell folgt weitestgehend den Vorgaben im Eurocode 3, Teil 1-5 [1] und soll eine effiziente Ermittlung der Beultragfähigkeit p_c des Teilfeldes mit endenden Längssteifen für Ausführungsbeispiele, welche ähnlich den untersuchten Systemen sind, erlauben.

Zur Quantifizierung des Einflusses von systembedingten Parametern, wie den effektiv mitwirkenden Querschnittsflächen, den Blechdicken und der Längssteifenausführung auf die Systemsteifigkeit bzw. –tragfähigkeit, bedarf es einer Vergleichsmöglichkeit mit tatsächlich auftretenden Spannungs- und Verformungsgrößen. Dies soll mittels einer linearen Analyse (LA) sichergestellt werden. Dadurch werden die einfachen Modellvorstellungen des Ingenieurmodells überprüft. Eine lineare Eigenwertanalyse (LBA) dient zur Ermittlung der anzuwendenden geometrischen Ersatzimperfektionen für eine geometrisch und materiell nichtlineare Traglastanalyse (GMNIA), welche den Laststeigerungsfaktor (LSF) – gleichbedeutend dem Reduktionsfaktor p_c der Beultragfähigkeit des längsausgesteiften Teilfeldes, da sich beide Größen auf das Erreichen der Fließspannung f_y im oberen Stegblechrand des mittleren Beobachtungsfeldes beziehen – liefert. Zudem werden die ermittelten idealen Beulspannungen $\sigma_{cr,p,glob}$ für das globale Verhalten bei der Anwendung des Ingenieurmodells benötigt. Ergänzend soll ein direkter Ergebnisvergleich (bzgl. der Laststeigerungsfaktoren, idealen Knick- und Beulspannungen, Beulwerte und Verformungen) mit modifizierten Systemen mit durchlaufenden Längssteifen erfolgen. Es gilt, die Regelungen des Eurocode 3 Teil 1-1 [2] zur Bestimmung des Knickverhaltens des „Längssteifenersatzstabes“, unter Berücksichtigung des zur Hauptnorm zugehörigen, österreichischen Nationalen Anhangs B (informativ) [3] für die Biegeknick-Bemessung des vorliegenden einfach-symmetrischen Längssteifenquerschnittes (Steife exzentrisch am Steg angeschlossen), und jene des Eurocode 3-1-5 [1], welche als Teil des Ingenieurmodells zum Nachweis der Beulstabilität nach der „Methode der reduzierten Spannungen“ dienen, dem tatsächlichen Systemverhalten gemäß den FE-Ergebnissen endender Längssteifen gegenüberzustellen. Die Übereinstimmung des Ingenieurmodells zu den numerischen Ergebnissen wird für vier Varianten der vereinfachten Anwendung der Eurocode-Regelung dargestellt. Letztlich sind die zu wertenden Ergebnisse und Erkenntnisse in ein vereinfachtes Ingenieurmodell für endende Längssteifen zu integrieren, sowie die dabei getroffenen Annahmen begleitend als Bemessungshinweise anzuführen.

3 Struktur und Umfang

- Anhang A

Der Anhang A erstreckt sich über den numerischen Berechnungsteil dieser Arbeit, welcher sich in allgemeine Voruntersuchungen und für jedes System in drei unterschiedliche FE-Analysen, mittels des Softwarepakets ABAQUS [4], gliedert. Das angewandte numerische Modell wird hinsichtlich der verwendeten Elementtypen, Lagerungs-, Belastungsannahmen sowie dem Imperfektionsansatz detailliert vorgestellt.

Das grundsätzlich – sinngemäß stellvertretend für alle weiteren Systeme – verwendete FE-Modell zeigt Abb. 3.1.

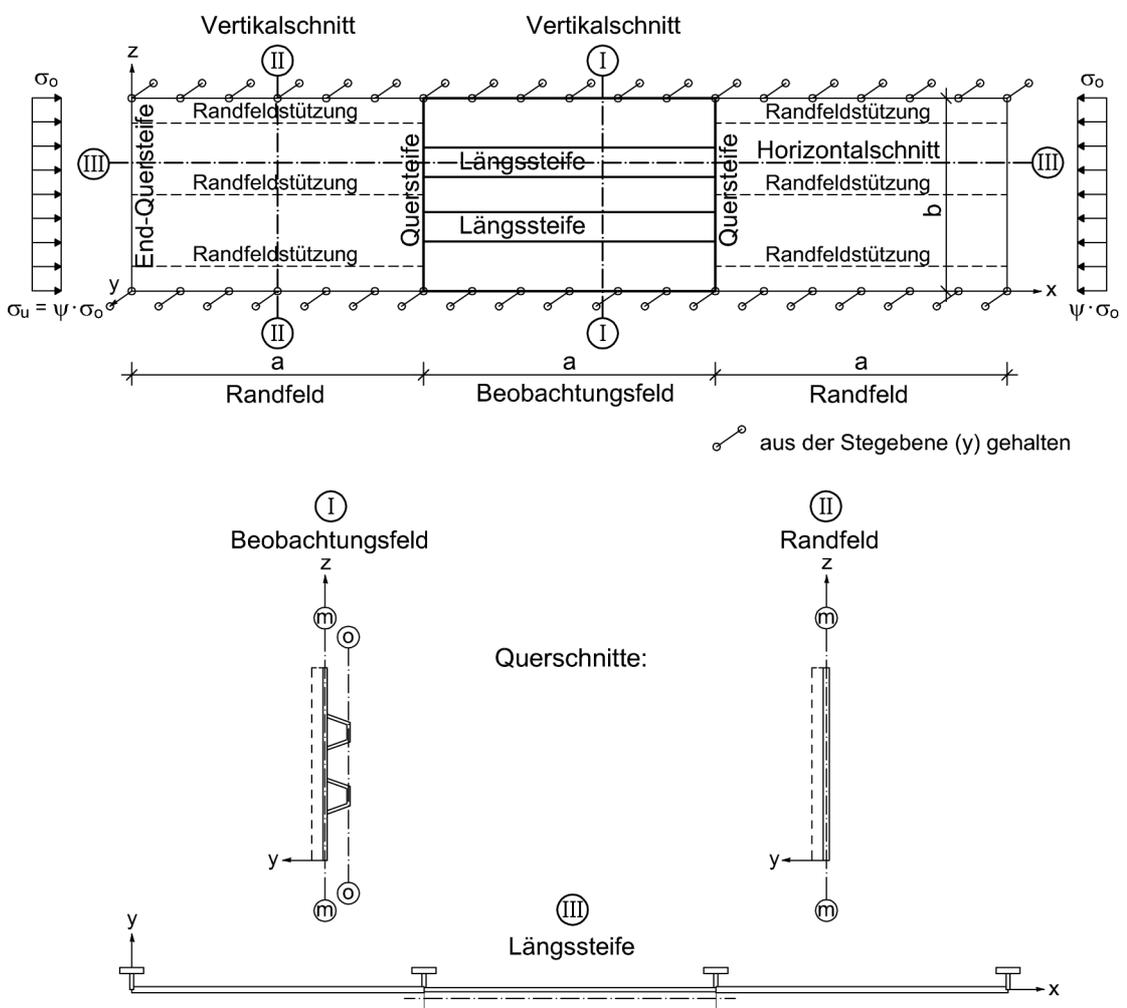


Abb. 3.1: Verwendetes FE-Modell, am Beispiel des Systems S1

Es wird für die Modellierung eine Randfeldstützung vorgesehen, welche ein alleiniges, maßgebendes Beulverhalten der außenliegenden Teilfelder verhindert, sodass immer das mittlere Beobachtungsfeld dessen Beultragfähigkeit bestimmt. Zudem wird der Einfluss der Quersteifengeometrie auf das zugehörige Traglastergebnis untersucht. Es erfolgt eine lineare Analyse (LA) für die Spannungs- und Verformungsauswertung an maßgebenden Stellen, welche der Erfassung der tatsächlichen Spannungsverläufe bzw. der vorliegenden Einspannwirkung durch die an das mittlere Beobachtungsfeld angrenzenden Teilfelder dient. Anschließend dient eine lineare Beulanalyse (LBA) dem Erhalt von maßgebenden globalen und lokalen Eigenwerten, welche als geometrische Ersatzimperfectionen für die nichtlineare Traglastanalyse (GMNIA) zur Ermittlung des Laststeigerungsfaktors (LSF) – bezogen auf das Erreichen der Fließgrenze f_y im mittleren Beobachtungsfeld (d.h. dann gilt $LSF = 1,0[-]$) – herangezogen werden. Ergänzend sind die idealen Beulspannungen und Beulwerte für die Einzel- und Teilfelder ausgewertet und dokumentiert. Die untersuchten Systeme entsprechen repräsentativen Fallbeispielen zur Erfassung des ungünstigsten Effekts endender Längssteifen mit einer konstanten Druckspannungsverteilung $\psi = 1,0[-]$ (System S1, S2 und S3 mit zwei, in äquidistanten Abständen befindlichen, trapezförmigen Hohlsteifen, Beulfeldgeometrie $\alpha = a/b = 1,5[-]$ und mittlerem Teilfeldsteg $10/2000$ [mm]) und einer linear veränderlichen Druckspannungsverteilung $\psi = 0[-]$ (System S4 als Steg eines unsymmetrischen Trägers mit drei dreiecksförmigen Hohlsteifen, $\alpha = 0,86[-]$ und mittlerem Teilfeldsteg $12/3500$ [mm]). Variiert werden zudem geometrische Parameter, wie Bauhöhe und Blechdicke der Längssteifen, welche die Beultragfähigkeit des längsausgesteiften Teilfeldes beeinflussen.

- **Anhang B**

Der Anhang B beinhaltet die Bestimmung der Biegewirkung der Längssteifen mithilfe zweier Varianten zum Ingenieurmodell und gibt dabei die Größenordnung des auf den Längssteifenquerschnitt einwirkenden Biegemomentanteils ΔM an. Als beanspruchter Querschnitt gilt jeweils die Steifenfläche und die anteilig mitwirkende „Bruttobreite“ des Steges (*Modell 1*) bzw. die vollständig mitwirkende Stegbreite (*Modell 2*). Zusätzlich werden für alle Systeme die Normalspannungsverläufe des Ingenieurmodells – getrennt als Normalkraft- und Biegemomentenanteil und zusammengefasst als Gesamtnormalspannung – angeführt und den FE-Ergebnissen gegenübergestellt.

▪ Anhang C

Im Anhang C wird das Ingenieurmodell für die an den Teilfeldrändern endenden Längssteifen, angelehnt an die Ermittlung der Beultragfähigkeit $\rho_c \cdot f_y$ nach der „Methode der reduzierten Spannungen“ im Eurocode 3-1-5 [1], dargestellt. Das Hauptaugenmerk gilt dabei dem knickstabähnlichen Verhalten, welches aufgrund der einseitigen Längssteifenanordnung für einfach-symmetrische Querschnitte nach dem Nationalen Anhang B zu Eurocode 3-1-1 [3] am „Ersatzstab“ (Knicklänge entspricht Teilfeldlänge) der Längssteife ermittelt wird. Dabei basiert der erhaltene Abminderungsfaktor χ_c für das knickstabähnliche Verhalten geschlossener, endender Längssteifen auf der Knickspannungslinie c nach [2] und wird auf Basis des Biegeknick-Nachweises (BK-NW) unter Druck und Biegung (N und ΔM) von einfach-symmetrischen Querschnitten berechnet. Das plattenartige Verhalten ρ_p wird gemäß der Regelung nach Eurocode 3-1-5 [1] (als ρ notiert) unter Anwendung der tatsächlichen globalen Eigenwerte $\phi_{cr, glob}$ aus der linearen Beulanalyse (LBA) ermittelt. Beide Mechanismen werden mittels der Interaktionsbeziehung ξ des Eurocode kombiniert und damit die resultierende Abminderung ρ_c für die Beultragfähigkeit ermittelt. Die Ergebnisse dieser Eurocode-Regelungen mit den vorgeschlagenen Ergänzungen sind für alle untersuchten Systeme dargestellt und den realitätsnahen FE-Ergebnissen gegenübergestellt. In begleitenden Anmerkungen sind die getroffenen Annahmen detailliert erläutert.

▪ Anhang D

Im Anhang D wird die Berechnungseingabe für die geometrisch und materiell nichtlineare Traglastanalyse mit Ersatzimperfectionen (GMNIA) zur Ermittlung des Laststeigerungsfaktors (LSF) von System S1 ($\alpha = 1,5[-] / t_{LSI} = 8[\text{mm}] / \psi = 1,0[-] / \text{Variante 2}$) – stellvertretend für alle numerischen Berechnungen – mittels des FE-Programmes ABAQUS Standard [4] angeführt.

4 Vorgehensweise und Ergebnisse der numerischen Traglastanalyse und des Ingenieurmodells

In diesem Abschnitt erfolgt vorab und gemäß dem chronologischen Aufbau dieser Arbeit eine Zusammenfassung hinsichtlich der Vorgehensweise und der Ergebnisse der nachfolgenden, sämtliche Berechnungsdetails beinhaltenden Anhänge.

4.1 Numerische Traglastanalyse

Nachfolgend sind die getroffenen Annahmen für die FE-Modellierung und die Ergebnisse der numerischen FE-Studie zusammengefasst (gemäß Anhang A).

In Abb. 4.1 sind die wesentlichen Merkmale der verwendeten FE-Modelle zur Untersuchung von Systemen mit endenden und durchlaufenden Längssteifen angeführt. In beiden Fällen sind drei Teilfelder mit insgesamt vier Quersteifen modelliert. Es ist nur der ausgesteifte Steg modelliert, da nur das Berechnungskonzept nach der „Methode der reduzierten Spannungen“ nach Eurocode 3-1-5 [1] behandelt wird. Im Fall der endenden Längssteifen liegen in den Randfeldern zusätzliche Längssteifen (in Abb. 4.1 als Strichlinien dargestellt) vor, denen jedoch keine Fläche zugewiesen wird.

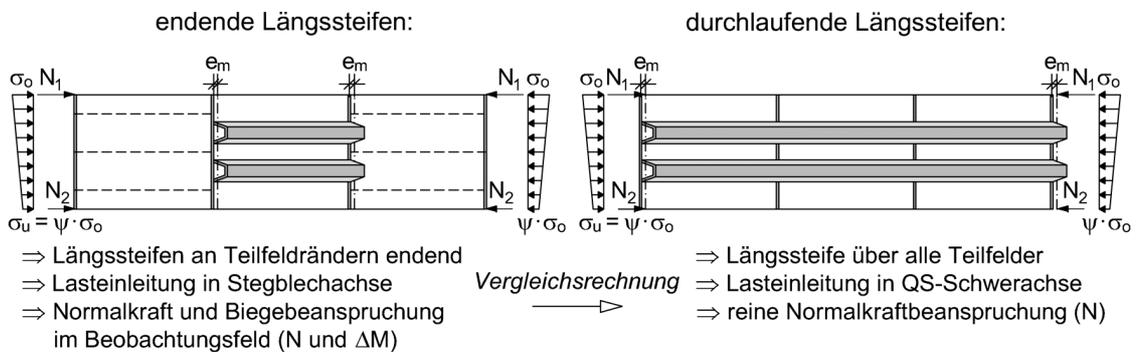


Abb. 4.1: Verwendete FE-Modelle – Vergleich zwischen endenden und durchlaufenden Längssteifen

4.1.1 Einflüsse auf die FE-Modellierung

Zum Beobachtungsfeld mit endenden Längssteifen wurden beidseits angrenzende Randfelder mitmodelliert. Diese dienen der störungsfreien Lasteinleitung (Unterbindung lokaler Einflüsse durch Randspannungsspitzen im betrachteten Teilfeld) sowie der Sicherstellung, dass die zusätzliche Biegebeanspruchung ΔM für das mittlere Beobachtungsfeld mit endenden Längssteifen „realitätsnah“ in das innenliegende Teilfeld eingeleitet wird.

Es stellte sich heraus, dass die versuchsweise angewandten unterschiedlichen Randfeldmodellierungen – a.) mit einer starren Stützung und einem begrenzt freien Rand zum Beobachtungsfeld hin (*Variante 1*), b.) mit Kräfteinleitungslängssteifen ohne Dehnsteifigkeit (*Variante 2 und 3*) und c.) mit einer alleinigen Blechdickenerhöhung (*Variante 4*) – nur einen zu vernachlässigenden, geringfügigen Einfluss auf das Traglastergebnis des mittleren Beulfeldes haben. Ein Variantenvergleich der unterschiedlichen Randfeldstützungen findet sich in Anhang A, Abschnitt 4.1.

Zudem erfolgte eine Untersuchung mit Variation der Zwischenquersteifen, welche als zentrisch an das Stegblech angeschlossene Flachsteifen ohne außenliegenden Gurt mit identer Biegesteifigkeit der ursprünglichen, exzentrisch an das Stegblech angeordneten Flachsteifen mit Außengurt (weiterhin an den vertikalen Trägerenden als Endquersteife angeordnet) ausgeführt wurden. Für beide Ausführungsarten bilden sich für das mittlere Beobachtungsfeld die Knotenlinien entlang der Quersteifen aus und die numerische Traglastrechnung ergibt in beiden Fällen den identen Laststeigerungsfaktor (LSF). Dies bedeutet, dass die einzelnen Quersteifen eine ausreichende Biegesteifigkeit aus der Stegebene aufweisen, sodass im Ingenieurmodell jedes Teilfeld isoliert betrachtet werden kann.

4.1.2 Lineare Analyse (LA)

Die lineare Analyse liefert Spannungsverläufe σ_{11} , welche der Vergleichsrechnung zur Erfassung der Biegewirkung mit einem einfachen Ingenieurmodell dienen und Verformungsverläufe u_y , welche zur Eigenkontrolle hinsichtlich der Einspannwirkung durch die Randfeldstützung verwendet werden. Beide Größen sind entsprechend dem vorliegenden Zusatzmoment ΔM im Vergleich zu gleichen Systemen mit durchlaufenden Längssteifen erhöht.

4.1.3 Lineare Beulanalyse (LBA)

Die lineare Beulanalyse liefert auch die geometrischen Ersatzimperfectionen für die nichtlineare Traglastanalyse (GMNIA) in Form von globalen und lokalen Eigenwerten gemäß der Tab. 4.1 und Tab. 4.2, welche beide die numerischen Ergebnisse mit der Randfeldstützung nach *Variante 2* anführen – vgl. Anhang A, Abschnitt 4.1.2.1.

System	ψ [-]	t_{LSt} [mm]	$\phi_{cr,lok}$ [-]		$\sigma_{cr,p,lok}$ [N/mm ²]			$k_{\sigma,p,lok}$ [-]	
			end. LSt	dl. LSt	end. LSt	dl. LSt	Δ [%]	end. LSt	dl. LSt
S1	1	8	28,929	35,407	354,08	354,07	+0,0	4,93	4,93
	1	10	28,299	36,385	361,83	363,85	-0,6	5,03	5,06
S2	1	8	26,927	34,894	349,44	348,94	+0,1	4,86	4,86
	1	10	26,103	35,915	360,44	359,15	+0,4	5,02	5,00
S3	1	8	25,360	34,718	345,25	347,18	-0,6	4,80	4,83
S4	0	6	70,143	76,917	765,05	769,17	-0,5	4,98	5,01

Tab. 4.1: Lokale Eigenwerte $\phi_{cr,lok}$, ideale Beulspannungen $\sigma_{cr,p,lok}$ und Beulwerte $k_{\sigma,p,lok}$ der linearen Beulanalyse (LBA) für endende und durchlaufende Längssteifen – *Variante 2*

Die lokalen idealen Beulspannungen endender Längssteifen stimmen dann mit jenen von gleichen Systemen mit über alle Teilfelder durchlaufenden Längssteifen überein ($\Delta < 1\%$), wenn die überlagerte Biegewirkung im Stegblech entsprechend berücksichtigt wird (siehe Anhang A, Abschnitt 4.1.4). Die tatsächlichen, rückgerechneten lokalen Beulwerte $k_{\sigma,p,lok}$ sind gegenüber isoliert betrachteten Einzelfeldern ($k_{\sigma,p,min} = 4,0[-]$) für die gegebene Lastsituation und Beulfeldgeometrie – wie zu erwarten – erhöht.

Die globalen idealen Beulspannungen endender Längssteifen, laut der nachfolgenden Tab. 4.2, sind im Vergleich zu gleichen Systemen mit durchlaufenden Längssteifen aufgrund der für die FE-Modellierung notwendigen Randfeldstützungen und Blechdickenerhöhung der Randfelder jeweils um 16% erhöht (höhere Einspannung in die Randfelder).

System	ψ [-]	t_{LSt} [mm]	$\phi_{cr, glob}$ [-]		$\sigma_{cr, p, glob}$ [N/mm ²]			$k_{\sigma, p, glob}$ [-]	
			end. LSt	dl. LSt	end. LSt	dl. LSt	Δ [%]	end. LSt	dl. LSt
S1	1	8	48,014	41,232	480,14	412,32	+16,4	101,08	86,80
	1	10	51,573	44,534	515,73	445,34	+15,8	108,57	93,76
S2	1	8	n.v.	n.v.	-	-	-	-	-
	1	10							
S3	1	8	n.v.	n.v.	-	-	-	-	-
S4	0	6	61,114	52,907	611,14	529,07	+15,5	273,63	237,25

Tab. 4.2: Globale Eigenwerte $\phi_{cr, glob}$, ideale Beulspannungen $\sigma_{cr, p, glob}$ und Beulwerte $k_{\sigma, p, glob}$ der linearen Beulanalyse (LBA) für endende und durchlaufende Längssteifen – *Variante 2*

4.1.4 Geometrisch und materiell nichtlineare Analyse mit Ersatzimperfectionen (GMNIA)

Die anschließende Tab. 4.3 gibt die numerisch errechneten Laststeigerungsfaktoren (LSF), die zugehörige Lage \bar{x}_{LSt} und die Blechdicke t_{LSt} der endenden und durchlaufenden Längssteifen sowie das Trägheitsmoment $I_{LSt, br}$ des Längssteifenbruttoquerschnittes (*Modell 1* gemäß Anhang B – Steife und anteilig mitwirkender Steg) endender Längssteifen wieder.

System	ψ [-]	t_{LSt} [mm]	Steifenlage \bar{x}_{LSt} [-]	$I_{LSt, br}$ [mm ⁴]	LSF [-]		Δ LSF end./dl. [%]
					end. LSt	dl. LSt	
S1	1	8	0,33; 0,66	17723028	0,557	0,670	-16,9
	1	10	0,33; 0,66	20594008	0,548	0,709	-22,7
S2	1	8	0,33; 0,66	66779052	0,624	0,853	-26,8
	1	10	0,33; 0,66	77337247	0,601	0,873	-31,2
S3	1	8	0,33; 0,66	142901191	0,620	0,866	-28,4
S4	0	6	0,16; 0,39; 0,63	16460640	0,772	0,776	-0,5

Tab. 4.3: Laststeigerungsfaktoren (LSF) der nichtlinearen Traglastanalyse (GMNIA) für endende (*Variante 2*) und durchlaufende Längssteifen

Die errechneten Laststeigerungsfaktoren (LSF) für endende Längssteifen (Spalte ,end. LSt') – gleichbedeutend den resultierenden Abminderungsfaktoren ρ_c der Beultragfähigkeit – liegen aufgrund der zusätzlichen Endmomentenbeanspruchung ΔM der Beulsteifen unter jenen von durchlaufenden Längssteifen (Spalte ,dl. LSt'). Während sich für die Druckspannungsverteilung $\psi = 1,0 [-]$ eine bis zu 23 % (für das System S1) bzw. 31 % (für das System S2) herabgesetzte Tragfähigkeit ergibt, bleibt der Laststeigerungsfaktor bei der linear veränderlichen Randspannungsverteilung $\psi = 0 [-]$ mit einer Reduktion von 0,5 % nahezu unverändert. Letztgenanntes Ergebnis deutet auf ein das höchstbelastete, nahe dem Druckrand gelegenes Einzelfeld entlastendes Mitwirken von weniger belasteten Einzelfeldern durch Spannungsumlagerung hin. Hauptgrund ist jedoch die geringere Momentenbeanspruchung für die hier vorliegende dreiecksförmige Längssteife (siehe Anhang B, Abschnitt 3.4).

Aus den Ergebnissen ist vordergründig erkennbar, dass eine Erhöhung der Stegblechdicke und damit verbundene Erhöhung der Biegesteifigkeit der Längssteife zu einem größeren Abfall der Tragfähigkeit bei endenden gegenüber durchlaufenden Längssteifen führt. Die detaillierte Analyse, durch Vergleich des Biegespannungsanteils aus dem Zusatzmoment ΔM , zeigt Anhang B, Abschnitt 4.

4.2 Ingenieurmodell zur Tragfähigkeitsabschätzung und Ergebnisvergleich zu nichtlinearen FE-Lösungen

Einleitend wird in diesem Abschnitt das Ingenieurmodell vorgestellt, welches zur Tragfähigkeitsabschätzung von Teilfeldern mit endenden Längssteifen dient und anhand der numerischen Ergebnisse entwickelt wurde. Das Ingenieurmodell folgt weitestgehend jenem nach der vereinfachten Eurocode-Regelung für durchlaufende Längssteifen. Anschließend werden die Ergebnisse bei Anwendung des vorgeschlagenen Ingenieurmodells für alle untersuchten Systeme dargestellt (gemäß Anhang B – Biegewirkung an endenden Längssteifen – und Anhang C – Beultragfähigkeit von längsausgesteiften Teilfeldern mit endenden Längssteifen) und mit den realitätsnahen Ergebnissen der nichtlinearen FE-Berechnung verglichen.

4.2.1 Ingenieurmodell für endende Längssteifen – Überblick

a.) Ingenieurmodell nach Eurocode EN 1993-1-5

Das Ingenieurmodell des Eurocode sieht, wie Abb. 4.2 zeigt, für die Ermittlung der resultierenden Beultragfähigkeit ($= \rho_c \cdot f_y$) die Bestimmung von Abminderungsfaktoren für knickstabähnliches (χ_c) und plattenartiges (ρ_p) Verhalten des betrachteten Beulfeldes vor, welche mittels einer Interaktionsbeziehung kombiniert werden und den Reduktionsfaktor ρ_c für die Fließspannung f_y liefern.

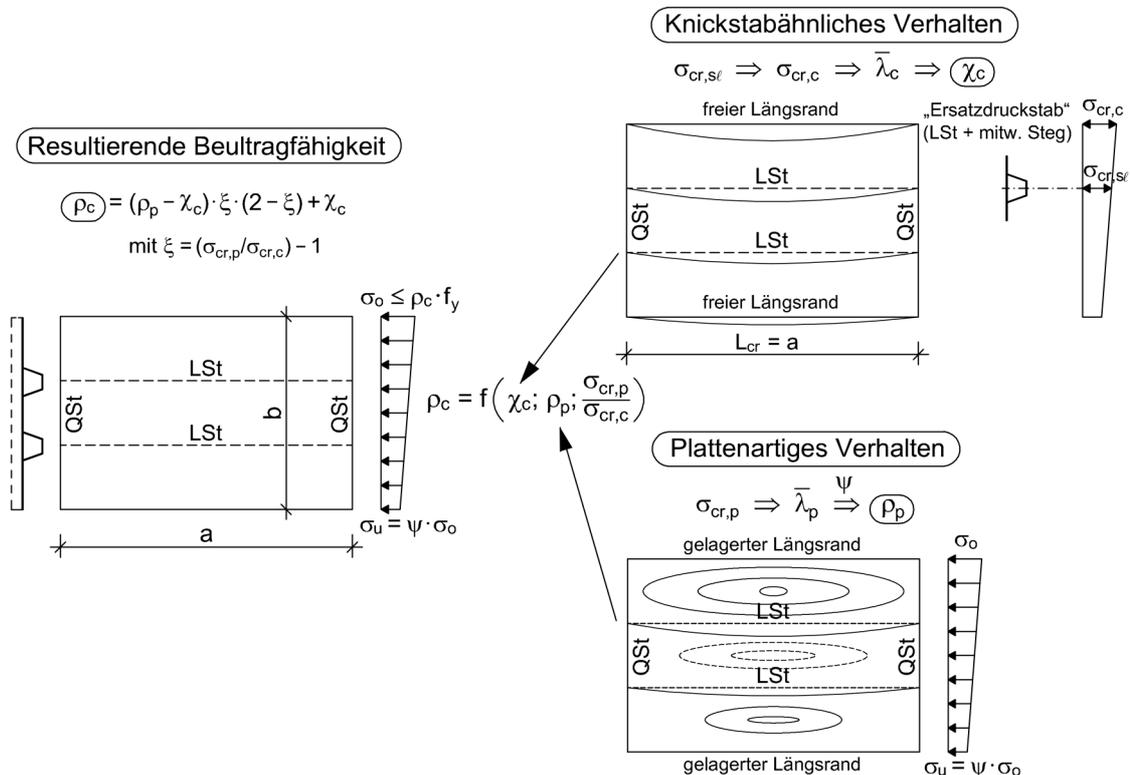


Abb. 4.2: Ingenieurmodell nach Eurocode EN 1993-1-5 [1] (auszugsweise nach [5] dargestellt)

Für den Fall zentrisch unter Druck beanspruchter, längsausgesteifter Teilfelder ergibt sich – mit einer vereinfachten Anwendung der Eurocode-Regelung gemäß dem Bemessungsvorschlag in [5] für durchlaufende Längssteifen – die nachfolgende Vorgehensweise:

- **Knickstabähnliches Verhalten $\chi_{c,dI}$ (durchlaufende Längssteifen)**

Der Längssteifenquerschnitt wird als „Ersatzstab“ betrachtet – d.h. die Knicklänge entspricht dem Quersteifenabstand – und der zugehörige bezogene Knickschlankheitsgrad $\bar{\lambda}_c$ wird unmittelbar mit den Bruttoquerschnittsgrößen (Annahme von $\beta_{A,c} = 1,0 [-]$) ermittelt. Der Abminderungsfaktor $\chi_{c,dI}$ des knickstabähnlichen Verhaltens wird für geschlossene Längssteifen vereinfacht mit der Knickspannungslinie (KSPL) c bestimmt. Dabei bleibt der modifizierte Imperfektionsbeiwert α_e zur „exakten“ Berücksichtigung des Imperfektionseinflusses durch geschweißte Längssteifen unberücksichtigt (somit gilt $\alpha_e = \alpha = 0,49 [-]$ für KSPL c).

- **Plattenartiges Verhalten ρ_p**

Der Abminderungsfaktor ρ_p für plattenartiges Verhalten wird nach der Bemessungsformel von *Winter* aus [1] berechnet, jedoch werden dabei die globalen Eigenwert $\phi_{cr,glob}$ der linearen Beulanalyse (LBA) für die Berechnung des Lastfaktors α_{cr} herangezogen (d. h. $\alpha_{cr} = \phi_{cr,glob}$).

- **Resultierende Tragfähigkeit $\rho_c \cdot f_y$**

Mit dem Interaktionsfaktor $\xi = (\sigma_{cr,p}/\sigma_{cr,c}) - 1$ erfolgt abschließend die Ermittlung des resultierenden Abminderungsfaktors ρ_c der Beultragfähigkeit gemäß der folgenden Bemessungsformel aus [1] (ρ_p wird im Eurocode als ρ notiert):

$$\rho_c = (\rho_p - \chi_c) \cdot \xi \cdot (2 - \xi) + \chi_c [-] \quad (4.1)$$

b.) Notwendige Ergänzungen im Ingenieurmodell für endende Längssteifen

Da im Fall der einseitig an das Stegblech angeschlossenen, endenden Längssteifen ein unter Normalkraft (N) und zusätzlicher Biegemomentenbeanspruchung ($\Delta M = N \cdot e_m$) beanspruchter Längssteifenquerschnitt vorliegt, erfolgt der Vorschlag zur Berücksichtigung von ΔM auf Basis der zuvor angeführten, vereinfachten Anwendung des Ingenieurmodells nach Eurocode 3-1-5 [1]. Die Ergänzung betrifft ausschließlich das knickstabähnliche Verhalten, während die restliche Vorgehensweise unverändert angewandt wird.

Der Abminderungsfaktor χ_c für knickstabähnliches Verhalten wird für geschlossene, endende Längssteifenquerschnitte (Steife und mitwirkender Steg – als Querschnitt der Klasse 3 betrachtet) und aus dem Biegeknick-Nachweises unter N und ΔM (BK-NW mit Teilsicherheitswert $\gamma_{M1} = 1,0[-]$ – d.h. $f_{yd} = f_y$) nach Eurocode 3-1-1, Anhang B für einfach-symmetrische Querschnitte [3], berechnet. Dabei ist, unter Verwendung des Abminderungsfaktors $\chi_{c,dI}$ für knickstabähnliches Verhalten unter zentrischem Druck, ein iteratives Vorgehen notwendig. Der gesuchte Reduktionsfaktor χ_c entspricht dabei dem Verhältniswert der aus dem Biegeknick-Nachweis (bei einem Ausnutzungsgrad von 100%) erhaltenen, größtmöglichen auf den Längssteifenquerschnitt einwirkenden Drucknormalbeanspruchung $N_{R,LSI}$ zum Querschnittswiderstand des Längssteifenquerschnittes $N_{R,fy}$ (somit gilt $\chi_c = N_{R,LSI}/N_{R,fy}$). Der dabei verwendete Längssteifenquerschnitt wird mit anteiliger Stegblechmitwirkung angenommen (nach *Modell 1* – siehe Anhang B, Abschnitt 2.1).

Letztlich werden für die Ermittlung der resultierenden Beultragfähigkeit ρ_c vier Variationskombinationen untersucht. Diese Variationen beziehen sich auf folgende Unterschiede bei der Berechnung von ρ_c :

- (1) Für knickstabähnliches Verhalten:
 - „ohne $f_{\sigma,LSI}$ “ – ohne fiktiver Erhöhung des Abminderungsfaktors χ_c (wie zuvor beschrieben)
 - „mit $f_{\sigma,LSI}$ “ – mit fiktiver Erhöhung des Abminderungsfaktors χ_c auf den erhöhten Abminderungsfaktor χ_c^* (Anwendung infolge reduzierter Längssteifenbeanspruchung bei niederen Belastungsstufen, siehe Anhang C, Abschnitt 3)

- (2) Für plattenartiges Verhalten und zur Ermittlung des Interaktionsfaktors ξ :
 - „mit $\phi_{\sigma,cr,end}$ “ – Ermittlung der idealen Plattenbeulspannung $\sigma_{cr,p}$ am System mit endenden Längssteifen
 - „mit $\phi_{\sigma,cr,dI}$ “ – Ermittlung der idealen Plattenbeulspannung $\sigma_{cr,p}$ am System mit durchlaufenden Längssteifen (empfohlene Anwendung)

4.2.2 Biegewirkung an den endenden Längssteifen im Vergleich zur FE-Berechnung

Die Längssteife (Steife und effektiv mitwirkender Steg) wird, wie in Abb. 4.3 dargestellt, isoliert als Einzelstab unter Normalkraft N und Biegebeanspruchung $\Delta M = N \cdot e_m$ betrachtet. Zur Erfassung der durch die exzentrische Steifenlage zusätzlich entstehenden Biegebeanspruchung ΔM und der Beurteilung ihrer Auswirkung auf die Beultragfähigkeit des Teilfeldes mit endenden Längssteifen werden zwei Modelle zur vereinfachten Spannungsermittlung untersucht. Diese unterscheiden sich durch die jeweils als anteilig (*Modell 1*) bzw. vollständig (*Modell 2*) mitwirkend angenommene Stegfläche. Für eine unmittelbare Vergleichsmöglichkeit mit den realitätsnahen linearen FE-Ergebnissen (siehe Anhang A, Abschnitt 5) basiert die Bezugslastgröße beider Modelle auf jener der linearen Analyse (LA), welche im mittleren Teilfeld unter alleiniger Normalkraftbeanspruchung die Druckspannung $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ liefert.

Die Abb. 4.3 stellt die Vorgehensweise hinsichtlich der Erfassung des Biegespannungsanteils $\sigma_{m,\Delta M}$ der Gesamtnormalspannung $\sigma_{m,ges}$ in der Stegblechachse (maßgebende Achse m) und die anschließende Gegenüberstellung zu den numerisch ermittelten Gesamtspannungen der linearen Analyse (LA) dar.

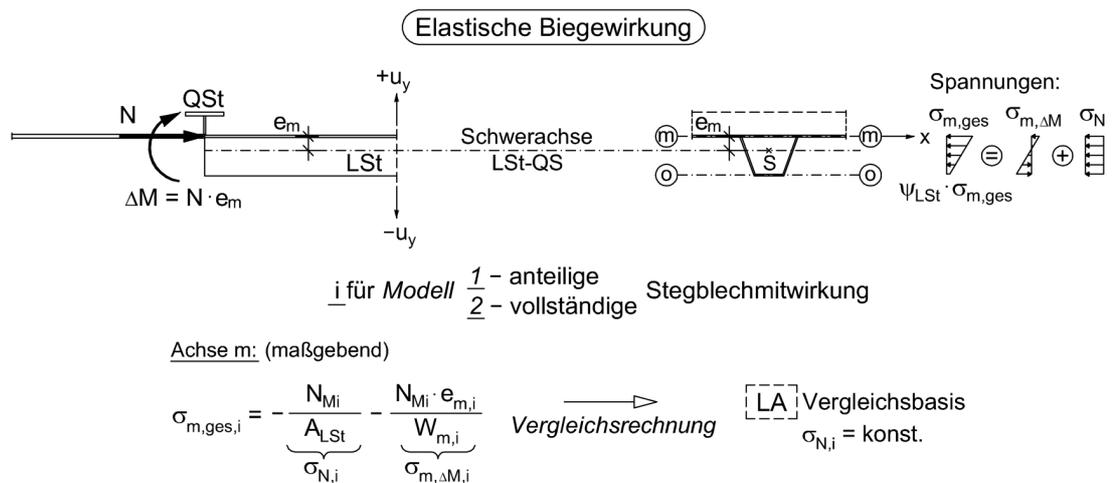


Abb. 4.3: Ingenieurmodell zur Erfassung der elastischen Biegewirkung an den endenden Längssteifen

In der nachfolgenden Tab. 4.4 (für *Modell 1*) und Tab. 4.5 (für *Modell 2*) sind die Biegeanteile $\sigma_{m,\Delta M}$ als Prozentsatz des Normalkraftanteils σ_N der Gesamtnormalspannung $\sigma_{m,ges}$ in der maßgebenden Achse m (Stegachse) und die je System zugehörige Differenz der Laststeigerungsfaktoren (ΔLSF) der untersuchten Systemen für den Fall mit endenden und durchlaufenden Längssteifen angegeben. Dabei wird mit dem Normalspannungsanteil σ_N der Handrechnung und der aus der linearen Analyse (LA) bekannten Gesamtspannung $\sigma_{m,ges}$ der FE-Vergleichswert für den Biegeanteil $\sigma_{m,\Delta M}$ ermittelt.

System	ψ [-]	t_{LSt} [mm]	Modell 1		LA	$\Delta\sigma_{m,\Delta M,1}$ M1/LA [%]	ΔLSF dl./end. [%]
			$\sigma_{N,1}$ [N/mm ²]	$\sigma_{m,\Delta M,1}$ [N/mm ²] ([% bzgl. $\sigma_{N,1}$])			
S1	1	8	-32,81 (100%)	-12,39 (37,7%)	-10,64 (32,4%)	+5,3	-16,9
	1	10	-32,36 (100%)	-15,21 (47,0%)	-13,03 (40,3%)	+6,7	-22,7
S2	1	8	-31,94 (100%)	-13,94 (43,6%)	-14,13 (44,2%)	-0,6	-26,8
	1	10	-31,46 (100%)	-16,91 (53,7%)	-17,56 (55,8%)	-2,1	-31,2
S3	1	8	-31,54 (100%)	-15,70 (49,8%)	-16,79 (53,2%)	-3,4	-28,4
S4	0	6	-27,47 (100%)	-5,33 (19,4%)	-5,45 (19,8%)	-0,4	-0,5

* gerechnet mit $\sigma_{N,1} = 100$ [%]

Tab. 4.4: Ergebnisüberblick der Vergleichsrechnung bzgl. der Längssteifenbiegewirkung – Modell 1

System	ψ [-]	t_{LSt} [mm]	Modell 2		LA	$\Delta\sigma_{m,\Delta M,2}$ M2/LA [%]	ΔLSF dl./end. [%]
			$\sigma_{N,2}$ [N/mm ²]	$\sigma_{m,\Delta M,2}$ [N/mm ²] ([% bzgl. $\sigma_{N,2}$])			
S1	1	8	-35,72 (100%)	-9,98 (27,9%)	-7,73 (21,6%)	+6,3	-16,9
	1	10	-35,72 (100%)	-12,30 (34,4%)	-9,67 (27,1%)	+7,3	-22,7
S2	1	8	-35,41 (100%)	-11,66 (32,9%)	-10,66 (30,1%)	+2,8	-26,8
	1	10	-35,41 (100%)	-14,25 (40,2%)	-13,61 (38,4%)	+1,8	-31,2
S3	1	8	-35,50 (100%)	-13,59 (38,3%)	-12,83 (36,1%)	+2,2	-28,4

* gerechnet mit $\sigma_{N,2} = 100$ [%]

Tab. 4.5: Ergebnisüberblick der Vergleichsrechnung bzgl. der Längssteifenbiegewirkung – Modell 2

Es zeigt sich, dass der durch die Blechdickenerhöhung bzw. höhere Längssteifenausbildung entstehende Steifigkeitszuwachs des Teilfeldes einen größeren Traglastabfall für Systeme mit endenden gegenüber durchlaufenden Längssteifen liefert. Mit zunehmender Steifigkeit steigt dabei, für jedes System, tendenziell auch die Exzentrizität und somit der Biegemomentenanteil ΔM sowie die Traglastreduktion ΔLSF . Für die untersuchten Systeme korrelieren die Ergebnisse hinsichtlich der maßgebenden Normalspannungen $\sigma_{m,ges,i}$ aus beiden Rechenmodellen mit den tatsächlichen FE-Werten in einem ausreichenden Maß. Für das empfohlene Ingenieurmodell wird jedoch nur das *Modell 1* weiter verfolgt.

4.2.3 Knickstabähnliches Verhalten χ_c (bzw. χ_c^*) des „Ersatzstabes“ endender Längssteifen für die untersuchten Systeme

Das knickstabähnliche Verhalten χ_c wird an dem als Ersatzstab betrachteten Längssteifenquerschnitt ermittelt. Die bezogene Knickschlankheit dieses „Längssteifenerersatzstabes“ wird mit der Knicklänge, welche der durch Quersteifen begrenzten Teilfeldlänge ($L_{cr} = a_{QSt}$) entspricht, berechnet. Die Querschnittswerte nach *Modell 1* (Steife und anteilig mitwirkender Steg) werden unmittelbar als Bruttoquerschnittswerte (konservative Annahme $\beta_{A,c} = 1,0[-]$) verwendet. Dabei wird für das *Modell 1* vereinfacht immer ein anteiliges Mitwirken der halben Stegblechbreite der an die Längssteife angrenzenden Einzelfelder angenommen. Eine weitere Annahme des Ingenieurmodells betrifft die ideale Knickspannung $\sigma_{cr,c}$, welche – ohne der Extrapolation zum Druckrand, wie es Eurocode 3-1-5 [1] vorsieht – unmittelbar der Knickspannung $\sigma_{cr,sl}$ auf Höhe der nahe am Druckrand gelegenen Längssteife gleichgesetzt wird (somit gilt $\sigma_{cr,c} = \sigma_{cr,sl}$). Der Reduktionsfaktor $\chi_{c,dl}$ des Eurocode 3-1-5 [1] für zentrisch unter Druck befindliche geschlossene, durchlaufende Längssteifen wird nach dem Bemessungsvorschlag in [5] vereinfacht mit der Knickspannungslinie (KSPL) c ermittelt. Der modifizierte Imperfektionsbeiwert α_e zur Berücksichtigung längsausgesteifter Teilfelder wird dabei mit dem Imperfektionsbeiwert α der Knickspannungslinie c gleichgesetzt (d. h. $\alpha_e = \alpha = 0,49[-]$). Dies deckt den Fall durchlaufender Längssteifen ab, während der Abminderungsfaktor χ_c (bzw. χ_c^*) für den Ersatzstab endender Längssteifen – unter der Beanspruchung von N und ΔM – auf diesem Wert $\chi_{c,dl}$ basiert und unter Erfüllung des Biegeknick-Nachweises für einfach-symmetrische Querschnitte berechnet wird. Die zusätzliche Erhöhung auf den Faktor χ_c^* – als versuchte Variante – ist in der Spannungsdifferenz zwischen dem Stegblech und dem Längssteifenquerschnitt des mittleren Teilfeldes begründet (Faktor $f_{\sigma,LSt} = \chi_c/\chi_c^*[-]$) und folgt aus reduzierter, realer Längssteifenbeanspruchung bei niederen Belastungsstufen (siehe Anhang C, Abschnitt 3).

Die Abb. 4.4 zeigt die schematische Vorgehensweise für die Ermittlung des knickstabähnlichen Verhaltens des „Längssteifenersatzstabes“ von Systemen mit endenden Längssteifen.

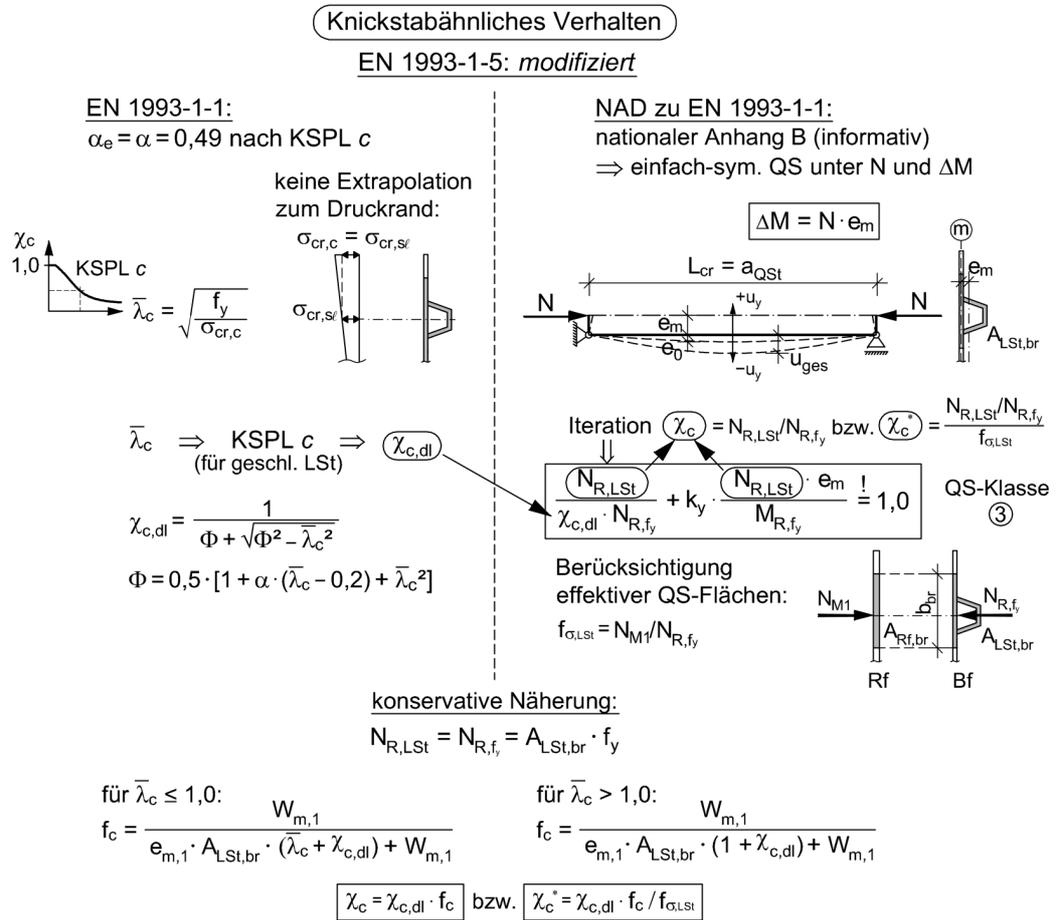


Abb. 4.4: Ingenieurmodell zur Ermittlung des knickstabähnlichen Verhaltens für den „Ersatzstab“ endender Längssteifen nach modifizierter Anwendung der Regelung des Eurocode 3-1-1 [2] und Anwendung des zur Hauptnorm zugehörigen Nationalen Anhangs B [3]

Der in Abb. 4.4 angeführte konservative Ansatz zur Ermittlung des knickstabähnlichen Verhaltens endender Längssteifen ohne Iteration basiert – wie die exakte Lösung – auf dem Abminderungsfaktor $\chi_{c,dl}$ für durchlaufende Längssteifen nach dem Ingenieurmodell des Eurocode 3-1-5 [1] (Ersatzstab unter zentrischem Druck). Daraufhin bedarf es, für die Bestimmung des Abminderungsfaktors χ_c (konservativ), lediglich der Einrechnung des angeführten Faktors f_c , wobei sich gemäß der vorliegenden Knick schlankheit zwei Fallunterscheidungen (für $\bar{\lambda}_c \leq 1,0$ [-] und $\bar{\lambda}_c > 1,0$ [-], da der Beiwert k_y aus [3] unterschiedlich definiert ist) ergeben. Als Variante erfolgte wiederum eine fiktive Erhöhung mittels des „Spannungsfaktors“ $f_{\sigma,LSt}$.

Die anschließende Tab. 4.6 gibt die für die Ermittlung des knickstabähnlichen Verhaltens χ_c bzw. χ_c^* benötigten Bemessungsgrößen des Längssteifenbruttoquerschnittes (nach *Modell 1*) des – unter N und ΔM (Biegeknicken) beanspruchten – Ersatzstabes von endenden Längssteifen und des – zentrisch unter N (Knicken) beanspruchten – Ersatzstabes von durchlaufenden Längssteifen für die untersuchten Systeme wieder.

System	ψ [-]	t_{LSt} [mm]	$\bar{\lambda}_c$ [-]	$\sigma_{cr,c} = \sigma_{cr,st}$ [N/mm ²]	dl. LSt	end. LSt	
					$\chi_{c,dl}$ [-]	χ_c („ohne $f_{\sigma,LSt}$ “) [-]	χ_c^* („mit $f_{\sigma,LSt}$ “) [-]
S1	1	8	0,973	375,25	0,556	0,409	0,442
	1	10	0,938	403,86	0,577	0,399	0,437
S2	1	8	0,526	1281,80	0,828	0,556	0,618
	1	10	0,512	1354,92	0,836	0,525	0,593
S3	1	8	0,376	2509,01	0,910	0,583	0,656
S4	0	6	1,035	331,60	0,520	0,438	0,567

Tab. 4.6: Knickstabähnliches Verhalten von endenden und durchlaufenden (vereinfacht nach KSPL c) Längssteifen – *Modell 1* „mit $f_{\sigma,LSt}$ “ (χ_c^*) bzw. „ohne $f_{\sigma,LSt}$ “ (χ_c)

Die Abb. 4.5 zeigt das knickstabähnliche Verhalten des „Längssteifenersatzstabes“ für jedes der untersuchten Systeme mit endenden Längsteifen (explizit ausgewiesen sind – jeweils für $a_{QSt} = 3000$ [mm] – χ_c^* für das System S1, S2 und S3 und χ_c für das System S4) anhand weiterer angenommener Knicklängen ($a_{QSt} = 1500$ [mm] bis 4500[mm] mit einer Schrittweite von jeweils 500[mm]) im Vergleich zur Knickspannungslinie c (KSPL mit $\alpha = 0,49$ [-]) nach Eurocode 3-1-5 [1] für geschlossene, durchlaufende Längsteifen.

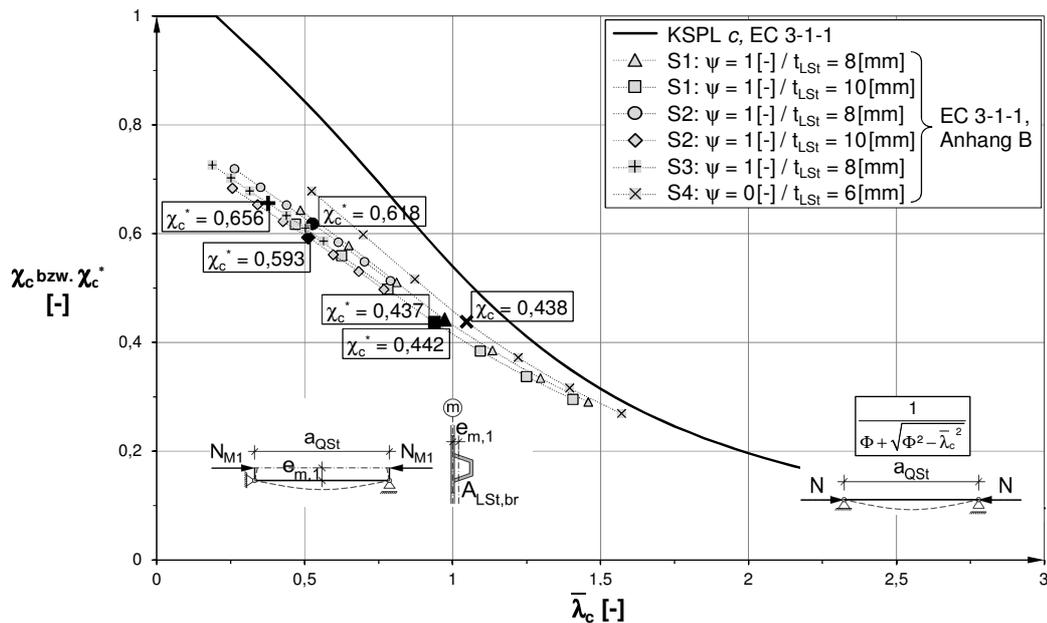


Abb. 4.5: Ergebnisübersicht für das knickstabähnliche Verhalten des „Längssteifenersatzstabes“ von endenden Längssteifen mit der Knicklänge $a_{QSt} = 1500[mm]$ bis $4500[mm]$ (Schrittweite von $500[mm]$) aller Systeme für *Modell 1*

Die Abb. 4.5 zeigt den Einfluss der zusätzlichen Exzentrizität $e_{m,1}$ (nach *Modell 1* – siehe Anhang B, Abschnitt 2.1), welcher mit kleiner werdender Knicklänge a_{QSt} zunimmt.

4.2.4 Plattenartiges Verhalten ρ_p des längsausgesteiften Teilfeldes für die untersuchten Systeme mit endenden Längssteifen

Unter Anwendung der globalen Eigenwerte $\phi_{cr, glob}$ aus der linearen Beulanalyse (LBA) wurden die elastischen kritischen Plattenbeulspannungen $\sigma_{cr, p}$ ermittelt. Aufgrund der Randfeldstützung ergeben sich erhöhte Eigenwerte für endende Längssteifen und somit ein ebenfalls erhöhter Abminderungsfaktor $\rho_{p, end}$ für Plattenbeulen (im Eurocode als ρ notiert). Darüber hinaus bestimmt $\sigma_{cr, p}$ maßgeblich die Iteration zwischen knickstabähnlichen Verhalten (χ_c) und Plattentragverhalten (ρ_p), ausgedrückt durch den Beiwert $\xi = (\sigma_{cr, p} / \sigma_{cr, c}) - 1$. Da letztlich die Anwendung der globalen Eigenwerte von Systemen mit endenden Längssteifen jedoch teils den tatsächlichen Traglastergebnissen (LSF aus GMNIA) widerspricht, werden die minderhohen globalen Eigenwerte von durchlaufenden Längssteifen für die Nachweisführung zum Vergleich verwendet und es ergibt sich der empfohlene Reduktionsfaktor $\rho_{p, dl}$ für plattenartiges Verhalten. Die Eigenwertermittlung kann daher beispielsweise mit Tabellenwerken (konservativ) oder einfachen Beulprogrammen an isolierten – rundum starr gestützten – Teilfeldern erfolgen.

Die Ermittlung des plattenartigen Verhaltens von längsausgesteiften Teilfeldern mit endenden Längssteifen wird in Abb. 4.6 zusammenfassend dargestellt.

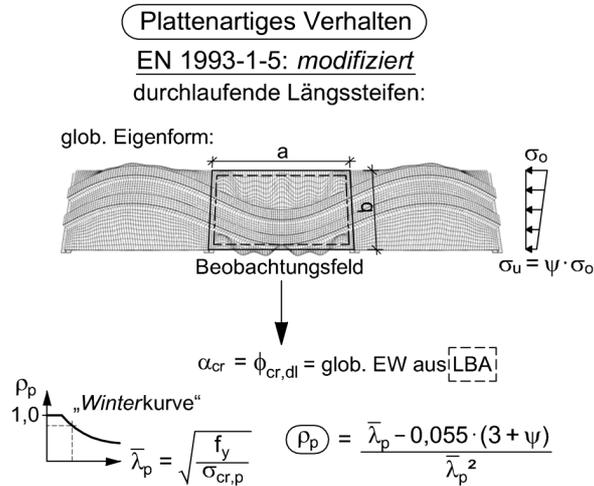


Abb. 4.6: Ingenieurmodell zur Ermittlung des plattenartigen Verhaltens für das längsausgesteifte Teilfeld mit endenden Längssteifen nach modifizierter Anwendung der Regelung des Eurocode 3-1-5 [1]

Die anschließende Tab. 4.7 fasst die Bemessungsgrößen des Plattenbeulverhaltens, getrennt für die globalen Eigenwerte der untersuchten Systeme mit endenden („mit $\phi_{cr,end}$ “) und durchlaufenden Längssteifen („mit $\phi_{cr,dl}$ “), zusammen.

System	ψ [-]	t_{LSt} [mm]	end. LSt – „mit $\phi_{cr,end}$ “			dl. LSt – „mit $\phi_{cr,dl}$ “		
			$\sigma_{cr,p}$ [N/mm ²]	$\bar{\lambda}_p$ [-]	$\rho_{p,end}$ [-]	$\sigma_{cr,p}$ [N/mm ²]	$\bar{\lambda}_p$ [-]	$\rho_{p,dl}$ [-]
S1	1	8	480,14	0,860	0,865	412,320	0,928	0,822
	1	10	515,73	0,830	0,886	445,340	0,893	0,844
S2	1	8	n.v.	1,148	0,704	n.v.	1,009	0,775
	1	10	n.v.	1,166	0,696	n.v.	0,994	0,783
S3	1	8	n.v.	1,183	0,688	n.v.	1,011	0,774
S4	0	6	611,14	0,762	1,0	529,070	0,819	0,975

Tab. 4.7: Plattenbeulverhalten von endenden und durchlaufenden Längssteifen – Modell 1 „mit $\phi_{cr,end}$ “ bzw. „mit $\phi_{cr,dl}$ “

4.2.5 Resultierende Beultragfähigkeit $\rho_c \cdot f_y$ des längsausgesteiften Teilfeldes mit endenden Längssteifen im Vergleich zur FE-Berechnung

Die größtmögliche ertragbare Druckbeanspruchung σ_o der resultierenden Beultragfähigkeit an den Teilfeldrändern entspricht gemäß der „Methode der reduzierten Spannungen“. $\sigma_o = \rho_c \cdot f_y$. Der resultierende Abminderungsfaktor ρ_c setzt sich aus dem knickstabähnlichen (χ_c bzw. χ_c^*) und plattenartigen (ρ_p) Mechanismus zusammen. Die Gewichtung des im Ingenieurmodell vorliegenden Verhaltens wird durch den Verhältnisfaktor $\xi = (\sigma_{cr,p}/\sigma_{cr,c}) - 1$ (reines knickstabähnliches Verhalten: $\xi = 0[-]$; alleiniges Plattenbeulverhalten: $\xi = 1,0[-]$) ausgedrückt. Die ermittelte Interaktionsgröße ξ gibt dabei nicht zwingend das real vorliegende Verhalten an und ist somit als reine Beiwertgröße des Ingenieurmodells des Eurocode anzusehen. Letztlich ergeben sich, aufgrund unterschiedlicher Bemessungsannahmen, vier Varianten für die resultierende Beultragfähigkeit. Dies sind zwei für das knickstabähnliche („ohne $f_{\sigma,LSt}$ “ bzw. „mit $f_{\sigma,LSt}$ “ – d.h. ohne bzw. mit fiktiver Erhöhung des Abminderungsfaktors χ_c aufgrund der Flächen- und folglich Spannungsdifferenz zwischen dem Rand- (ohne Längssteifen) und dem längsausgesteiften Teilfeld) und zwei für das plattenartige Verhalten („mit $\phi_{cr,end}$ “ bzw. „mit $\phi_{cr,dl}$ “ – d.h. Beulspannungsermittlung $\sigma_{cr,p}$ am System mit endenden bzw. durchlaufenden Längssteifen).

Letztlich wird – in allen vier Bemessungsvarianten – der Abminderungsfaktor ρ_c der resultierenden Beultragfähigkeit – aufgrund identer Lastniveaus, d.h. die Druckspannung im längsausgesteiften Teilfeld entspricht $\sigma_{m,N,GMNIA} = f_y$ – den nichtlinearen FE-Ergebnissen (LSF) gemäß Abb. 4.7 gegenübergestellt.

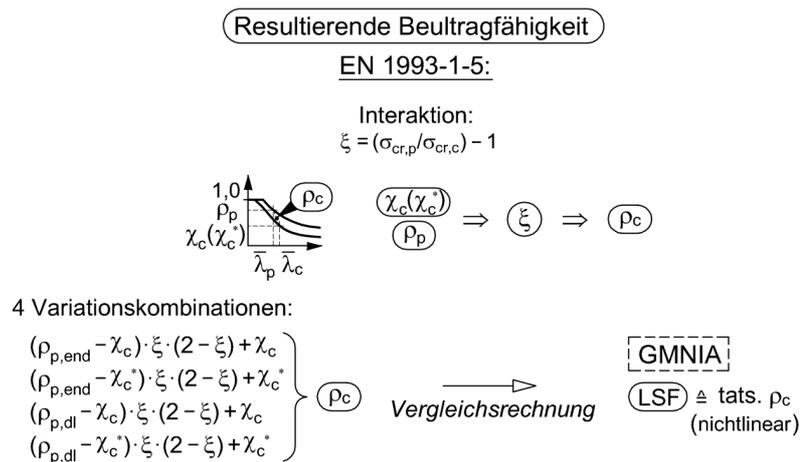


Abb. 4.7: Ingenieurmodell zur Ermittlung des resultierenden Abminderungsfaktors der Beultragfähigkeit für das längsausgesteifte Teilfeld mit endenden Längssteifen nach Eurocode 3-1-5 [1]

In der nachfolgenden Tab. 4.8 und Tab. 4.9 werden zwei („ohne $f_{\sigma, \text{LSt}}$ / mit $\phi_{\text{cr, dl}}$ “ und „mit $f_{\sigma, \text{LSt}}$ / mit $\phi_{\text{cr, dl}}$ “) ausgewählte Varianten des für endende Längssteifen ergänzten Ingenieurmodells (jene mit der zutreffendsten Übereinstimmung zu den tatsächlichen FE-Werten) zur Ermittlung der Beultragfähigkeit von Teilfeldern mit endenden Längssteifen angegeben. Zudem sind die Ergebnisdifferenzen $\Delta(\rho_c/\text{LSF})$ für die resultierenden Abminderungsfaktoren ρ_c der Beultragfähigkeit des Ingenieurmodells im Vergleich zu den Laststeigerungsfaktoren (LSF) der numerischen Traglastanalyse angeführt.

System	ψ [-]	t_{LSt} [mm]	Modell 1 – „ohne $f_{\sigma, \text{LSt}}$ / mit $\phi_{\text{cr, dl}}$ “				GMNIA	$\Delta(\rho_c/\text{LSF})$ M1/GMNIA [%]
			χ_c [-]	$\rho_{p, dl}$ [-]	ξ [-]	ρ_c [-]	LSF [-]	
S1	1	8	0,409	0,822	0,099	0,487	0,557	-12,6
	1	10	0,399	0,844	0,103	0,486	0,548	-11,3
S2	1	8	0,556	0,775	0	0,556	0,624	-10,9
	1	10	0,525	0,783	0	0,525	0,601	-12,6
S3	1	8	0,583	0,774	0	0,583	0,620	-6,0
S4	0	6	0,438	0,975	0,596	0,887	0,772	+14,9

Tab. 4.8: Ergebnisvergleich der Beultragfähigkeit (ρ_c bzw. LSF) für Modell 1 – „ohne $f_{\sigma, \text{LSt}}$ / mit $\phi_{\text{cr, dl}}$ “

System	ψ [-]	t_{LSt} [mm]	Modell 1 – „mit $f_{\sigma, \text{LSt}}$ / mit $\phi_{\text{cr, dl}}$ “				GMNIA	$\Delta(\rho_c/\text{LSF})$ M1/GMNIA [%]
			χ_c^* [-]	$\rho_{p, dl}$ [-]	ξ [-]	ρ_c [-]	LSF [-]	
S1	1	8	0,442	0,822	0,099	0,514	0,557	-7,7
	1	10	0,437	0,844	0,103	0,517	0,548	-5,7
S2	1	8	0,618	0,775	0	0,618	0,624	-1,0
	1	10	0,593	0,783	0	0,593	0,601	-1,3
S3	1	8	0,656	0,774	0	0,656	0,620	+5,8
S4	0	6	0,567	0,975	0,596	0,908	0,772	+17,6

Tab. 4.9: Ergebnisvergleich der Beultragfähigkeit (ρ_c bzw. LSF) für Modell 1 – „mit $f_{\sigma, \text{LSt}}$ / mit $\phi_{\text{cr, dl}}$ “

Für die Systeme S1 und S2 mit konstanter Drucknormalbeanspruchung ergeben sich mit der Variationskombination „mit $f_{\sigma,LS1}$ / mit $\phi_{cr,dl}$ “ Unterschätzungen der tatsächlichen Beultragfähigkeit von 1% bis 8%. Das System S3 ist aufgrund der überhöhten Steifigkeitsverhältnisse ($\bar{\lambda}_c = 0,376$ [-]) kein praxisgerechtes Fallbeispiel und stellt für das Ingenieurmodell den Grenzfall eines nicht knickgefährdeten Druckstabes dar (Übergang zum reinen Querschnittsnachweis aus N und ΔM). Es ergibt sich dabei, unter Berücksichtigung der Kombination „mit $f_{\sigma,LS1}$ / mit $\phi_{cr,dl}$ “, eine Überschätzung der Tragfähigkeit von 6%, wohingegen bei der Kombination „ohne $f_{\sigma,LS1}$ / mit $\phi_{cr,dl}$ “ die Beultragfähigkeit um 6% unterschätzt wird. Das System S4 mit linear veränderlicher Druckspannungsverteilung $\psi = 0$ [-] hingegen wird mit 15% („ohne $f_{\sigma,LS1}$ / mit $\phi_{cr,dl}$ “) überschätzt. Im Falle des Systems S4 zeigt eine nichtlineare Spannungsauswertung, dass bereits in der Längssteife ein Querschnittsversagen auftritt. Auf eine Berücksichtigung des günstigen Faktors $f_{\sigma,LS1}$ sollte somit verzichtet werden. Da aufgrund des Interaktionsfaktors ξ in beiden Fällen plattenartiges Verhalten dominiert, wird beispielsweise eine reduzierte Überschätzung von 6% mit der Annahme von $\psi = 1,0$ [-] (wie im Bemessungsvorschlag in [5] für das gleiche System mit durchlaufenden Längssteifen vorgesehen) für die Bestimmung des bezogenen Plattenschlankheitsgrades $\bar{\lambda}_p$ und mittels dem Reduktionsfaktor χ_c („ohne $f_{\sigma,LS1}$ “) für das knickstabähnliche Verhalten sichergestellt. Anzumerken ist, dass für das System S4 auch im Falle von durchlaufenden Längssteifen ähnliche Überschätzungen der Traglast vorliegen.

Das Ingenieurmodell für an Teilfeldrändern endende Längssteife – auch in Form der konservativen Näherungslösung – stellt somit für alle untersuchten Systeme durch die angepasste Anwendung der Eurocode-Regelung durchwegs hinreichende Übereinstimmungen mit den tatsächlichen FE-Ergebnissen für die Ermittlung des Effekts endender Längssteifen her. Für die Bemessung maßgeblich sind immer die systembedingten Geometriegrößen wie die Beulfeldgeometrie und die Steifenausbildung (Bauform und -höhe, Blechdicke).

Die nachfolgende Abb. 4.9 stellt zusammenfassend für alle untersuchten Systeme die einzelnen resultierenden Beultragfähigkeiten ρ_c sowie die Basisgrößen χ_c bzw. χ_c^* und ρ_p dar. Dabei werden das knickstabähnliche (χ_c^* für die Systeme S1, S2 sowie S3 und χ_c für das System S4) und das plattenartige Verhalten ($\rho_{p,dl}$ für alle Systeme) der Knickspannungslinie c (KSPL mit $\alpha = 0,49[-]$) und den Beulspannungskurven nach Winter ($\psi = 1,0[-]$ und $\psi = 0[-]$ als Grenzkurven) gemäß Eurocode 3-1-5 [1] gegenübergestellt.

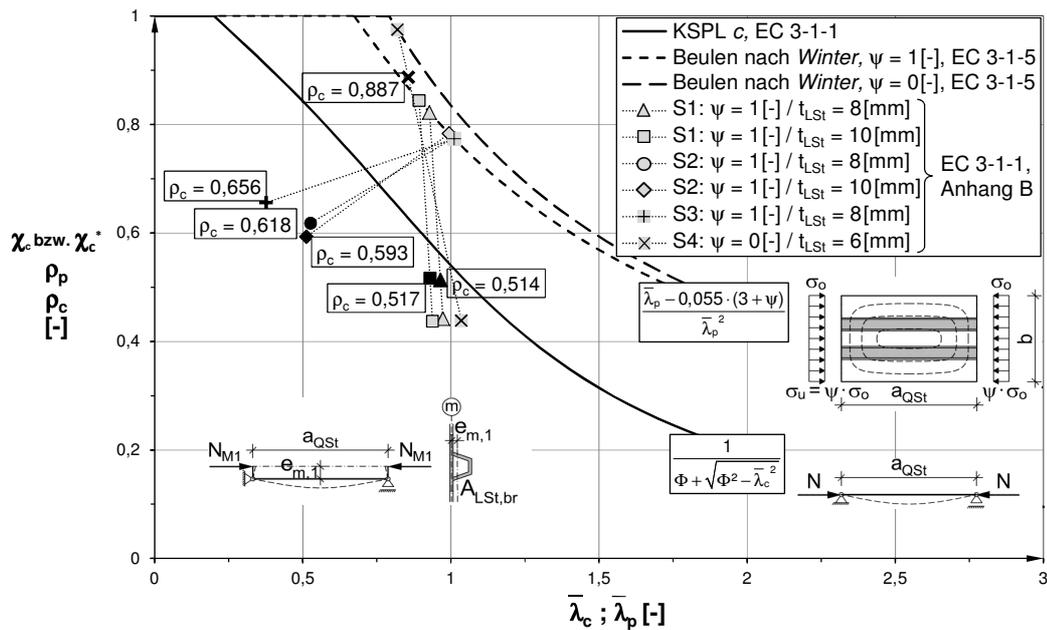


Abb. 4.8: Ergebnisübersicht der Abminderungsfaktoren χ_c bzw. χ_c^* , ρ_p und ρ_c für die Ermittlung der Beultragfähigkeit von Teilfeldern mit endenden Längssteifen aller Systeme für Modell 1

Anmerkung:

Für jedes der einzelnen untersuchten Systeme sind die Abminderungsfaktoren für die Ermittlung der resultierenden Beultragfähigkeit $\rho_c \cdot f_y$ wie folgt dargestellt:

- Der Abminderungsfaktor χ_c bzw. χ_c^* des knickstabähnlichen Verhaltens wird über die zugehörige bezogene Knickschlankheit $\bar{\lambda}_c$ des „Längssteifenersatzstabes“ aufgetragen.
- Der Abminderungsfaktor ρ_p des plattenartigen Verhaltens wird über die zugehörige Plattenschlankheit $\bar{\lambda}_p$ des längsausgesteiften Teilfeldes aufgetragen.
- Die resultierende Beultragfähigkeit ρ_c ist auf der Verbindungsgerade ($\chi_c \rho_p$ bzw. $\chi_c^* \rho_p$) eingetragen, d.h. die vermeintlich zugehörige Schlankheit (Abszisse) ist bedeutungslos.

Für die Systeme S2 und S3 entsprechen die resultierenden Abminderungsfaktoren ρ_c – aufgrund des jeweils ermittelten Interaktionsbeiwertes $\xi = 0[-]$ – unmittelbar den zugehörigen Abminderungsfaktoren χ_c^* für knickstabähnliches Verhalten.

- [1] ÖNORM EN 1993-1-5, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-5: Plattenbeulen, Ausgabe 2005-11-01, Österreichisches Normungsinstitut
- [2] ÖNORM EN 1993-1-1, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, Ausgabe 2006-10-01, Österreichisches Normungsinstitut
- [3] ÖNORM EN 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, Ausgabe 2007-02-01, Österreichisches Normungsinstitut
- [4] *Dassault Systèmes Simulia Corp.*, Softwarepaket ABAQUS, Version 6.10-1, 2010
- [5] *Gänsluckner G.*: Beultragfähigkeit längsausgesteifter Biegeträger, Diplomarbeit, November 2009, Institut für Stahlbau und Flächentragwerke, TU Graz
- [6] *Uttenthaler G.*: Untersuchung zur plastischen Tragfähigkeit im Verbundbrückenbau, Diplomarbeit, November 2008, Institut für Stahlbau und Flächentragwerke, TU Graz
- [7] *Dassault Systèmes Simulia Corp.*, ABAQUS User's Manual, Version 6.10, 2010
- [8] *Boissonnade N., Degèe H., Naumes J., Oppe M.*, Experimental and numerical investigations for I-girders in bending and shear stiffened by trapezoidal stiffeners, march 2008, International Journal for Advanced Steel Construction Vol. 4, No. 1, p. 1-12
- [9] *Klöppel K., Scheer J.*: Beulwerte ausgesteifter Rechteckplatten, Band 1, 1960, Ernst & Sohn
- [10] *Sedlacek G., Eisel H., Hensen W., Kühn B., Paschen M.*: Leitfaden zum DIN Fachbericht 103 Stahlbrücken, Ausgabe März 2003, Ernst & Sohn
- [11] *Greiner R., Unterweger H.*: Stahlbau, Skriptum, Ausgabe 2007, Institut für Stahlbau und Flächentragwerke, TU Graz

NUMERISCHE TRAGLASTANALYSE

1 Grundlagen

In diesem Anhang sind die einzelnen Berechnungsschritte zum Erhalt der numerisch zu bestimmenden Traglast von längsausgesteiften Teilfeldern mit endenden Längssteifen angeführt. Die restlichen Teilfelder weisen eine versetzte Steifenanordnung und unter Umständen eine reduzierte Steifenanzahl (d. h. eine erhöhte Beulfeldhöhe b_{EF} der Einzelfelder) auf. Durch den einseitigen Anschluss der Steifen an das Stegblech der Beulfelder und die exzentrische Lasteinleitung entsteht eine zusätzliche Biegebeanspruchung für die Längssteifen.

Bei den untersuchten Systemen handelt es sich um schlanke, längs- und querausgesteifte Vollwandträger, welche sich in drei Teilfelder gliedern. Es werden ein maßgebendes Mittelfeld (Beobachtungsfeld) und zwei angrenzende Randfelder, welche jeweils durch Quersteifen getrennt sind, modelliert (siehe nachfolgende Abb. 1.1). Zu ermitteln ist das Systemverhalten unter dem Einfluss der gewählten Längs- und Quersteifengeometrie, der Ausbildung der Randfelder, sowie der Auswirkung durch konstante ($\psi = 1,0[-]$) und linear veränderliche Normalspannungsverteilungen ($\psi < 1,0[-]$). Es ergeben sich durch Variation dieser Parameter auch unterschiedliche Steifigkeitsverhältnisse für das Gesamtsystem, da an den Spannungsverlauf angepasste Längssteifenlagen vorgegeben sind. Besondere Bedeutung wird der Teilfeldstruktur zugemessen, deren Randfelder die ungestörte Lasteinleitung gewährleisten, selbst jedoch den kleinstmöglichen Steifigkeitseinfluss auf das maßgebende mittlere Beobachtungsfeld bewirken sollen. Diesbezüglich wird rechnerisch der fiktive Grenzfall simuliert, dass die Längssteifen in den Randfeldern nahezu keine Fläche aufweisen und somit die Lasteinleitung in das mittlere Teilfeld nur über den Steg erfolgt. Es besteht somit die Notwendigkeit einer Analyse bezüglich verschiedener Varianten, durch deren Annahme die äußeren Beulfelder gelagert bzw. gestützt werden. Folglich werden eine gesonderte Stützungsmethode sowie eine zusätzliche Blechdickenerhöhung für die Randfelder vorgesehen.

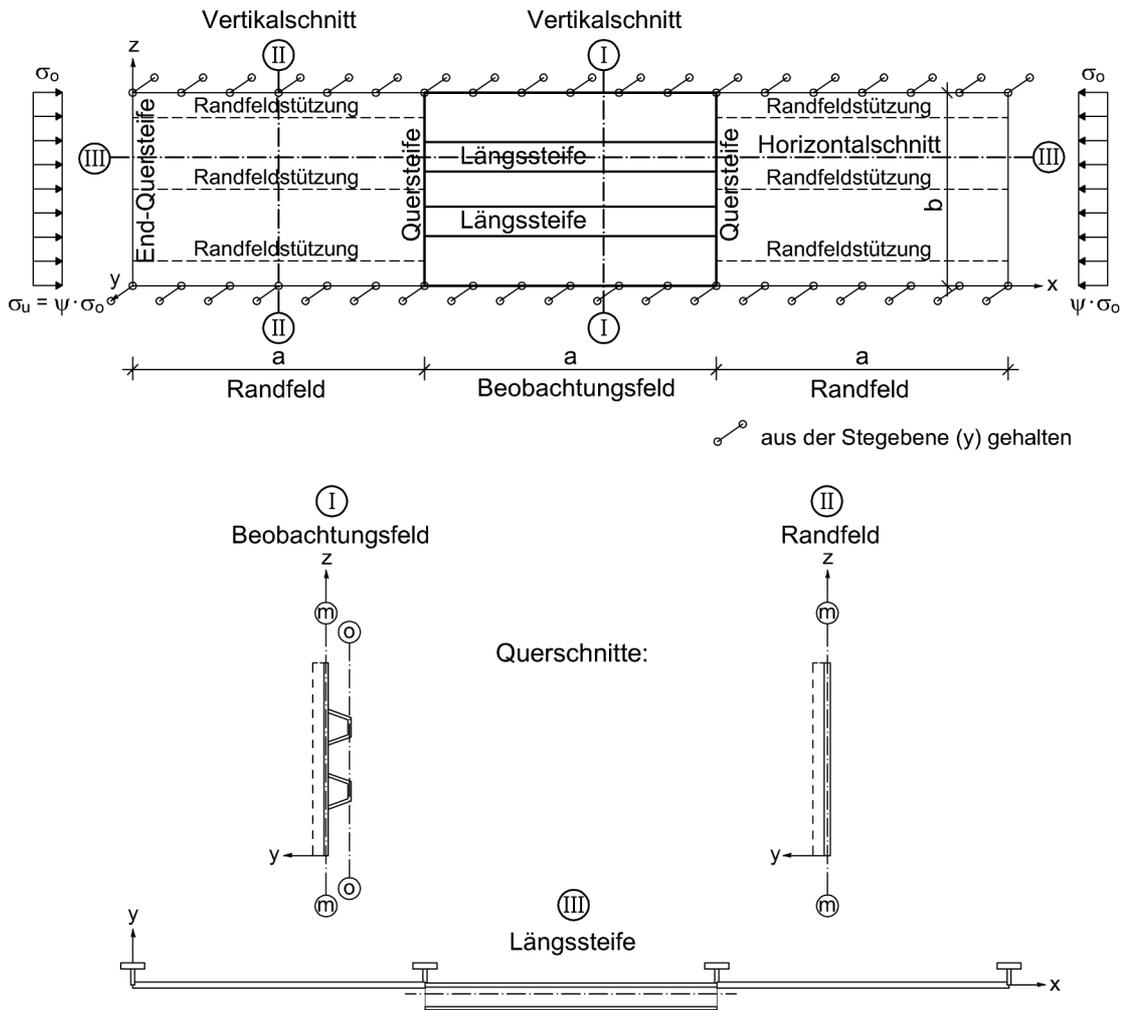


Abb. 1.1: Systemübersicht für System S1 mit Lage der Schnittführung I, II und III (Erläuterung zur Randfeldstützung folgt in Abschnitt 4.1)

Im Vorfeld der Traglastberechnung mittels des FE-Programmpakets ABAQUS [4] wird eine lineare Analyse (LA) durchgeführt, welche Aufschluss über die tatsächlichen Verformungs- und Spannungsverläufe gibt. Die für die Traglaststudie benötigten Eigenwerte und Eigenformen werden in einer linearen Beulanalyse (LBA) gesondert ermittelt. Nach den Regelungen gemäß Eurocode 3-1-5, Anhang A [1], werden die maßgebenden lokalen und globalen Eigenwerte gewählt und es erfolgt die Ermittlung der idealen Plattenbeulspannungen und der tatsächlichen Beulwerte. Für die nichtlineare Traglaststudie (GMNIA) werden geometrische und strukturelle Imperfektionen nach Eurocode 3-1-5, Anhang C [1], ersatzweise mittels vereinfachter geometrischer Verformungsansätze (affin zum Eigenformverlauf) berücksichtigt. Die dabei ermittelte Traglast wird durch den Laststeigerungsfaktor (LSF) ausgedrückt. Sämtliche angeführten Verformungs- und Spannungsdiagramme stellen eine Ergänzung für die FE-Studie dar, ermöglichen die Plausibilitätskontrolle der numerischen Ergebnisse und bilden die Grundlage für die Vergleichsrechnung zur Erfassung der Biegewirkung en-

dender Längssteifen (siehe Anhang B). Die Abb. 1.2 zeigt das FE-Modell des Systems S1 stellvertretend und sinngemäß für alle weiteren untersuchten Systeme.

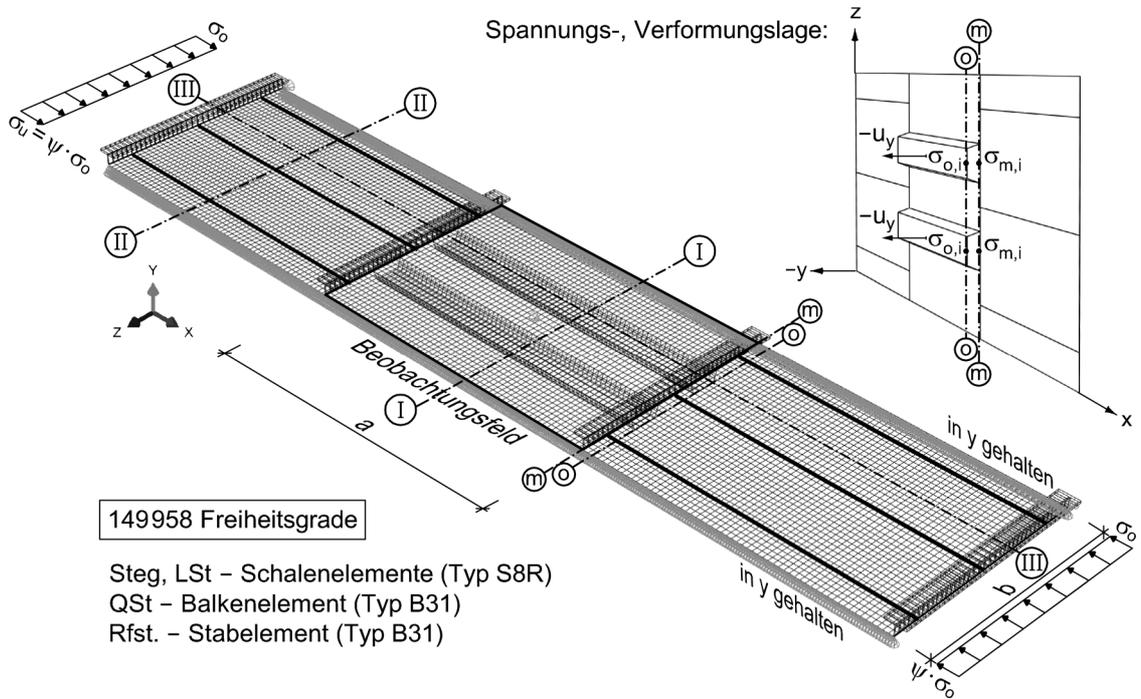


Abb. 1.2: Realitätsnahes FE-Modell für System S1 (Stützung der Randfelder mittels fiktiver Längssteifen ohne Dehnsteifigkeit; siehe Abschnitt 4.1.2)

2 Untersuchte Systeme

Für die Berechnung mit endenden Längssteifen in dieser Arbeit werden die dafür maßgebenden Systeme aus der Diplomarbeit *Gänsluckner* [5] mit durchlaufenden Längssteifen gewählt. Zu diesen zählt das System S1 als Grundfall, das System S2 mit hohen Längssteifen und das unsymmetrische System S4 (entspricht System S5 aus [5]). Erweitert wird die Untersuchung mit dem System S3, welches überhöhte Längssteifen aufweist. Die Systeme unterscheiden sich voneinander durch die jeweils vorhandene Längssteifenausführung, das Seitenverhältnis α ($= a/b[-]$), als auch durch die Normalspannungsverteilung ψ . Zudem werden für die Systeme S1 und S2 die Blechdicken der Längssteifen ($t_{LSt} = 8$ bzw. 10 [mm]) variiert.

2.1 System S1, S2 und S3

a.) Mittelfeld (maßgebendes Beulfeld)

Die in Abb. 2.1 dargestellten Systeme S1, S2 und S3 bestehen aus zwei, in den Drittelpunkten des Stegbleches ($t_w = 10$ [mm] für das mittlere Teilfeld) befindlichen, trapezförmigen Längssteifen ($t_{LSt} = 8$ bzw. 10 [mm], wie Abb. 2.3 und Abb. 2.4 zeigt). Die Höhe der Längssteifen beträgt 100 [mm] für das System S1, 200 [mm] für das System S2 und 300 [mm] für das System S3. Die Quersteifen gemäß Abb. 2.6 sind nur an einer Stegseite angeordnet. Für alle drei Systeme ergibt sich jeweils die Beulfeldgeometrie $\alpha = a/b = 1,5$ [-] und es liegt immer die konstante Normalspannungsverteilung $\psi = 1,0$ [-] vor.

b.) Modellierung der Randfelder

Für das System S1 ($t_{LSt} = 8$ [mm]) erfolgt eine Analyse über den Einfluss verschiedener Stützungsarten der Randfelder auf die Systemtraglast. Aufgrund der Lasteinleitung über das Stegblech des Randfeldes besteht die Notwendigkeit, diese derart auszusteiern, sodass kein die Traglast bestimmendes Beulverhalten in den Randfeldern auftritt. Durch Stützungen des Steges, biegesteife Krafteinleitungslängssteifen und Blechdickenerhöhungen wird dies unterschiedlich erfasst. Die detaillierte Erläuterung zu diesen Ausbildungen finden sich in Abschnitt 4.1 dieses Anhangs. Für die Systeme S1 ($t_{LSt} = 10$ [mm]), S2 und S3 wird ausschließlich eine Stützungsmethode (nach Variante 2 in Abschnitt 4.1.2.1) aufgrund der Erkenntnisse aus der Untersuchung für das System S1 ($t_{LSt} = 8$ [mm]) angeordnet. Beide Randfelder erhalten eine Blechdicke von 15 [mm].

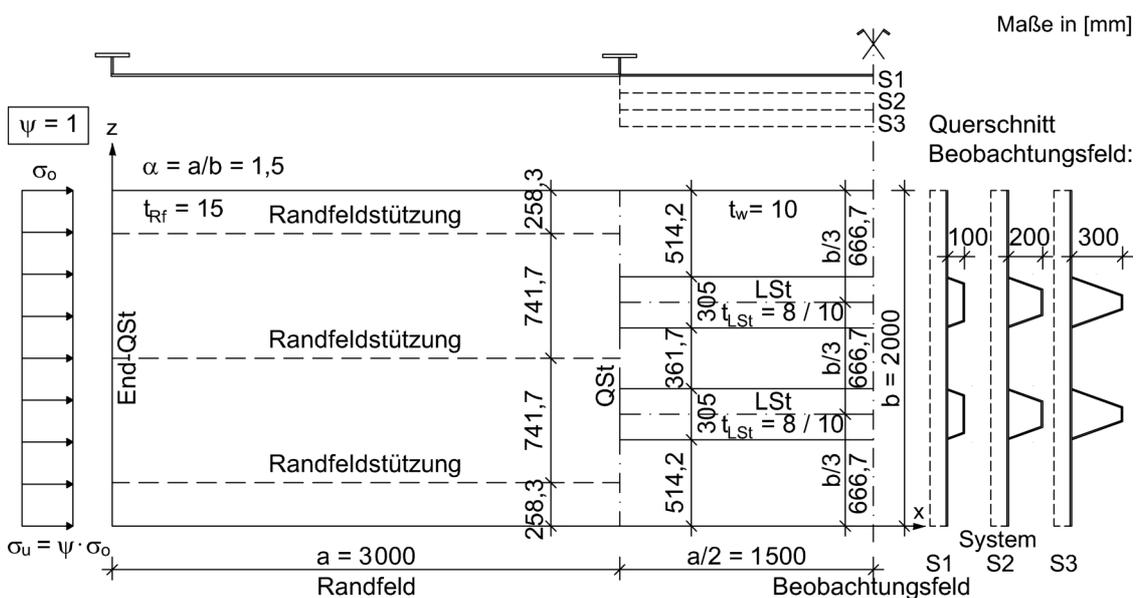


Abb. 2.1: System S1, S2 und S3 (Systemhälfte)

2.2 System S4

a.) Mittelfeld (maßgebendes Beulfeld)

Der Biegeträger des Systems S4 in Abb. 2.2 entspricht dem System S5 in [5], jedoch in der Ausführung mit endenden Längssteifen im Mittelfeld. Dieses System gibt ein praxisgerechtes Beispiel für einen sehr unsymmetrischen Biegeträger (Hauptträger einer Deckbrücke) mit einer fiktiven Lastverteilung $\psi = 0[-]$ wieder. Es werden dreiecksförmige Hohlsteifen gemäß Abb. 2.5 mit einer Blechdicke von $t_{LSt} = 6[\text{mm}]$ verwendet. Der Abstand der Längssteifen wird zum unteren Stegrand ($\sigma_u = 0[\text{N}/\text{mm}^2]$) erhöht, wodurch sich ein annähernd identer Beulwiderstand für die zwischenliegenden Einzelfelder ergibt. Die Stegblechdicke t_w im mittleren Beobachtungsfeld beträgt $12[\text{mm}]$ und es liegt ein Seitenverhältnis von $\alpha = a/b = 0,86[-]$ vor. Der verwendete Quersteifentyp ist in Abb. 2.6 dargestellt.

b.) Modellierung der Randfelder

Die Randfelder erhalten wie die Systeme S1, S2 und S3 die Stützungsmaßnahme entsprechend der *Variante 2* aus Abschnitt 4.1.2.1, sowie eine erhöhte Blechdicke von $20[\text{mm}]$.

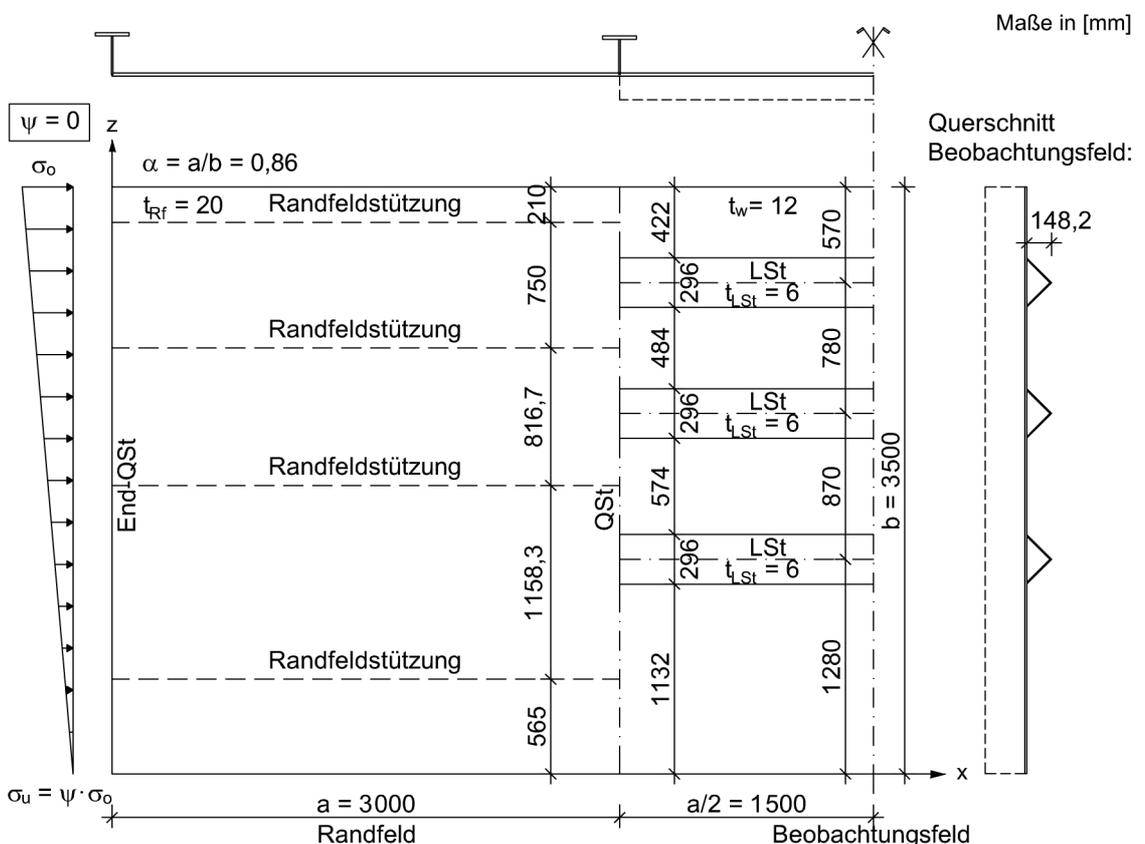


Abb. 2.2: System S4 (Systemhälfte)

2.3 Längssteifenausbildung

Die Systeme S1, S2 und S3 bestehen, wie in Abb. 2.3 und Abb. 2.4 dargestellt, aus trapezförmigen und das System S4, gemäß Abb. 2.5, aus dreiecksförmigen Hohlsteinen.

2.3.1 System S1, S2 und S3

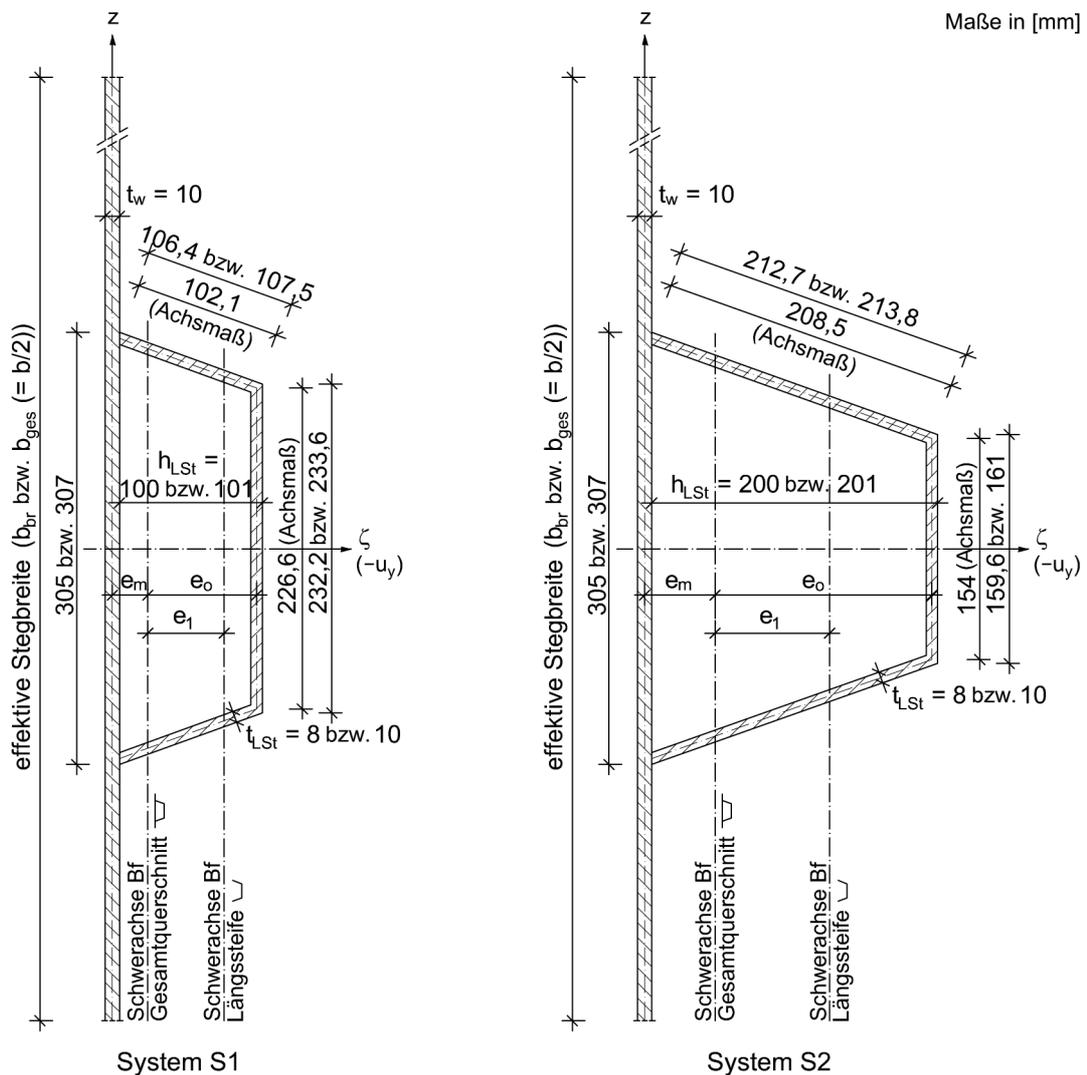


Abb. 2.3: Längssteifengeometrie für das System S1 und S2 mit $t_{LSt} = 8$ [mm] (nach [5]) bzw. 10 [mm]

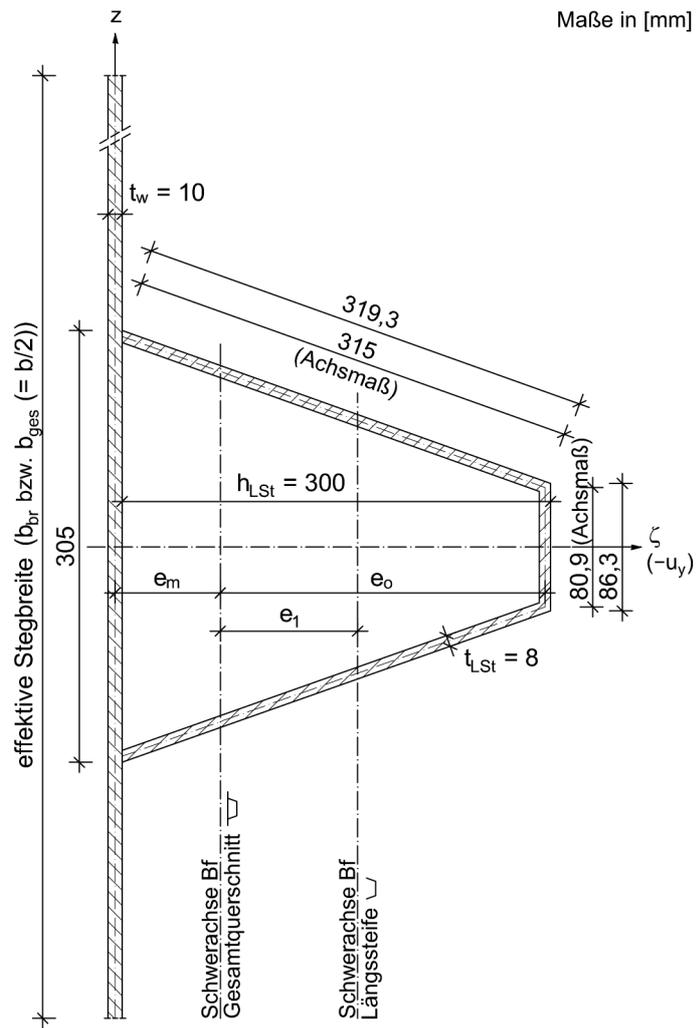


Abb. 2.4: Längssteifengeometrie für das System S3

2.3.2 System S4

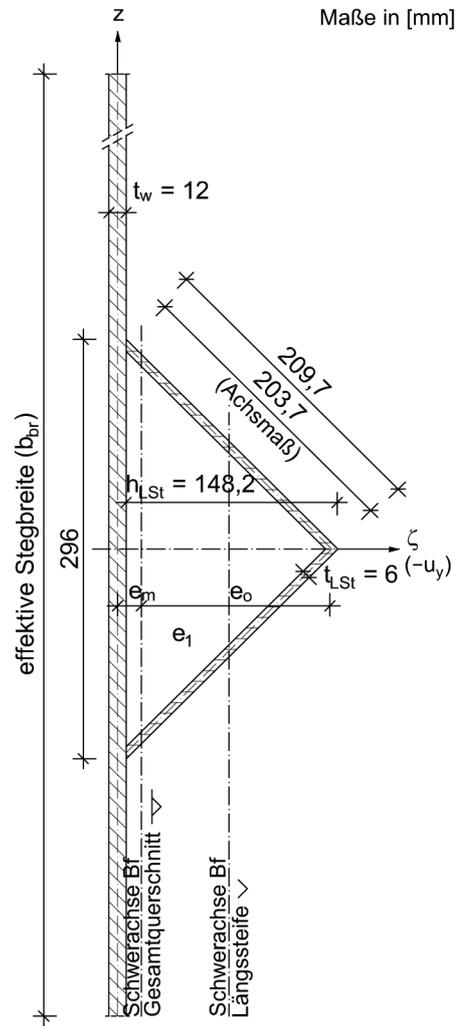


Abb. 2.5: Längssteifengeometrie für das System S4 (System S5 nach [5])

2.4 Quersteifenausbildung

Die vorhandenen Quersteifen der untersuchten Systeme entsprechen jenen, die nach Untersuchung in [5] auch eine ausreichende Mindeststeifigkeit zur Ausbildung einer Knotenlinie aufweisen. Für alle Systeme erfolgt die Ausführung aller Quersteifen in Form von Flachsteifen mit aufgesetztem Außengurt, welche einseitig am Steg (Richtung $+u_y$), den Längssteifen (Richtung $-u_y$) gegenüberliegend, angeordnet sind (siehe Abb. 2.6).

Zusätzlich findet sich gesondert für das System S1 ($t_{Lst} = 8$ [mm]) in Abschnitt 4.2 dieses Anhangs eine Traglastberechnung, bei welcher – zum Unterschied der genannten einheitlichen Ausbildung der Quersteifen mit Außengurt – die mittleren Quersteifen nur als Flachsteife ohne außenliegenden Gurt ausgeführt sind.

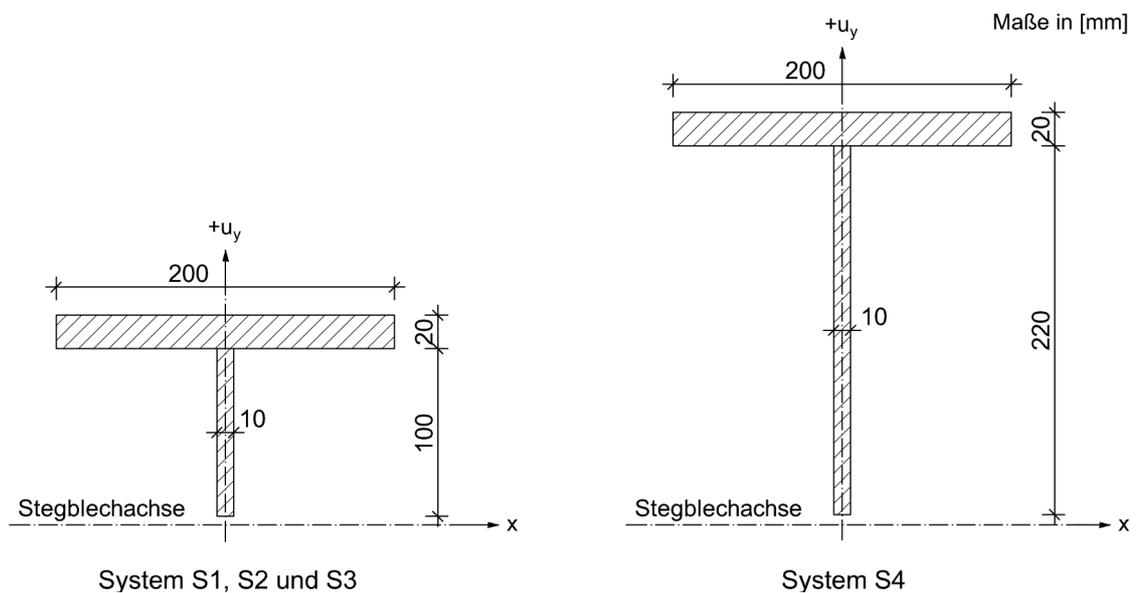


Abb. 2.6: Quersteifengeometrie der untersuchten Systeme (nach [5])

3 FE-Modellierung

3.1 FE-Modell

Die Grundlage für sämtliche numerischen Berechnungen mit dem Softwarepaket ABAQUS [4] stellt eine realitätsnahe Finite-Elemente-Modellierung dar. Nachfolgend wird diese, basierend auf den Erkenntnissen der Voruntersuchungen aus den Diplomarbeiten von *Gänsluckner* [5] und *Uttenthaler* [6], erläutert. Das FE-Modell für durchlaufende Längssteifen in [5] wurde für die Anwendung mit endenden Längssteifen entsprechend adaptiert. Die dabei notwendigen Änderungen und Ergänzungen betreffen die Längssteifen, die Randfeldstützung, die Systemlagerung, die Lasteinleitung und die Elementdicken.

3.1.1 Verwendetes FE-Netz

Die Vorgehensweise bei der Netzmodellierung wird anschließend anhand des Systems S1 im Detail dargelegt und in Abb. 3.1 sowie Abb. 3.2 dargestellt. Sämtliche Systeme basieren auf diesem Grundschema.

Das Stegblech wird durch Knotennummern aufgespannt, welche sich in globaler x-Achse (Trägerlängsrichtung) je Knoten um eins (von xxxxx1 bis xxx361) und in globaler z-Achse (Steghöhe) in Schritten von 5000 (von 100xxx bis 480xxx) erhöhen. Die Elementeckpunkte werden in x-Richtung mit ungeraden Knotennummern an der Einerstelle (xxxxx1, xxxxx3, usw.) und in z-Richtung mit der Zehntausenderstelle (x10xxx, x20xxx, usw.) geführt, da alle Elemente einen Mittelknoten aufweisen. Die Fünftausenderstellen (xx5xxx) beschreiben die Elementmittelknoten und die Millionenstelle fasst jedes der drei Teilfelder (1xxxxxx – linkes Randfeld; 2xxxxxx – mittleres Beobachtungsfeld; 3xxxxxx – rechtes Randfeld) mit all seinen eingeschriebenen Elementen einzeln zusammen. Die Quersteifen erhalten ihre Knotennummern fortlaufend gekennzeichnet durch die Millionenstelle, ausgehend von der ersten Quersteife am linken Trägerrand (1xxxxxx) bis hin zur letzten Quersteife am rechten Trägerrand (4xxxxxx). Die eingeschriebenen Quersteifenelemente werden ihrer Lage nach (von 7xxxxxx bis 10xxxxxx) beschrieben. Die untere Längssteife erhält die Knotennummer 50xxxx, die obere 60xxxx und die zugehörigen Elementnummern sind mit 5xxxxxx bzw. 6xxxxxx gekennzeichnet. Die Stützelemente der äußeren Randfelder erhalten für die „Längssteifenstäbe“ des linken Randfeldes die Knotennummern 5xxxxxx und für jene des rechten Randfeldes die Knotennummern 6xxxxxx. Die Elementnummerierung der „Stützstäbe“ erfolgt getrennt nach linkem (11xxxxxx, 13xxxxxx und 15xxxxxx) und rechtem (12xxxxxx, 14xxxxxx und 16xxxxxx) Randfeld.

Anmerkung:

Der Platzhalter „x“ dient stellvertretend der Angabe fortlaufender Ziffern.

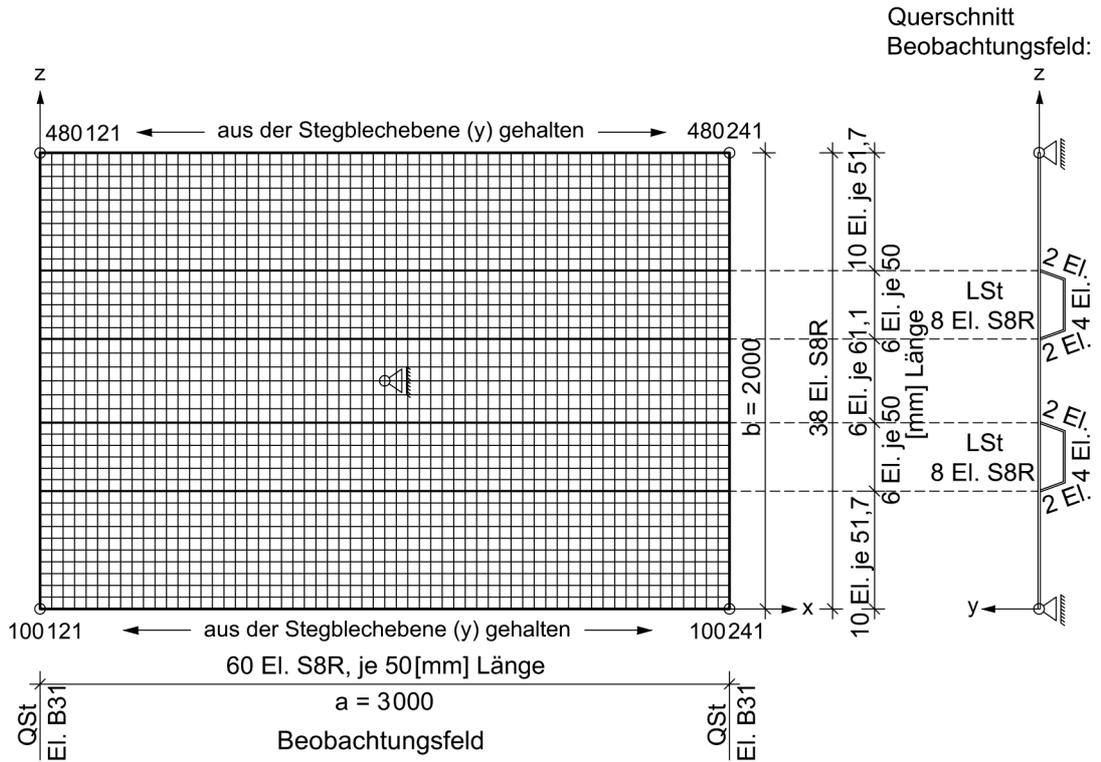


Abb. 3.1: FE-Netzmodellierung mit Lagerung (in x, y) für das Beobachtungsfeld (mittleres Teilfeld) – System S1

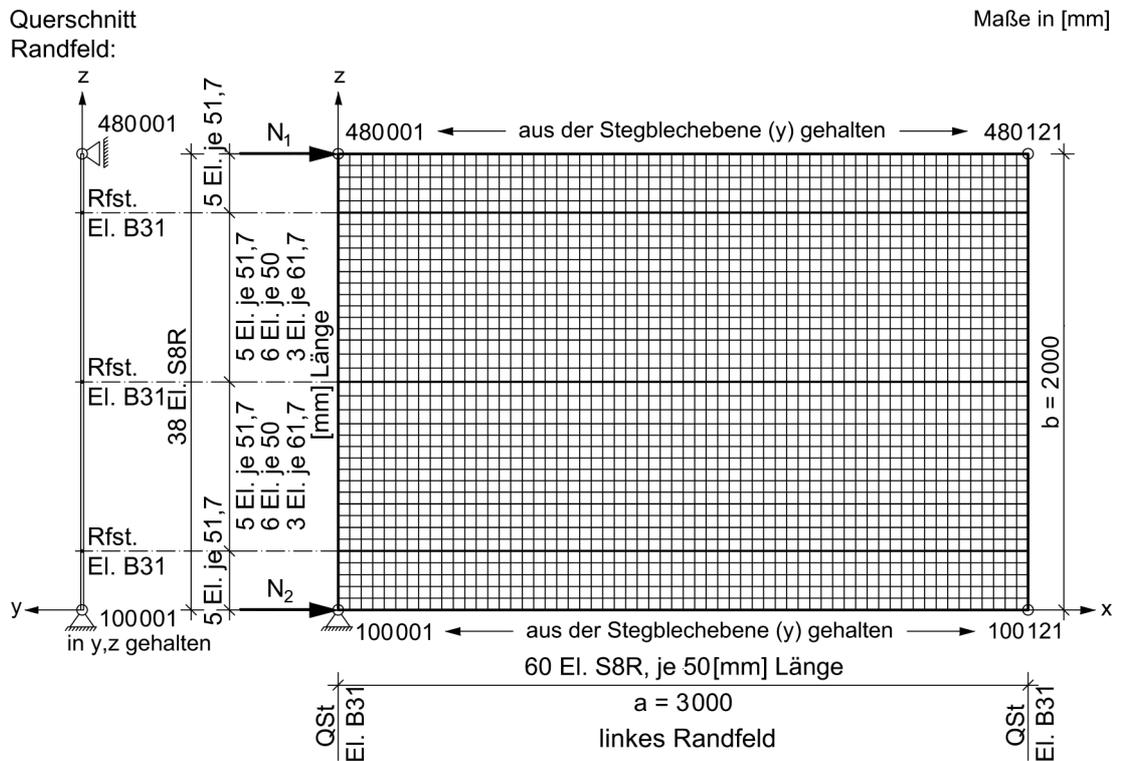


Abb. 3.2: FE-Netzmodellierung mit Belastung und Lagerung (in y, z) für das linke Randfeld (rechtes Randfeld sinngemäß) mit Stützungsanordnung nach Variante 2 – System S1

3.1.2 Verwendete Elementtypen

Die passenden Stab- und Schalenelemente aus der Elementebibliothek von ABAQUS [4] wurden entsprechend den Erkenntnissen der Voruntersuchung nach [6] herangezogen und den einzelnen Systemkomponenten wie im Falle von durchlaufenden Längssteifen nach [5], mit entsprechenden Ergänzungen, zugeordnet. Im Anschluss sind die einzelnen Systemelemente mit den jeweils zugehörigen Elementtypen angeführt.

a.) Schalenelemente

Das Stegblech und die Längssteifen im Mittelfeld werden als Schalenelemente des Typs S8R modelliert (siehe Abb. 3.3). Die Eigenschaften dieses Elementtyps sind:

- 8 Knoten
- 6 Freiheitsgrade
- 4 Integrationspunkte
- parabolischer Verformungsansatz
- doppelt gekrümmte, dickwandige Schale

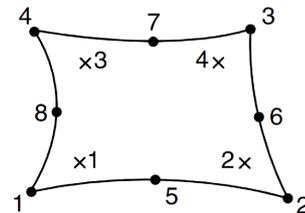


Abb. 3.3: Schalenelement Typ S8R (aus [7])

b.) Stabelemente

Die Quersteifen und Randfeldstützungen bzw. Längssteifen in den Randfeldern werden mittels Stabelementen des Typs B31 modelliert (siehe Abb. 3.4). Die Eigenschaften dieses Elementtyps sind:

- 2 Knoten
- 6 Freiheitsgrade
- 1 Integrationspunkt
- linearer Verformungsansatz



Abb. 3.4: Stabelement Typ B31 (aus [7])

3.1.3 Randbedingungen, Lagerung und Kopplungen

An den vertikalen Systemrändern (linker und rechter Trägerrand) wird das Ebenbleiben des Stegbleches und die Erhaltung der freien Querkontraktion (in vertikaler Richtung) mittels in der Berechnungseingabe als *MPC, SLIDER definierte Geraden entlang der Stegränder gewährleistet. Die Knotenpunkte der vertikalen, äußeren Stegränder gestatten folglich die freie Verschiebung entlang dieser Geraden. Die modellierten Längssteifen-, Quersteifen- und die Stützelemente (in Unterscheidung nach der jeweils gewählten Stützvariante) der Randfelder werden mittels der Eingabebezeichnung *MPC, TIE starr an das Stegblech gebunden. Die Knotenpunkte dieser Elemente folgen somit immer der Verschiebung der Knotenpunkte des Stegbleches.

Das gesamte System wird aus der y-Ebene (quer zur Stegebene) durch die Fixierung der vier Systemeckpunkte 100001, 100361 (unterer Systemrand) sowie 480001, 480361 (oberer Systemrand) und einer, zwischen diesen Eckpunkten liegenden, eingezogenen Lagerlinie entlang des oberen und unteren Stegrandes gehalten. Zusätzliche Haltung erfahren die Knotennummern 100001 und 100361 in z-Richtung (entlang der Steghöhe). Ein ausschließlich für die numerische Berechnung benötigter Haltepunkt in x-Richtung wird im Systemmittelpunkt durch Fixierung des Knotens 290181 angesetzt. Die genannten Modellierungsannahmen sind in Abb. 3.5 mit der Randfeldstützung durch fiktive Längssteifen ohne Dehnsteifigkeit (siehe Abschnitt 4.1.2) zusammengefasst.

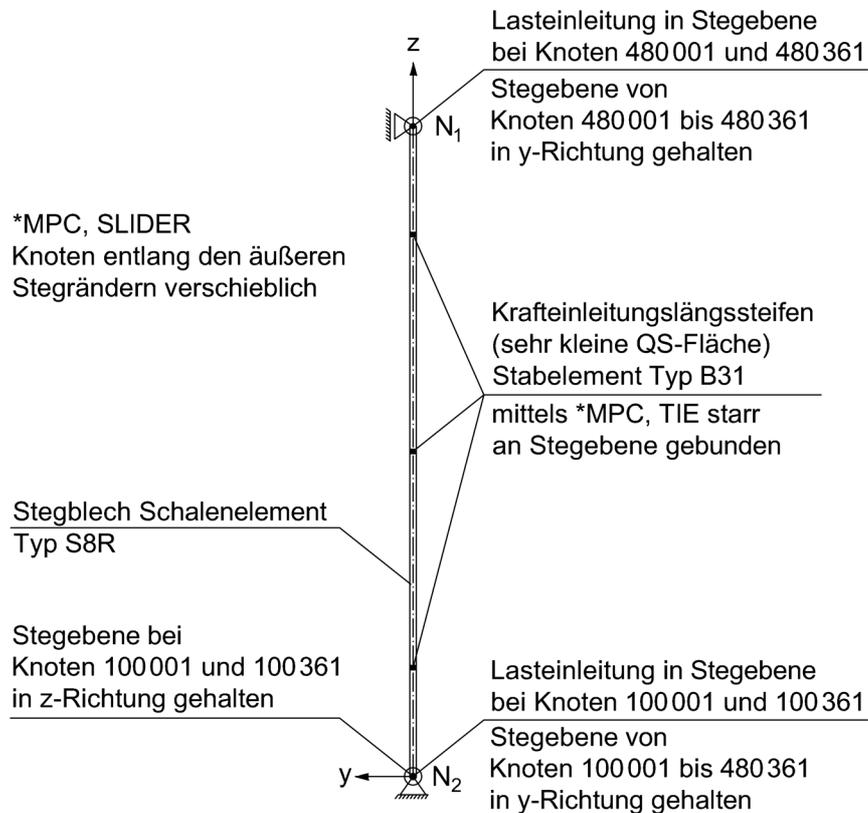


Abb. 3.5: Modellierte Rand-, Lager-, Koppelbedingungen an den vertikalen Trägerrändern

3.1.4 Materialgüte

Die Stahlgüte S355 ($E = 210000[\text{N}/\text{mm}^2]$; $f_y = 355[\text{N}/\text{mm}^2]$; $\nu = 0,3[-]$) wird sämtlichen Systemelementen für die Berechnungen zugrunde gelegt. Die Materialkennwerte entsprechen dem elastisch idealplastischen Materialverhalten (nur mit Fließplateau f_y , ohne Wiederverfestigung, gemäß Eurocode 3-1-5, Anhang C [1]). Die Annahme dieses vereinfachten Werkstoffverhaltens erlaubt eine hinreichend genaue Traglastermittlung. Zudem wird eine Vergleichsmöglichkeit auf elastischem Niveau für die Ergebnisse der vereinfachten Rechenmodelle zur Bestimmung der Biegewirkung endender Längssteifen (siehe Anhang B; lineare Analyse (LA) dient dort als Vergleichsbasis) und für das Ingenieurmodell zur Tragfähigkeitsabschätzung (siehe Anhang C; geometrisch und materiell nichtlineare Analyse mit geometrischen Ersatzimperfektionen (GMNIA) dient dort als Vergleichsbasis) geschaffen.

3.1.5 Lastannahme

Als Belastung wird an beiden Längsrändern die Druckspannungsverteilung $\psi = 1,0[-]$ (konstanter Verlauf) für die Systeme S1, S2 und S3 sowie $\psi = 0[-]$ (linear veränderlicher Verlauf mit $\sigma_u = 0[\text{N}/\text{mm}^2]$) für das System S4 angesetzt. Im FE-Modell sind diese linearen Verteilungen indirekt als Einzeldruckkräfte (N_1, N_2) jeweils am oberen und unteren Systemrand angesetzt (siehe Abb. 3.6). Die gewählten Randbedingungen führen zum gewünschten Normalspannungsverlauf im Steg der Randfelder. Da die Längssteifen in den Randfeldern keine Fläche aufweisen, erfolgt die Lasteinleitung in das mittlere Beulfeld ausschließlich über das Stegblech. Das Kräftepaar wird jeweils am oberen und unteren Stegtrand der vertikalen Trägerenden eingeleitet.

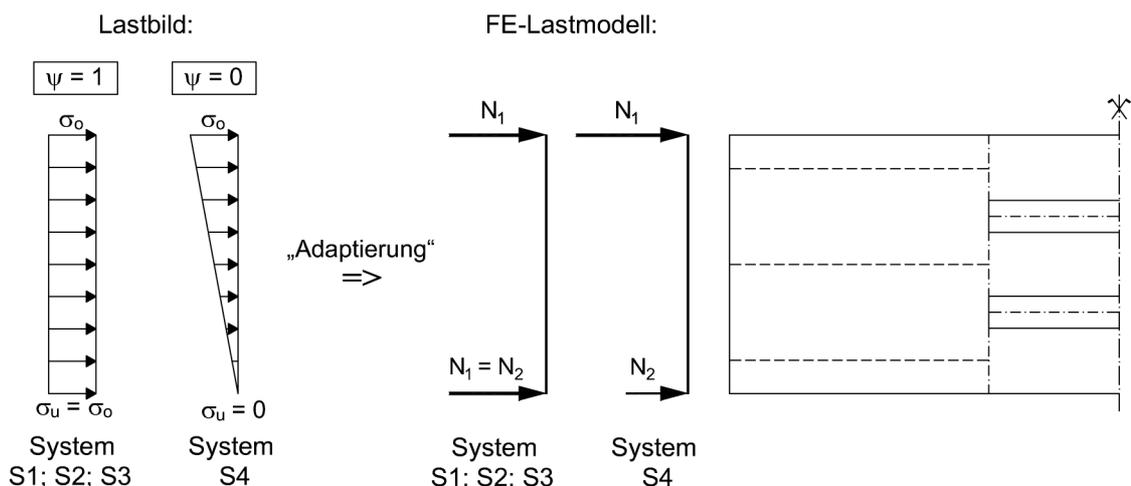


Abb. 3.6: Lastfälle und die zugehörige FE-Modellierung

Als Bezugslast wird immer jenes Lastniveau herangezogen, welches – unter der Voraussetzung einer reinen Normalkraftbeanspruchung ohne zusätzlicher Biegebeanspruchung ΔM – im mittleren Beobachtungsfeld die nachfolgende Druckspannung $\sigma_{m,N}$ am oberen Stegblechrand für die angeführten numerischen Analysen liefert:

- LA: $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y = 35,5 [\text{N/mm}^2]$
- LBA: $\sigma_{m,N,LBA} = 10 [\text{N/mm}^2]$
- GMNIA: $\sigma_{m,N,GMNIA} = f_y = 355 [\text{N/mm}^2]$

Für $\psi = 1,0 [-]$ ergibt sich die Normalspannung $\sigma_{m,N}$ zu:

$$\sigma_{m,N} = \frac{N_1 + N_2}{A_{Bf,ges}} [\text{N/mm}^2] \quad (3.1)$$

3.2 Imperfektionsansatz

3.2.1 Geometrische Ersatzimperfektionen

Die nichtlinearen Traglastberechnungen (GMNIA) in Abschnitt 5 dieses Anhangs erfolgen mit geometrischen Ersatzimperfektionen. Deren Verlauf basiert auf den globalen und lokalen Eigenformen der linearen Beulanalyse (LBA), welche in ihren Beulformen bestmöglich den Angaben des Eurocode 3-1-5 [1] – dargestellt in Tab. 3.1 und Abb. 3.7 – entsprechen. Diese Vorgehensweise dient einer zweckmäßigen Vereinfachung und als Ersatz für aufwendige Analysen mit geometrisch und strukturell getrennten Imperfektionsansätzen.

Imperfektionsansatz	Bauteil	Form	Amplitude
global	Bauteil der Länge ℓ	Bogen	siehe EN 1993-1-1, Tabelle 5.1
global	Längssteife der Länge a	Bogen	$\min(a/400, b/400)$
lokal	Teilfeld oder Einzelfeld mit kurzer Länge a oder b	Beulform	$\min(a/200, b/200)$
lokal	Verdrehung von Steifen und Flanschen	Bogen	1/50

Tab. 3.1: Geometrische Ersatzimperfektion (Tabelle C.2 aus Eurocode 3-1-5 [1])

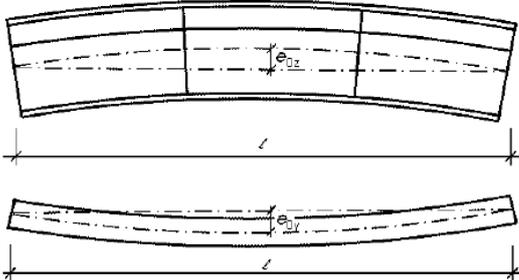
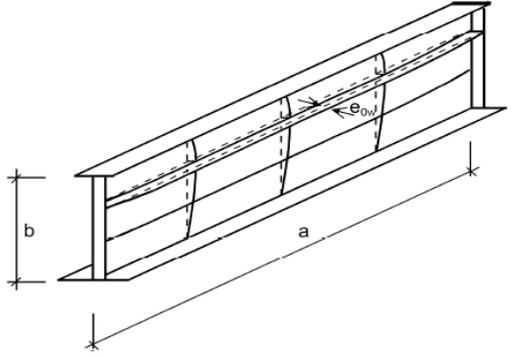
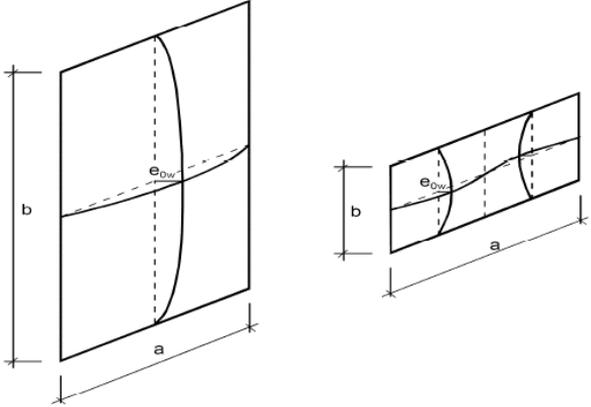
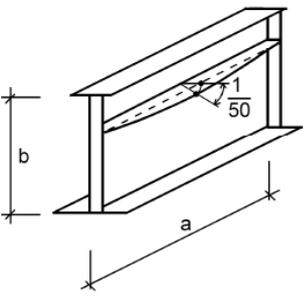
Imperfektionsansatz	Bauteil
global, Bauteil der Länge l	
global, Längssteife der Länge a	
lokal, Teilfeld oder Einzelfeld	
lokal, Verdrehung von Steifen oder Flanschen	

Abb. 3.7: Modellierung geometrischer Ersatzimperfectionen (Bild C.1 aus Eurocode 3-1-5 [1])

3.2.2 Maßgebende Kombination und Skalierung der geometrischen Ersatzimperfectionen

Wesentlichen Einfluss auf die Systemberechnung hat die Kombination der globalen und lokalen Beulformen. Da die globale geometrische Ersatzimperfection den wesentlichen Einfluss auf die Beultragfähigkeit (wie auch in [8] angeführt) hat, wird die maßgebende Imperfektionskombination „ $-1,0 \cdot \text{glob} + 0,7 \cdot \text{lok}$ “ gemäß [5] für die Systemberechnung mit endenden Längssteifen übernommen. Diese richtungs- und anteilsbestimmte Imperfektionskombination liefert die niedrigste Beanspruchbarkeit des Systems. Dabei gilt nach Abb. 3.8 die globale Eigenform als Leitimperfection (Ansatz zu 100%) und die lokale Eigenform als Begleitimperfection (Ansatz zu 70%). Beide Eigenformen unterliegen den Vorzeichen nach der jeweils maßgebenden Imperfektionsrichtung mit vorherrschender Druck- oder Zugspannung. Das Minuszeichen bei der globalen Imperfection bedeutet, dass daraus Druckspannungen im Stegblech entstehen und die Steife außenliegend Zugspannungen erfährt.

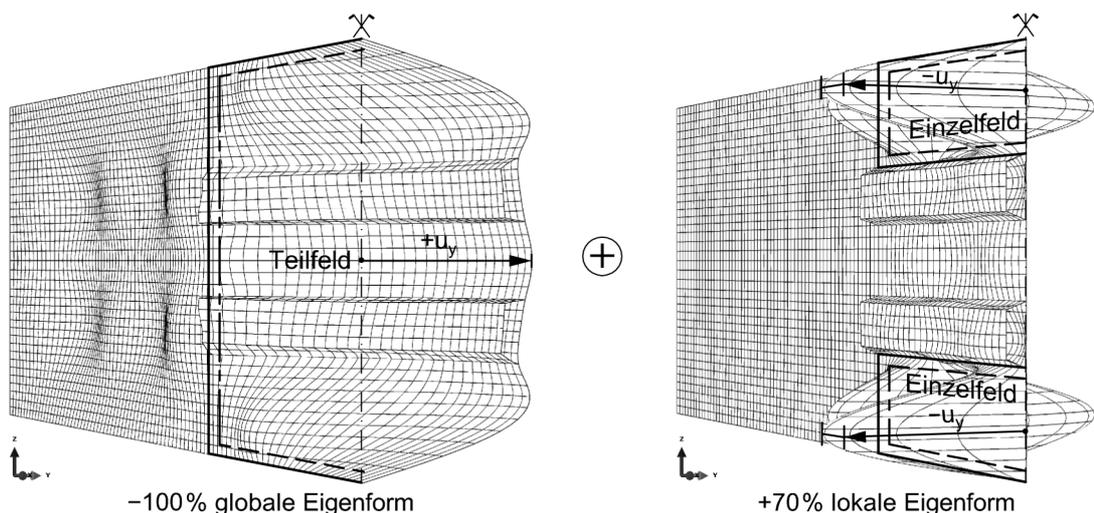


Abb. 3.8: Maßgebende Kombination eigenmode-konformer, geometrischer Ersatzimperfectionen (für System S1 mit $\psi = 1,0[-]$ dargestellt)

Zudem bedarf es der Skalierung der Eigenformen nach den tatsächlichen Verformungswerten u_y der Längssteife. Angewandt wird für die Amplitude des globalen Eigenwertes der Ansatz mit „ $\min(a/400, b/400)$ “ und für die des lokalen Eigenwertes der Ansatz mit „ $\min(a/200, b/200)$ “ gemäß Tab. 3.1. Die Größen a bzw. b entsprechen der Beulfeldgeometrie des mittleren Beobachtungsfeldes. Die aus der linearen Beulanalyse (LBA) erhaltenen Größtwerte (auf den Wert 1,0[-] in der LBA skaliert) treten nicht zwingend in der Längssteifenachse (für den globalen Eigenwert maßgeblich) bzw. in einem Einzelfeld (für den lokalen Eigenwert maßgeblich) auf. Dies wird mit einem zusätzlichen Vorfaktor berücksichtigt. Die Skalierfaktoren (SF) sind in Abschnitt 5 für die lineare Beulanalyse (LBA) getrennt nach globalen und lokalen Eigenformen mit den zugehörigen Verformungsverläufen u_y einzeln ausgewiesen.

4 Erläuterungen zur Systemberechnung

4.1 Einfluss der Randfeldstützung

Im Vorfeld der numerischen Traglastanalyse wurde der Einfluss unterschiedlicher Stützwirkungen der Randfelder auf die Berechnung anhand des Systems S1 ($t_{LSt} = 8$ [mm]) untersucht. Die nachfolgenden Stützungsvarianten mit zusätzlicher Erhöhung der Blechdicken der Randfelder sollen das alleinige Beulen des Stegbleches in den Randfeldern unterbinden, sodass immer das mittlere Beulfeld die Traglast bestimmt. Eine Stegblechdickenverstärkung in den Randfeldern erfolgt bei allen Varianten.

4.1.1 Starre Stützung – Variante 1

In beiden Randfeldern befinden sich an den Längssteifenlagen modellierte Lagerlinien, welche einer Stützung ausschließlich senkrecht zur Stegebene entsprechen. Diese befinden sich jeweils etwa auf Höhe des äquidistanten Abstandes zwischen den Längssteifen bzw. zwischen den Längssteifen und dem äußeren oberen bzw. unteren Systemrand (siehe Abb. 4.1). Durch diese möglichst mittige Lage zwischen den Längssteifen und den Systemrändern wird die Einspannwirkung der Längssteifen aus der Stegebene an den Rändern des mittleren Feldes minimiert. In einer Distanz der 15-fachen Stegblechdicke t_w des mittleren Beulfeldes liegt der Ausgangspunkt der Lagerlinien, welche bis zu den außenliegenden Endquersteifen reichen. Dies soll verhindern, dass ungewollt auch die Quersteife aus der Stegebene gehalten wird. Entlang der Lagerlinie erfolgt eine starre Stützung aus der Stegebene.

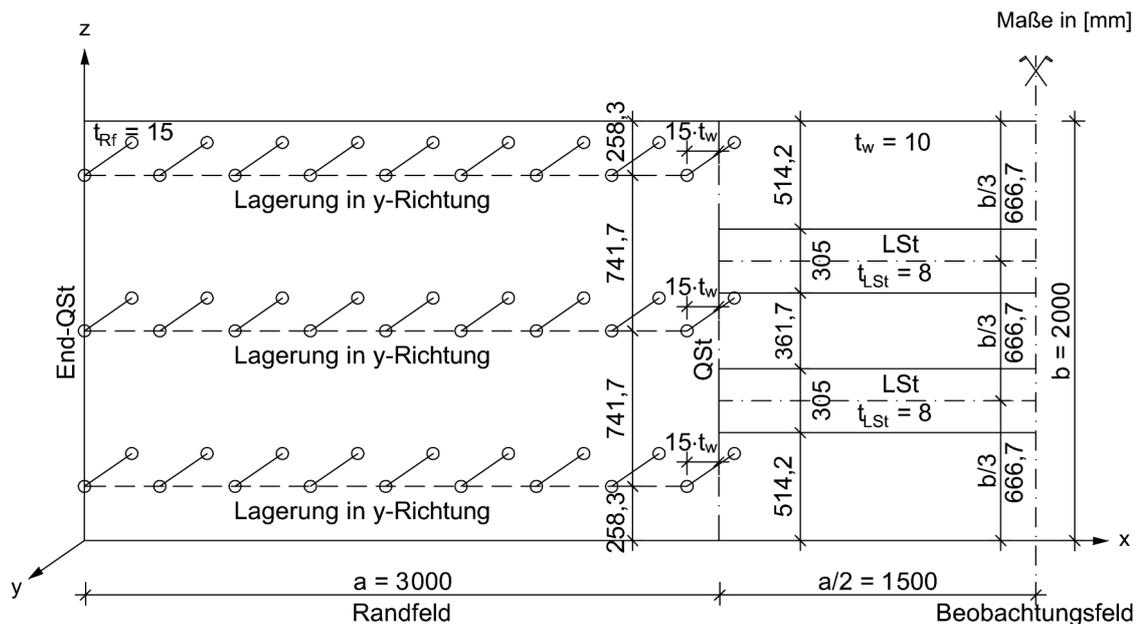


Abb. 4.1: Starre Stützung mit Randabstand $15 \cdot t_w$ zu den mittleren Quersteifen (Systemhälfte)

4.1.2 Stützung durch fiktive Längssteifen ohne Dehnsteifigkeit

Anstatt der starren Stützung werden nun Längssteifen jeweils in den Randfeldern angeordnet (wie in *Variante 1*, d.h. mittig zwischen den Einzelfeldern des Beobachtungsfeldes), die als Stäbe modelliert werden (siehe Abb. 4.2). Dabei wird jedoch nur eine Biegesteifigkeit I_z zugewiesen und keine Dehnsteifigkeit, sodass der Grenzfall vorliegt, dass in den Randfeldern nur das Stegblech belastet ist.

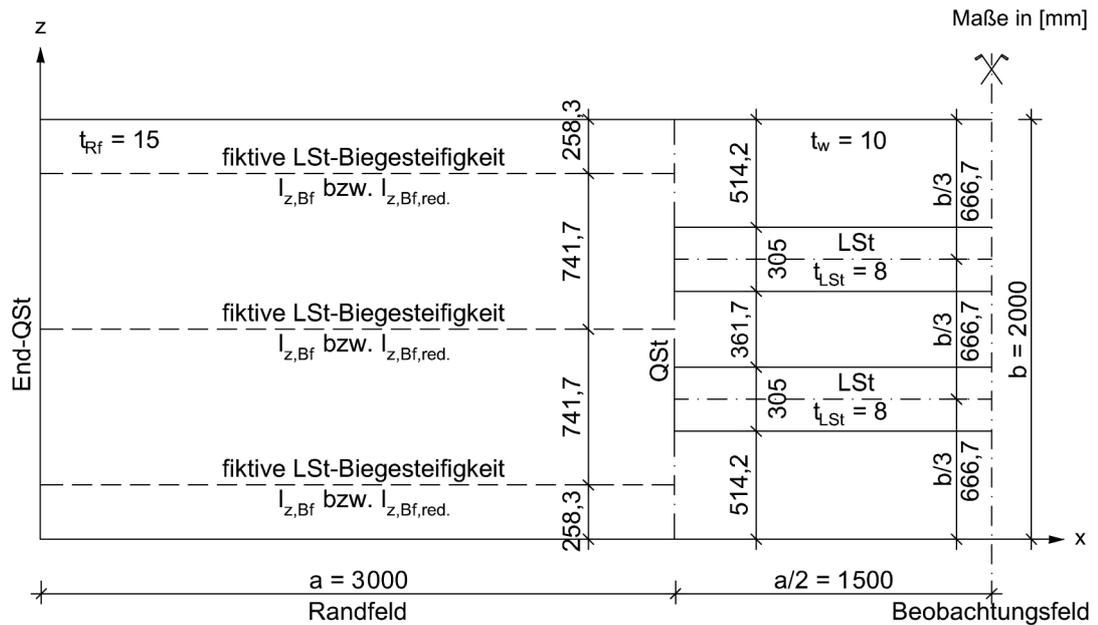


Abb. 4.2: Stützung der Randfelder mittels fiktiver Längssteifen ohne Dehnsteifigkeit (Systemhälfte)

4.1.2.1 Identische Längssteifen-Biegesteifigkeit in den Randfeldern – Variante 2

Hierbei wird die Biegesteifigkeit $I_{z,Bf}$ der Längssteifen um die starke Achse (aus der Stegebene inklusive Mitwirkung des Stegbleches) im mittleren Beobachtungsfeld in den äußeren Randfeldern als identische Biegesteifigkeit $I_{z,Rf}$ entlang zusätzlicher Stützlinien angesetzt (d.h. $I_{z,Rf} = I_{z,Bf}$). Die Achse dieser „Längssteifenstäbe“ liegt in der Stegachse. Diese erhalten in der FE-Modellierung bei allen Systemen ergänzend einen geometrischen Flächenanteil von $100[\text{mm}^2]$, eine fiktive Biegesteifigkeit I_y um die schwache Achse sowie eine Torsionssteifigkeit I_T , welche beide der Größe von 1% der Biegesteifigkeit $I_{z,Bf}$ um die starke Achse der Längssteifen des Beobachtungsfeldes entsprechen. Der gewählte, äußerst kleine Flächenanteil stellt sicher, dass die Normalspannungen in das Beobachtungsfeld nur vom Steg her eingeleitet werden. Die Randfeldstützung verläuft zwischen den mittleren Quersteifen des Beobachtungsfeldes und den Endquersteifen der Randfelder. Die Lage der fiktiven Längssteifen entspricht derer bei starrer Lagerung aus der Stegebene.

4.1.2.2 Reduzierte Längssteifen-Biegesteifigkeit in den Randfeldern – Variante 3

Die Anordnung erfolgt wie für *Variante 2*, jedoch wird zudem die idente Biegesteifigkeit $I_{z,Rf}$ dieser Längssteifen in den Randfeldern gegenüber jenen des mittleren Beulfeldes $I_{z,Bf}$ reduziert (d.h. $I_{z,Rf} = I_{z,Bf,red}$). Bei System S1 erfolgte eine Reduktion auf 70% der Längssteifen-Biegesteifigkeit des Beobachtungsfeldes. Ergänzend wird das unsymmetrische System S4 mit veränderlichem Druckspannungsverlauf ebenfalls für den Fall mit reduzierter Längssteifen-Biegesteifigkeit ausgewertet. Die Reduktion wird dort aufgrund der linear zum unteren Stegrand hin abnehmenden Druckspannung mit 50% angenommen. Der Reduktionsfaktor entspricht allgemein etwa dem Verhältnis der Anzahl der vorhandenen Längssteifen des mittleren Beulfeldes zu jenem der äußeren Randfelder, sodass die Summe der Biegesteifigkeiten aller Längssteifen in Rand- und Mittelfeld in etwa ident ist. Zudem wird für die bisher angeführten Stützungsarten die Blechdicke der Randfelder t_{Rf} erhöht. Erst durch die Kombination der bisher genannten Stützmethoden und der gesteigerten Randfeldblechdicke kann sichergestellt werden, dass es zu keinem alleinigen Beulen der Randfelder kommt. Die Blechdicke der Randfelder beträgt für das System S1, S2 sowie S3 15[mm] und bei System S4 20[mm].

4.1.3 Stützung der Randfelder ohne Längssteifen – Variante 4

Die Randfelder erhalten hierbei keine zusätzlichen Stützmaßnahmen, es wird ausschließlich, wie Abb. 4.3 zeigt, deren Blechdicke entsprechend erhöht. Damit wird die geringstmögliche Einspannwirkung für die endenden Längssteifen des mittleren Beulfeldes erzielt.

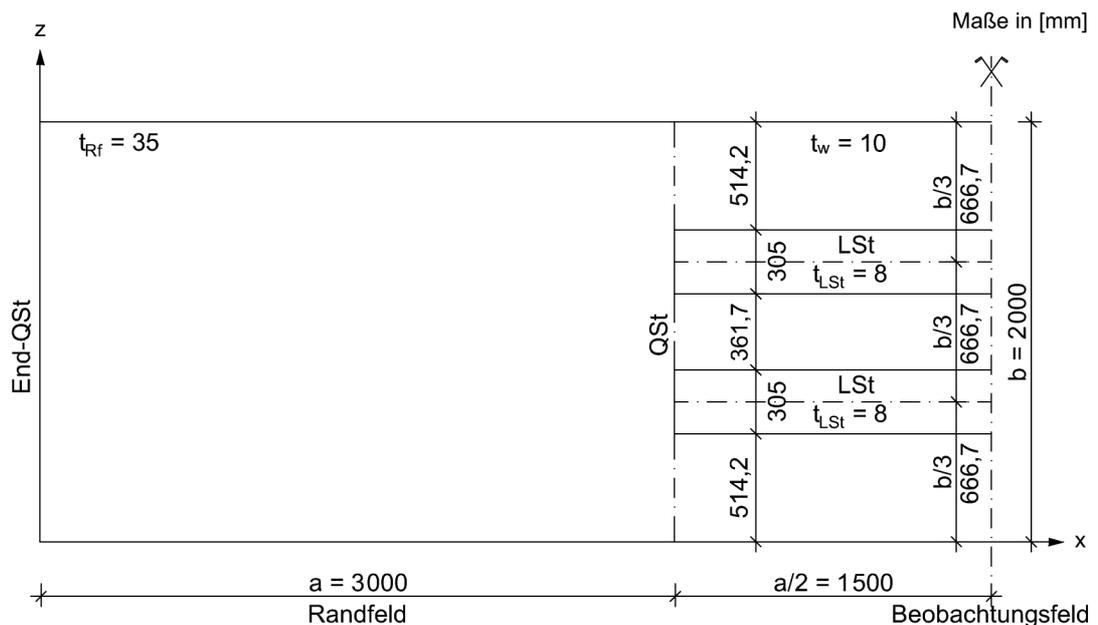


Abb. 4.3: Stützung durch Blechdickenerhöhung (ohne Längssteifen) in den Randfeldern (Systemhälfte)

Die Abschätzung für die zu wählende Blechdicke der Randfelder erfolgt gemäß dem Beulnachweis für Einzelblechfelder ohne Längssteifen nach Eurocode 3-1-5, Abschnitt 4.4 [1]. Der Abminderungsfaktor ρ_p für allseitig gestützte Querschnittsteile errechnet sich nach Eurocode 3-1-5, Gl. (4.2) [1] (als ρ notiert), zu:

$$\rho_p = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 [-] \quad (4.1)$$

für $\bar{\lambda}_p > 0,673 [-]$ und $(3 + \psi) \geq 0$

$$\text{mit } \bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{\bar{b}/t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} [-]$$

Als Grundlage für den benötigten Abminderungsfaktor ρ_p des Plattenbeulens dient vereinfacht der Laststeigerungsfaktor (LSF) für das System S1 mit durchlaufenden Längssteifen nach [5] (\Rightarrow Annahme: $LSF = \rho_p = \rho_{Bf}$). Somit ergibt sich mit der vorliegenden Druckspannungsverteilung $\psi = 1,0 [-]$ und mit der Annahme des Beulwertes $k_{\sigma,p,\min} = 4,0 [-]$:

$$\rho_p = \rho_{Bf} = 0,670 [-] \Rightarrow \bar{\lambda}_{p,\max} = 1,22 [-] \text{ (aus Gl. (4.1))}$$

$$\bar{\lambda}_{p,\max} = \frac{2000/t_{Rf}}{28,4 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} \cdot \sqrt{4}} \Rightarrow t_{Rf} \geq 35,5 [\text{mm}]$$

Die Annahme einer Randfeldblechdicke von $t_{Rf} = 35 [\text{mm}]$ erwies sich für dieses Alternativmodell zur Vermeidung des alleinigen Beulens der Randfelder als ausreichend.

4.1.4 Schlussfolgerung zur Stützungsverfahren der Randfelder

Es ergeben sich im Variantenvergleich nach Tab. 4.1 (für das System S1) und Tab. 4.2 (für das System S4) der genannten Stützungsarten die nachfolgenden Traglastdifferenzen.

Imperfektion	Laststeigerungsfaktor (LSF)[-]			
	Variante 1	Variante 2	Variante 3 ($0,7 \cdot l_{z,Bf}$)	Variante 4
$-1,0 \cdot \text{glob} + 0,7 \cdot \text{lok}$	0,551	0,557	0,557	0,559

Tab. 4.1: Vergleich der Laststeigerungsfaktoren bei unterschiedlichen Randfeldstützungen für System S1; $t_{LSt} = 8 [\text{mm}]$

Wie die Tab. 4.1 zeigt, liefert die starre Stützung bei System S1 das Traglastminimum mit einem Laststeigerungsfaktor $LSF = 0,551[-]$. Es zeigt sich aus den geringen Differenzen, dass die Art der Stützung unbedeutend ist. Für das System S1 mit einer Längssteifenblechdicke $t_{Lst} = 10[\text{mm}]$ sowie für das System S2 und S3 – alle mit konstanter Normalspannungsverteilung $\psi = 1,0[-]$ belastet – werden aufgrund der geringfügigen Traglaständerung durch unterschiedliche Stützungsmaßnahmen weiterhin ausschließlich die Variante 2 mit identer Biegesteifigkeit ($I_{z,Rf} = I_{z,Bf}$) für die numerische Traglastanalyse angewandt.

Imperfektion	Laststeigerungsfaktor (LSF)[-]	
	Variante 2	Variante 3 ($0,5 \cdot I_{z,Bf}$)
$-1,0 \cdot \text{glob} + 0,7 \cdot \text{lok}$	0,772	0,766

Tab. 4.2: Vergleich der Laststeigerungsfaktoren bei unterschiedlichen Randfeldstützungen für System S4

Bei System S4 mit linear veränderlicher Normalspannungsverteilung $\psi = 0[-]$ ergibt sich bei der numerischen Traglastberechnung ebenfalls keine wesentliche Differenz zu den alternativen Stützmöglichkeiten. Allgemein ergibt sich für das System S4 vergleichsweise nur ein geringer Traglastabfall zu dem Fall mit durchlaufenden Längssteifen (vgl. Abschnitt 5.4.1.3).

Es lassen sich für die untersuchten Varianten der Randfeldstützung anhand der aus der numerischen Berechnung ermittelten globalen und lokalen Eigenwerte ϕ_{cr} die idealen Beulspannungen $\sigma_{cr,p}$ und Beulwerte $k_{\sigma,p}$ für das mittlere Teilfeld und die maßgebenden Einzelfelder vergleichen (siehe Tab. 4.3). In Abschnitt 5 dieses Anhangs sind die Beulspannungen und -werte für jedes der untersuchten Systeme explizit angeführt. Nachfolgend wird die Vorgehensweise anhand des Systems S1 ($t_{Lst} = 8[\text{mm}]$) und Stützmethodene der *Variante 2* lt. Abschnitt 4.1.2.1) erläutert.

Dabei errechnet sich die *Eulersche* Bezugsspannung σ_E zu:

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot t^2}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot b^2} = 190000 \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.2)$$

$$\sigma_E = 190000 \cdot \left(\frac{10}{514,17}\right)^2 = 71,87 \quad [\text{N/mm}^2]$$

Der lokale Eigenwert $\phi_{cr,lok} = 28,929[-]$ für das System S1 wird mittels der linearen Beulanalyse (vgl. Tab. 5.3 bzw. Abb. 5.27) ermittelt. Der Lastfaktor α_{cr} wird dabei dem genannten lokalen Eigenwert $\phi_{cr,lok}$ gleichgesetzt. Zu beachten ist, dass die Bezugsspannung $\sigma_{m,N,LBA} = 10[\text{N/mm}^2]$ nur aus der reinen Normalkraftwirkung herrührt.

Zufolge der überlagerten Biegebeanspruchung ΔM im Beobachtungsfeld – infolge der alleinigen Krafteinleitung über den Steg des Randfeldes – weicht die zugehörige Normalspannung $\sigma_{x,Ed,Bf}$ im Stegblech des Beobachtungsfeldes davon ab. Um diese zu ermitteln, kann von den Ergebnissen der linearen Berechnung (LA) mit einer Gewichtung infolge des unterschiedlichen Lastniveaus ausgegangen werden ($\sigma_{m,ges,LA}$ lt. den Normalspannungsergebnissen der linearen Analyse in Abschnitt 5). Somit ergibt sich:

$$\sigma_{x,Ed,Bf} = \frac{\sigma_{m,ges,LA}}{\sigma_{m,N,LA}} \cdot \sigma_{m,N,LBA} = \frac{43,45}{0,10 \cdot 355} \cdot 10 = 12,24 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (4.3)$$

$$\sigma_{cr,p,lok} = \alpha_{cr} \cdot \sigma_{x,Ed,Bf} = 28,929 \cdot 12,24 = 354,08 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (4.4)$$

$$k_{\sigma,p,lok} = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_E} = \frac{354,08}{71,87} = 4,93 \text{ [-]} \quad (4.5)$$

Der globale Beulwert des mittleren Teilfeldes errechnet sich unmittelbar mit der Bezugsspannung $\sigma_{m,N,LBA}$ der linearen Beulanalyse zu:

$$\sigma_E = 190000 \cdot \left(\frac{10}{2000} \right)^2 = 4,75 \text{ [N/mm}^2\text{]} \text{ (Gl. (4.2))}$$

$$\sigma_{cr,p,glob} = \alpha_{cr} \cdot \sigma_{m,N,LBA} = 48,014 \cdot 10 = 480,14 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (4.6)$$

$$k_{\sigma,p,glob} = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_E} = \frac{480,14}{4,75} = 101,08 \text{ [-]} \text{ (Gl. (4.5))}$$

Nachfolgend sind in Tab. 4.3 die idealen Beulspannungen $\sigma_{cr,p}$ und Beulwerte $k_{\sigma,p}$ aus der linearen Beulanalyse (LBA) für das maßgebende Einzelfeld (lokal) und mittlere Teilfeld (global) zusammengestellt. Diese zeigen keine wesentlichen Differenzen für die unterschiedlichen Stützmethoden.

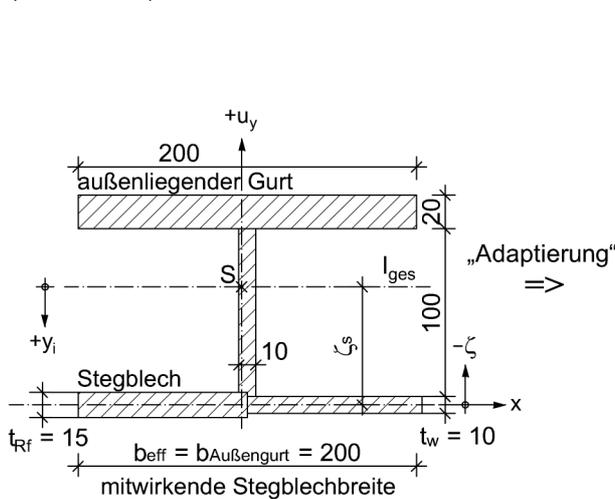
Stützmethode	$\sigma_{cr,p}$ [N/mm ²]		$k_{\sigma,p}$ [-]	
	Einzelfeld	mittleres Teilfeld	Einzelfeld	mittleres Teilfeld
<i>Variante 1</i>	354,17	451,53	4,93	95,06
<i>Variante 2</i>	354,08	480,14	4,93	101,08
<i>Variante 3</i>	354,06	476,14	4,93	100,24
<i>Variante 4</i>	359,47	474,11	5,00	99,81

Tab. 4.3: Ideale Beulspannungen $\sigma_{cr,p}$ und Beulwerte $k_{\sigma,p}$ des Systems S1; $t_{Lst} = 8$ [mm]

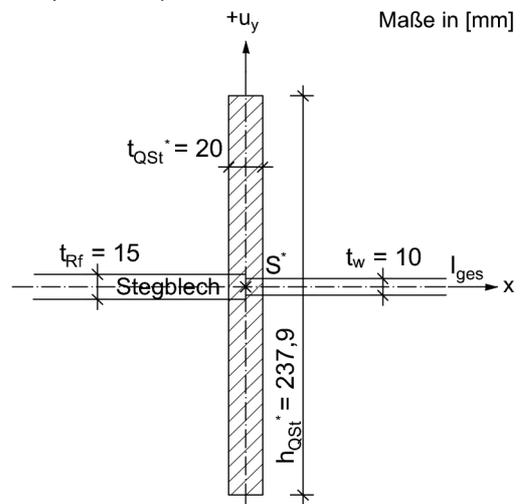
4.2 Einfluss der Quersteifengeometrie

In der Praxis werden Quersteifen als Flachsteifen oder als Flachsteifen mit zusätzlichem Außengurt ausgeführt. Beide Ausführungsvarianten sind in Abb. 4.4 dargestellt. In sämtlichen Berechnungen liegen alle Quersteifen als Flachsteife mit Außengurt vor. Bei System S1 ($t_{Lst} = 8$ [mm] und Stützmethod der *Variante 2* lt. Abschnitt 4.1.2.1) wurden alternativ die mittleren Quersteifen als Flachsteifen ohne Gurt (jedoch mit derselben Gesamtbiegesteifigkeit I_{ges} aus der Stegblechebene) – die Quersteifen an den Trägerenden gleichbleibend mit Gurt – angenommen.

Flachsteife mit außenliegendem Gurt:
(exzentrisch)



„reine“ Flachsteife:
(zentrisch)



Anschlüsse gemäß Berechnung
(vereinfacht dargestellt)

QSt-Anordnung im Alternativmodell:

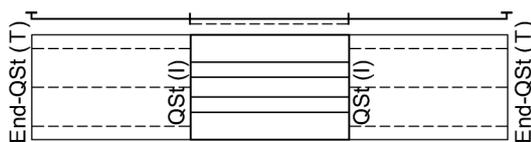


Abb. 4.4: Quersteifenausbildung für System S1

Bei der Bauform mit Gurt ist eine mitwirkende Breite des Stegbleches als wirksamer Untergurt – vereinfacht mit der identen Länge des oberen Außengurtes – berücksichtigt. Die Flächenanteile des Steges sind aufgrund des Blechdickenwechsels getrennt nach Rand- und Beobachtungsfeld angegeben. Die mittlere Stegblechebene dient als Bezug für die Abstände ζ der Einzelquerschnitte. In der nachfolgenden Tab. 4.4 sind die Querschnittswerte für die Quersteife mit außenliegendem Gurt für das System S1 angegeben.

Querschnitt	A [mm ²]	ζ [mm]	A · ζ [mm ³]	y _i [mm]	I _x [mm ⁴]	A · y _i ² [mm ⁴]	I _{ges} [mm ⁴]
Obergurt: 20/200	4000	-117,5	-470000	-47,17	133333	8898778	9032111
Steg: 100/10	1000	-57,5	-57500	12,83	833333	164694	998028
mitw. Steg _{Rf} : 15/100	1500	0	0	70,33	28125	7420167	7448292
mitw. Steg _{Bf} : 10/100	1000	0	0	70,33	8333,3	4946778	4955111
Summe	7500		-527500		1003125	21430417	22433542

Tab. 4.4: Querschnittswerte für System S1 – Quersteife mit Außengurt und mitwirkendem Stegblech

Die Biegesteifigkeit I_{ges} (um die starke Achse der Quersteifen mit Gurt und Steganteil) wird beibehalten und bildet die Grundlage für die Abmessungen der gurtlosen Ausführung. Ausgehend von einer angenommenen Breite der Quersteife mit $b_{QSt}^* = 20$ [mm] ergibt sich für die „reine“ Flachsteife eine Höhe h_{QSt}^* von:

$$h_{QSt}^* = \sqrt[3]{\frac{I \cdot 12}{b_{QSt}^*}} = \sqrt[3]{\frac{22433542 \cdot 12}{20}} = 237,9 \text{ [mm]} \quad (4.7)$$

Der Alternativquerschnitt ohne Gurt wird, entgegen jenem mit Außengurt, zentrisch an das Stegblech angeschlossen. Unter diesen genannten Annahmen erfolgt eine Verminderung der Drillsteifigkeit.

4.2.1 Schlussfolgerung zur Quersteifenausbildung

Der Laststeigerungsfaktor (LSF) für das System S1 ($t_{LSt} = 8$ [mm] und Stützmethod der *Variante 2* lt. Abschnitt 4.1.2.1) bleibt mit alternativer Quersteifenausbildung unverändert bestehen (siehe Tab. 4.5). Es ist somit für die „reine“ Flachsteife bei gleichbleibender Biegesteifigkeit I_{ges} , jedoch mit verminderter Drillsteifigkeit, praktisch dieselbe Traglast des mittleren Beulfeldes gegeben. In sämtlichen Systemen werden aufgrund dieser Erkenntnisse die Quersteifen mit Außengurt gewählt.

Imperfektion	LSF mit Randfeldstützung der <i>Variante 2</i> [-]	
	Flachsteife mit Außengurt und mitwirkendem Stegblech	„reine“ Flachsteife
-1,0 · glob + 0,7 · lok	0,557	0,557

Tab. 4.5: Laststeigerungsfaktoren (LSF) des Systems S1 ($t_{LSt} = 8$ [mm]; *Variante 2*) für unterschiedliche Quersteifenbauformen

5 Ergebnisse der FE-Studie

Dieser Abschnitt beinhaltet die Ergebnisse der linearen Analyse (LA), der linearen Beulanalyse (LBA) und der geometrisch und materiell nichtlinearen Analyse mit geometrischen Ersatzimperfectionen (GMNIA) für die Berechnungen aller untersuchten Systeme mit dem Programmpaket ABAQUS [4].

Die Auswertung der Spannungs- bzw. Verformungsverläufe erfolgt, wie in Abb. 5.1 dargestellt, am Vertikalschnitt I und II, sowie am Horizontalschnitt III. Der Parameter $\bar{x} = x^*/a$ gibt dabei, wie in [5], die Lage des Vertikalschnittes I im Beobachtungsfeld wieder. Der Vertikalschnitt II liegt in Randfeldmitte und der Horizontalschnitt III folgt mittig dem Verlauf einer Längssteife mit beidseitiger Weiterführung bis hin zu den vertikalen Systemrändern.

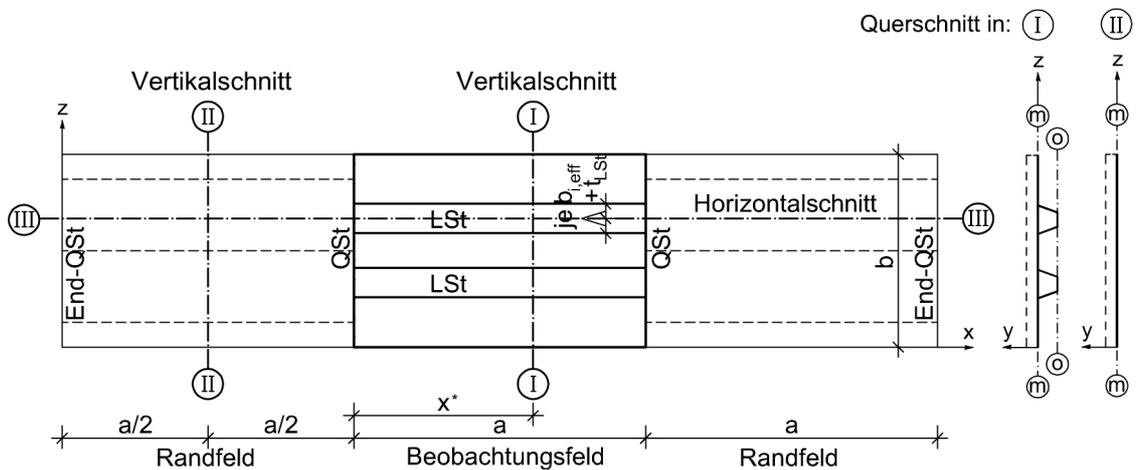
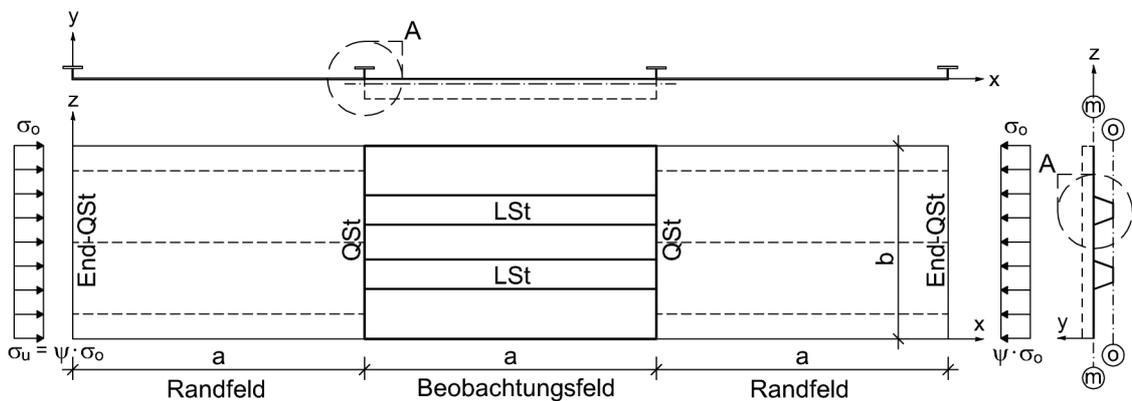


Abb. 5.1: Lage der Schnittführungen für die Verformungs- und Spannungsauswertung

a.) Lineare Analyse (LA)

Die lineare Analyse dient der Bestimmung der bei den Längssteifen auftretenden, zusätzlichen Biegebelastung bzw. deren Größe bezogen auf die Normalkraftbeanspruchung aus den Normalspannungen am Steg. Die Lasteinleitung zu den Längssteifen hin erfolgt nur über die Stegbleche der Randfelder. Durch die Ausmitte des Gesamtschwerpunkts des Längssteifenquerschnittes bezogen auf die Stelle der Lasteinleitung in Stegblechmitte ergibt sich eine Biegebeanspruchung. Wie in Abb. 5.2 dargestellt, erfährt die isoliert betrachtete Längssteife eine kombinierte Beanspruchung aus Normalkraft N und Biegemoment ΔM .



Detail A: Zusatzmoment ΔM

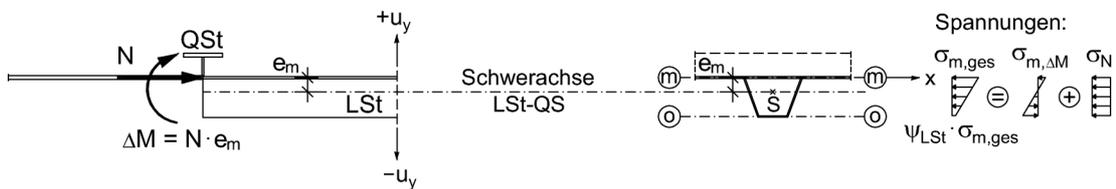


Abb. 5.2: Zusätzliche Biegebeanspruchung ΔM des Längssteifenquerschnittes

Mittels der ebenfalls aus der linearen Analyse gewonnenen Verformungsverläufe u_y (Horizontalverformung senkrecht zur Stegebene) in Horizontalschnitt III erfolgt eine Kontrolle über die Haltewirkung der in Abschnitt 4.1 angeführten Stützmaßnahmen der Randfelder. Eindeutig erkennbar zeigt sich dabei der Grad der Stützwirkung der äußeren Randfelder (vgl. für das System S1 Abb. 5.7, Abb. 5.12, Abb. 5.17 und Abb. 5.22), die analoge Verdrehung der Quersteifen mit dem Stegblech, sowie der Einfluss auf den Verformungsverlauf u_y im mittleren Beulfeld bei vorhandener Belastung. Als Parameter für die Stützwirkung können hier beispielsweise die Tangentwinkel an die Stegblechachse, ausgehend vom Anschlusspunkt der Quersteife, herangezogen werden. Da die wesentliche Analyse auf die Traglastberechnung sowie dessen Laststeigerungsfaktor (LSF) abzielt, und die unterschiedlichen Stützmöglichkeiten dabei nur eine geringe Auswirkung haben, wird diese Betrachtung hier nicht weiter untersucht.

Die Spannungsberechnung wird immer auf jener Laststufe durchgeführt, welche – unter der Voraussetzung einer alleinigen Normalkraftbeanspruchung ohne das Zusatzmoment ΔM – im mittleren Beobachtungsfeld eine gedachte Druckspannung von $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y = 35,5$ [N/mm²] am oberen Stegblechrand liefert. Bei der Ergebnisdarstellung wird die Gesamtspannung in der Stegblechmitte (Achse m) sowie entlang der Mitte der Längssteifengurte für die Systeme S1, S2 und S3 (Achse o, vgl. Abb. 5.2) bzw. für das System S4 in der Mittelachse der „Längssteifenspitze“ angegeben. Die in den Diagrammen der linearen Analyse zusätzlich ausgewiesenen Spannungspunkte dienen als Grundlage für die Vergleichsrechnung mit vereinfachten Rechenmodellen zur Erfassung der Biegewirkung an den Längssteifen (siehe Ergebnisvergleich in Anhang B, Abschnitt 4).

b.) Lineare Beulanalyse (LBA)

Anhand der linearen Beulanalyse ergeben sich die globalen und lokalen Eigenformen und Eigenwerte, die als Imperfektionsansatz für die Traglastberechnung verwendet werden. Als Vertikalschnitte sind die Verformungen u_y aus der Stegebene – an der maßgebenden Stelle – der beiden Eigenformen dargestellt. Die verwendeten Skalierfaktoren für die Traglastberechnung sind ebenfalls angegeben.

Es wird für die lineare Beulanalyse immer jenes Lastniveau gewählt, welches die gedachte Druckspannung $\sigma_{m,N,LBA} = 10$ [N/mm²] für den oberen Stegblechrand (aus alleiniger Normalkraftbeanspruchung) im Mittelfeld liefert.

c.) Nichtlineare Traglastberechnung (GMNIA)

Die nichtlineare Traglastberechnung mit geometrischen Ersatzimperfektionen auf Basis der Beuleigenformen wird immer so durchgeführt, dass die vorgegebene Belastung auf ein Spannungsniveau für das mittlere Beobachtungsfeld in Höhe der Stegoberkante auf die Fließspannung $\sigma_{m,N,GMNIA} = f_y = 355$ [N/mm²] aus alleiniger Normalkraftbeanspruchung führt. Der berechnete Laststeigerungsfaktor (LSF) bezieht sich auf die Größe dieses Spannungsniveaus und kann somit unmittelbar mit dem Abminderungsfaktor ρ_c der Beultragfähigkeit nach Eurocode 3-1-5 [1] verglichen werden. Aufgrund der hohen Steifigkeit der Längssteifen ergab sich für die Systeme S2 und S3 (sowohl mit endenden Längssteifen, als auch bei durchlaufenden Längssteifen nach [5]) keine globale Eigenformen bzw. kein globaler Eigenwerte. Die für die Traglastberechnung erforderliche, globale geometrische Ersatzimperfektion laut Eurocode 3-1-5 [1] wurde daher manuell mittels eines parabolischen Verformungsansatzes in das FE-Modell eingebracht.

5.1 System S1

Das System S1 beinhaltet zwei in äquidistanten Abständen, in den Drittelpunkten des Beobachtungsfeldes befindliche, trapezförmige Hohlsteifen ($h_{LSt} = 100$ [mm] bzw. 101 [mm]). Die Berechnung erfolgt mit unterschiedlichen Steifenblechdicken ($t_{LSt} = 8$ [mm] bzw. 10 [mm]) und der konstanten Randspannungsverteilung $\psi = 1,0$ [-]. Für das System S1 ($t_{LSt} = 8$ [mm]) werden die Ergebnisse der vier Varianten der Randfeldstützung (siehe Abschnitt 4.1) angeführt, für das System S1 ($t_{LSt} = 10$ [mm]) erfolgt die Berechnung ausschließlich mit der Randfeldstützung nach *Variante 2*.

5.1.1 System S1: $\alpha = 1,5$ [-] / $t_{LSt} = 8$ [mm] / $\psi = 1,0$ [-] / *Variante 1 bis 4*

5.1.1.1 Lineare Analyse (LA)

Die Spannungs- (σ_{11}) bzw. Verformungsverläufe (u_y) im Stegblech des Randfeldes sowie des Beobachtungsfeldes und in den Längssteifen sind der nachfolgenden Abb. 5.3 bis Abb. 5.22 zu entnehmen.

a.) Starre Stützung (*Variante 1*)

Die Normalspannungsverteilung σ_{11} im Steg des Randfeldes entspricht Abb. 5.3.

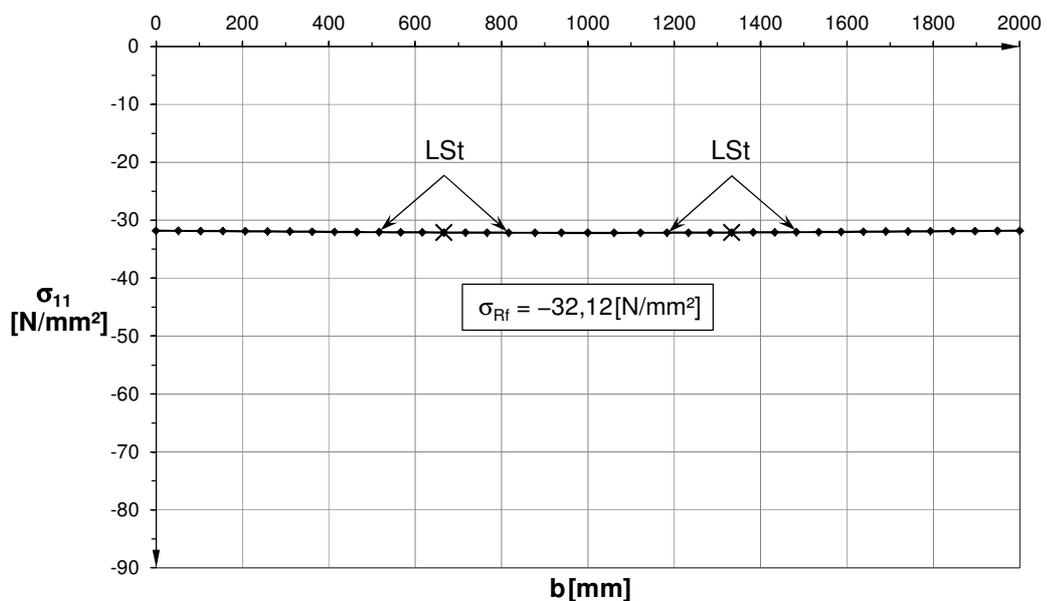


Abb. 5.3: Gesamtspannung σ_{11} ($= \sigma_{Rf}$) in der Mitte eines Randfeldes über die Steghöhe auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (Vertikalschnitt II) für System S1; $t_{LSt} = 8$ [mm] – *Variante 1*

In der nachfolgenden Abb. 5.4 (Achse m) und Abb. 5.5 (Achse o) sind die vorliegenden Gesamtspannungen σ_{11} in der Mittelachse der Längssteifen explizit ausgewiesen, welche in der Vergleichsrechnung zwischen den FE-Ergebnissen und den vereinfachten Rechenmodellen in Anhang B Verwendung finden.

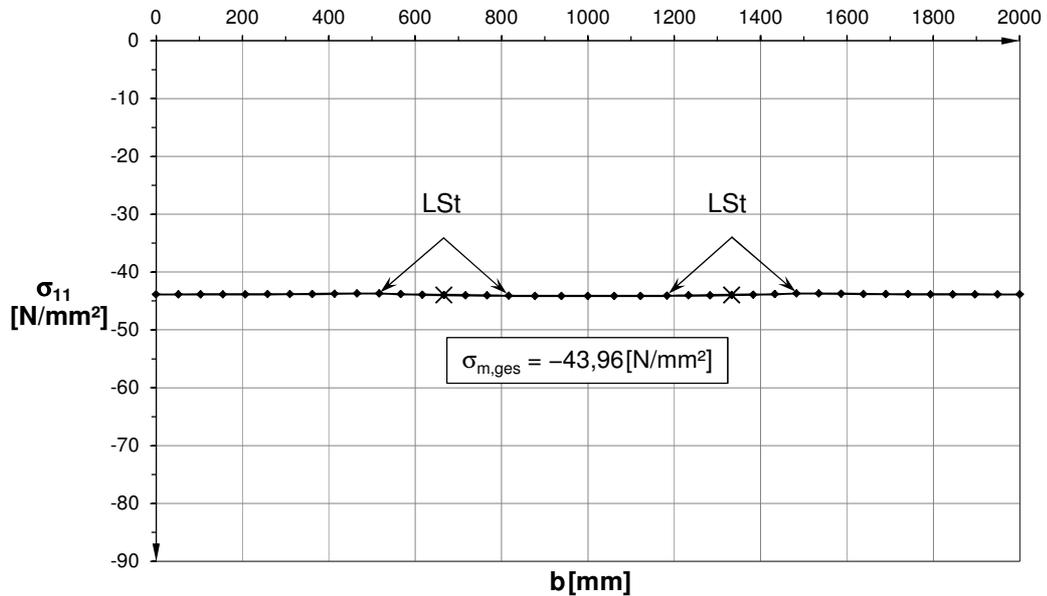


Abb. 5.4: Gesamtspannung σ_{11} ($= \sigma_{m,N} + \sigma_{m,\Delta M}$) in der Mitte des Beobachtungsfeldes über die Steghöhe auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (Vertikalschnitt I) für System S1; $t_{LSt} = 8 \text{ [mm]}$ – Variante 1

Es liegt ein nahezu konstanter Spannungsverlauf über den gesamten Stegquerschnitt in allen Teilfeldern vor. Die äußeren Einzelfelder im Mittelfeld werden somit auch für die Biegewirkung der Längssteifen vollständig mitaktiviert. Gemäß Abb. 5.5 erfährt die gesamte Längssteife ausschließlich Druckspannungen.

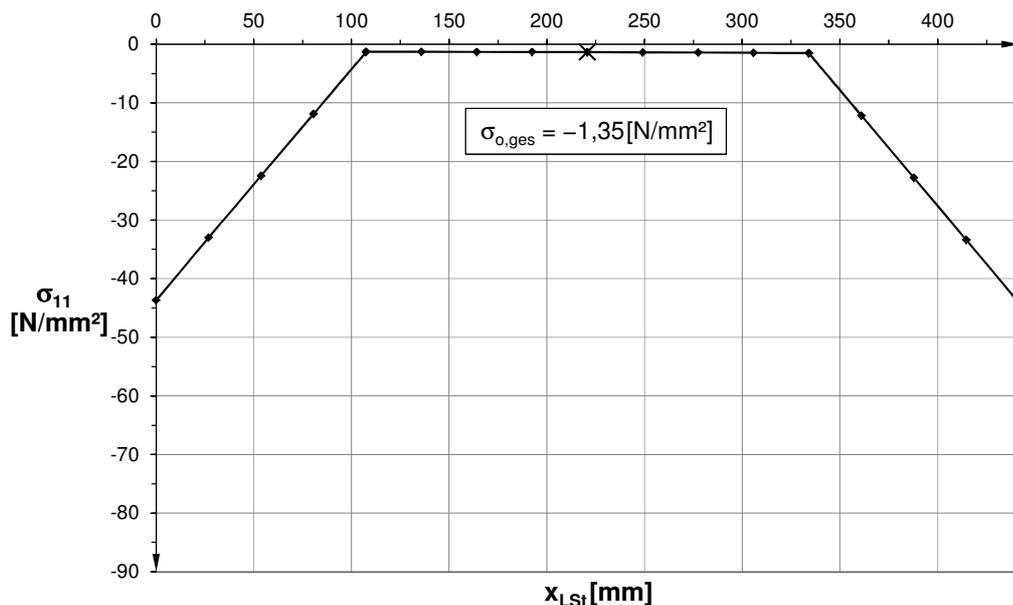


Abb. 5.5: Gesamtspannung σ_{11} ($= \sigma_{N,LSt} + \sigma_{\Delta M,LSt}$) der Längssteife auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (abgewinkelte Länge x_{LSt} ; beide Stege und Untergurt) für System S1; $t_{LSt} = 8 \text{ [mm]}$ – Variante 1

Die Verformung u_y aus der Stegebene des Beobachtungsfeldes ist in Abb. 5.6 dargestellt.

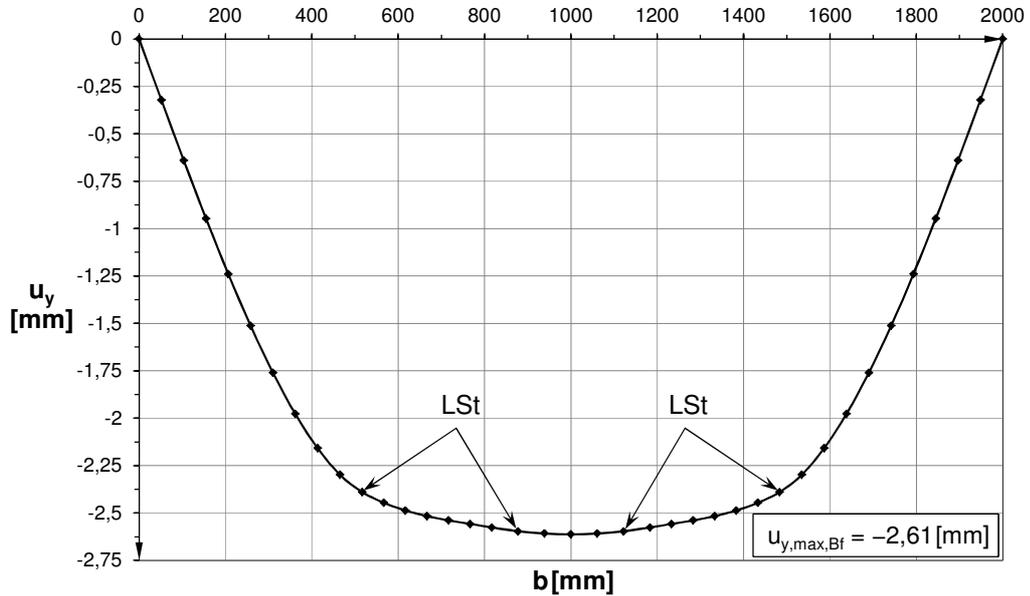


Abb. 5.6: Verformung u_y in der Mitte des Beobachtungsfeldes über die Steghöhe auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (Vertikalschnitt I) für System S1; $t_{LSt} = 8 [mm]$ – Variante 1

Die Abb. 5.7 zeigt den Verformungsverlauf u_y entlang einer Längssteife im Beobachtungsfeld mit einer beidseitig in die Randfelder fortgesetzten Schnittführung.

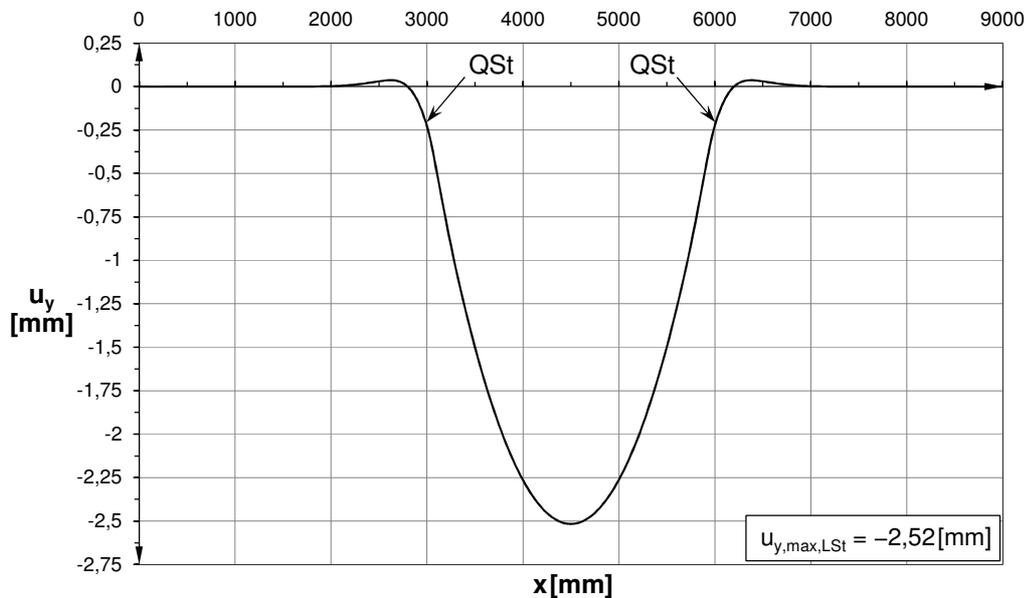


Abb. 5.7: Verformung u_y entlang einer Längssteife in Längsrichtung auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (Horizontalschnitt III) für System S1; $t_{LSt} = 8 [mm]$ – Variante 1

b.) Stützung mit identer Längssteifen-Biegesteifigkeit (Variante 2)

Die Normalspannungsverteilung σ_{11} im Steg des Randfeldes entspricht Abb. 5.8.

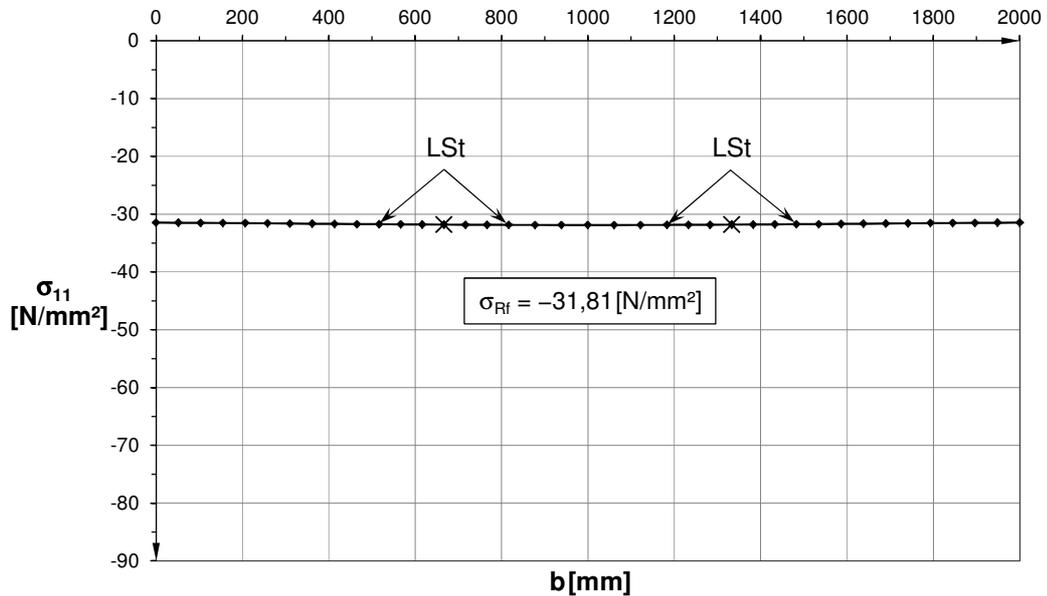


Abb. 5.8: Gesamtspannung σ_{11} ($= \sigma_{Rf}$) in der Mitte eines Randfeldes über die Steghöhe auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (Vertikalschnitt II) für System S1; $t_{LSt} = 8$ [mm] – Variante 2

In der nachfolgenden Abb. 5.9 (Achse m) und Abb. 5.10 (Achse o) sind die vorliegenden Gesamtspannungen σ_{11} in der Mittelachse der Längssteifen explizit ausgewiesen, welche in der Vergleichsrechnung zwischen den FE-Ergebnissen und den vereinfachten Rechenmodellen in Anhang B Verwendung finden.

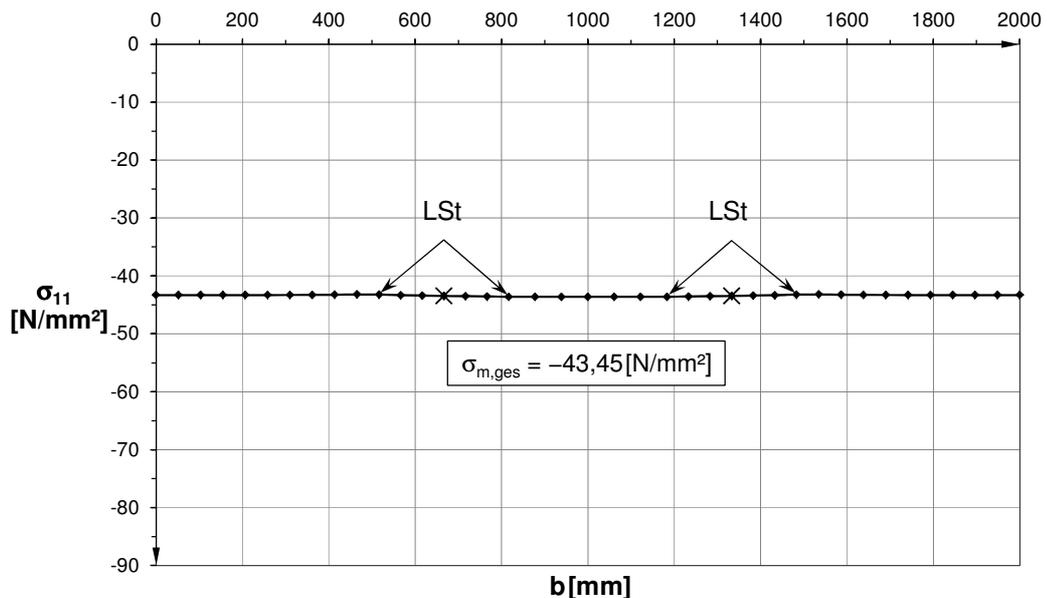


Abb. 5.9: Gesamtspannung σ_{11} ($= \sigma_{m,N} + \sigma_{m,\Delta M}$) in der Mitte des Beobachtungsfeldes über die Steghöhe auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (Vertikalschnitt I) für System S1; $t_{LSt} = 8$ [mm] – Variante 2

Es liegt ein nahezu konstanter Spannungsverlauf über den gesamten Stegquerschnitt in allen Teilfeldern vor. Die äußeren Einzelfelder im Mittelfeld werden somit auch für die Biegewirkung der Längssteifen vollständig mitaktiviert. Gemäß Abb. 5.10 erfährt die gesamte Längssteife ausschließlich Druckspannungen.

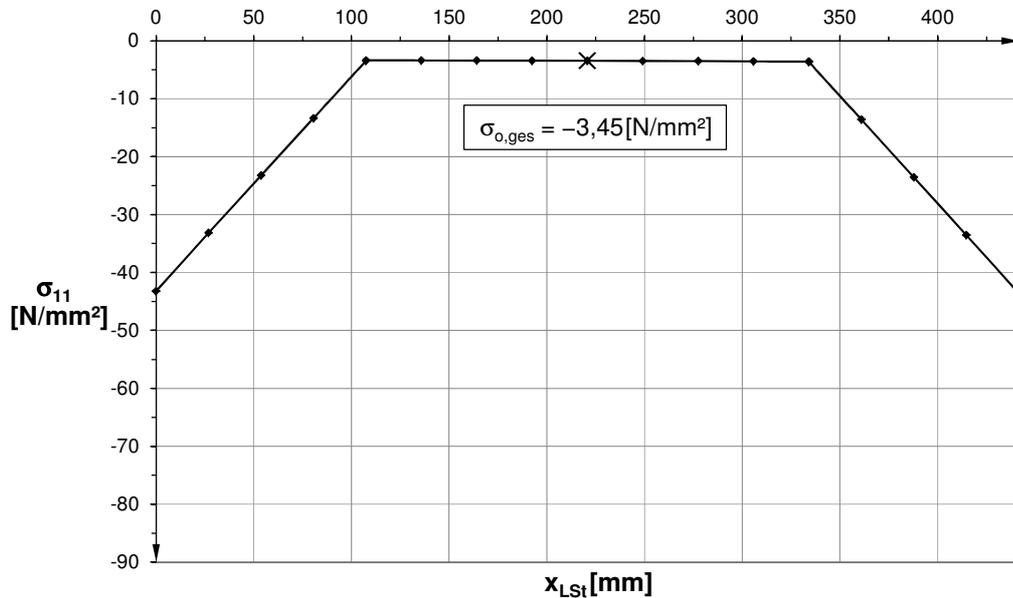


Abb. 5.10: Gesamtspannung σ_{11} ($= \sigma_{N,LS1} + \sigma_{\Delta M,LS1}$) der Längssteife auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (abgewinkelte Länge x_{LSt} ; beide Stege und Untergurt) für System S1; $t_{LS1} = 8$ [mm] – Variante 2

Die Verformung u_y aus der Stegebene des Beobachtungsfeldes ist in Abb. 5.11 dargestellt.

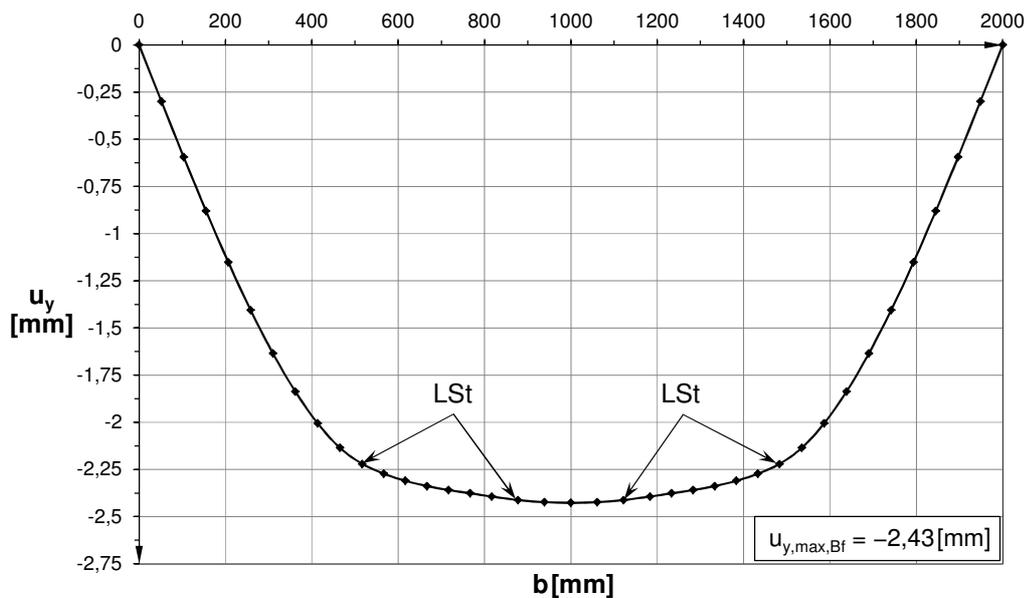


Abb. 5.11: Verformung u_y in der Mitte des Beobachtungsfeldes über die Steghöhe auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (Vertikalschnitt I) für System S1; $t_{LS1} = 8$ [mm] – Variante 2

Die Abb. 5.12 zeigt den Verformungsverlauf u_y entlang einer Längssteife im Beobachtungsfeld mit einer beidseitig in die Randfelder fortgesetzten Schnittführung.

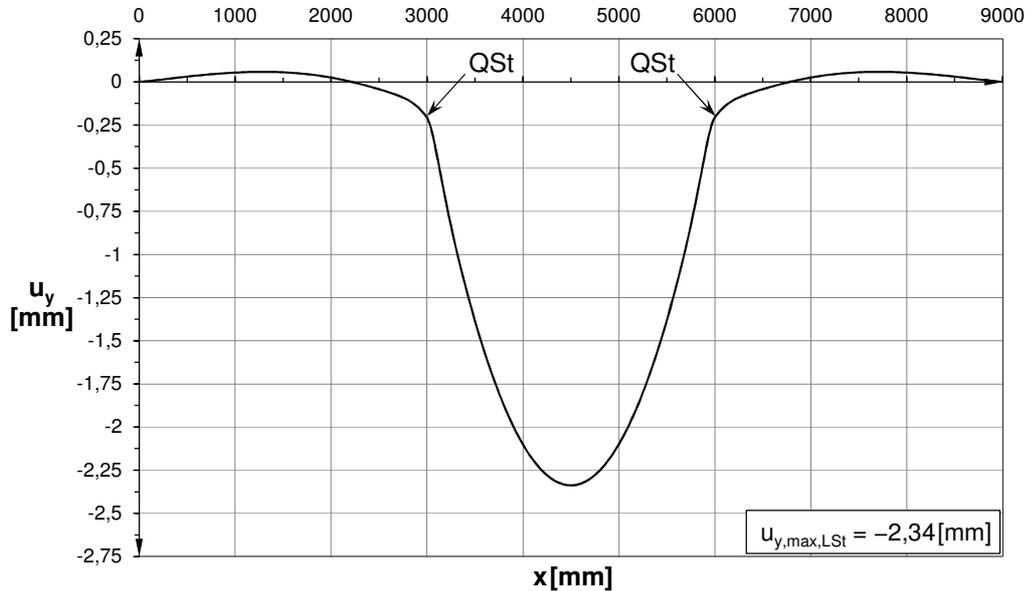


Abb. 5.12: Verformung u_y entlang einer Längssteife in Längsrichtung auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (Horizontalschnitt III) für System S1; $t_{LSt} = 8$ [mm] – Variante 2

c.) **Stützung mit reduzierter Längssteifen-Biegesteifigkeit (Variante 3)**

Die Normalspannungsverteilung σ_{11} im Steg des Randfeldes entspricht Abb. 5.13.

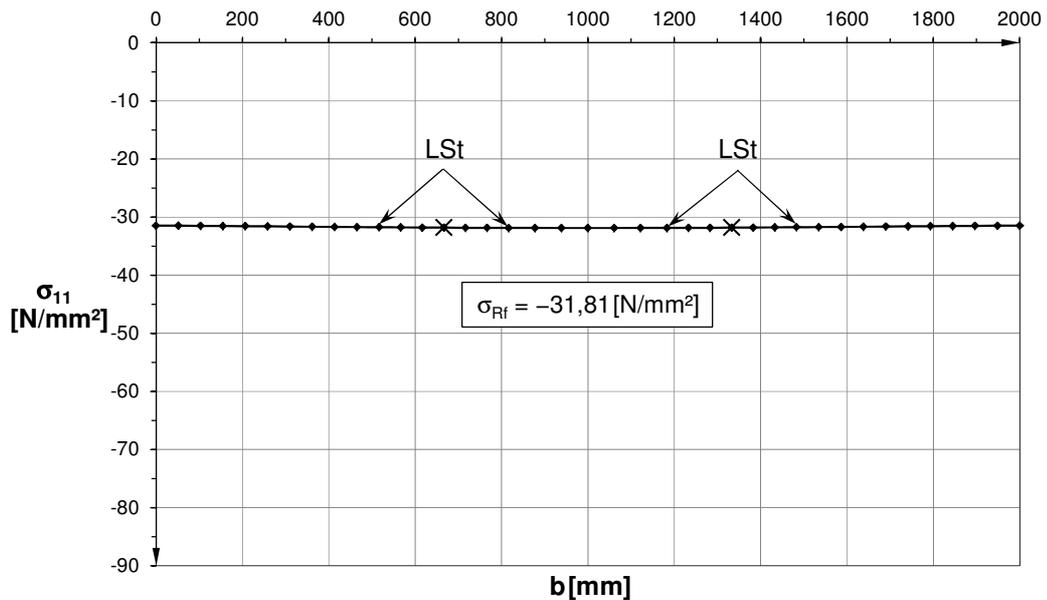


Abb. 5.13: Gesamtspannung σ_{11} ($= \sigma_{Rf}$) in der Mitte eines Randfeldes über die Steghöhe auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (Vertikalschnitt II) für System S1; $t_{LSt} = 8$ [mm] – Variante 3

In der nachfolgenden Abb. 5.14 (Achse m) und Abb. 5.15 (Achse o) sind die vorliegenden Gesamtspannungen σ_{11} in der Mittelachse der Längssteifen explizit ausgewiesen, welche in der Vergleichsrechnung zwischen den FE-Ergebnissen und den vereinfachten Rechenmodellen in Anhang B Verwendung finden.

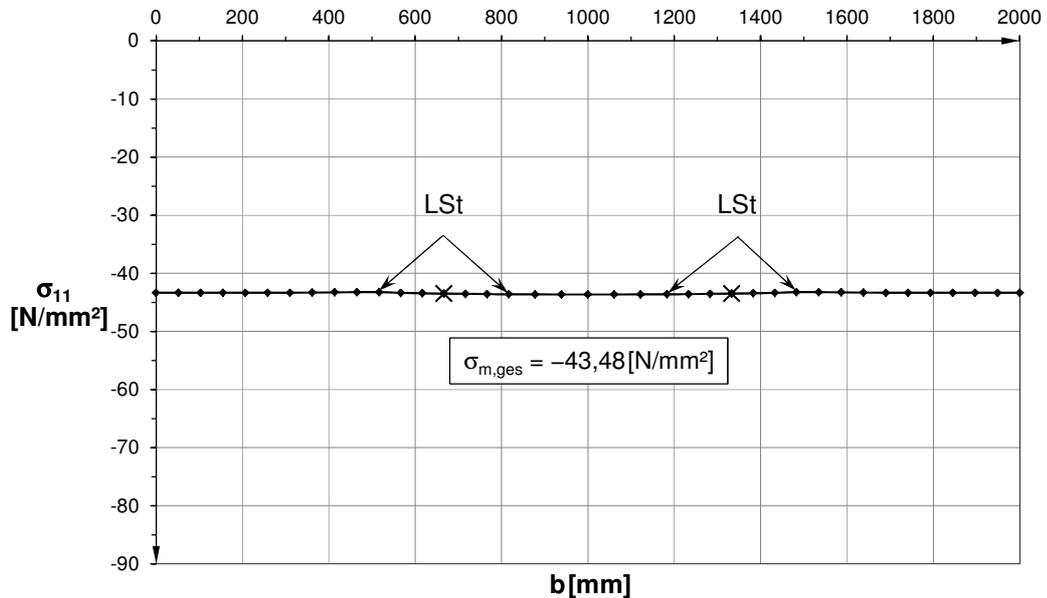


Abb. 5.14: Gesamtspannung σ_{11} ($= \sigma_{m,N} + \sigma_{m,\Delta M}$) in der Mitte des Beobachtungsfeldes über die Steghöhe auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (Vertikalschnitt I) für System S1; $t_{LSt} = 8[\text{mm}]$ – Variante 3

Es liegt ein nahezu konstanter Spannungsverlauf über den gesamten Stegquerschnitt in allen Teilfeldern vor. Die äußeren Einzelfelder im Mittelfeld werden somit auch für die Biegewirkung der Längssteifen vollständig mitaktiviert. Gemäß Abb. 5.15 erfährt die gesamte Längssteife ausschließlich Druckspannungen.

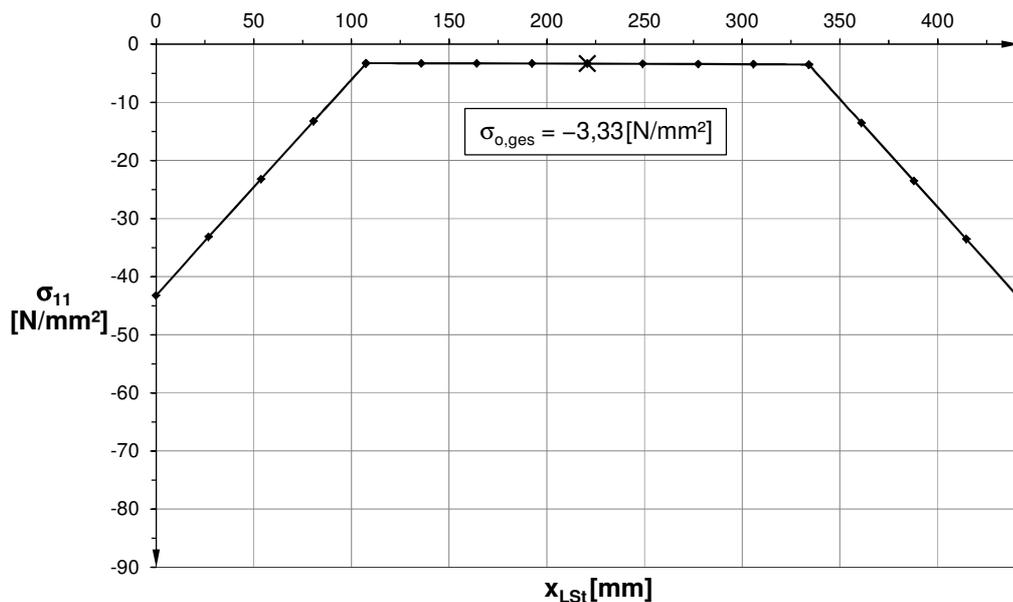


Abb. 5.15: Gesamtspannung σ_{11} ($= \sigma_{N,LSt} + \sigma_{\Delta M,LSt}$) der Längssteife auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (abgewinkelte Länge x_{LSt} ; beide Stege und Untergurt) für System S1; $t_{LSt} = 8[\text{mm}]$ – Variante 3

Die Verformung u_y aus der Stegebene des Beobachtungsfeldes ist in Abb. 5.16 dargestellt.

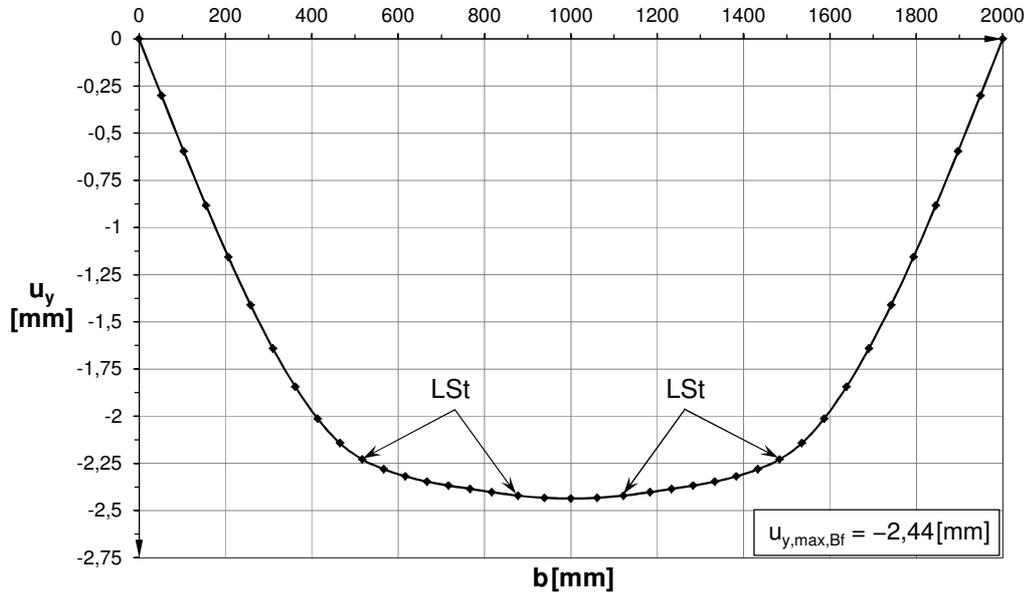


Abb. 5.16: Verformung u_y in der Mitte des Beobachtungsfeldes über die Steghöhe auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (Vertikalschnitt I) für System S1; $t_{LSt} = 8 [mm]$ – Variante 3

Die Abb. 5.17 zeigt den Verformungsverlauf u_y entlang einer Längssteife im Beobachtungsfeld mit einer beidseitig in die Randfelder fortgesetzten Schnittführung.

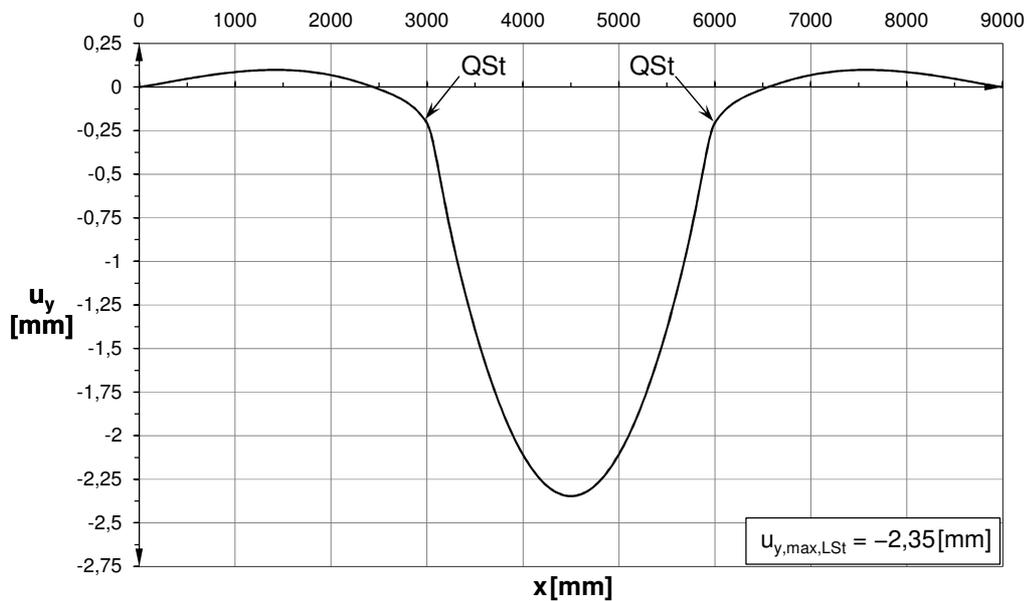


Abb. 5.17: Verformung u_y entlang einer Längssteife in Längsrichtung auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (Horizontalschnitt III) für System S1; $t_{LSt} = 8 [mm]$ – Variante 3

d.) Stützung der Randfelder ohne Längssteifen (*Variante 4*)

Die Normalspannungsverteilung σ_{11} im Steg des Randfeldes entspricht Abb. 5.18.

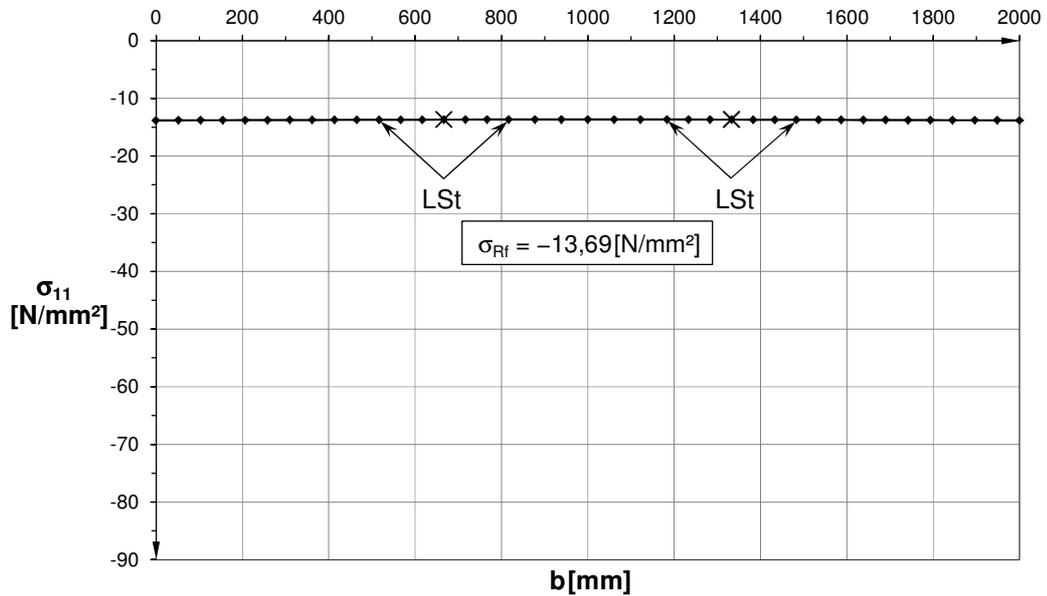


Abb. 5.18: Gesamtspannung σ_{11} ($= \sigma_{Rf}$) in der Mitte eines Randfeldes über die Steghöhe auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (Vertikalschnitt II) für System S1; $t_{LSt} = 8 \text{ [mm]}$ – *Variante 4*

In der nachfolgenden Abb. 5.19 (Achse m) und Abb. 5.20 (Achse o) sind die vorliegenden Gesamtspannungen σ_{11} in der Mittelachse der Längssteifen explizit ausgewiesen, welche in der Vergleichsrechnung zwischen den FE-Ergebnissen und den vereinfachten Rechenmodellen in Anhang B Verwendung finden.

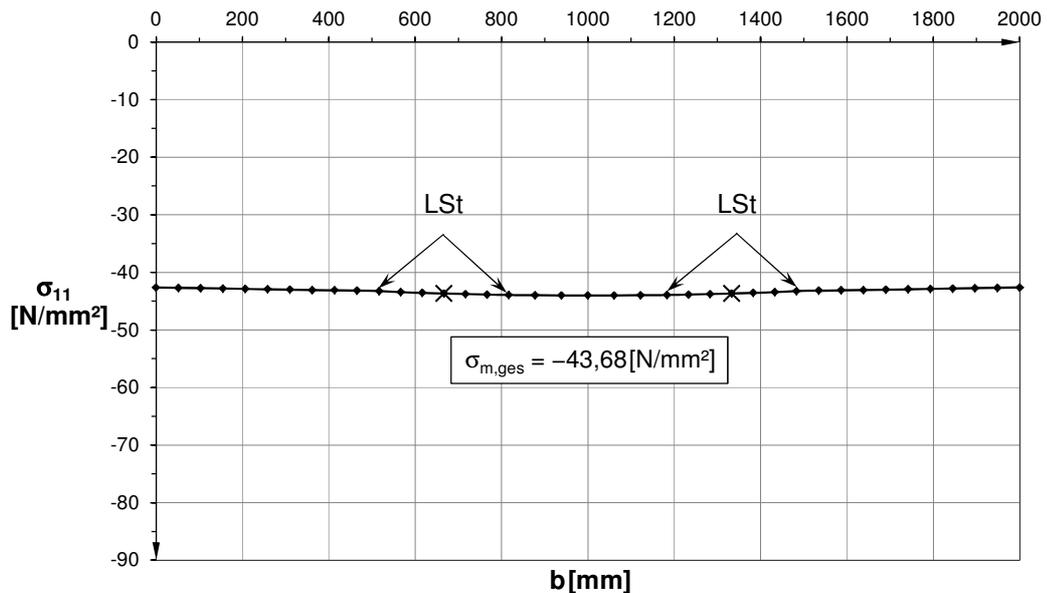


Abb. 5.19: Gesamtspannung σ_{11} ($= \sigma_{m,N} + \sigma_{m,\Delta M}$) in der Mitte des Beobachtungsfeldes über die Steghöhe auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (Vertikalschnitt I) für System S1; $t_{LSt} = 8 \text{ [mm]}$ – *Variante 4*

Es liegt ein nahezu konstanter Spannungsverlauf über den gesamten Stegquerschnitt in allen Teilfeldern vor. Die äußeren Einzelfelder im Mittelfeld werden somit auch für die Biegewirkung der Längssteifen vollständig mitaktiviert. Gemäß Abb. 5.20 erfährt die gesamte Längssteife ausschließlich Druckspannungen.

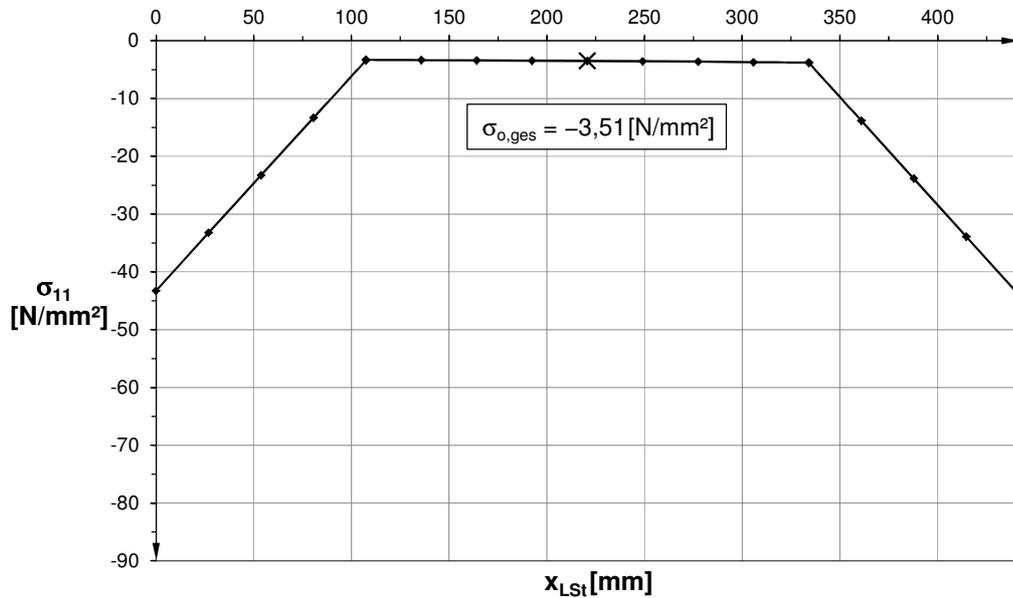


Abb. 5.20: Gesamtspannung σ_{11} ($= \sigma_{N,LSt} + \sigma_{\Delta M,LSt}$) der Längssteife auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (abgewinkelte Länge x_{LSt} ; beide Stege und Untergurt) für System S1; $t_{LSt} = 8$ [mm] – Variante 4

Die Verformung u_y aus der Stegebene des Beobachtungsfeldes ist in Abb. 5.21 dargestellt.

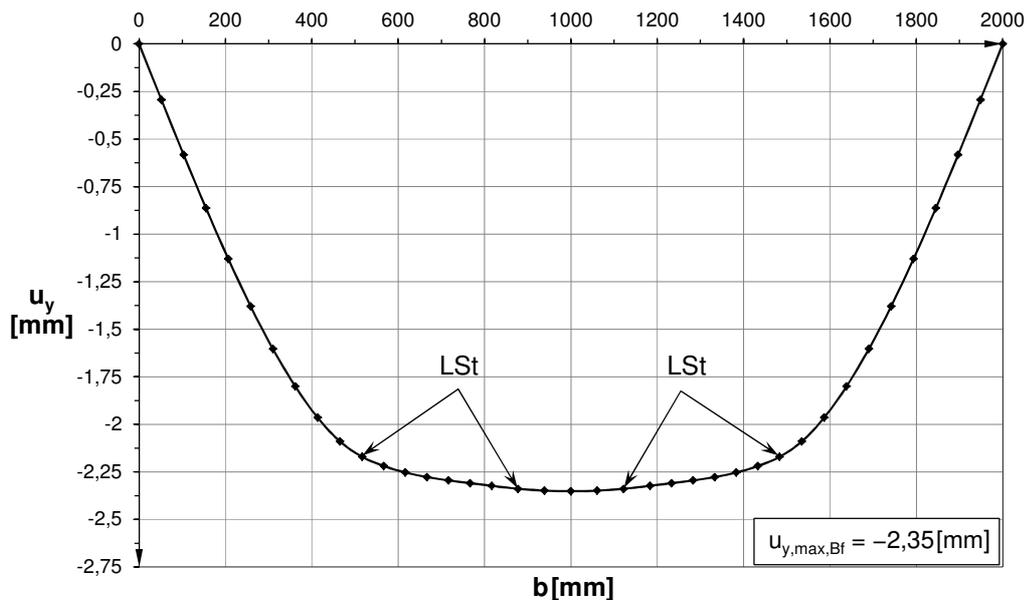


Abb. 5.21: Verformung u_y in der Mitte des Beobachtungsfeldes über die Steghöhe auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (Vertikalschnitt I) für System S1; $t_{LSt} = 8$ [mm] – Variante 4

Die Abb. 5.22 zeigt den Verformungsverlauf u_y entlang einer Längssteife im Beobachtungsfeld mit einer beidseitig in die Randfelder fortgesetzten Schnittführung.

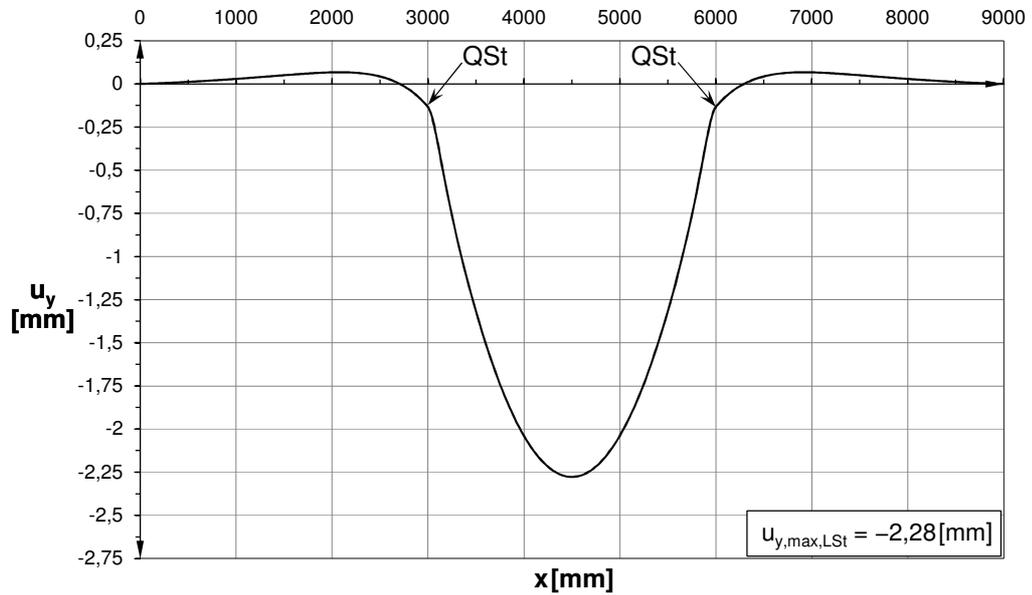


Abb. 5.22: Verformung u_y entlang einer Längssteife in Längsrichtung auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (Horizontalschnitt III) für System S1; $t_{LSt} = 8[mm]$ – Variante 4

5.1.1.2 Lineare Beulanalyse (LBA)

a.) Starre Stützung (*Variante 1*)

Der gemäß der Regelung für geometrische Ersatzimperfectionen nach Eurocode 3-1-5 [1] gewählte globale und lokale Eigenwert ϕ_{cr} aus der linearen Beulberechnung (LBA) ist in Tab. 5.1 angegeben. Vergleichsweise finden sich in Klammern gesetzt die zugehörigen Eigenwerte der numerischen Traglastermittlung des identen Systems mit durchlaufenden Längssteifen aus [5].

Nr.	Eigenwert ϕ_{cr} [-]	Eigenform
1.	28,601 (35,407)	lokal
25.	45,153 (41,232)	global

Tab. 5.1: Lokaler und globaler Eigenwert ϕ_{cr} der linearen Beulanalyse für System S1; $t_{LSt} = 8$ [mm] – *Variante 1*

In Abb. 5.23 und Abb. 5.24 sind die zugehörigen lokalen und globalen Eigenformen für endende Längssteifen dargestellt. Aufgrund des in x- und z-Richtung symmetrisch verlaufenden Gesamtquerschnittes sind die Beulformen ebenfalls symmetrisch.

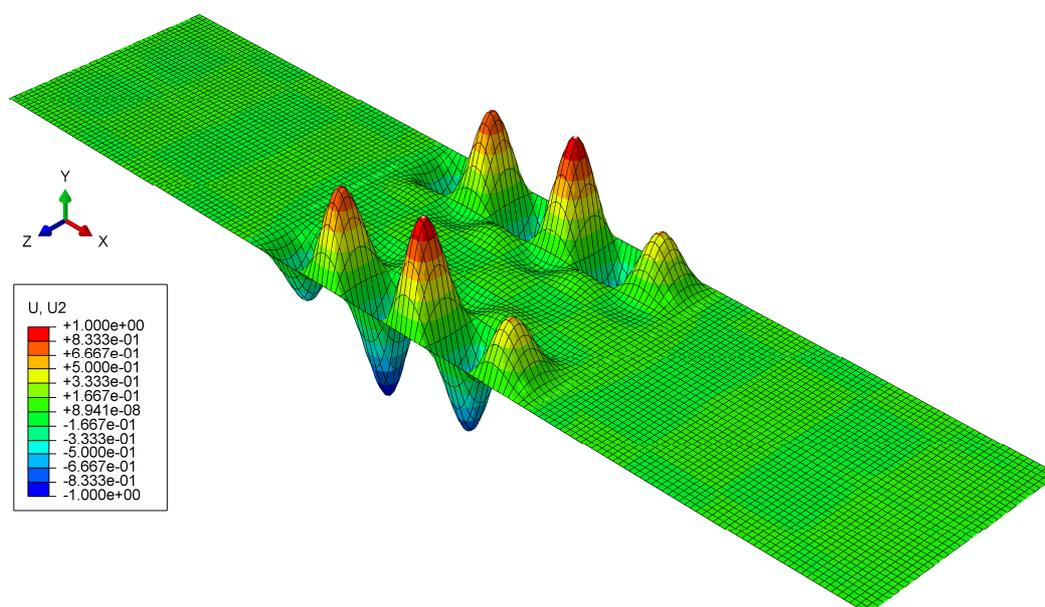


Abb. 5.23: 1. Eigenform (lokal), $\phi_{cr} = 28,601$ [-] für System S1; $t_{LSt} = 8$ [mm] – *Variante 1*

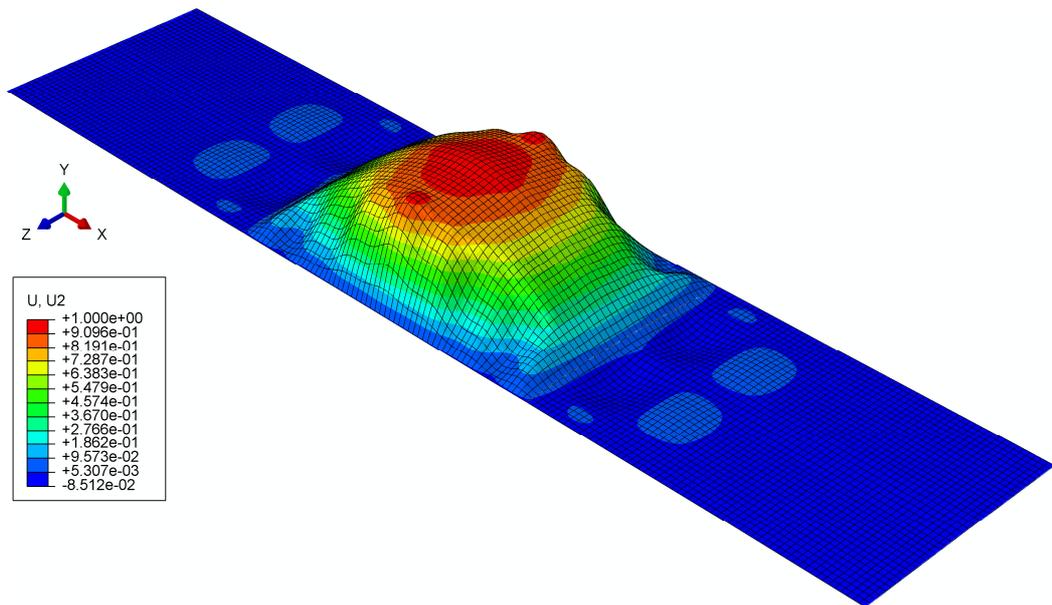


Abb. 5.24: 25. Eigenform (global), $\phi_{cr} = 45,153[-]$ für System S1; $t_{LSt} = 8[\text{mm}]$ – Variante 1

Die in Abb. 5.25 und Abb. 5.26 dargestellten Vertikalschnitte verlaufen durch die Amplitude der gewählten Beulform. Für den Skalierfaktor (SF) der lokalen Eigenform (Begleitimperfection) gilt ein Ansatz zu 70% der Bezugsgröße $b/200$ (siehe Tab. 3.1 und Abb. 3.7). Daraus folgt:

$$SF = 0,7 \cdot 1,0 \cdot \frac{b_{EF}}{200} = 0,7 \cdot 1,0 \cdot \frac{514,17}{200} = 1,800 [-]$$

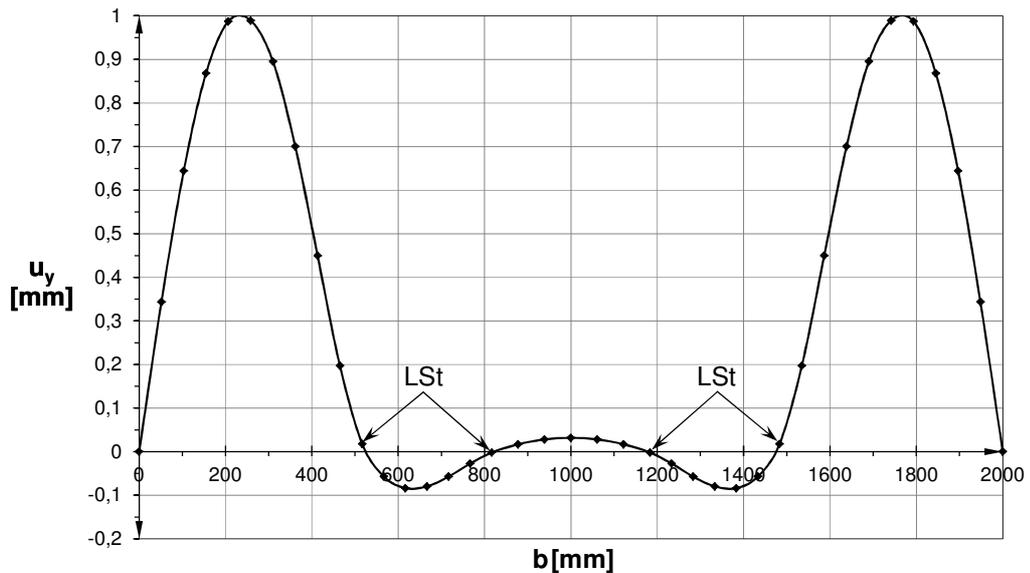


Abb. 5.25: Verformung u_y der 1. Eigenform (lokal) über die Steghöhe für $\bar{x} = 0,58[-]$ für System S1; $t_{LSt} = 8[\text{mm}]$ – Variante 1

Die globale Eigenform (Leitimperfektion) wird mit dem Ansatz zu 100% in der Traglastberechnung berücksichtigt. Der zugehörige Skalierfaktor (SF) ergibt sich somit zu:

$$SF = -1,0 \cdot \frac{1}{0,9281} \cdot \frac{b}{400} = -1,0 \cdot \frac{1}{0,9281} \cdot \frac{2000}{400} = -5,388 [-]$$

Anmerkung:

Das negative Vorzeichen ergibt sich, da die Imperfektionsrichtung mit Druckspannungen im Stegblech maßgebend ist. Der Faktor 0,9281 [-] berücksichtigt die überlagerte globale Eigenform in Abb. 5.26 und stellt die tatsächliche Verformung u_y an der Stelle der Längssteife dar.

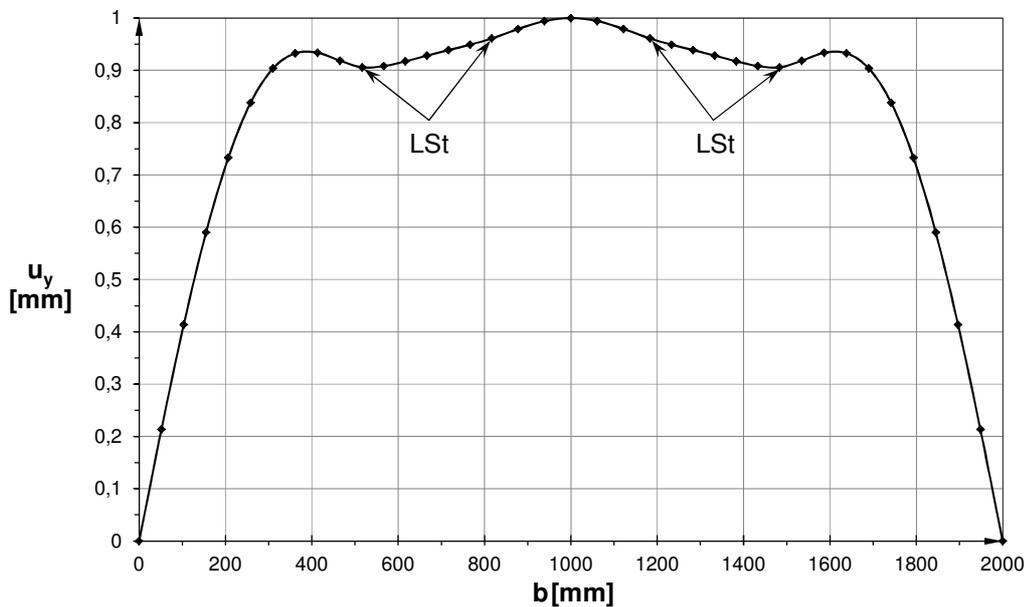


Abb. 5.26: Verformung u_y der 25. Eigenform (global) über die Steghöhe für $\bar{x} = 0,50[-]$ für System S1; $t_{LSt} = 8[\text{mm}]$ – Variante 1

Die Berechnung der idealen Plattenbeulspannungen $\sigma_{cr,p}$ erfolgt, wie in Abschnitt 4.1.4, auf Basis der numerischen Eigenwerte ϕ_{cr} ($= \alpha_{cr}$), welche einen Rückschluss auf die Beulwerte $k_{\sigma,p}$ lt. Tab. 5.2 (Vergleichswerte mit durchlaufenden Längssteifen aus [5] sind in Klammern gesetzt) ermöglichen.

	Einzelfeld	mittleres Teilfeld
σ_E [N/mm ²]	71,87	4,75
$\sigma_{cr,p}$ [N/mm ²]	354,17 (354,07)	451,53 (412,32)
$k_{\sigma,p}$ [-]	4,93 (4,93)	95,06 (86,80)

Tab. 5.2: Beulspannungen σ_E , $\sigma_{cr,p}$ und zugehöriger Beulwert $k_{\sigma,p}$ getrennt nach Stegfeldern für System S1; $t_{LSt} = 8[\text{mm}]$ – Variante 1

b.) Stützung mit identer Längssteifen-Biegesteifigkeit (*Variante 2*)

Der gemäß der Regelung für geometrische Ersatzimperfektionen nach Eurocode 3-1-5 [1] gewählte globale und lokale Eigenwert ϕ_{cr} aus der linearen Beulberechnung (LBA) ist in Tab. 5.3 angegeben. Vergleichsweise finden sich in Klammern gesetzt die zugehörigen Eigenwerte der numerischen Traglastermittlung des identen Systems mit durchlaufenden Längssteifen aus [5].

Nr.	Eigenwert ϕ_{cr} [-]	Eigenform
1.	28,929 (35,407)	lokal
31.	48,014 (41,232)	global

Tab. 5.3: Lokaler und globaler Eigenwert ϕ_{cr} der linearen Beulanalyse für System S1; $t_{LSt} = 8[\text{mm}]$ – *Variante 2*

In Abb. 5.27 und Abb. 5.28 sind die zugehörigen lokalen und globalen Eigenformen für endende Längssteifen dargestellt. Aufgrund des in x- und z-Richtung symmetrisch verlaufenden Gesamtquerschnittes sind die Beulformen ebenfalls symmetrisch.

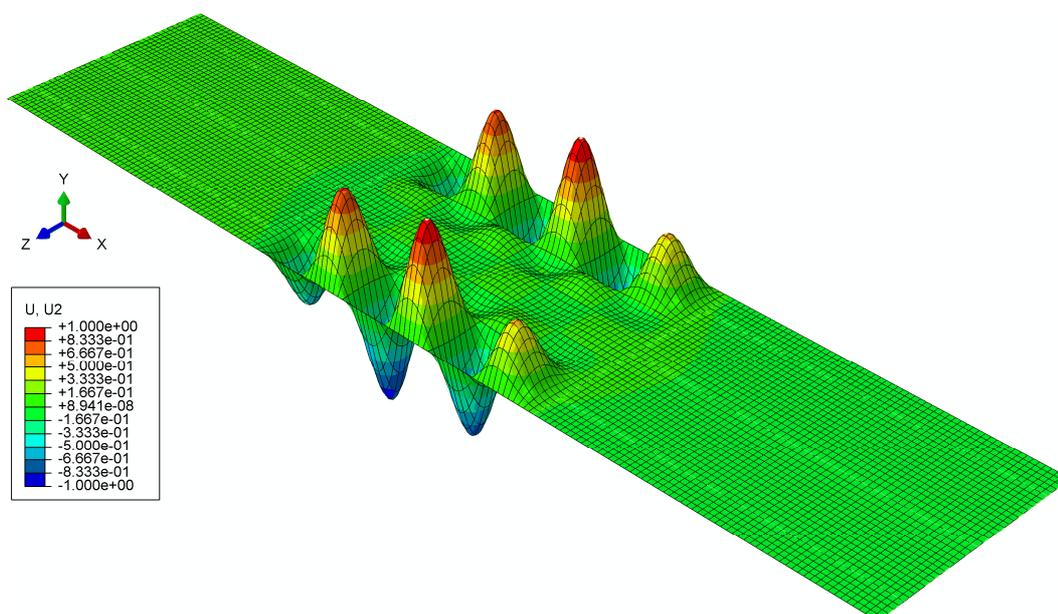


Abb. 5.27: 1. Eigenform (lokal), $\phi_{cr} = 28,929[-]$ für System S1; $t_{LSt} = 8[\text{mm}]$ – *Variante 2*

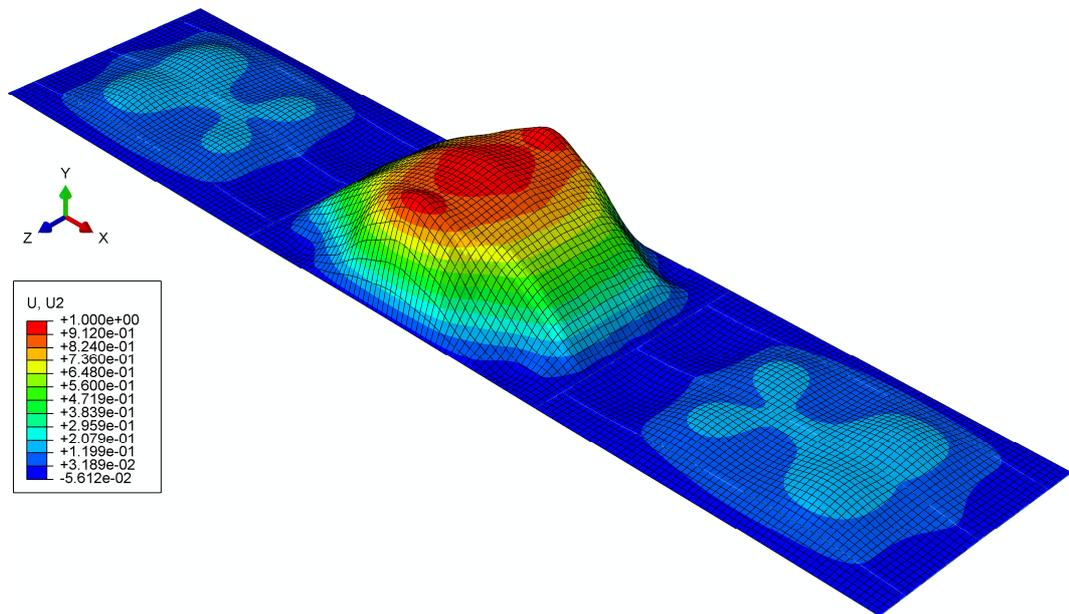


Abb. 5.28: 31. Eigenform (global), $\phi_{cr} = 48,014[-]$ für System S1; $t_{LSt} = 8[\text{mm}]$ – Variante 2

Die in Abb. 5.29 und Abb. 5.30 dargestellten Vertikalschnitte verlaufen durch die Amplitude der gewählten Beulform. Für den Skalierfaktor (SF) der lokalen Eigenform (Begleitimperfection) gilt ein Ansatz zu 70% der Bezugsgröße $b/200$ (siehe Tab. 3.1 und Abb. 3.7). Daraus folgt:

$$SF = 0,7 \cdot 1,0 \cdot \frac{514,17}{200} = 1,800[-]$$

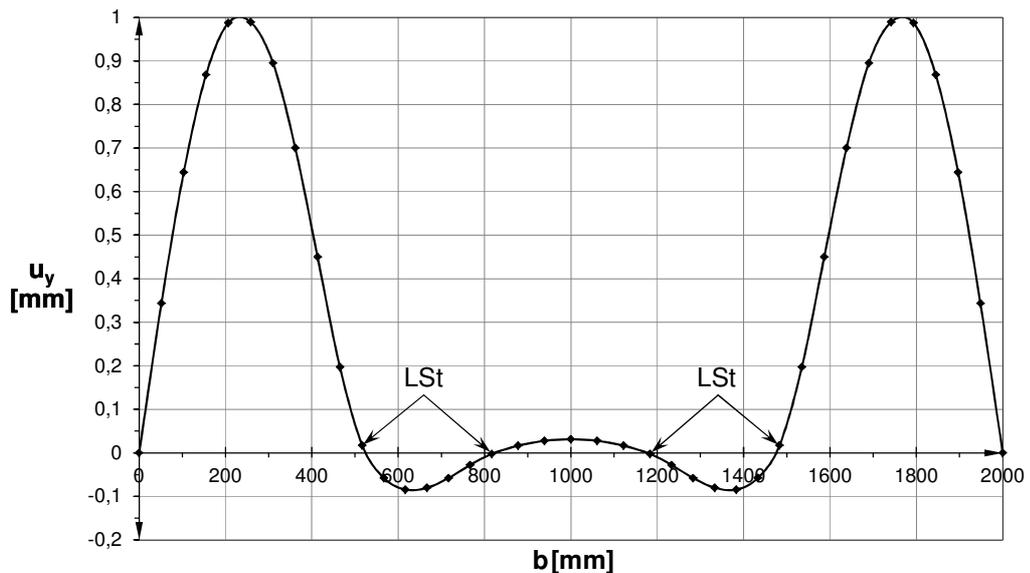


Abb. 5.29: Verformung u_y der 1. Eigenform (lokal) über die Steghöhe für $\bar{x} = 0,58[-]$ für System S1; $t_{LSt} = 8[\text{mm}]$ – Variante 2

Die globale Eigenform (Leitimperfektion) wird mit dem Ansatz zu 100% in der Traglastberechnung berücksichtigt. Der zugehörige Skalierfaktor (SF) ergibt sich somit zu:

$$SF = -1,0 \cdot \frac{1}{0,9251} \cdot \frac{2000}{400} = -5,405 [-]$$

Anmerkung:

Das negative Vorzeichen ergibt sich, da die Imperfektionsrichtung mit Druckspannungen im Stegblech maßgebend ist. Der Faktor 0,9251 [-] berücksichtigt die überlagerte globale Eigenform in Abb. 5.30 und stellt die tatsächliche Verformung u_y an der Stelle der Längssteife dar.

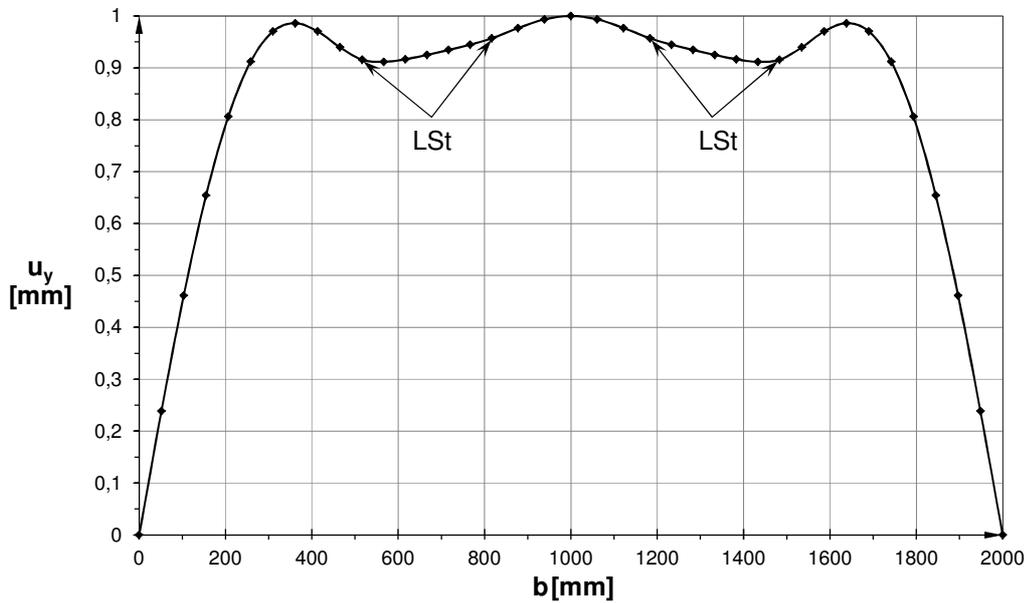


Abb. 5.30: Verformung u_y der 31. Eigenform (global) über die Steghöhe für $\bar{x} = 0,50[-]$ für System S1; $t_{LSt} = 8[mm]$ – Variante 2

Die Berechnung der idealen Plattenbeulspannungen $\sigma_{cr,p}$ erfolgt, wie in Abschnitt 4.1.4, auf Basis der numerischen Eigenwerte ϕ_{cr} ($= \alpha_{cr}$), welche einen Rückschluss auf die Beulwerte $k_{\sigma,p}$ lt. Tab. 5.4 (Vergleichswerte mit durchlaufenden Längssteifen aus [5] sind in Klammern gesetzt) ermöglichen.

	Einzelfeld	mittleres Teilfeld
σ_E [N/mm ²]	71,87	4,75
$\sigma_{cr,p}$ [N/mm ²]	354,08 (354,07)	480,14 (412,32)
$k_{\sigma,p}$ [-]	4,93 (4,93)	101,08 (86,80)

Tab. 5.4: Beulspannungen σ_E , $\sigma_{cr,p}$ und zugehöriger Beulwert $k_{\sigma,p}$ getrennt nach Stegfeldern für System S1; $t_{LSt} = 8[mm]$ – Variante 2

c.) **Stützung mit reduzierter Längssteifen-Biegesteifigkeit (Variante 3)**

Der gemäß der Regelung für geometrische Ersatzimperfektionen nach Eurocode 3-1-5 [1] gewählte globale und lokale Eigenwert ϕ_{cr} aus der linearen Beulberechnung (LBA) ist in Tab. 5.5 angegeben. Vergleichsweise finden sich in Klammern gesetzt die zugehörigen Eigenwerte der numerischen Traglastermittlung des identen Systems mit durchlaufenden Längssteifen aus [5].

Nr.	Eigenwert $\phi_{cr}[-]$	Eigenform
1.	28,908 (35,407)	lokal
31.	47,614 (41,232)	global

Tab. 5.5: Lokaler und globaler Eigenwert ϕ_{cr} der linearen Beulanalyse für System S1; $t_{LSt} = 8[\text{mm}]$ – Variante 3

In Abb. 5.31 und Abb. 5.32 sind die zugehörigen lokalen und globalen Eigenformen für endende Längssteifen dargestellt. Aufgrund des in x- und z-Richtung symmetrisch verlaufenden Gesamtquerschnittes sind die Beulformen ebenfalls symmetrisch.

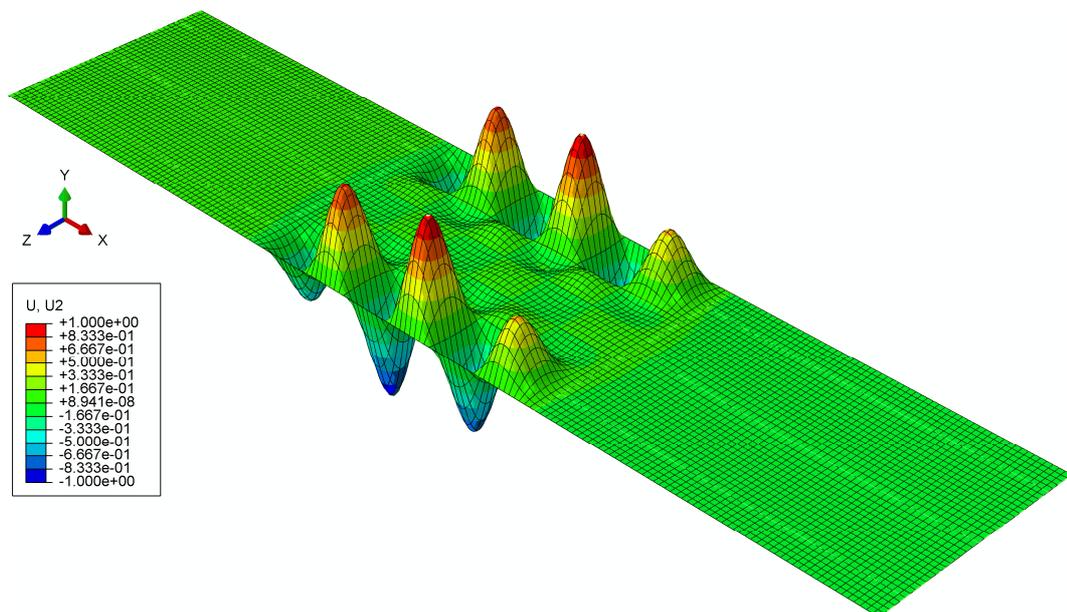


Abb. 5.31: 1. Eigenform (lokal), $\phi_{cr} = 28,908[-]$ für System S1; $t_{LSt} = 8[\text{mm}]$ – Variante 3

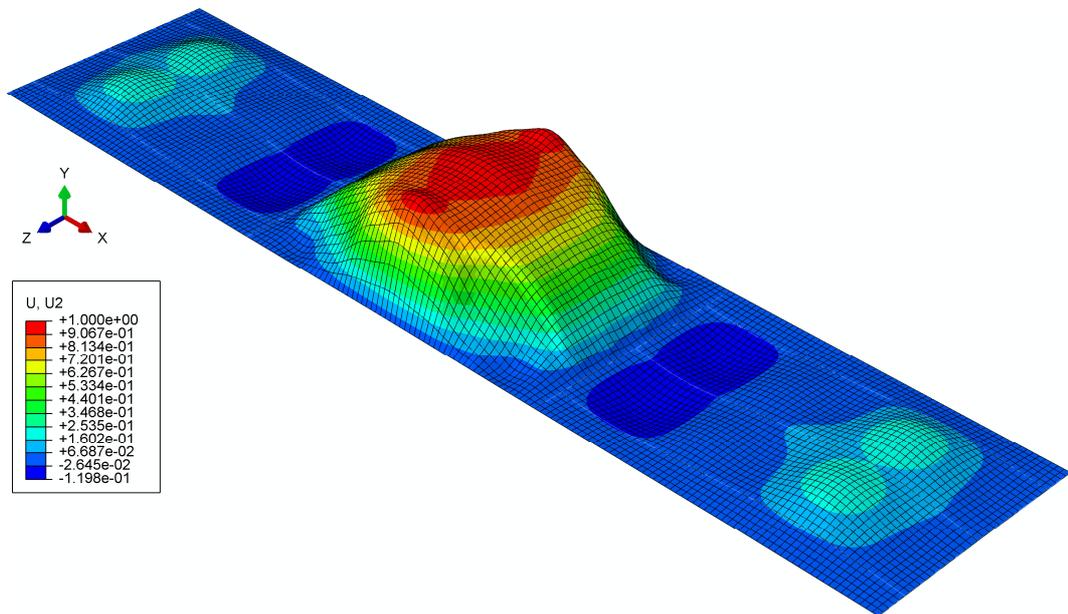


Abb. 5.32: 31. Eigenform (global), $\phi_{cr} = 47,614[-]$ für System S1; $t_{LSt} = 8[mm]$ – Variante 3

Die in Abb. 5.33 und Abb. 5.34 dargestellten Vertikalschnitte verlaufen durch die Amplitude der gewählten Beulform. Für den Skalierfaktor (SF) der lokalen Eigenform (Begleitimperfection) gilt ein Ansatz zu 70% der Bezugsgröße $b/200$ (siehe Tab. 3.1 und Abb. 3.7). Daraus folgt:

$$SF = 0,7 \cdot 1,0 \cdot \frac{514,17}{200} = 1,800[-]$$

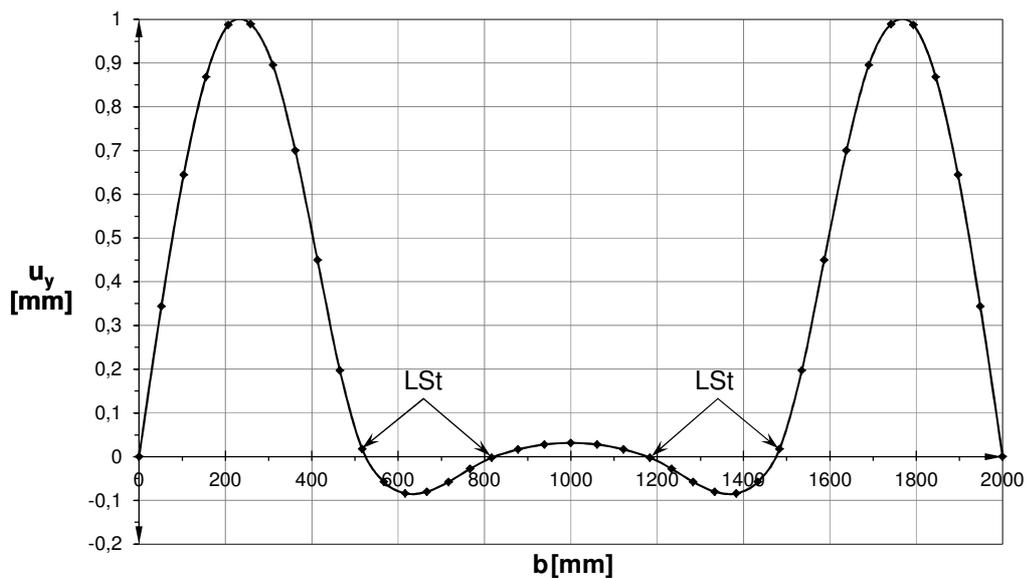


Abb. 5.33: Verformung u_y der 1. Eigenform (lokal) über die Steghöhe für $\bar{x} = 0,58[-]$ für System S1; $t_{LSt} = 8[mm]$ – Variante 3

Die globale Eigenform (Leitimperfektion) wird mit dem Ansatz zu 100% in der Traglastberechnung berücksichtigt. Der zugehörige Skalierfaktor (SF) ergibt sich somit zu:

$$SF = -1,0 \cdot \frac{1}{0,9284} \cdot \frac{2000}{400} = -5,385 [-]$$

Anmerkung:

Das negative Vorzeichen ergibt sich, da die Imperfektionsrichtung mit Druckspannungen im Stegblech maßgebend ist. Der Faktor 0,9284[-] berücksichtigt die überlagerte globale Eigenform in Abb. 5.34 und stellt die tatsächliche Verformung u_y an der Stelle der Längssteife dar.

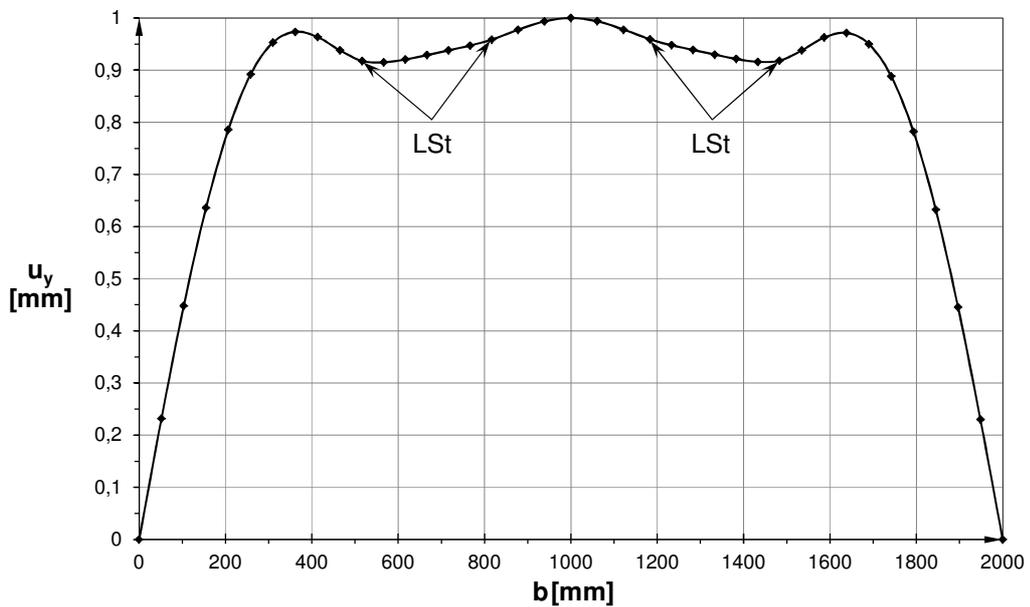


Abb. 5.34: Verformung u_y der 31. Eigenform (global) über die Steghöhe für $\bar{x} = 0,50[-]$ für System S1; $t_{LSt} = 8[\text{mm}]$ – Variante 3

Die Berechnung der idealen Plattenbeulspannungen $\sigma_{cr,p}$ erfolgt, wie in Abschnitt 4.1.4, auf Basis der numerischen Eigenwerte ϕ_{cr} ($= \alpha_{cr}$), welche einen Rückschluss auf die Beulwerte $k_{\sigma,p}$ lt. Tab. 5.6 (Vergleichswerte mit durchlaufenden Längssteifen aus [5] sind in Klammern gesetzt) ermöglichen.

	Einzelfeld	mittleres Teilfeld
σ_E [N/mm ²]	71,87	4,75
$\sigma_{cr,p}$ [N/mm ²]	354,06 (354,07)	476,14 (412,32)
$k_{\sigma,p}$	4,93 (4,93)	100,24 (86,80)

Tab. 5.6: Beulspannungen σ_E , $\sigma_{cr,p}$ und zugehöriger Beulwert $k_{\sigma,p}$ getrennt nach Stegfeldern für System S1; $t_{LSt} = 8[\text{mm}]$ – Variante 3

d.) Stützung der Randfelder ohne Längssteifen (Variante 4)

Der gemäß der Regelung für geometrische Ersatzimperfektionen nach Eurocode 3-1-5 [1] gewählte globale und lokale Eigenwert ϕ_{cr} aus der linearen Beulberechnung (LBA) ist in Tab. 5.7 angegeben. Vergleichsweise finden sich in Klammern gesetzt die zugehörigen Eigenwerte der numerischen Traglastermittlung des identen Systems mit durchlaufenden Längssteifen aus [5].

Nr.	Eigenwert $\phi_{cr}[-]$	Eigenform
1.	29,215 (35,407)	lokal
21.	47,411 (41,232)	global

Tab. 5.7: Lokaler und globaler Eigenwert ϕ_{cr} der linearen Beulanalyse für System S1; $t_{LSt} = 8[\text{mm}]$ – Variante 4

In Abb. 5.35 und Abb. 5.36 sind die zugehörigen lokalen und globalen Eigenformen für endende Längssteifen dargestellt. Aufgrund des in x- und z-Richtung symmetrisch verlaufenden Gesamtquerschnittes sind die Beulformen ebenfalls symmetrisch.

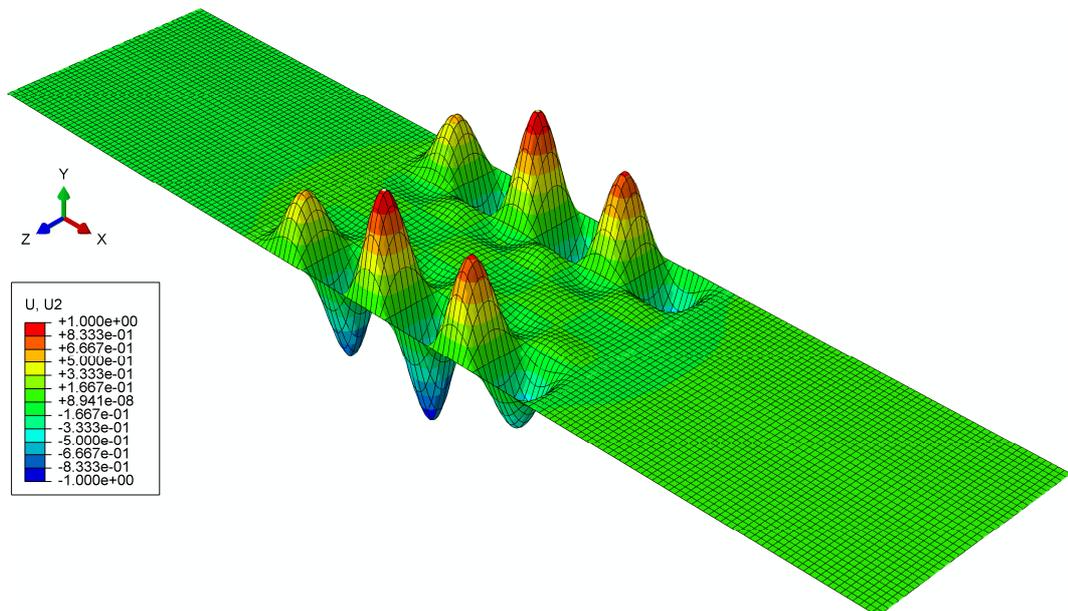


Abb. 5.35: 1. Eigenform (lokal), $\phi_{cr} = 29,215[-]$ für System S1; $t_{LSt} = 8[\text{mm}]$ – Variante 4

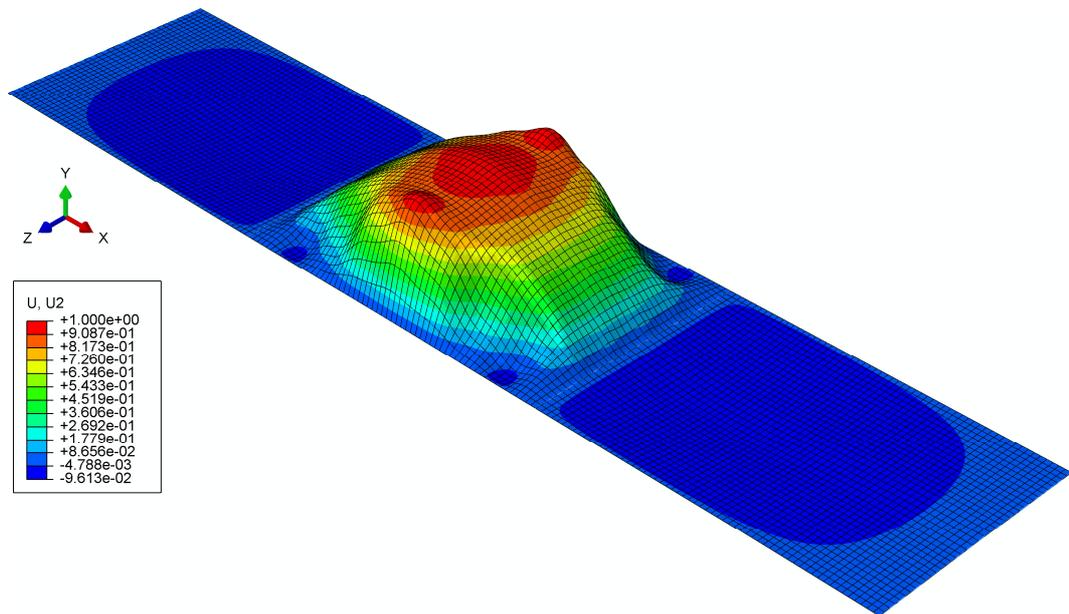


Abb. 5.36: 21. Eigenform (global), $\phi_{cr} = 47,411[-]$ für System S1; $t_{LSt} = 8[\text{mm}]$ – Variante 4

Die in Abb. 5.37 und Abb. 5.38 dargestellten Vertikalschnitte verlaufen durch die Amplitude der gewählten Beulform. Für den Skalierfaktor (SF) der lokalen Eigenform (Begleitimperfection) gilt ein Ansatz zu 70% der Bezugsgröße $b/200$ (siehe Tab. 3.1 und Abb. 3.7). Daraus folgt:

$$SF = 0,7 \cdot 1,0 \cdot \frac{514,17}{200} = 1,800[-]$$

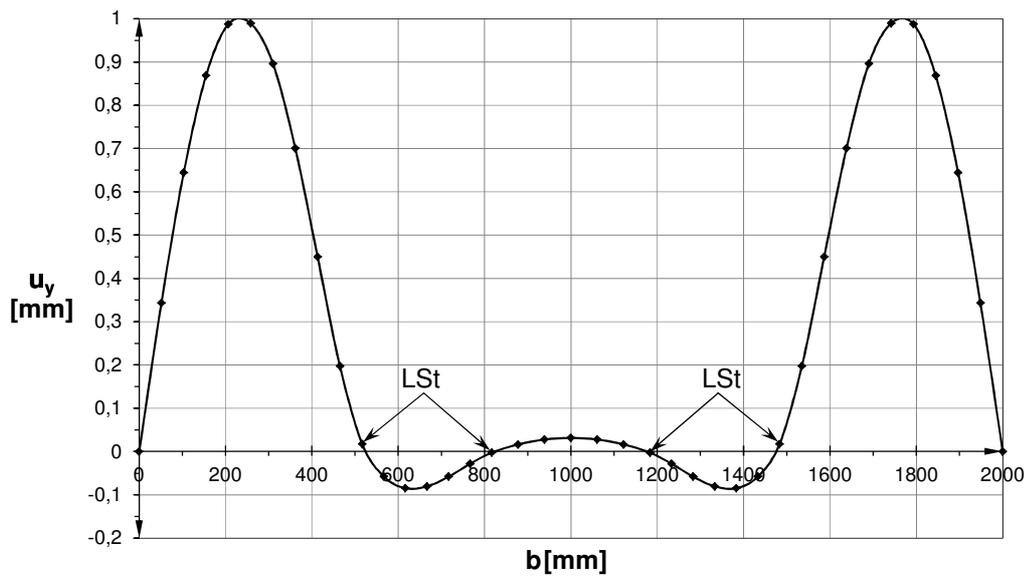


Abb. 5.37: Verformung u_y der 1. Eigenform (lokal) über die Steghöhe für $\bar{x} = 0,43$ für System S1; $t_{LSt} = 8[\text{mm}]$ – Variante 4

Die globale Eigenform (Leitimperfektion) wird mit dem Ansatz zu 100% in der Traglastberechnung berücksichtigt. Der zugehörige Skalierfaktor (SF) ergibt sich somit zu:

$$SF = -1,0 \cdot \frac{1}{0,9218} \cdot \frac{2000}{400} = -5,424 [-]$$

Anmerkung:

Das negative Vorzeichen ergibt sich, da die Imperfektionsrichtung mit Druckspannungen im Stegblech maßgebend ist. Der Faktor 0,9218[-] berücksichtigt die überlagerte globale Eigenform in Abb. 5.38 und stellt die tatsächliche Verformung u_y an der Stelle der Längssteife dar.

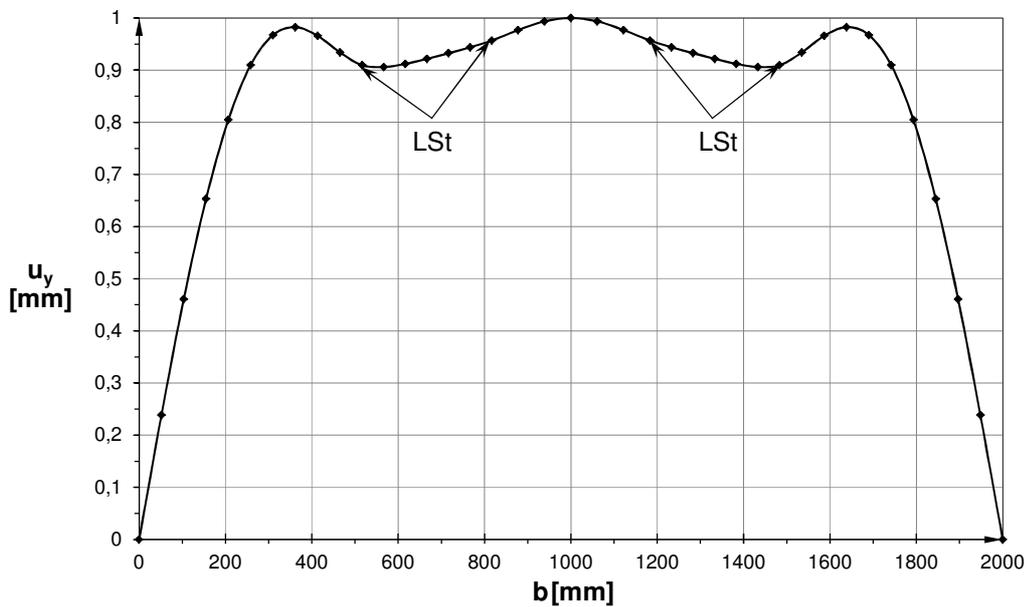


Abb. 5.38: Verformung u_y der 21. Eigenform (global) über die Steghöhe für $\bar{x} = 0,50[-]$ für System S1; $t_{LSt} = 8[mm]$ – Variante 4

Die Berechnung der idealen Plattenbeulspannungen $\sigma_{cr,p}$ erfolgt, wie in Abschnitt 4.1.4, auf Basis der numerischen Eigenwerte ϕ_{cr} ($= \alpha_{cr}$), welche einen Rückschluss auf die Beulwerte $k_{\sigma,p}$ lt. Tab. 5.8 (Vergleichswerte mit durchlaufenden Längssteifen aus [5] sind in Klammern gesetzt) ermöglichen.

	Einzelfeld	mittleres Teilfeld
$\sigma_E [N/mm^2]$	71,87	4,75
$\sigma_{cr,p} [N/mm^2]$	359,47 (354,07)	474,11 (412,32)
$k_{\sigma,p} [-]$	5,00 (4,93)	99,81 (86,80)

Tab. 5.8: Beulspannungen σ_E , $\sigma_{cr,p}$ und zugehöriger Beulwert $k_{\sigma,p}$ getrennt nach Stegfeldern für System S1; $t_{LSt} = 8[mm]$ – Variante 4

5.1.1.3 Nichtlineare Traglastberechnung (GMNIA)

Als Berechnungsgrundlage wird die maßgebende Imperfektionskombination von $-1,0 \cdot \text{glob} + 0,7 \cdot \text{lok}$ herangezogen. Dabei werden, entsprechend den genannten Vorzeichen der Kombination, die Imperfektionen immer in Richtung der Längssteifen angenommen.

a.) Starre Stützung (*Variante 1*)

Der Laststeigerungsfaktor (LSF) für die maßgebende Imperfektionskombination bei endenden und durchlaufenden Längssteifen (Klammerwert nach [5]) ist in Tab. 5.9 angegeben.

Imperfektion	LSF [-]
$-1,0 \cdot \text{glob} + 0,7 \cdot \text{lok}$	0,551 (0,670)

Tab. 5.9: Laststeigerungsfaktor (LSF) bei maßgebender Eigenwert-Kombination für System S1; $t_{LSt} = 8[\text{mm}]$ – *Variante 1*

Die Abb. 5.39 zeigt das verformte System im Traglastzustand und die Abb. 5.40 stellt die zugehörige Verformung u_y an der Stelle der Beulamplitude im Beobachtungsfeld dar. Ein unsymmetrisches Traglastbild zeichnet sich aufgrund der bei $\bar{x} = 0,58$ [-] in positiver Verformungsrichtung ($+u_y$) gelegenen Amplitude der lokalen Eigenform ab. Im Traglastzustand liegt die Verformungsamplitude jedoch aufgrund der maßgebenden lokalen Eigenformanteile in Richtung der Längssteifen ($-u_y$) bei $\bar{x} = 0,50$ [-].

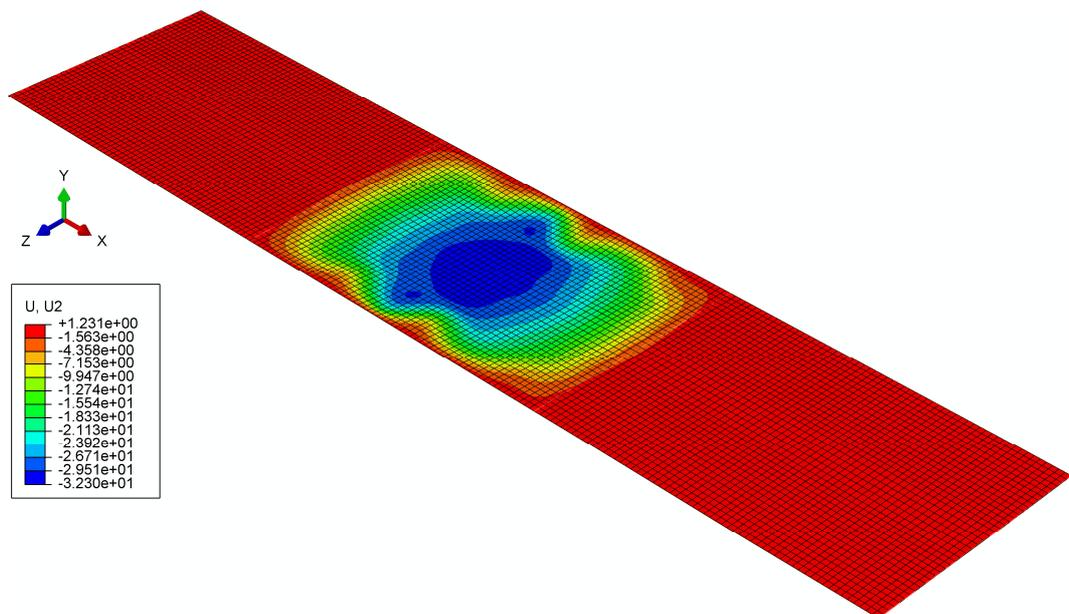


Abb. 5.39 Geometrisch nichtlineares Traglastbild mit Verformung u_y bei LSF = 0,551 [-] für System S1; $t_{LSt} = 8[\text{mm}]$ – *Variante 1*

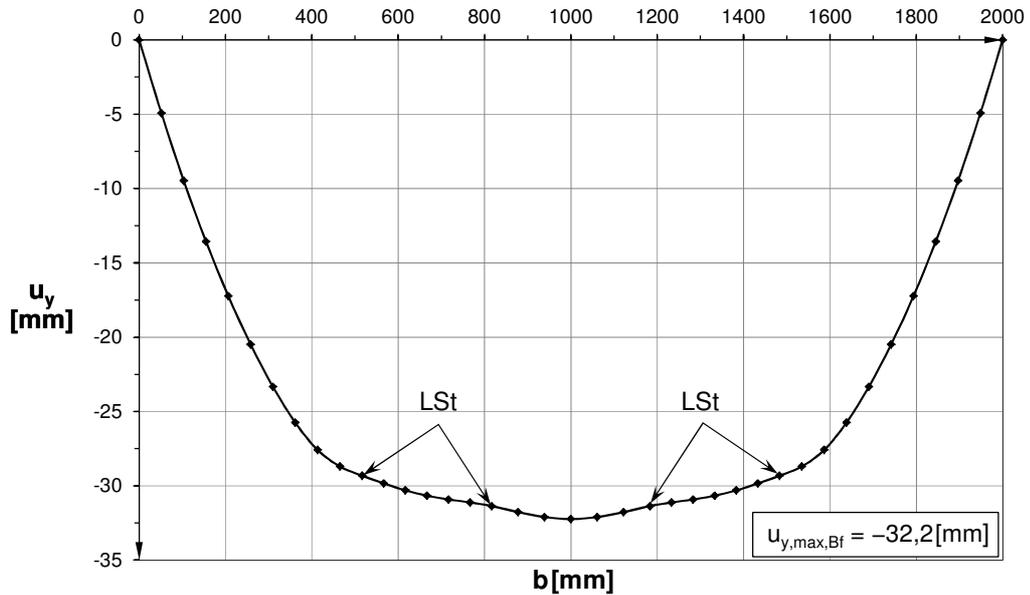


Abb. 5.40: Verformung u_y über die Steghöhe für $\bar{x} = 0,50[-]$ im Beobachtungsfeld für System S1; $t_{LSt} = 8[mm]$ – Variante 1

b.) Stützung mit identer Längssteifen-Biegesteifigkeit (Variante 2)

Der Laststeigerungsfaktor (LSF) für die maßgebende Imperfektionskombination bei endenden und durchlaufenden Längssteifen (Klammerwert nach [5]) ist in Tab. 5.10 angegeben.

Imperfektion	LSF[-]
$-1,0 \cdot glob + 0,7 \cdot lok$	0,557 (0,670)

Tab. 5.10: Laststeigerungsfaktor (LSF) bei maßgebender Eigenwert-Kombination für System S1; $t_{LSt} = 8[mm]$ – Variante 2

Die Abb. 5.41 zeigt das verformte System im Traglastzustand und die Abb. 5.42 stellt die zugehörige Verformung u_y an der Stelle der Beulamplitude im Beobachtungsfeld dar. Ein unsymmetrisches Traglastbild zeichnet sich aufgrund der bei $\bar{x} = 0,58 [-]$ in positiver Verformungsrichtung ($+u_y$) gelegenen Amplitude der lokalen Eigenform ab. Im Traglastzustand liegt die Verformungsamplitude jedoch aufgrund der maßgebenden lokalen Eigenformanteile in Richtung der Längssteifen ($-u_y$) bei $\bar{x} = 0,50 [-]$.

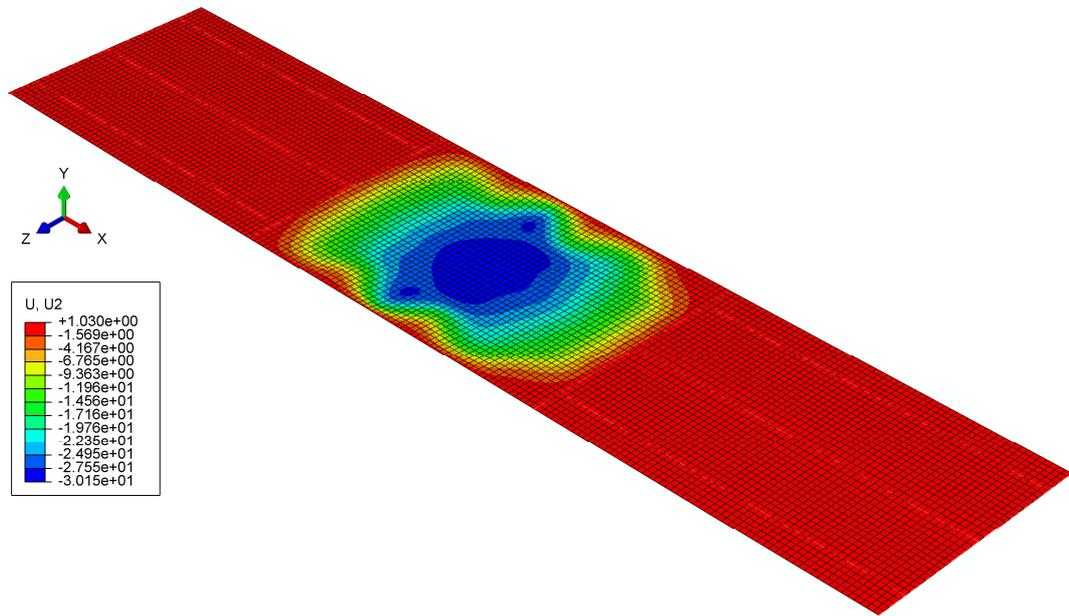


Abb. 5.41: Geometrisch nichtlineares Traglastbild mit Verformung u_y bei $LSF = 0,557[-]$ für System S1; $t_{LSt} = 8[mm]$ – Variante 2

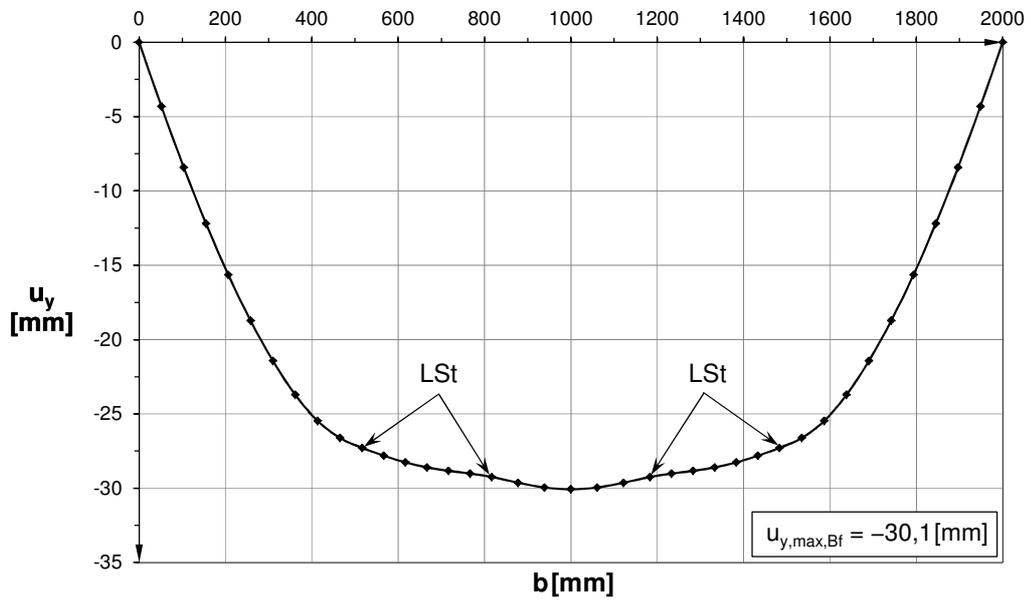


Abb. 5.42: Verformung u_y über die Steghöhe für $\bar{x} = 0,50[-]$ im Beobachtungsfeld für System S1; $t_{LSt} = 8[mm]$ – Variante 2

c.) Stützung mit reduzierter Längssteifen-Biegesteifigkeit (*Variante 3*)

Der Laststeigerungsfaktor (LSF) für die maßgebende Imperfektionskombination bei endenden und durchlaufenden Längssteifen (Klammerwert nach [5]) ist Tab. 5.11 angegeben.

Imperfektion	LSF[-]
-1,0·glob + 0,7·lok	0,557 (0,670)

Tab. 5.11: Laststeigerungsfaktor (LSF) bei maßgebender Eigenwert-Kombination für System S1; $t_{LSt} = 8[\text{mm}]$ – *Variante 3*

Die Abb. 5.43 zeigt das verformte System im Traglastzustand und die Abb. 5.44 stellt die zugehörige Verformung u_y an der Stelle der Beulamplitude im Beobachtungsfeld dar. Ein unsymmetrisches Traglastbild zeichnet sich aufgrund der bei $\bar{x} = 0,58 [-]$ in positiver Verformungsrichtung ($+u_y$) gelegenen Amplitude der lokalen Eigenform ab. Im Traglastzustand liegt die Verformungsamplitude jedoch aufgrund der maßgebenden lokalen Eigenformanteile in Richtung der Längssteifen ($-u_y$) bei $\bar{x} = 0,50 [-]$.

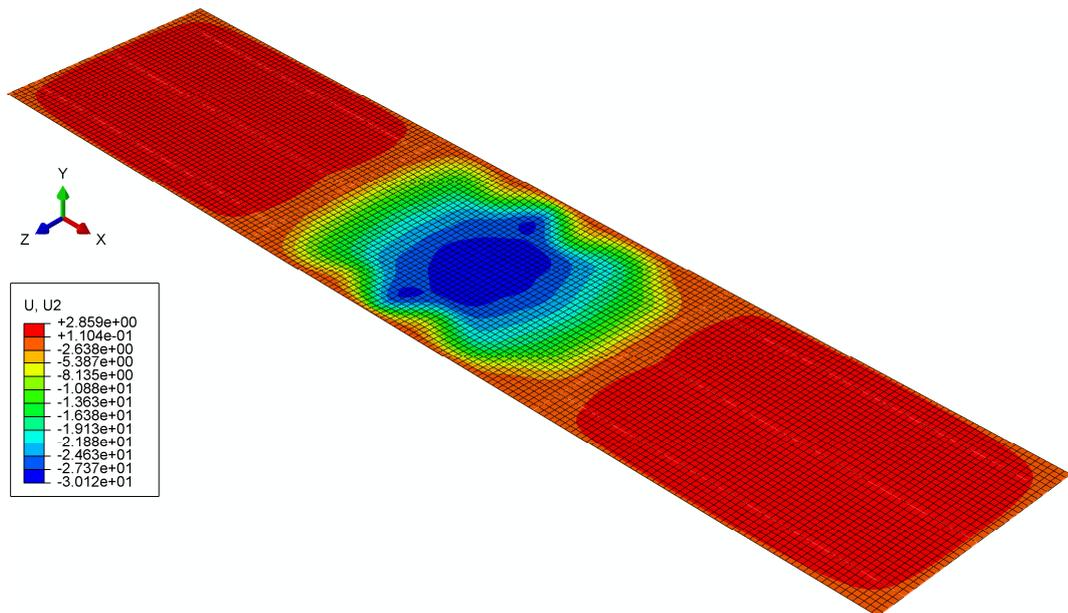


Abb. 5.43: Geometrisch nichtlineares Traglastbild mit Verformung u_y bei LSF = 0,557[-] für System S1; $t_{LSt} = 8[\text{mm}]$ – *Variante 3*

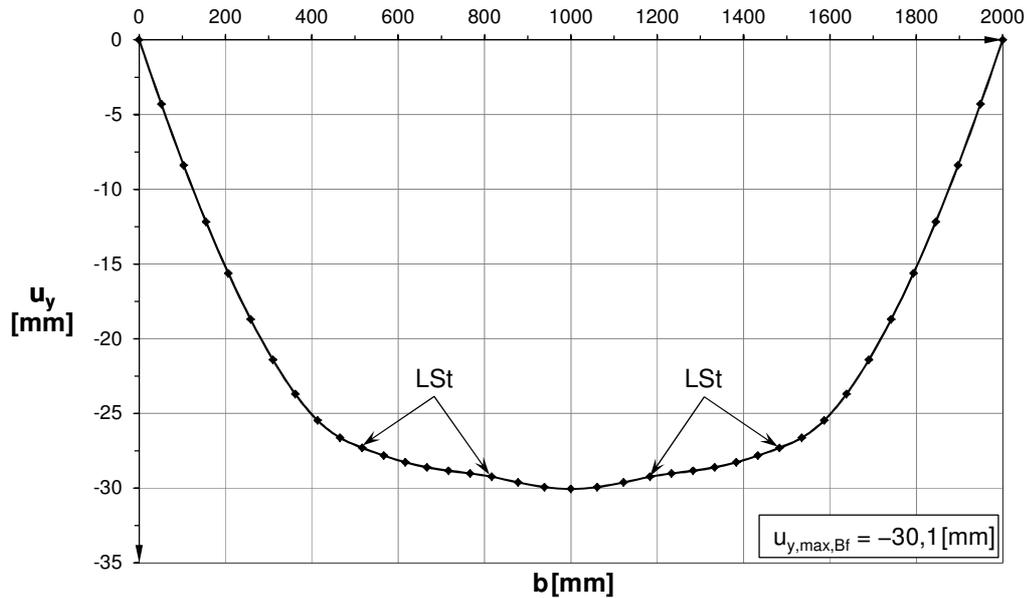


Abb. 5.44: Verformung u_y über die Steghöhe für $\bar{x} = 0,50[-]$ im Beobachtungsfeld für System S1; $t_{LSt} = 8[\text{mm}]$ – Variante 3

d.) Stützung der Randfelder ohne Längssteifen (Variante 4)

Der Laststeigerungsfaktor (LSF) für die maßgebende Imperfektionskombination bei endenden und durchlaufenden Längssteifen (Klammerwert nach [5]) ist Tab. 5.12 angegeben.

Imperfektion	LSF[-]
$-1,0 \cdot \text{glob} + 0,7 \cdot \text{lok}$	0,559 (0,670)

Tab. 5.12: Laststeigerungsfaktor (LSF) bei maßgebender Eigenwert-Kombination für System S1; $t_{LSt} = 8[\text{mm}]$ – Variante 4

Die Abb. 5.45 zeigt das verformte System im Traglastzustand und die Abb. 5.46 stellt die zugehörige Verformung u_y an der Stelle der Beulamplitude im Beobachtungsfeld dar. Ein unsymmetrisches Traglastbild zeichnet sich aufgrund der bei $\bar{x} = 0,43[-]$ in positiver Verformungsrichtung ($+u_y$) gelegenen Amplitude der lokalen Eigenform ab. Im Traglastzustand liegt die Verformungsamplitude jedoch aufgrund der maßgebenden lokalen Eigenformanteile in Richtung der Längssteifen ($-u_y$) bei $\bar{x} = 0,50[-]$.

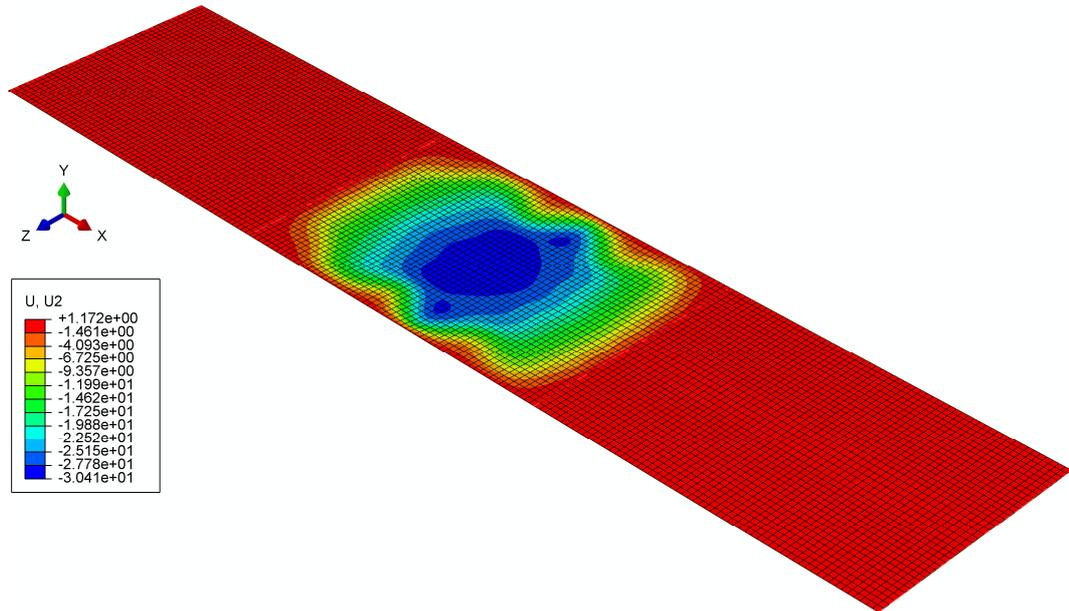


Abb. 5.45: Geometrisch nichtlineares Traglastbild mit Verformung u_y bei $LSF = 0,559[-]$ für System S1; $t_{LSt} = 8[\text{mm}]$ – Variante 4

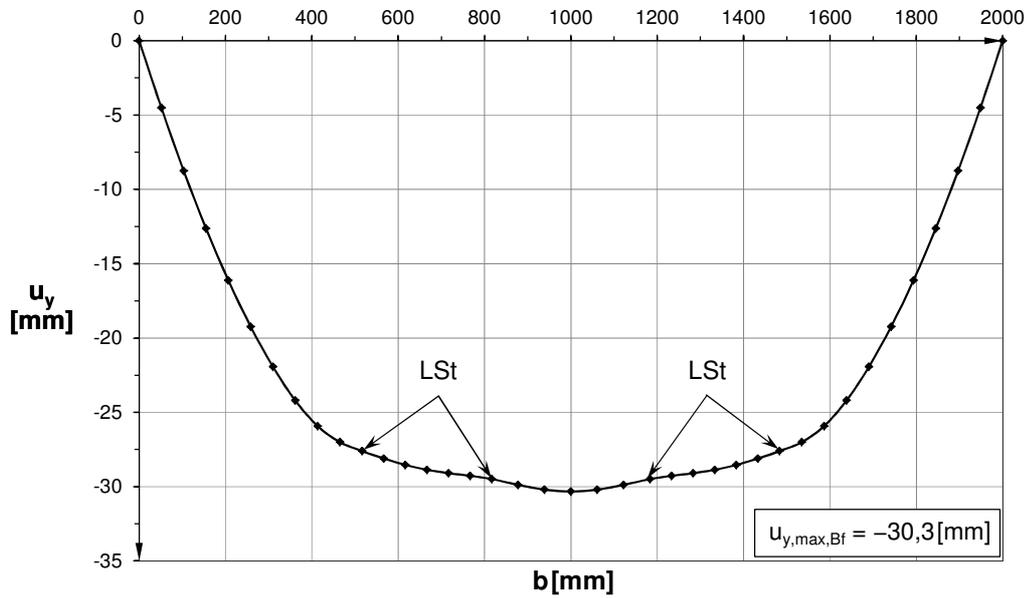


Abb. 5.46: Verformung u_y über die Steghöhe für $\bar{x} = 0,50[-]$ im Beobachtungsfeld für System S1; $t_{LSt} = 8[\text{mm}]$ – Variante 4

5.1.2 System S1: $\alpha = 1,5 [-]$ / $t_{LSt} = 10 [mm]$ / $\psi = 1,0 [-]$ / *Variante 2*

5.1.2.1 Lineare Analyse (LA)

Die Spannungs- (σ_{11}) bzw. Verformungsverläufe (u_y) im Stegblech des Randfeldes sowie des Beobachtungsfeldes und in den Längssteifen sind der nachfolgenden Abb. 5.47 bis Abb. 5.51 zu entnehmen.

Die Normalspannungsverteilung σ_{11} im Steg des Randfeldes entspricht Abb. 5.47.

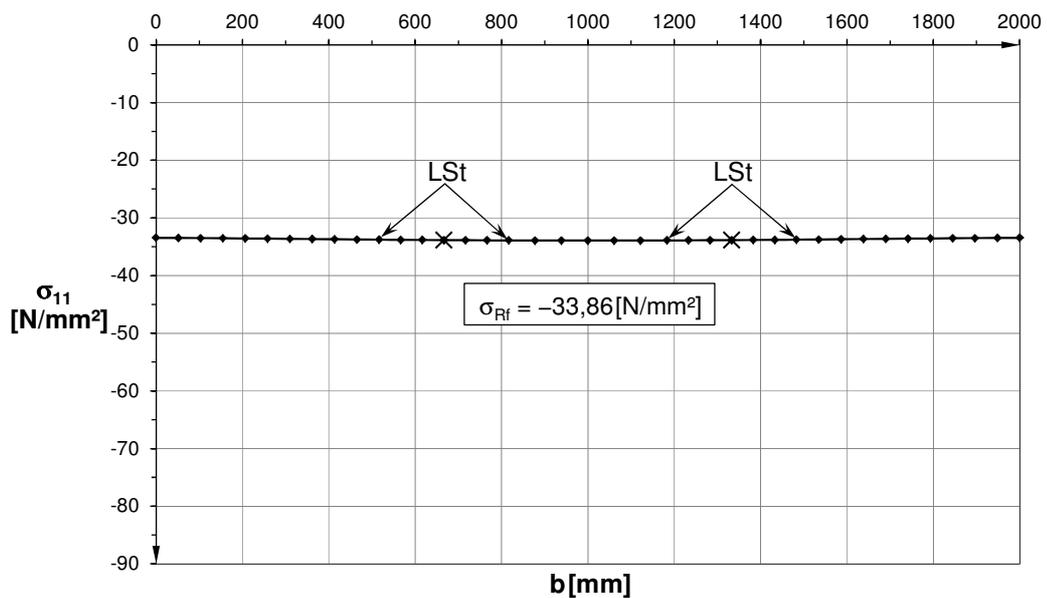


Abb. 5.47: Gesamtspannung σ_{11} ($= \sigma_{Rf}$) in der Mitte eines Randfeldes über die Steghöhe auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (Vertikalschnitt II) für System S1; $t_{LSt} = 10 [mm]$ – *Variante 2*

In der nachfolgenden Abb. 5.48 (Achse m) und Abb. 5.49 (Achse o) sind die vorliegenden Gesamtspannungen σ_{11} in der Mittelachse der Längssteifen explizit ausgewiesen, welche in der Vergleichsrechnung zwischen den FE-Ergebnissen und den vereinfachten Rechenmodellen in Anhang B Verwendung finden.

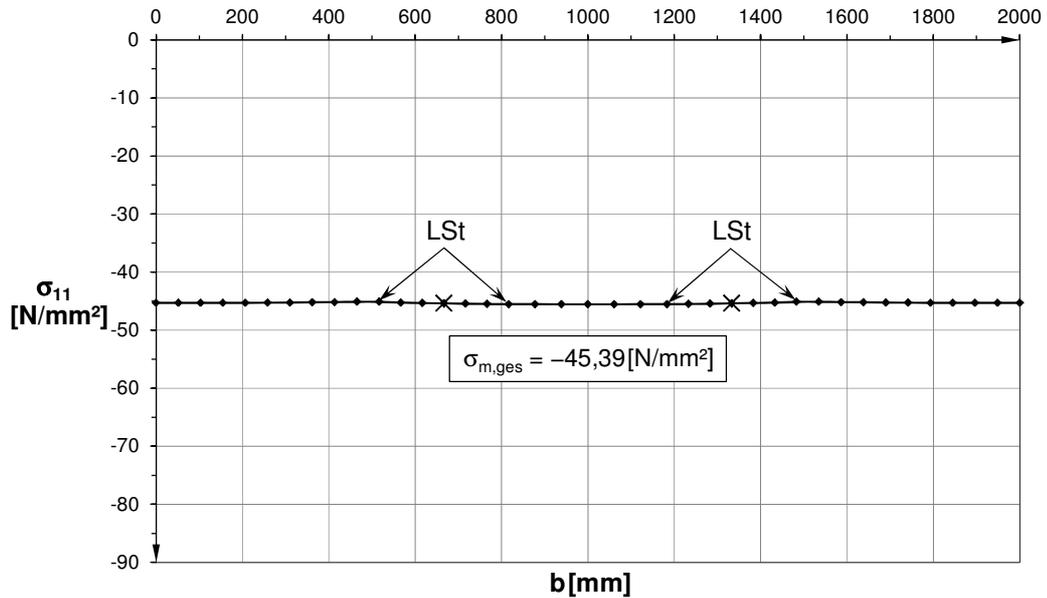


Abb. 5.48: Gesamtspannung σ_{11} ($= \sigma_{m,N} + \sigma_{m,\Delta M}$) in der Mitte des Beobachtungsfeldes über die Steghöhe auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (Vertikalschnitt I) für System S1; $t_{LSt} = 10 \text{ [mm]}$ – Variante 2

Es liegt ein nahezu konstanter Spannungsverlauf über den gesamten Stegquerschnitt in allen Teilfeldern vor. Die äußeren Einzelfelder im Mittelfeld werden somit auch für die Biegewirkung der Längssteifen vollständig mitaktiviert. Gemäß Abb. 5.49 erfährt die gesamte Längssteife ausschließlich Druckspannungen.

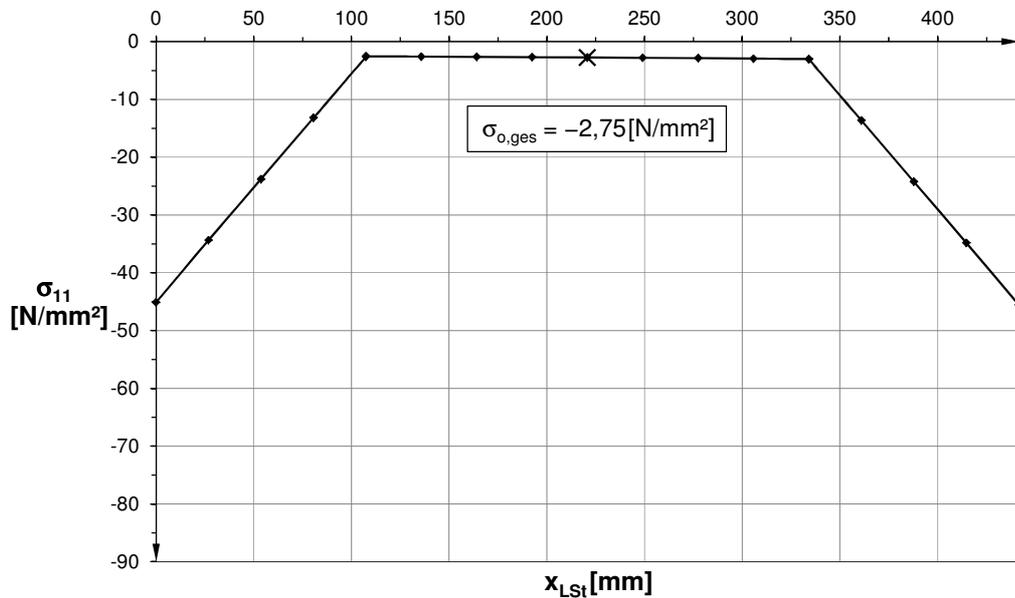


Abb. 5.49: Gesamtspannung σ_{11} ($= \sigma_{N,LSt} + \sigma_{\Delta M,LSt}$) der Längssteife auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (abgewinkelte Länge x_{LSt} ; beide Stege und Untergurt) für System S1; $t_{LSt} = 10 \text{ [mm]}$ – Variante 2

Die Verformung u_y aus der Stegehöhe des Beobachtungsfeldes ist in Abb. 5.50 dargestellt.

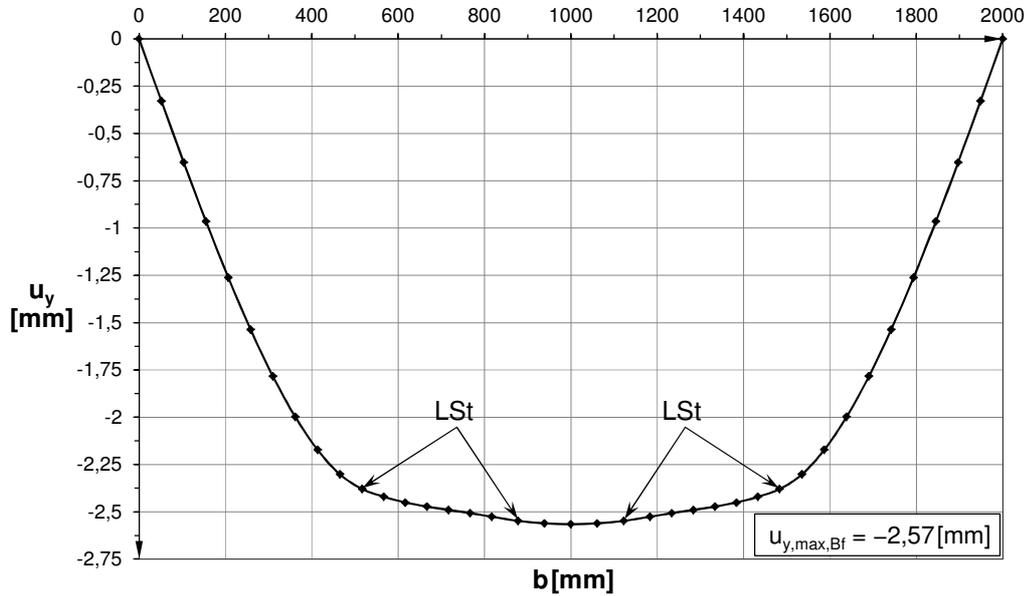


Abb. 5.50: Verformung u_y in der Mitte des Beobachtungsfeldes über die Steghöhe auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (Vertikalschnitt I) für System S1; $t_{LSt} = 10 [mm]$ – Variante 2

Die Abb. 5.51 zeigt den Verformungsverlauf u_y entlang einer Längssteife im Beobachtungsfeld mit einer beidseitig in die Randfelder fortgesetzten Schnittführung.

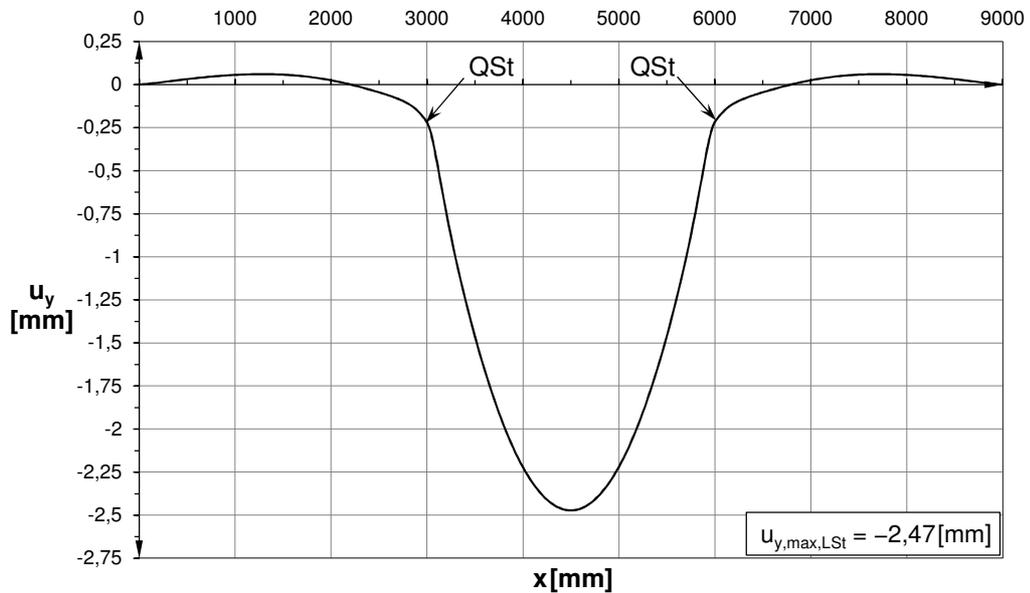


Abb. 5.51: Verformung u_y entlang einer Längssteife in Längsrichtung auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (Horizontalschnitt III) für System S1; $t_{LSt} = 10 [mm]$ – Variante 2

5.1.2.2 Lineare Beulanalyse (LBA)

Der gemäß der Regelung für geometrische Ersatzimperfectionen nach Eurocode 3-1-5 [1] gewählte globale und lokale Eigenwert ϕ_{cr} aus der linearen Beulberechnung (LBA) ist in Tab. 5.13 angegeben. Vergleichsweise finden sich in Klammern gesetzt die zugehörigen Eigenwerte der numerischen Traglastermittlung des identen Systems mit durchlaufenden Längssteifen aus [5].

Nr.	Eigenwert ϕ_{cr} [-]	Eigenform
1.	28,299 (36,385)	lokal
43.	51,573 (44,534)	global

Tab. 5.13: Lokaler und globaler Eigenwert ϕ_{cr} der linearen Beulanalyse für System S1; $t_{LSt} = 10$ [mm] – Variante 2

In Abb. 5.52 und Abb. 5.53 sind die zugehörigen lokalen und globalen Eigenformen für endende Längssteifen dargestellt. Aufgrund des in x- und z-Richtung symmetrisch verlaufenden Gesamtquerschnittes sind die Beulformen ebenfalls symmetrisch.

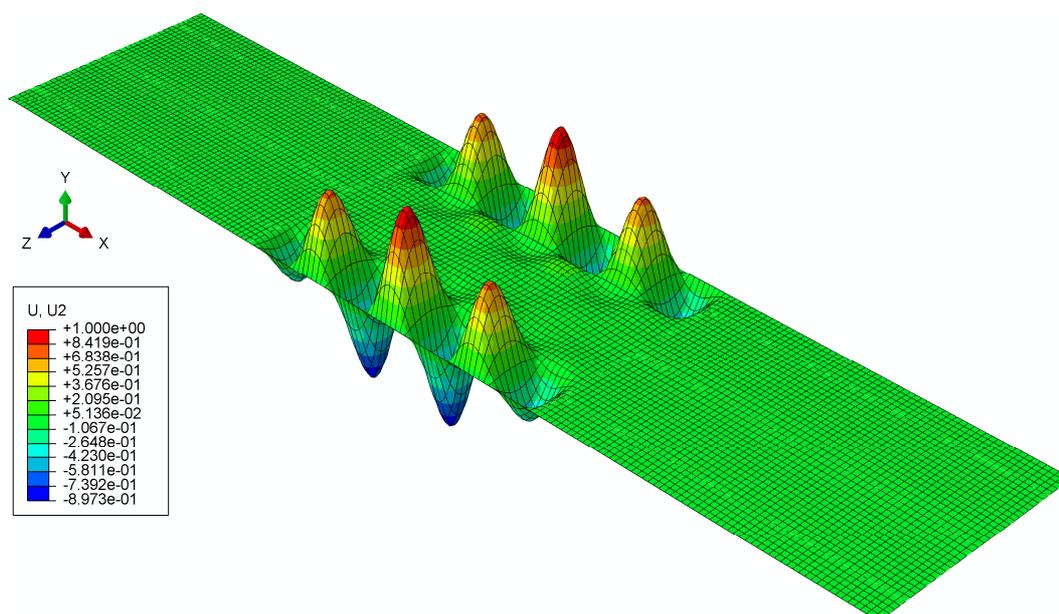


Abb. 5.52: 1. Eigenform (lokal), $\phi_{cr} = 28,299$ [-] für System S1; $t_{LSt} = 10$ [mm] – Variante 2

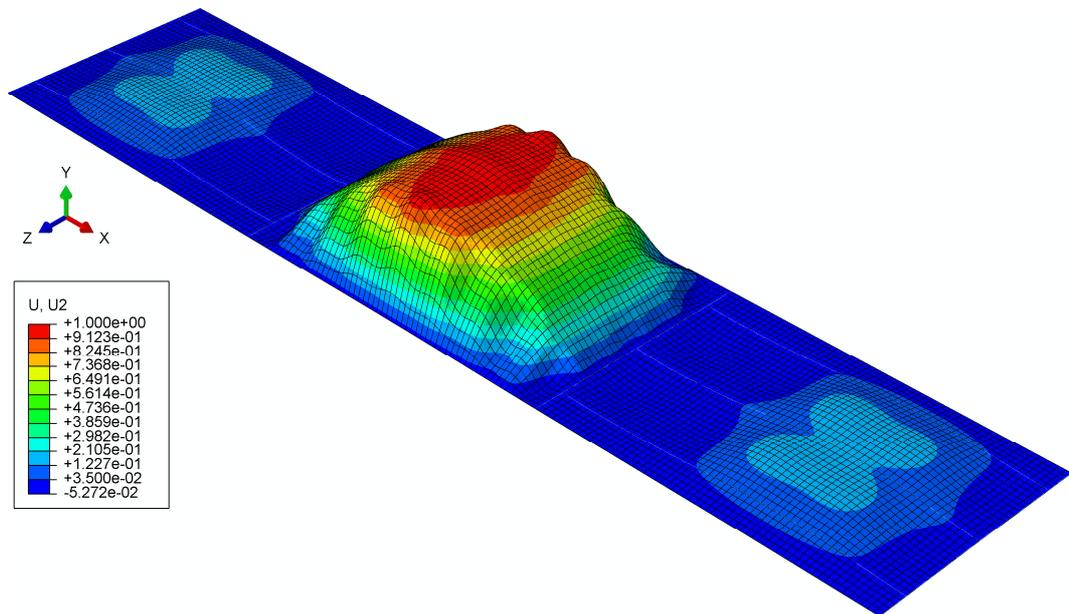


Abb. 5.53: 43. Eigenform (global), $\phi_{cr} = 51,573[-]$ für System S1; $t_{LSt} = 10[\text{mm}]$ – Variante 2

Die in Abb. 5.54 und Abb. 5.55 dargestellten Vertikalschnitte verlaufen durch die Amplitude der gewählten Beulform. Für den Skalierfaktor (SF) der lokalen Eigenform (Begleitimperfection) gilt ein Ansatz zu 70% der Bezugsgröße $b/200$ (siehe Tab. 3.1 und Abb. 3.7). Daraus folgt:

$$SF = 0,7 \cdot 1,0 \cdot \frac{514,17}{200} = 1,800 [-]$$

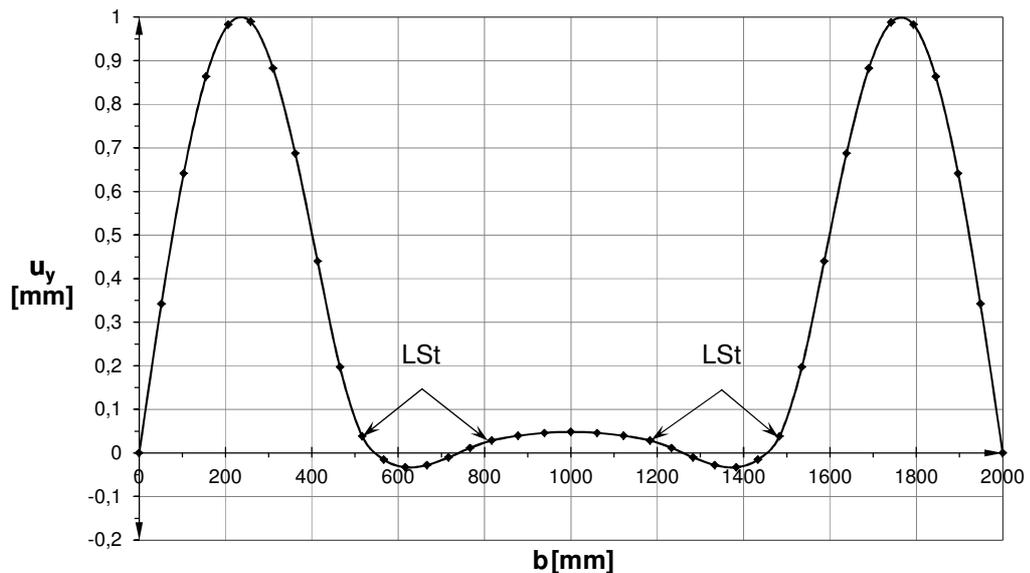


Abb. 5.54: Verformung u_y der 1. Eigenform (lokal) über die Steghöhe für $\bar{x} = 0,50[-]$ für System S1; $t_{LSt} = 10[\text{mm}]$ – Variante 2

Die globale Eigenform (Leitimperfektion) wird mit dem Ansatz zu 100% in der Traglastberechnung berücksichtigt. Der zugehörige Skalierfaktor (SF) ergibt sich somit zu:

$$SF = -1,0 \cdot \frac{1}{0,9528} \cdot \frac{2000}{400} = -5,248 [-]$$

Anmerkung:

Das negative Vorzeichen ergibt sich, da die Imperfektionsrichtung mit Druckspannungen im Stegblech maßgebend ist. Der Faktor 0,9528[-] berücksichtigt die überlagerte globale Eigenform in Abb. 5.55 und stellt die tatsächliche Verformung u_y an der Stelle der Längssteife dar.

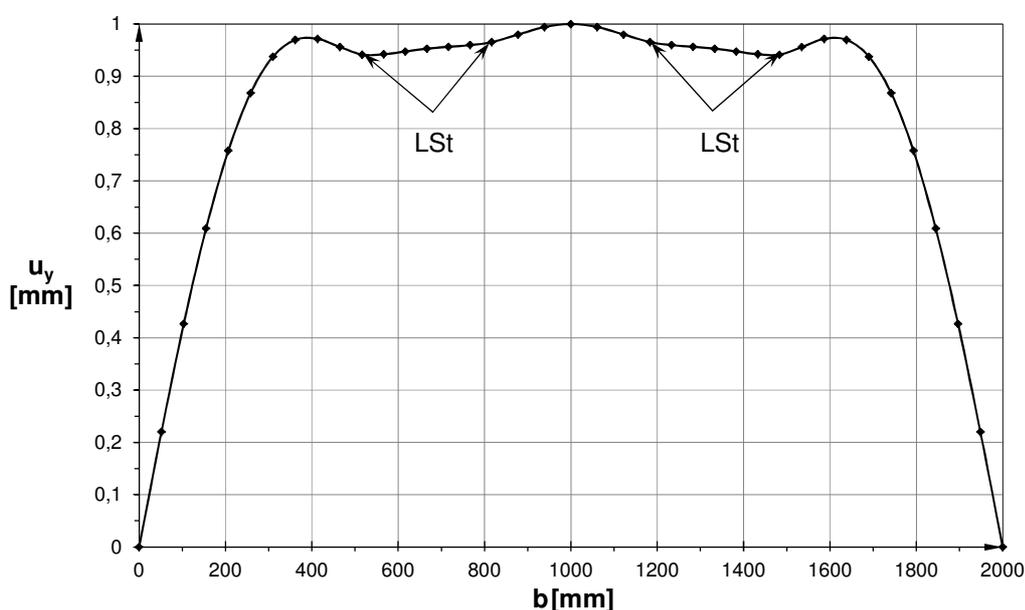


Abb. 5.55: Verformung u_y der 43. Eigenform (global) über die Steghöhe für $\bar{x} = 0,50[-]$ für System S1; $t_{LSt} = 10[\text{mm}]$ – Variante 2

Die Berechnung der idealen Plattenbeulspannungen $\sigma_{cr,p}$ erfolgt, wie in Abschnitt 4.1.4, auf Basis der numerischen Eigenwerte ϕ_{cr} ($= \alpha_{cr}$), welche einen Rückschluss auf die Beulwerte $k_{\sigma,p}$ lt. Tab. 5.14 (Vergleichswerte mit durchlaufenden Längssteifen aus [5] sind in Klammern gesetzt) ermöglichen.

	Einzelfeld	mittleres Teilfeld
σ_E [N/mm ²]	71,87	4,75
$\sigma_{cr,p}$ [N/mm ²]	361,83 (363,85)	515,73 (445,34)
$k_{\sigma,p}$ [-]	5,03 (5,06)	108,57 (93,76)

Tab. 5.14: Beulspannungen σ_E , $\sigma_{cr,p}$ und zugehöriger Beulwert $k_{\sigma,p}$ getrennt nach Stegfeldern für System S1; $t_{LSt} = 10[\text{mm}]$ – Variante 2

5.1.2.3 Nichtlineare Traglastberechnung (GMNIA)

Als Berechnungsgrundlage wird die maßgebende Imperfektionskombination von $-1,0 \cdot \text{glob} + 0,7 \cdot \text{lok}$ herangezogen. Dabei werden, entsprechend den genannten Vorzeichen der Kombination, die Imperfektionen immer in Richtung der Längssteifen angenommen.

Der Laststeigerungsfaktor (LSF) für die maßgebende Imperfektionskombination bei endenden und durchlaufenden Längssteifen (Klammerwert nach [5]) ist in Tab. 5.15 angegeben.

Imperfektion	LSF [-]
$-1,0 \cdot \text{glob} + 0,7 \cdot \text{lok}$	0,548 (0,709)

Tab. 5.15: Laststeigerungsfaktor (LSF) bei maßgebender Eigenwert-Kombination für System S1; $t_{Lst} = 10[\text{mm}]$ – Variante 2

Die Abb. 5.56 zeigt das verformte System im Traglastzustand und die Abb. 5.57 stellt die zugehörige Verformung u_y an der Stelle der Beulamplitude im Beobachtungsfeld bei $\bar{x} = 0,50$ [-] dar.

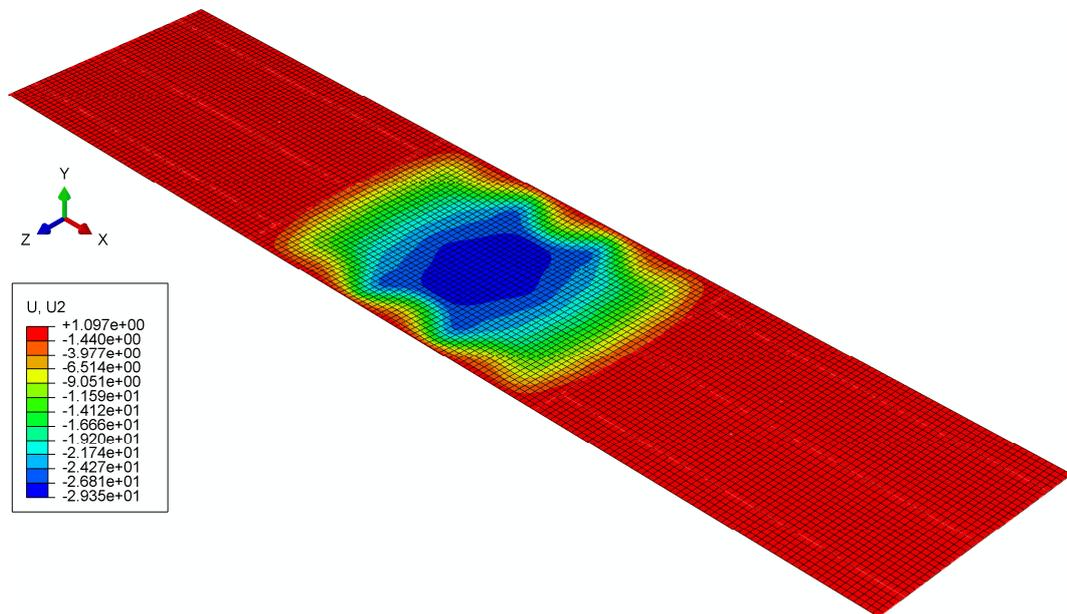


Abb. 5.56: Geometrisch nichtlineares Traglastbild mit Verformung u_y bei LSF = 0,548 [-] für System S1; $t_{Lst} = 10[\text{mm}]$ – Variante 2

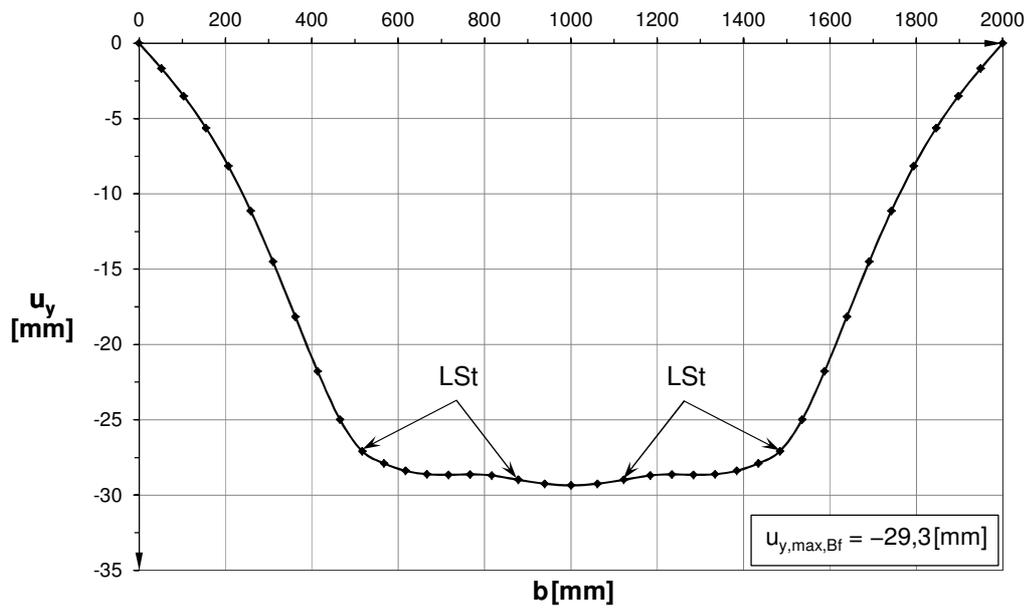


Abb. 5.57: Verformung u_y über die Steghöhe für $\bar{x} = 0,50[-]$ im Beobachtungsfeld für System S1; $t_{LSt} = 10 [mm]$ – Variante 2

5.2 System S2

Das System S2 beinhaltet zwei in äquidistanten Abständen, in den Drittelpunkten des Beobachtungsfeldes befindliche, trapezförmige, hohe Hohlsteifen ($h_{LSt} = 200$ [mm] bzw. 201 [mm]). Die Berechnung erfolgt mit unterschiedlichen Steifenblechdicken ($t_{LSt} = 8$ [mm] bzw. 10 [mm]), der konstanten Randspannungsverteilung $\psi = 1,0$ [-] und der Randfeldstützung gemäß *Variante 2*.

5.2.1 System S2: $\alpha = 1,5$ [-] / $t_{LSt} = 8$ [mm] / $\psi = 1,0$ [-] / *Variante 2*

5.2.1.1 Lineare Analyse (LA)

Die Spannungs- (σ_{11}) bzw. Verformungsverläufe (u_y) im Stegblech des Randfeldes sowie des Beobachtungsfeldes und in den Längssteifen sind der nachfolgenden Abb. 5.58 bis Abb. 5.62 zu entnehmen.

Die Normalspannungsverteilung σ_{11} im Steg des Randfeldes entspricht Abb. 5.58.

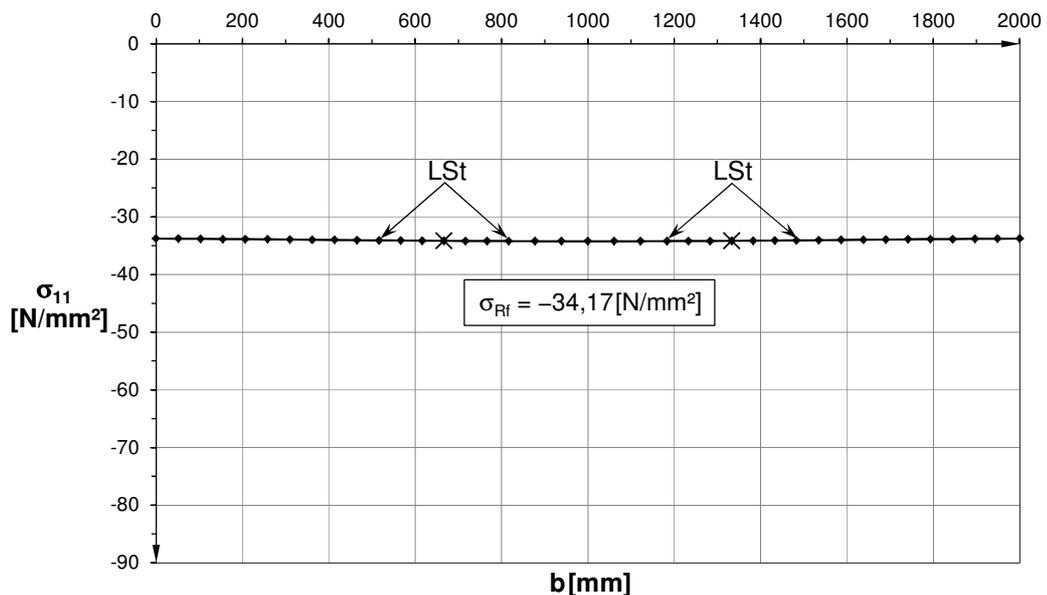


Abb. 5.58: Gesamtspannung σ_{11} ($= \sigma_{Rf}$) in der Mitte eines Randfeldes über die Steghöhe auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (Vertikalschnitt II) für System S2; $t_{LSt} = 8$ [mm] – *Variante 2*

In der nachfolgenden Abb. 5.59 (Achse m) und Abb. 5.60 (Achse o) sind die vorliegenden Gesamtspannungen σ_{11} in der Mittelachse der Längssteifen explizit ausgewiesen, welche in der Vergleichsrechnung zwischen den FE-Ergebnissen und den vereinfachten Rechenmodellen in Anhang B Verwendung finden.

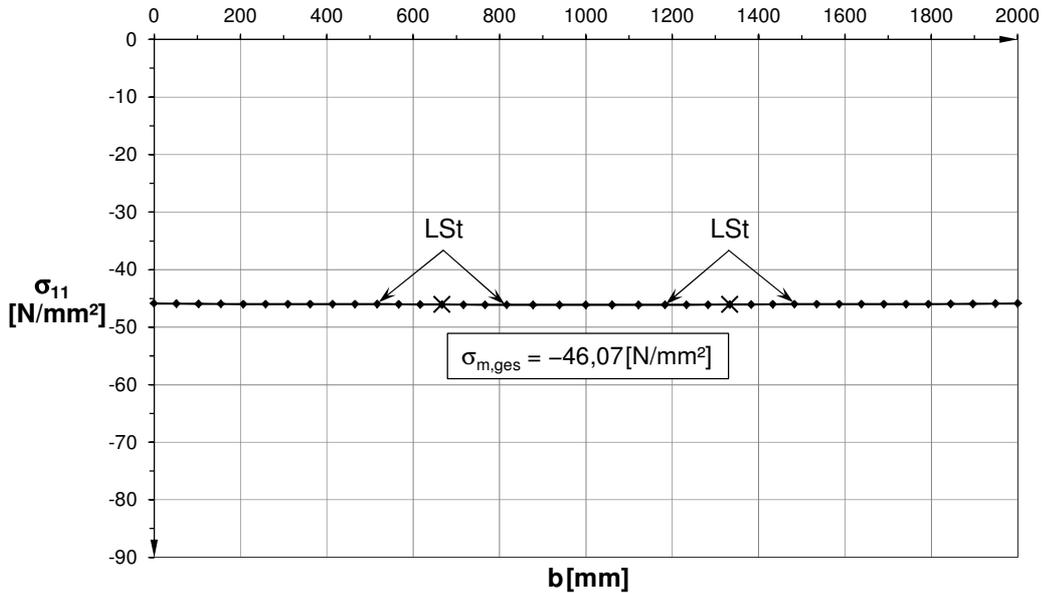


Abb. 5.59: Gesamtspannung σ_{11} ($= \sigma_{m,N} + \sigma_{m,\Delta M}$) in der Mitte des Beobachtungsfeldes über die Steghöhe auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (Vertikalschnitt I) für System S2; $t_{LSt} = 8 \text{ [mm]}$ – Variante 2

Es liegt ein nahezu konstanter Spannungsverlauf über den gesamten Stegquerschnitt in allen Teilfeldern vor. Die äußeren Einzelfelder im Mittelfeld werden somit auch für die Biegewirkung der Längssteifen vollständig mitaktiviert. Gemäß Abb. 5.60 bildet sich der Längssteifenaußengurt bei der vorliegenden Beanspruchung als Zuggurt aus.

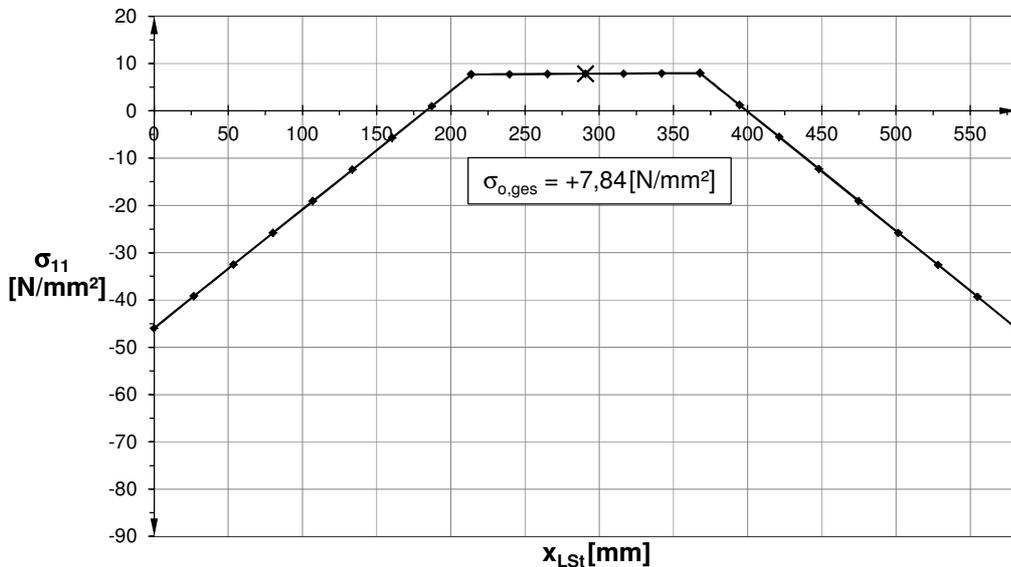


Abb. 5.60: Gesamtspannung σ_{11} ($= \sigma_{N,LSt} + \sigma_{\Delta M,LSt}$) der Längssteife auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (abgewinkelte Länge x_{LSt} : beide Stege und Untergurt) für System S2; $t_{LSt} = 8 \text{ [mm]}$ – Variante 2

Die Verformung u_y aus der Stegehöhe des Beobachtungsfeldes ist in Abb. 5.61 dargestellt.

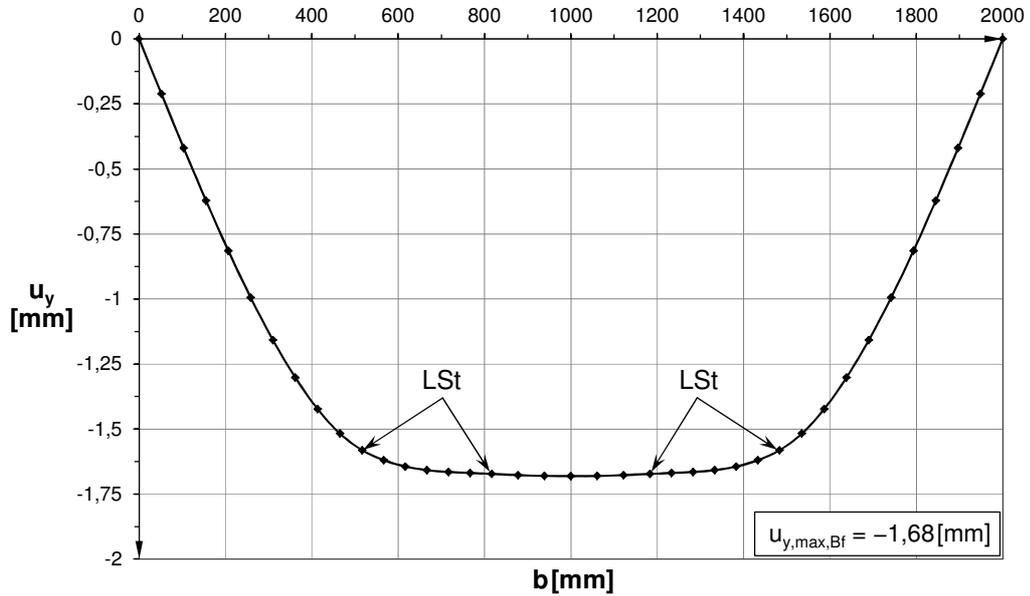


Abb. 5.61: Verformung u_y in der Mitte des Beobachtungsfeldes über die Steghöhe auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (Vertikalschnitt I) für System S2; $t_{LSt} = 8$ [mm] – Variante 2

Die Abb. 5.62 zeigt den Verformungsverlauf u_y entlang einer Längssteife im Beobachtungsfeld mit einer beidseitig in die Randfelder fortgesetzten Schnittführung.

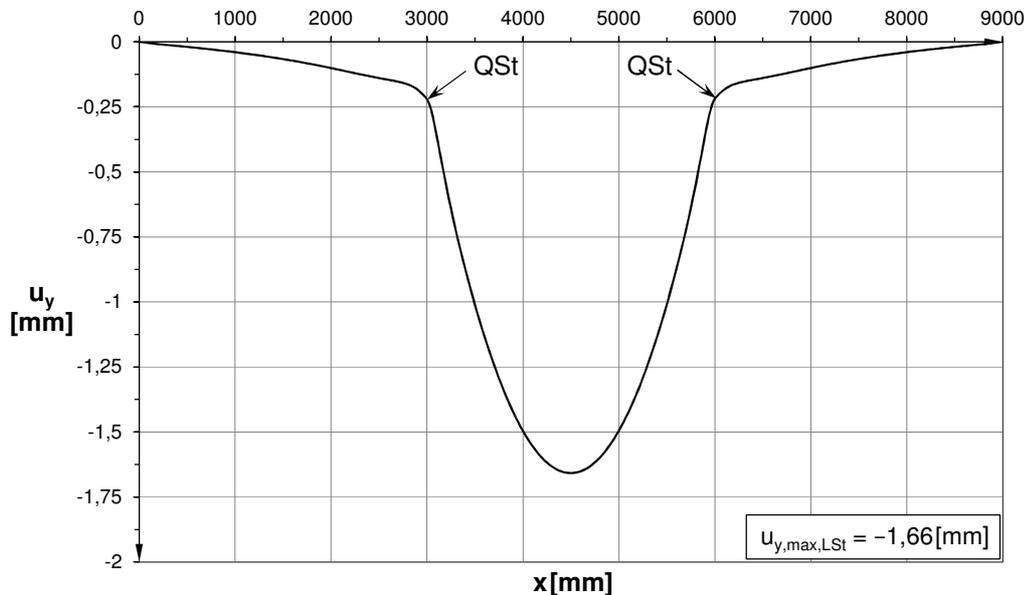


Abb. 5.62: Verformung u_y entlang einer Längssteife in Längsrichtung auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (Horizontalschnitt III) für System S2; $t_{LSt} = 8$ [mm] – Variante 2

5.2.1.2 Lineare Beulanalyse (LBA)

Der gemäß der Regelung für geometrische Ersatzimperfectionen nach Eurocode 3-1-5 [1] gewählte lokale Eigenwert ϕ_{cr} aus der linearen Beulberechnung (LBA) ist in Tab. 5.16 angegeben. Vergleichsweise findet sich in Klammern gesetzt der zugehörige lokale Eigenwert der numerischen Traglastermittlung des identen Systems mit durchlaufenden Längssteifen in [5].

Da für das System S2 kein globaler Beulwert mittels ABAQUS [4] ermittelt werden konnte, wird dem FE-Modell eine parabolische Durchbiegung vorgegeben. Für endende Längssteifen beschränkt sich dieser Ansatz auf das mittlere Beulfeld mit einer Imperfektion in Richtung der Längssteifen, wohingegen bei durchlaufenden Längssteifen die vorgegebene Durchbiegung wechselweise (Randfelder entgegen $+u_y$) und mittleres Beulfeld in Richtung der Längssteifen ($-u_y$) in allen drei Teilfeldern angesetzt wird. Die Geometrie und Größe dieser Verformung ist in beiden Fällen für jedes Teilfeld ident.

Nr.	Eigenwert ϕ_{cr} [-]	Eigenform
1.	26,927 (34,894)	lokal

Tab. 5.16: Lokaler Eigenwert ϕ_{cr} der linearen Beulanalyse für System S2; $t_{LSt} = 8$ [mm] – Variante 2

In Abb. 5.63 ist die zugehörige lokale Beulform für endende Längssteifen dargestellt. Aufgrund des in x- und z-Richtung symmetrisch verlaufenden Gesamtquerschnittes sind die Beulformen ebenfalls symmetrisch.

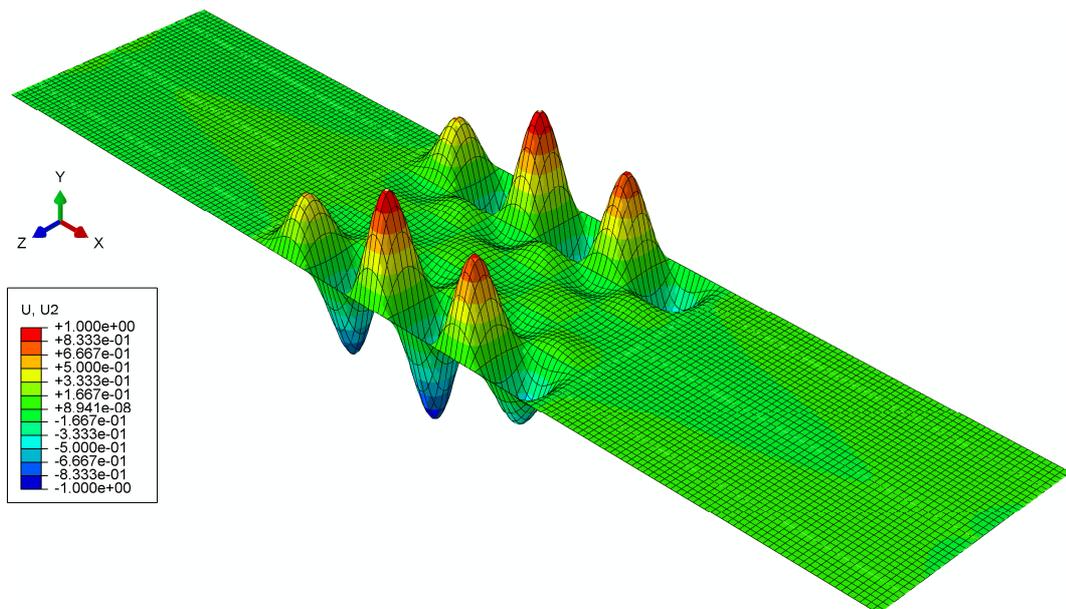


Abb. 5.63: 1. Eigenform (lokal), $\phi_{cr} = 26,927$ [-] für System S2; $t_{LSt} = 8$ [mm] – Variante 2

Der Vertikalschnitt in Abb. 5.64 verläuft durch die Amplitude der gewählten Beulform. Für den Skalierfaktor (SF) der lokalen Eigenform (Begleitimperfection) gilt ein Ansatz zu 70% der Bezugsgröße $b/200$ (siehe Tab. 3.1 und Abb. 3.7). Daraus folgt:

$$SF = 0,7 \cdot 1,0 \cdot \frac{514,17}{200} = 1,800 [-]$$

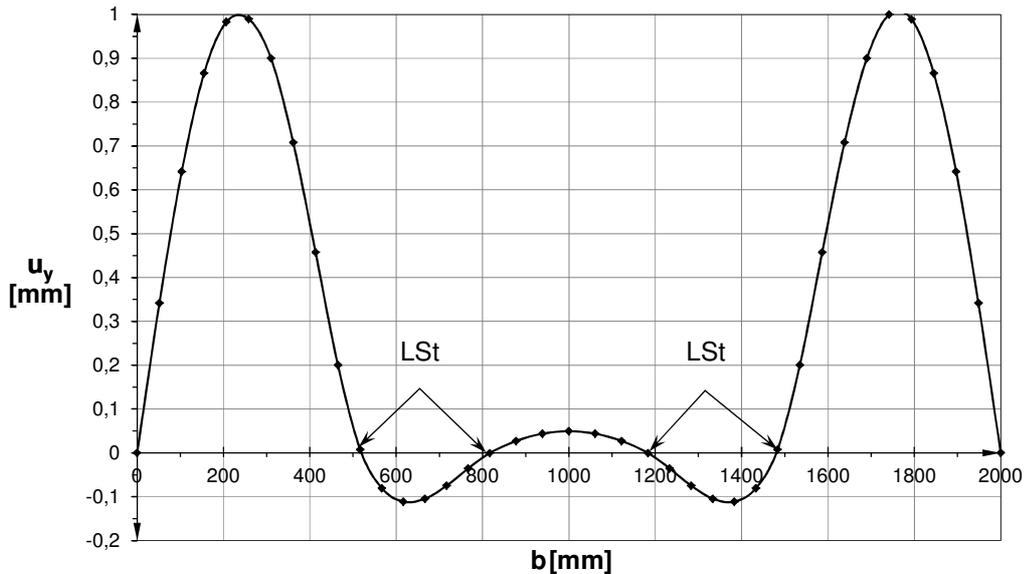


Abb. 5.64: Verformung u_y der 1. Eigenform (lokal) über die Steghöhe für $\bar{x} = 0,43$ für System S2; $t_{LSt} = 8$ [mm] – Variante 2

Die Berechnung der idealen Plattenbeulspannungen $\sigma_{cr,p}$ erfolgt, wie in Abschnitt 4.1.4, auf Basis der numerischen Eigenwerte ϕ_{cr} ($= \alpha_{cr}$), welche einen Rückschluss auf die Beulwerte $k_{\sigma,p}$ lt. Tab. 5.17 (Vergleichswerte mit durchlaufenden Längssteifen aus [5] sind in Klammern gesetzt) ermöglichen.

	Einzelfeld
σ_E [N/mm ²]	71,87
$\sigma_{cr,p}$ [N/mm ²]	349,44 (348,94)
$k_{\sigma,p}$ [-]	4,86 (4,86)

Tab. 5.17: Beulspannungen σ_E , $\sigma_{cr,p}$ und zugehöriger Beulwert $k_{\sigma,p}$ des maßgebenden Einzelfeldes für System S2; $t_{LSt} = 8$ [mm] – Variante 2

5.2.1.3 Nichtlineare Traglastberechnung (GMNIA)

Als Berechnungsgrundlage wird die maßgebende Imperfektionskombination von $-1,0 \cdot \text{glob} + 0,7 \cdot \text{lok}$ herangezogen. Dabei werden, entsprechend den genannten Vorzeichen der Kombination, die Imperfektionen immer in Richtung der Längssteifen angenommen.

Der Laststeigerungsfaktor (LSF) für die maßgebende Imperfektionskombination bei endenden und durchlaufenden Längssteifen (Klammerwert nach [5]) ist in Tab. 5.18 angegeben.

Imperfektion	LSF [-]
$-1,0 \cdot \text{glob} + 0,7 \cdot \text{lok}$	0,624 (0,853)

Tab. 5.18: Laststeigerungsfaktor (LSF) bei maßgebender Eigenwert-Kombination für System S2; $t_{Lst} = 8[\text{mm}]$ – Variante 2

Die Abb. 5.65 zeigt das verformte System im Traglastzustand und die Abb. 5.66 stellt die zugehörige Verformung u_y an der Stelle der Beulamplitude im Beobachtungsfeld dar. Ein unsymmetrisches Traglastbild zeichnet sich aufgrund der bei $\bar{x} = 0,50 [-]$ in positiver Verformungsrichtung ($+u_y$) gelegenen Amplitude der lokalen Eigenform ab. Im Traglastzustand liegt die Verformungsamplitude jedoch aufgrund der maßgebenden lokalen Eigenformanteile in Richtung der Längssteifen ($-u_y$) bei $\bar{x} = 0,58 [-]$.

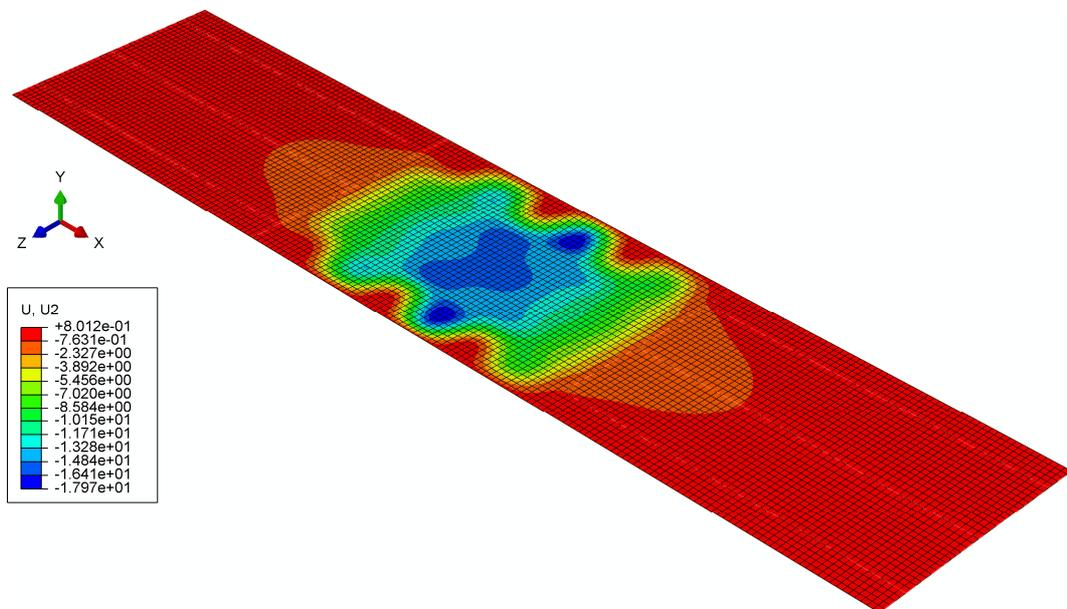


Abb. 5.65: Geometrisch nichtlineares Traglastbild mit Verformung u_y bei LSF = 0,624 [-] für System S2; $t_{Lst} = 8[\text{mm}]$ – Variante 2

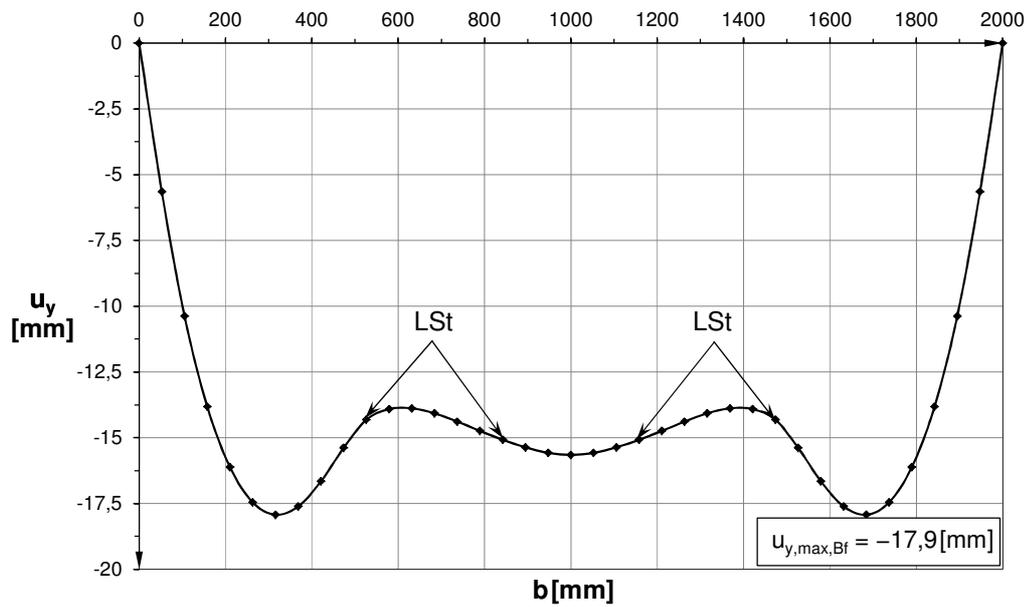


Abb. 5.66: Verformung u_y über die Steghöhe für $\bar{x} = 0,58[-]$ im Beobachtungsfeld für System S2; $t_{LSt} = 8 [mm]$ – Variante 2

5.2.2 System S2: $\alpha = 1,5 [-]$ / $t_{LSt} = 10$ [mm] / $\psi = 1,0 [-]$ / Variante 2

5.2.2.1 Lineare Analyse (LA)

Die Spannungs- (σ_{11}) bzw. Verformungsverläufe (u_y) im Stegblech des Randfeldes sowie des Beobachtungsfeldes und in den Längssteifen sind der nachfolgenden Abb. 5.67 bis Abb. 5.71 zu entnehmen.

Die Normalspannungsverteilung σ_{11} im Steg des Randfeldes entspricht Abb. 5.67.

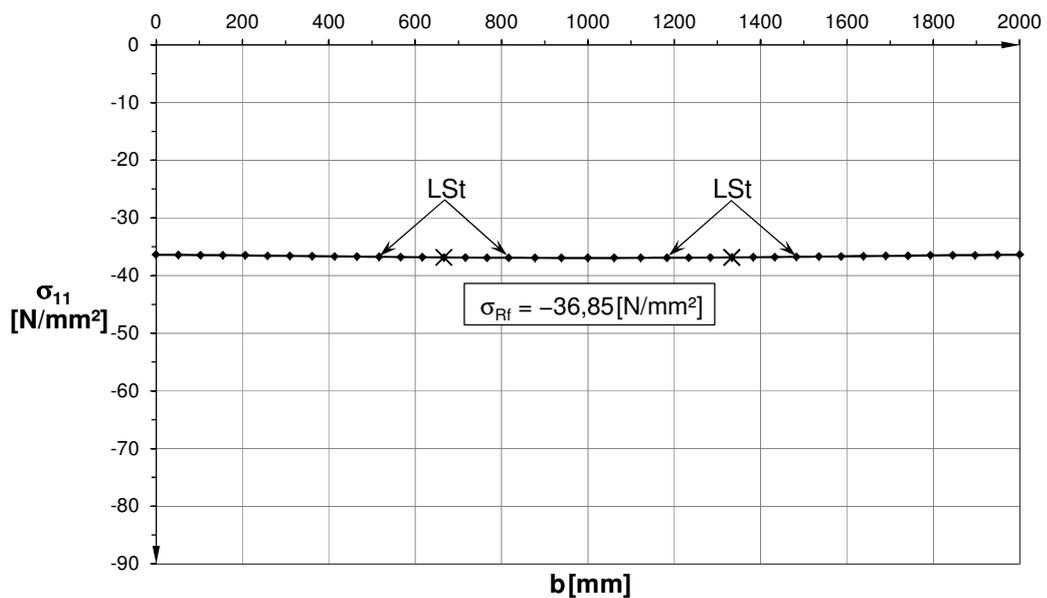


Abb. 5.67: Gesamtspannung σ_{11} ($= \sigma_{Rf}$) in der Mitte eines Randfeldes über die Steghöhe auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (Vertikalschnitt II) für System S2; $t_{LSt} = 10$ [mm] – Variante 2

In der nachfolgenden Abb. 5.68 (Achse m) und Abb. 5.69 (Achse o) sind die vorliegenden Gesamtspannungen σ_{11} in der Mittelachse der Längssteifen explizit ausgewiesen, welche in der Vergleichsrechnung zwischen den FE-Ergebnissen und den vereinfachten Rechenmodellen in Anhang B Verwendung finden.

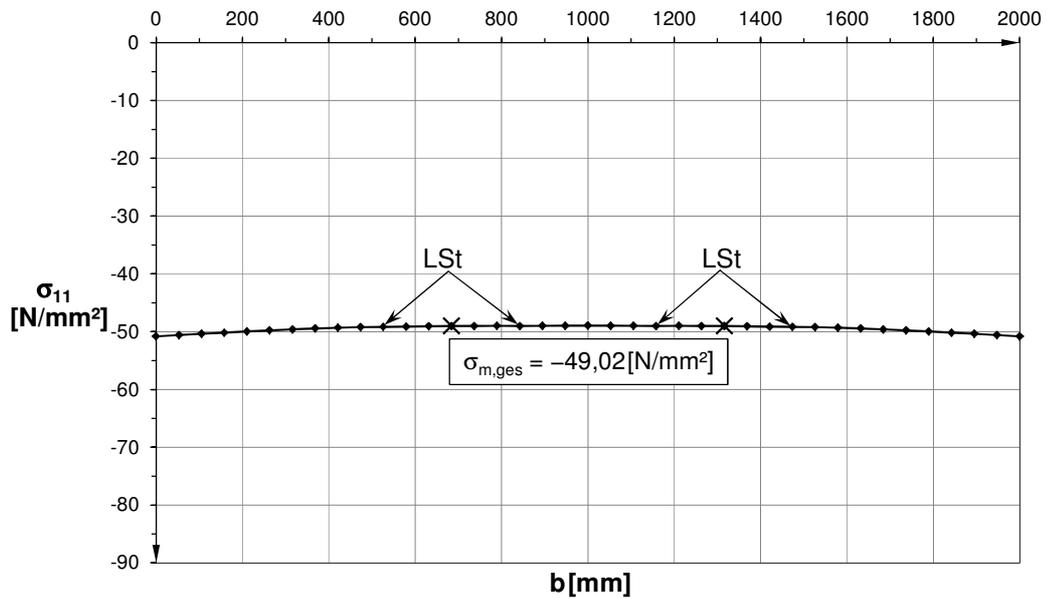


Abb. 5.68: Gesamtspannung σ_{11} ($= \sigma_{m,N} + \sigma_{m,\Delta M}$) in der Mitte des Beobachtungsfeldes über die Steghöhe auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (Vertikalschnitt I) für System S2; $t_{LSt} = 10[\text{mm}]$ – Variante 2

Es liegt ein nahezu konstanter Spannungsverlauf über den gesamten Stegquerschnitt in allen Teilfeldern vor. Die äußeren Einzelfelder im Mittelfeld werden somit auch für die Biegewirkung der Längssteifen vollständig mitaktiviert. Gemäß Abb. 5.69 bildet sich der Längssteifenaußengurt bei der vorliegenden Beanspruchung als Zuggurt aus.

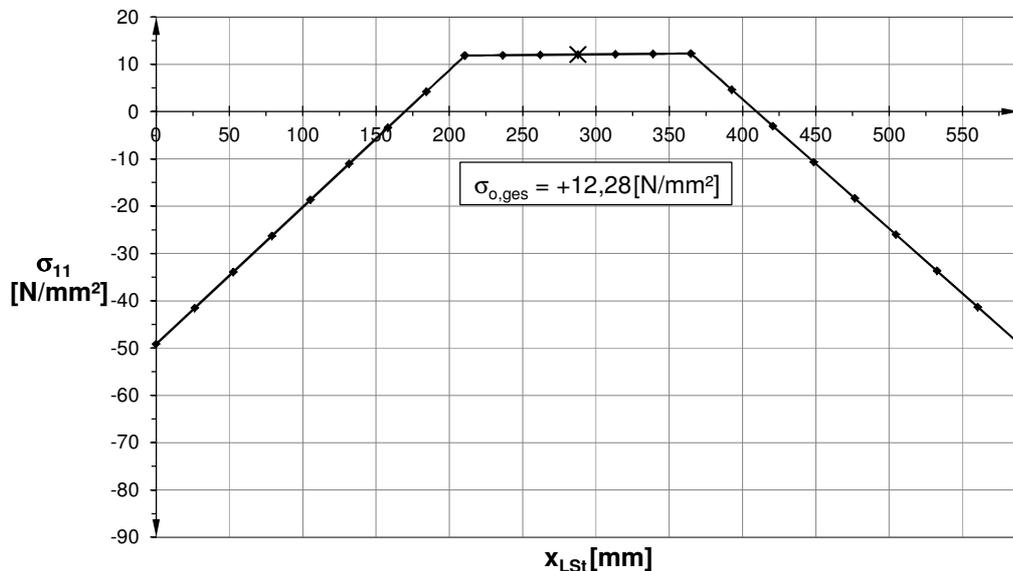


Abb. 5.69: Gesamtspannung σ_{11} ($= \sigma_{N,LSt} + \sigma_{\Delta M,LSt}$) der Längssteife auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (abgewinkelte Länge x_{LSt} ; beide Stege und Untergurt) für System S2; $t_{LSt} = 10[\text{mm}]$ – Variante 2

Die Verformung u_y aus der Stegehöhe des Beobachtungsfeldes ist in Abb. 5.70 dargestellt.

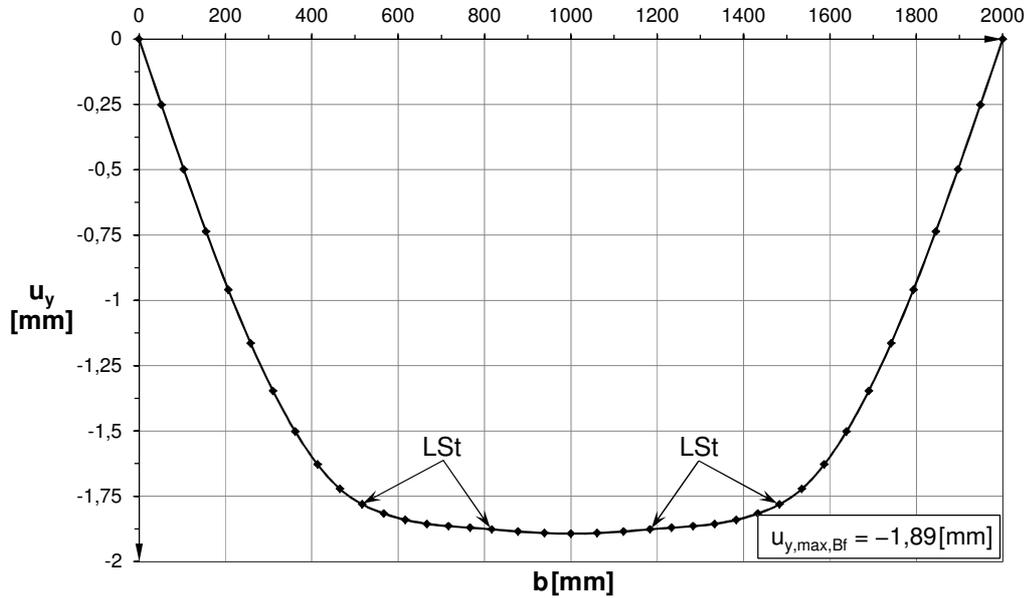


Abb. 5.70: Verformung u_y in der Mitte des Beobachtungsfeldes über die Steghöhe auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (Vertikalschnitt I) für System S2; $t_{LSt} = 10$ [mm] – Variante 2

Die Abb. 5.71 zeigt den Verformungsverlauf u_y entlang einer Längssteife im Beobachtungsfeld mit einer beidseitig in die Randfelder fortgesetzten Schnittführung.

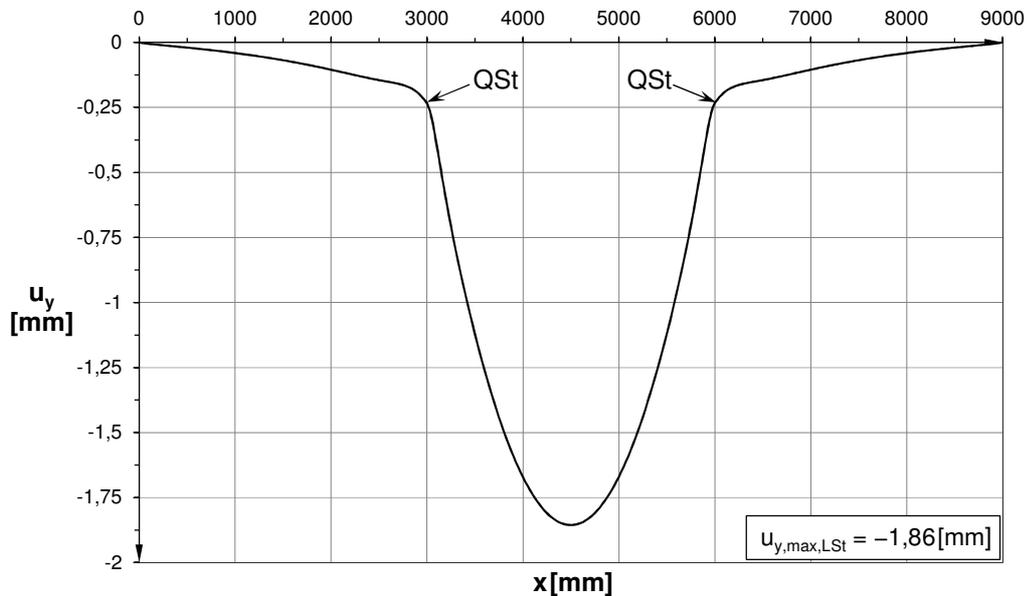


Abb. 5.71: Verformung u_y entlang einer Längssteife in Längsrichtung auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (Horizontalschnitt III) für System S2; $t_{LSt} = 10$ [mm] – Variante 2

5.2.2.2 Lineare Beulanalyse (LBA)

Der gemäß der Regelung für geometrische Ersatzimperfectionen nach Eurocode 3-1-5 [1] gewählte lokale Eigenwert ϕ_{cr} aus der linearen Beulberechnung (LBA) ist in Tab. 5.19 angegeben. Vergleichsweise findet sich in Klammern gesetzt der zugehörige lokale Eigenwert der numerischen Traglastermittlung des identen Systems mit durchlaufenden Längssteifen in [5].

Da für das System S2 kein globaler Beulwert mittels ABAQUS [4] ermittelt werden konnte, wird dem FE-Modell eine parabolische Durchbiegung vorgegeben. Für endende Längssteifen beschränkt sich dieser Ansatz auf das mittlere Beulfeld mit einer Imperfektion in Richtung der Längssteifen, wohingegen bei durchlaufenden Längssteifen die vorgegebene Durchbiegung wechselweise (Randfelder entgegen $+u_y$) und mittleres Beulfeld in Richtung der Längssteifen ($-u_y$) in allen drei Teilfeldern ange-setzt wird. Die Geometrie und Größe dieser Verformung ist in beiden Fällen für jedes Teilfeld ident.

Nr.	Eigenwert ϕ_{cr} [-]	Eigenform
1.	26,103 (35,915)	lokal

Tab. 5.19: Lokaler Eigenwert ϕ_{cr} der linearen Beulanalyse für System S2; $t_{LSt} = 10$ [mm] – Variante 2

In Abb. 5.72 ist die zugehörige lokale Beulform für endende Längssteifen dargestellt. Aufgrund des in x- und z-Richtung symmetrisch verlaufenden Gesamtquerschnittes sind die Beulformen ebenfalls symmetrisch.

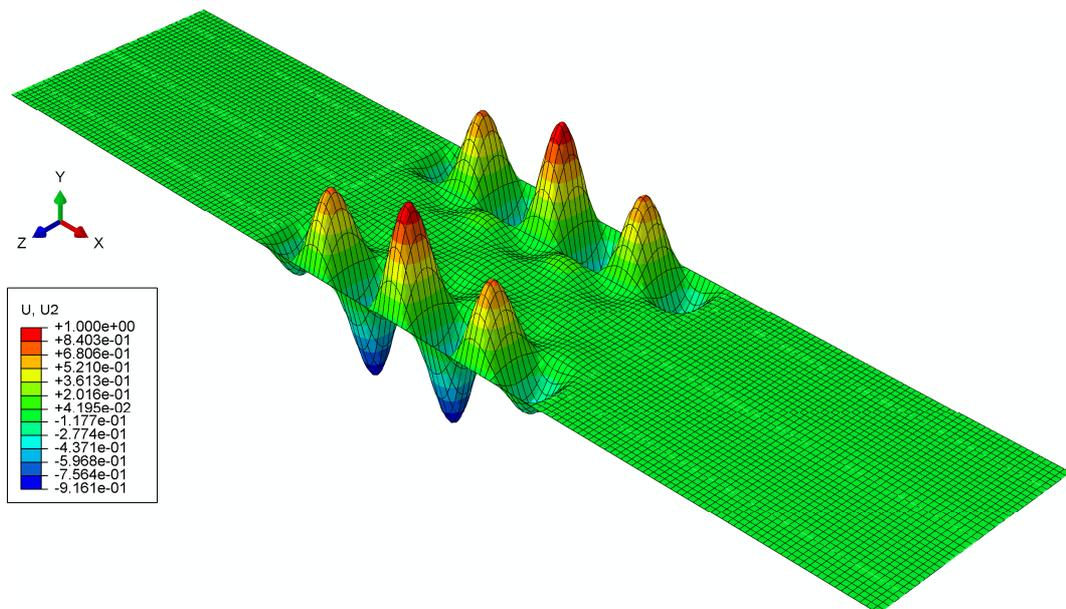


Abb. 5.72: 1. Eigenform (lokal), $\phi_{cr} = 26,103$ [-] für System S2; $t_{LSt} = 10$ [mm] – Variante 2

Der Vertikalschnitt in Abb. 5.73 verläuft durch die Amplitude der gewählten Beulform. Für den Skalierfaktor (SF) der lokalen Eigenform (Begleitimperfection) gilt ein Ansatz zu 70% der Bezugsgröße $b/200$ (siehe Tab. 3.1 und Abb. 3.7). Daraus folgt:

$$SF = 0,7 \cdot 1,0 \cdot \frac{514,17}{200} = 1,800 [-]$$

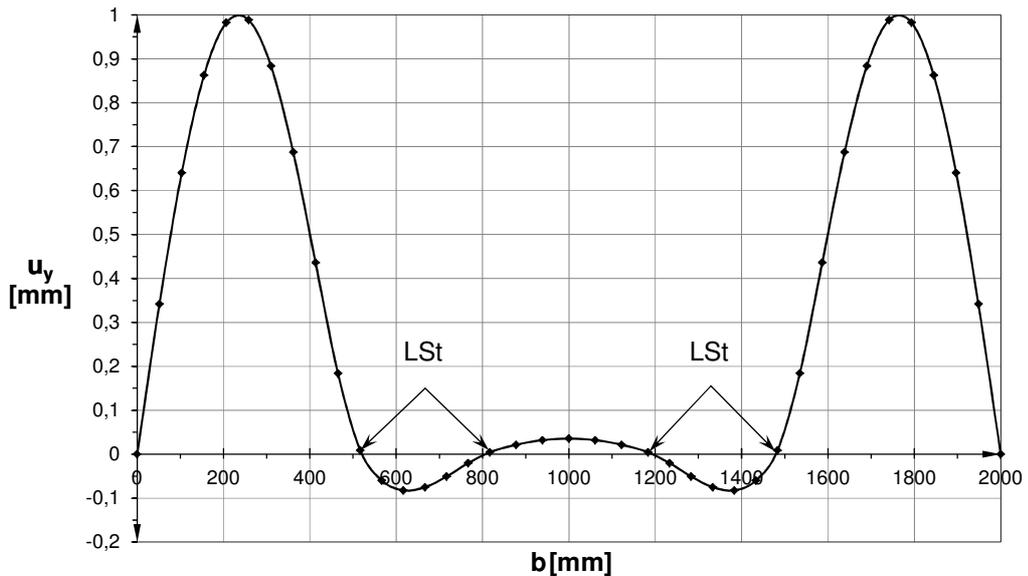


Abb. 5.73: Verformung u_y der 1. Eigenform (lokal) über die Steghöhe für $\bar{x} = 0,50 [-]$ für System S2; $t_{LSt} = 10 [mm]$ – Variante 2

Die Berechnung der idealen Plattenbeulspannungen $\sigma_{cr,p}$ erfolgt, wie in Abschnitt 4.1.4, auf Basis der numerischen Eigenwerte ϕ_{cr} ($= \alpha_{cr}$), welche einen Rückschluss auf die Beulwerte $k_{\sigma,p}$ lt. Tab. 5.20 (Vergleichswerte mit durchlaufenden Längssteifen aus [5] sind in Klammern gesetzt) ermöglichen.

	Einzelfeld
$\sigma_E [N/mm^2]$	71,87
$\sigma_{cr,p} [N/mm^2]$	360,44 (359,15)
$k_{\sigma,p} [-]$	5,02 (5,00)

Tab. 5.20: Beulspannungen σ_E , $\sigma_{cr,p}$ und zugehöriger Beulwert $k_{\sigma,p}$ des maßgebenden Einzelfeldes für System S2; $t_{LSt} = 10 [mm]$ – Variante 2

5.2.2.3 Nichtlineare Traglastberechnung (GMNIA)

Als Berechnungsgrundlage wird die maßgebende Imperfektionskombination von $-1,0 \cdot \text{glob} + 0,7 \cdot \text{lok}$ herangezogen. Dabei werden, entsprechend den genannten Vorzeichen der Kombination, die Imperfektionen immer in Richtung der Längssteifen angenommen.

Der Laststeigerungsfaktor (LSF) für die maßgebende Imperfektionskombination bei endenden und durchlaufenden Längssteifen (Klammerwert nach [5]) ist in Tab. 5.21 angegeben.

Imperfektion	LSF [-]
$-1,0 \cdot \text{glob} + 0,7 \cdot \text{lok}$	0,601 (0,873)

Tab. 5.21: Laststeigerungsfaktor (LSF) bei maßgebender Eigenwert-Kombination für System S2; $t_{Lst} = 10[\text{mm}]$ – Variante 2

Die Abb. 5.74 zeigt das verformte System im Traglastzustand und die Abb. 5.75 stellt die zugehörige Verformung u_y an der Stelle der Beulamplitude im Beobachtungsfeld bei $\bar{x} = 0,50$ [-] dar.

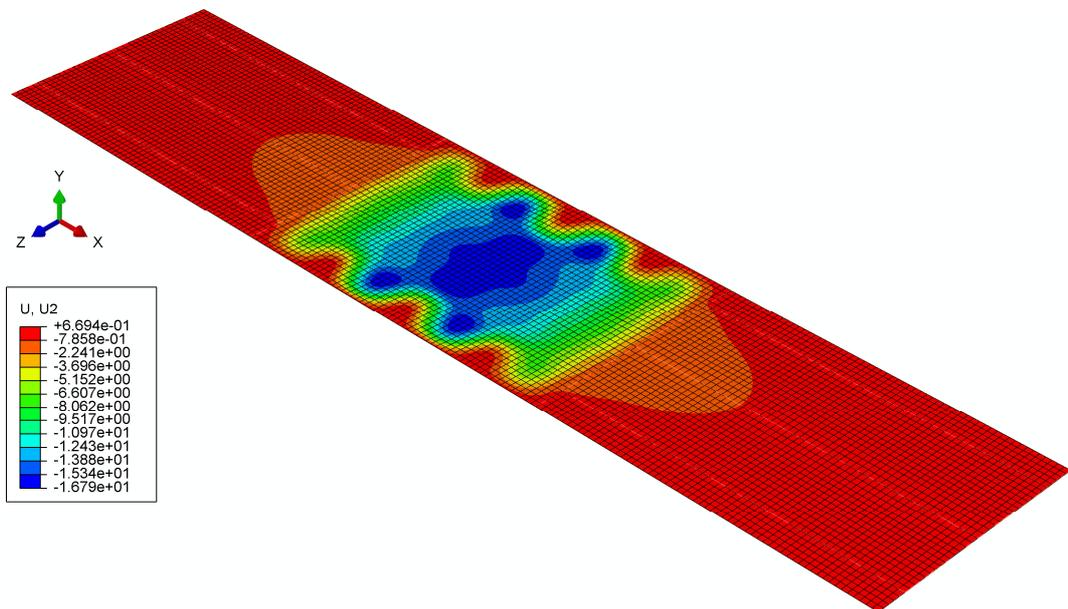


Abb. 5.74: Geometrisch nichtlineares Traglastbild mit Verformung u_y bei LSF = 0,601 [-] für System S2; $t_{Lst} = 10[\text{mm}]$ – Variante 2

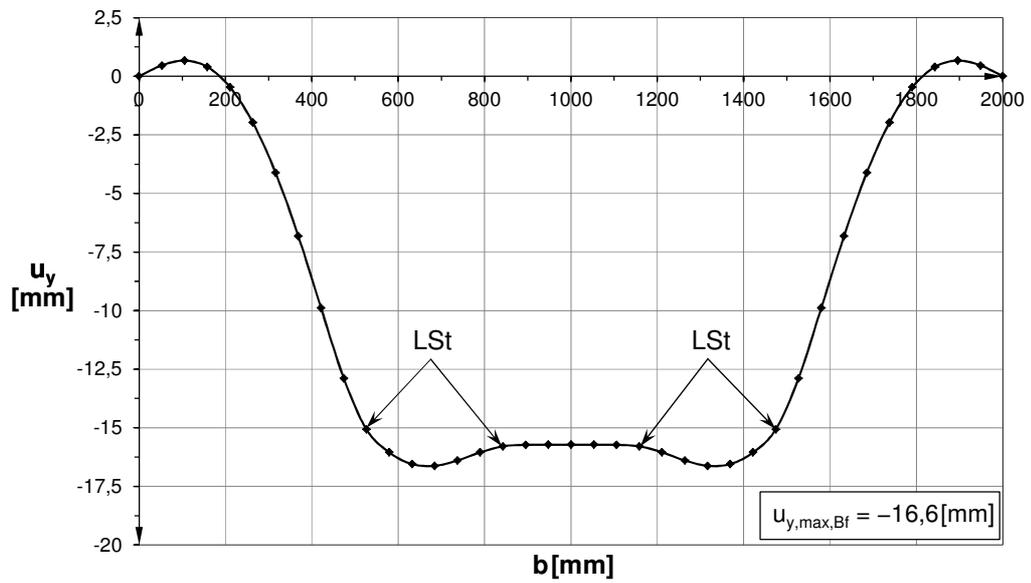


Abb. 5.75: Verformung u_y über die Steghöhe für $\bar{x} = 0,50[-]$ im Beobachtungsfeld für System S2; $t_{LSt} = 10[mm]$ – Variante 2

5.3 System S3

Das System S3 beinhaltet zwei in äquidistanten Abständen, in den Drittelpunkten des Beobachtungsfeldes befindliche, trapezförmige, überhöhte Hohlsteifen ($h_{LSt} = 300$ [mm]). Die Berechnung erfolgt mit der Steifenblechdicke $t_{LSt} = 8$ [mm], der konstanten Randspannungsverteilung $\psi = 1,0$ [-] und der Randfeldstützung gemäß *Variante 2*.

5.3.1 System S3: $\alpha = 1,5$ [-] / $t_{LSt} = 8$ [mm] / $\psi = 1,0$ [-] / *Variante 2*

5.3.1.1 Lineare Analyse (LA)

Die Spannungs- (σ_{11}) bzw. Verformungsverläufe (u_y) im Stegblech des Randfeldes sowie des Beobachtungsfeldes und in den Längssteifen sind der nachfolgenden Abb. 5.76 bis Abb. 5.80 zu entnehmen.

Die Normalspannungsverteilung σ_{11} im Steg des Randfeldes entspricht Abb. 5.76.

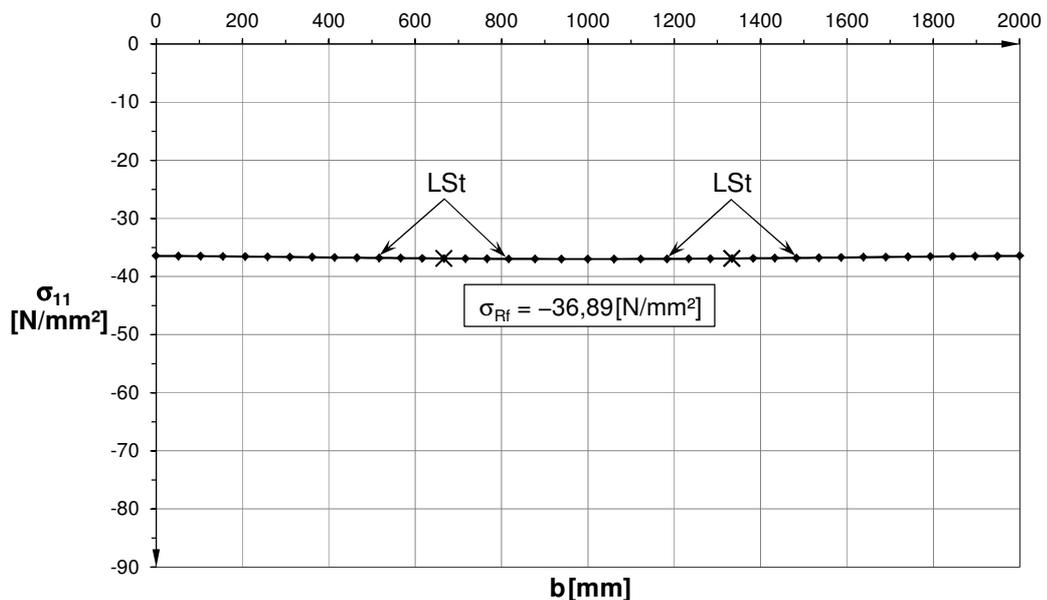


Abb. 5.76: Gesamtspannung σ_{11} ($= \sigma_{Rf}$) in der Mitte eines Randfeldes über die Steghöhe auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (Vertikalschnitt II) für System S3; $t_{LSt} = 8$ [mm] – *Variante 2*

In der nachfolgenden Abb. 5.77 (Achse m) und Abb. 5.78 (Achse o) sind die vorliegenden Gesamtspannungen σ_{11} in der Mittelachse der Längssteifen explizit ausgewiesen, welche in der Vergleichsrechnung zwischen den FE-Ergebnissen und den vereinfachten Rechenmodellen in Anhang B Verwendung finden.

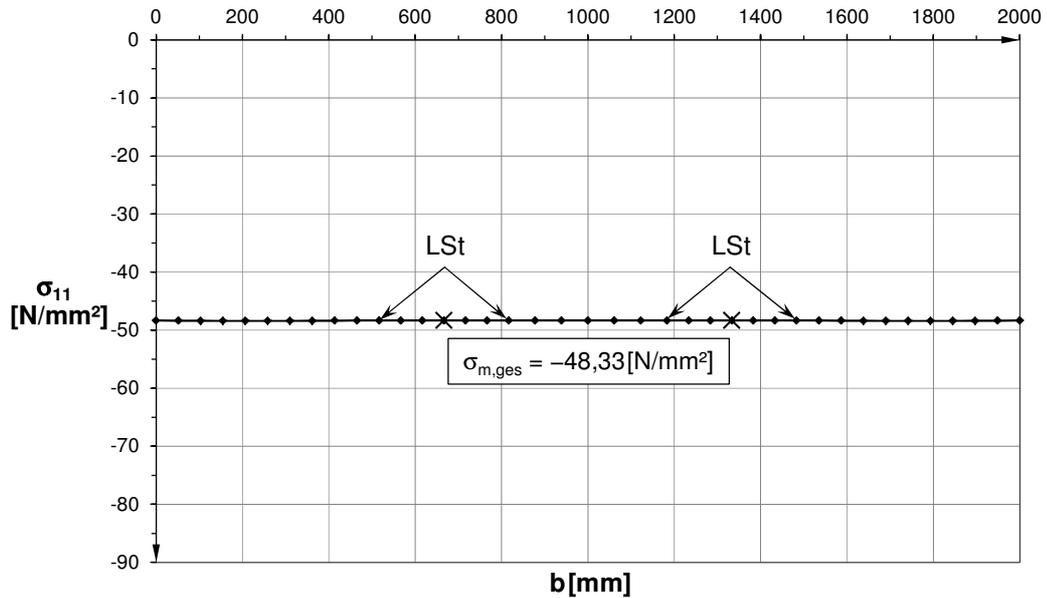


Abb. 5.77: Gesamtspannung σ_{11} ($= \sigma_{m,N} + \sigma_{m,\Delta M}$) in der Mitte des Beobachtungsfeldes über die Steghöhe auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (Vertikalschnitt I) für System S3; $t_{LSt} = 8 \text{ [mm]}$ – Variante 2

Es liegt ein nahezu konstanter Spannungsverlauf über den gesamten Stegquerschnitt in allen Teilfeldern vor. Die äußeren Einzelfelder im Mittelfeld werden somit auch für die Biegewirkung der Längssteifen vollständig mitaktiviert. Gemäß Abb. 5.78 bildet sich der Längssteifenaußengurt bei der vorliegenden Beanspruchung als Zuggurt aus.

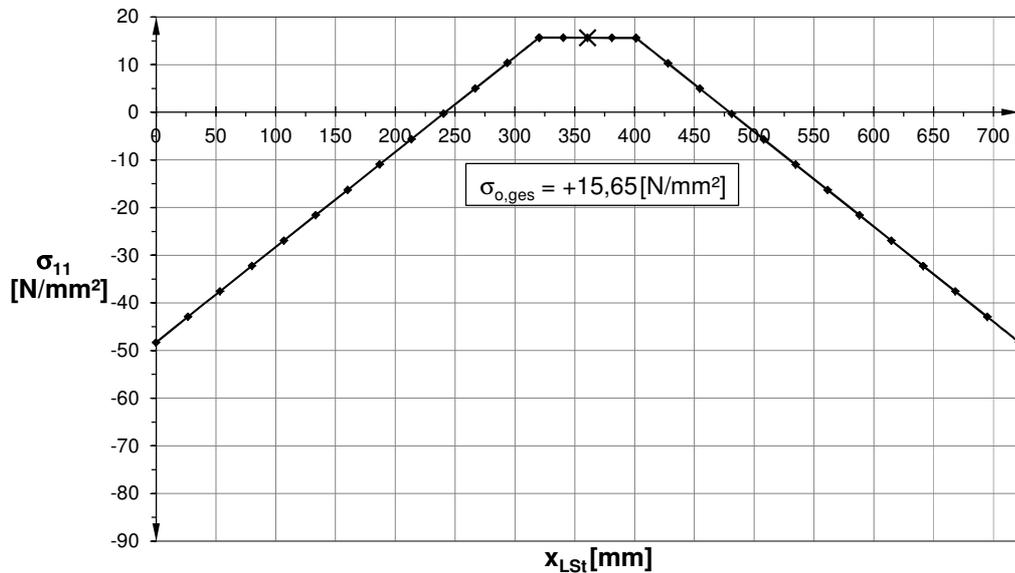


Abb. 5.78: Gesamtspannung σ_{11} ($= \sigma_{N,LSt} + \sigma_{\Delta M,LSt}$) der Längssteife auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (abgewinkelte Länge x_{LSt} ; beide Stege und Untergurt) für System S3; $t_{LSt} = 8 \text{ [mm]}$ – Variante 2

Die Verformung u_y aus der Stegehöhe des Beobachtungsfeldes ist in Abb. 5.79 dargestellt.

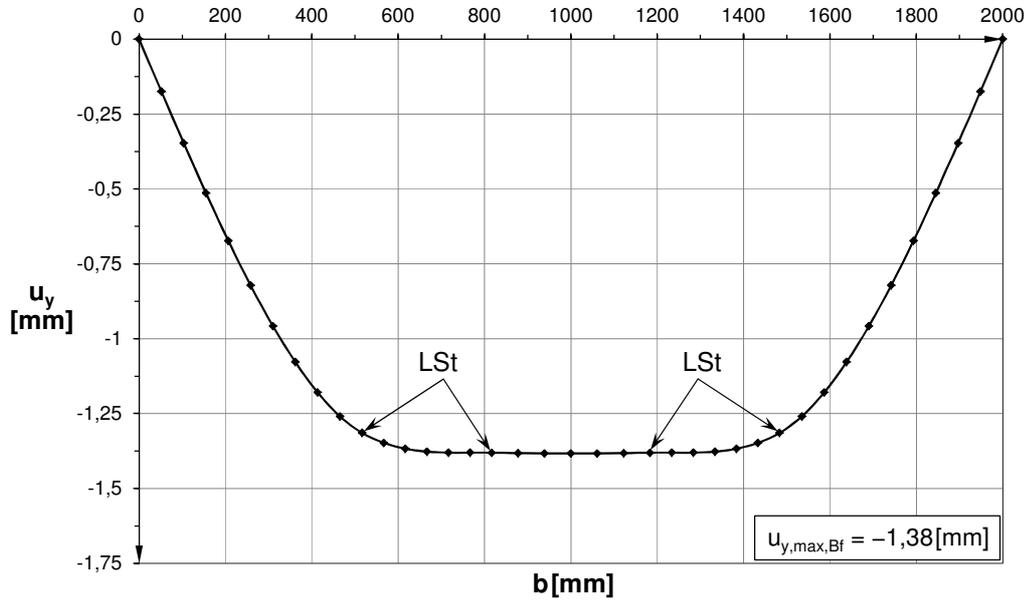


Abb. 5.79: Verformung u_y in der Mitte des Beobachtungsfeldes über die Steghöhe auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (Vertikalschnitt I) für System S3; $t_{LSt} = 8[mm]$ – Variante 2

Die Abb. 5.80 zeigt den Verformungsverlauf u_y entlang einer Längssteife im Beobachtungsfeld mit einer beidseitig in die Randfelder fortgesetzten Schnittführung.

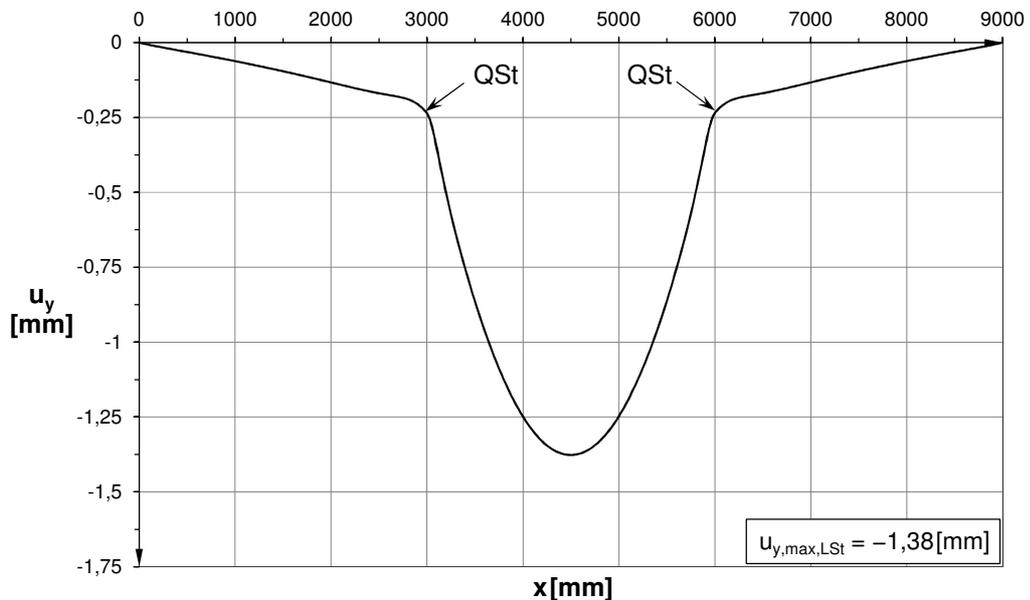


Abb. 5.80: Verformung u_y entlang einer Längssteife in Längsrichtung auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (Horizontalschnitt III) für System S3; $t_{LSt} = 8[mm]$ – Variante 2

5.3.1.2 Lineare Beulanalyse (LBA)

Der gemäß der Regelung für geometrische Ersatzimperfectionen nach Eurocode 3-1-5 [1] gewählte lokale Eigenwert ϕ_{cr} aus der linearen Beulberechnung (LBA) ist in Abb. 5.22 angegeben. Vergleichsweise findet sich in Klammern gesetzt der zugehörige lokale Eigenwert der numerischen Traglastermittlung des identen Systems mit durchlaufenden Längssteifen in [5].

Da für das System S2 kein globaler Beulwert mittels ABAQUS [4] ermittelt werden konnte, wird dem FE-Modell eine parabolische Durchbiegung vorgegeben. Für endende Längssteifen beschränkt sich dieser Ansatz auf das mittlere Beulfeld mit einer Imperfektion in Richtung der Längssteifen, wohingegen bei durchlaufenden Längssteifen die vorgegebene Durchbiegung wechselweise (Randfelder entgegen $+u_y$) und mittleres Beulfeld in Richtung der Längssteifen ($-u_y$) in allen drei Teilfeldern angesetzt wird. Die Geometrie und Größe dieser Verformung ist in beiden Fällen für jedes Teilfeld ident.

Nr.	Eigenwert ϕ_{cr} [-]	Eigenform
1.	25,360 (34,718)	lokal

Tab. 5.22: Lokaler Eigenwert ϕ_{cr} der linearen Beulanalyse für System S3; $t_{Lst} = 8$ [mm] – Variante 2

In Abb. 5.81 ist die zugehörige lokale Beulform für endende Längssteifen dargestellt. Aufgrund des in x- und z-Richtung symmetrisch verlaufenden Gesamtquerschnittes sind die Beulformen ebenfalls symmetrisch.

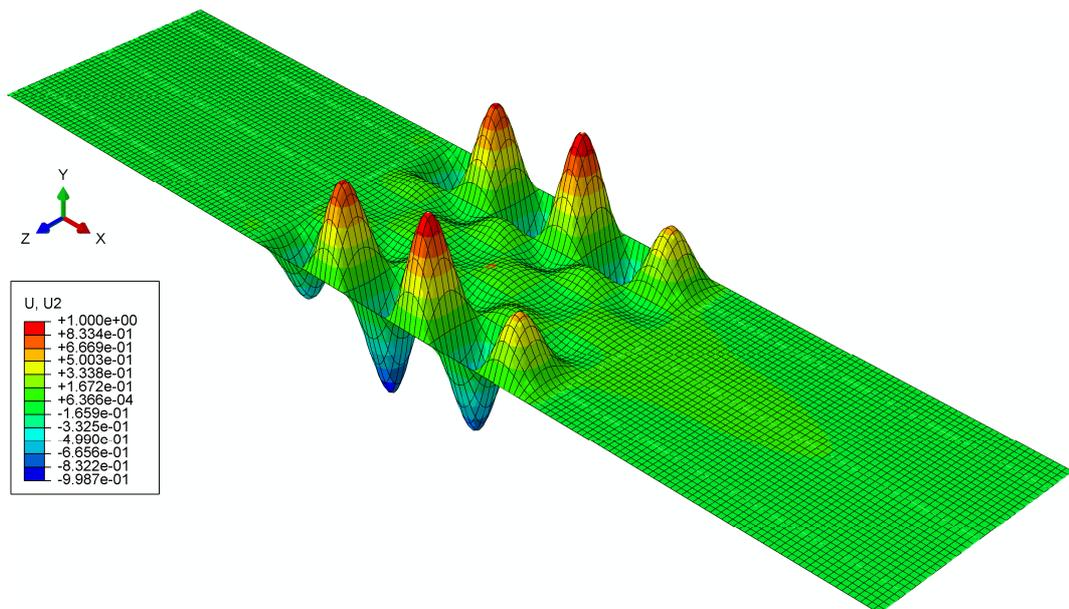


Abb. 5.81: 1. Eigenform (lokal), $\phi_{cr} = 25,360$ [-] für System S3; $t_{Lst} = 8$ [mm] – Variante 2

Der Vertikalschnitt in Abb. 5.82 verläuft durch die Amplitude der gewählten Beulform. Für den Skalierfaktor (SF) der lokalen Eigenform (Begleitimperfection) gilt ein Ansatz zu 70% der Bezugsgröße $b/200$ (siehe Tab. 3.1 und Abb. 3.7). Daraus folgt:

$$SF = 0,7 \cdot 1,0 \cdot \frac{514,17}{200} = 1,800 [-]$$

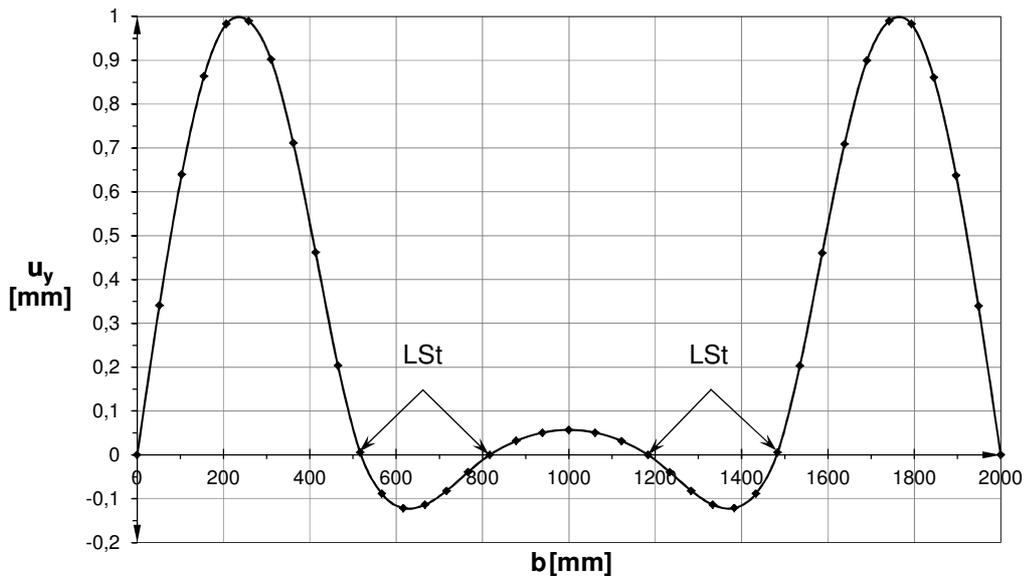


Abb. 5.82: Verformung u_y der 1. Eigenform (lokal) über die Steghöhe für $\bar{x} = 0,58[-]$ für System S3; $t_{LSt} = 8[\text{mm}]$ – Variante 2

Die Berechnung der idealen Plattenbeulspannungen $\sigma_{cr,p}$ erfolgt, wie in Abschnitt 4.1.4, auf Basis der numerischen Eigenwerte ϕ_{cr} ($= \alpha_{cr}$), welche einen Rückschluss auf die Beulwerte $k_{\sigma,p}$ lt. Tab. 5.23 (Vergleichswerte mit durchlaufenden Längssteifen aus [5] sind in Klammern gesetzt) ermöglichen.

	Einzelfeld
σ_E [N/mm ²]	71,87
$\sigma_{cr,p}$ [N/mm ²]	345,25 (347,18)
$k_{\sigma,p}$ [-]	4,80 (4,83)

Tab. 5.23: Beulspannungen σ_E , $\sigma_{cr,p}$ und zugehöriger Beulwert $k_{\sigma,p}$ des maßgebenden Einzelfeldes für System S3; $t_{LSt} = 8[\text{mm}]$ – Variante 2

5.3.1.3 Nichtlineare Traglastberechnung (GMNIA)

Als Berechnungsgrundlage wird die maßgebende Imperfektionskombination von $-1,0 \cdot \text{glob} + 0,7 \cdot \text{lok}$ herangezogen. Dabei werden, entsprechend den genannten Vorzeichen der Kombination, die Imperfektionen immer in Richtung der Längssteifen angenommen.

Der Laststeigerungsfaktor (LSF) für die maßgebende Imperfektionskombination bei endenden und durchlaufenden Längssteifen (Klammerwert nach [5]) ist in Tab. 5.24 angegeben.

Imperfektion	LSF [-]
$-1,0 \cdot \text{glob} + 0,7 \cdot \text{lok}$	0,620 (0,866)

Tab. 5.24: Laststeigerungsfaktor (LSF) bei maßgebender Eigenwert-Kombination für System S3; $t_{LSt} = 8[\text{mm}]$ – Variante 2

Die Abb. 5.83 zeigt das verformte System im Traglastzustand und die Abb. 5.84 stellt die zugehörige Verformung u_y an der Stelle der Beulamplitude im Beobachtungsfeld dar. Ein unsymmetrisches Traglastbild zeichnet sich aufgrund der bei $\bar{x} = 0,58 [-]$ in positiver Verformungsrichtung ($+u_y$) gelegenen Amplitude der lokalen Eigenform ab. Im Traglastzustand liegt die Verformungsamplitude jedoch aufgrund der maßgebenden lokalen Eigenformanteile in Richtung der Längssteifen ($-u_y$) bei $\bar{x} = 0,43 [-]$.

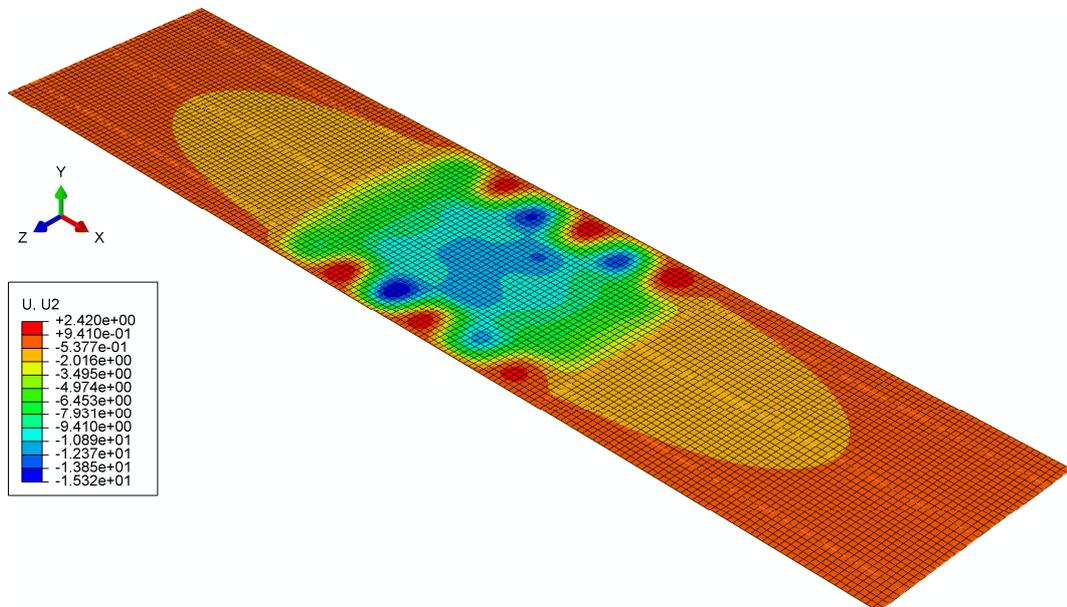


Abb. 5.83: Geometrisch nichtlineares Traglastbild mit Verformung u_y bei LSF = 0,620 [-] für System S3; $t_{LSt} = 8[\text{mm}]$ – Variante 2

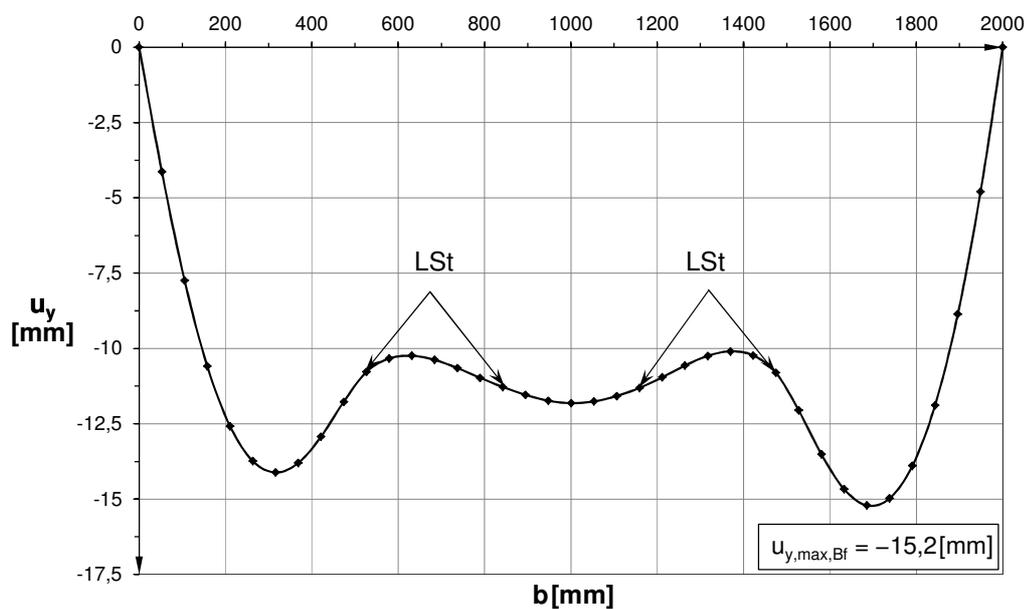


Abb. 5.84: Verformung u_y über die Steghöhe für $\bar{x} = 0,43[-]$ im Beobachtungsfeld für System S3; $t_{LSt} = 8$ [mm] – Variante 2

5.4 System S4

Das System S4 beinhaltet drei dreiecksförmige Hohlsteifen ($h_{LSt} = 148$ [mm]). Diese sind unter Berücksichtigung annähernd identer Beulwiderstände der Einzelfelder über die Steghöhe angeordnet. Die Berechnung erfolgt mit der Steifendicke $t_{LSt} = 6$ [mm], der linear veränderlichen Randspannungsverteilung $\psi = 0$ [-] und der Randfeldstützung gemäß *Variante 2*.

5.4.1 System S4: $\alpha = 0,86$ [-] / $t_{LSt} = 6$ [mm] / $\psi = 0$ [-] / *Variante 2*

5.4.1.1 Lineare Analyse (LA)

Die Spannungs- (σ_{11}) bzw. Verformungsverläufe (u_y) im Stegblech des Randfeldes sowie des Beobachtungsfeldes und in den Längssteifen sind der nachfolgenden Abb. 5.85 bis Abb. 5.89 zu entnehmen.

Die Normalspannungsverteilung σ_{11} im Steg des Randfeldes entspricht Abb. 5.85.

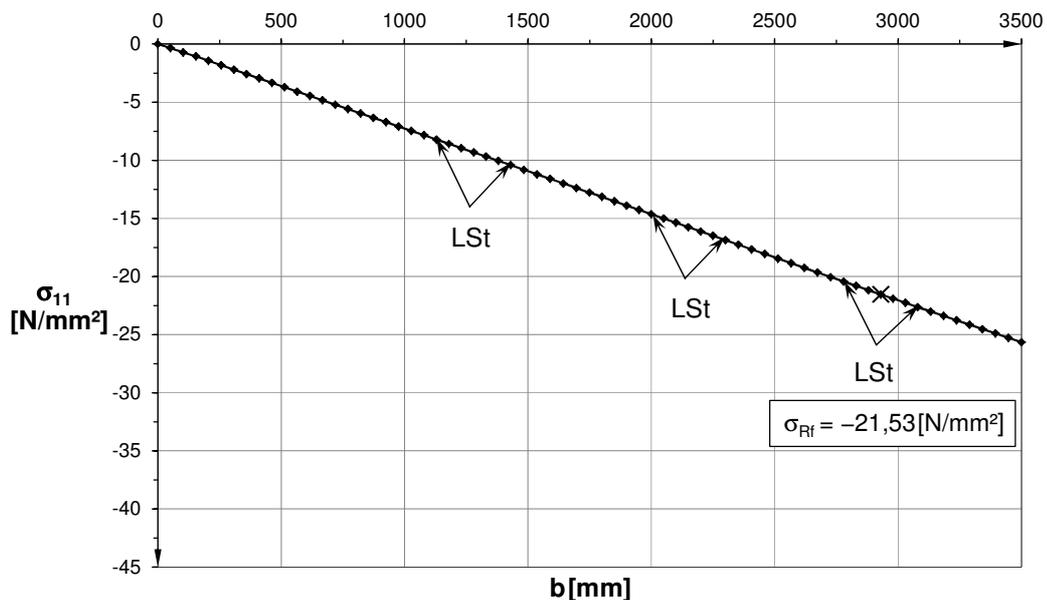


Abb. 5.85: Gesamtspannung σ_{11} ($= \sigma_{Rf}$) in der Mitte eines Randfeldes über die Steghöhe auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (Vertikalschnitt II) für System S4; $t_{LSt} = 6$ [mm] – *Variante 2*

In der nachfolgenden Abb. 5.86 (Achse m) und Abb. 5.87 (Achse o) sind die vorliegenden Gesamtspannungen σ_{11} in der Mittelachse der Längssteifen explizit ausgewiesen, welche in der Vergleichsrechnung zwischen den FE-Ergebnissen und den vereinfachten Rechenmodellen in Anhang B Verwendung finden.

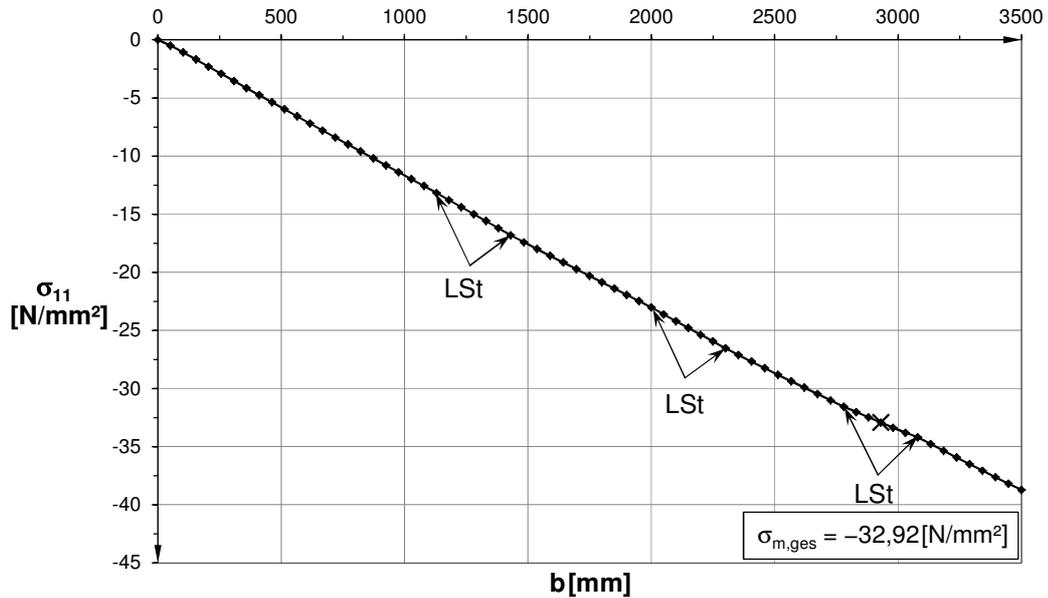


Abb. 5.86: Gesamtspannung σ_{11} ($= \sigma_{m,N} + \sigma_{m,\Delta M}$) in der Mitte des Beobachtungsfeldes über die Steghöhe auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (Vertikalschnitt I) für System S4; $t_{LSt} = 6$ [mm] – Variante 2

In allen Teilfeldern ist ein linear veränderlicher Spannungsverlauf entsprechend der Spannungsverteilung $\psi = 0$ [-] erkennbar. Die äußeren Einzelfelder im Mittelfeld werden somit auch für die Biegewirkung der Längssteifen vollständig mitaktiviert. Gemäß Abb. 5.87 fällt die Druckbeanspruchung bis zur vollen Längssteifenhöhe linear ab.

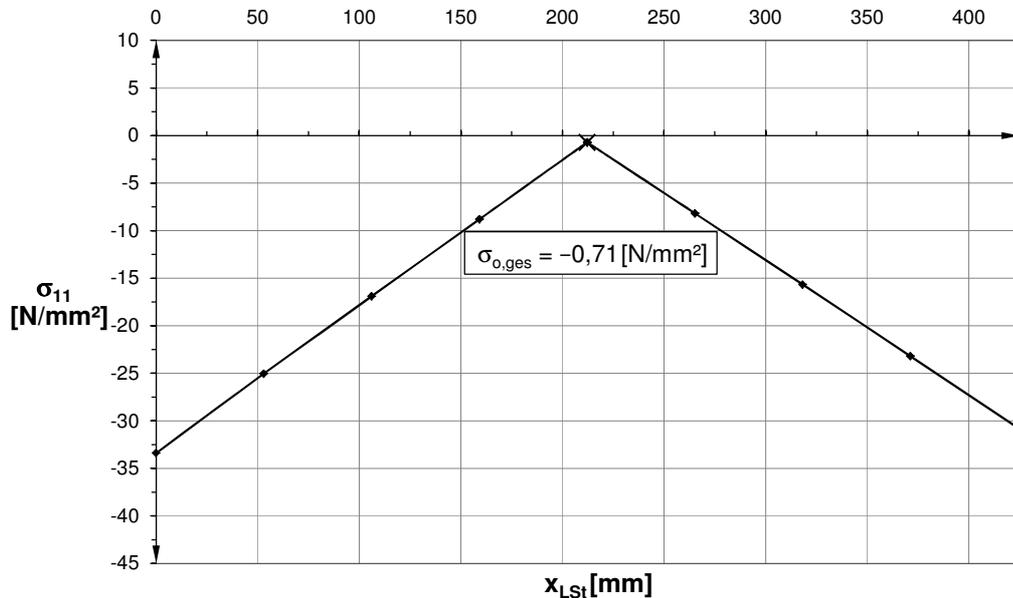


Abb. 5.87: Gesamtspannung σ_{11} ($= \sigma_{N,LSt} + \sigma_{\Delta M,LSt}$) der Längssteife auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (abgewinkelte Länge x_{LSt} ; beide Stege) für System S4; $t_{LSt} = 6$ [mm] – Variante 2

Die Verformung u_y aus der Stegehöhe des Beobachtungsfeldes ist in Abb. 5.88 dargestellt.

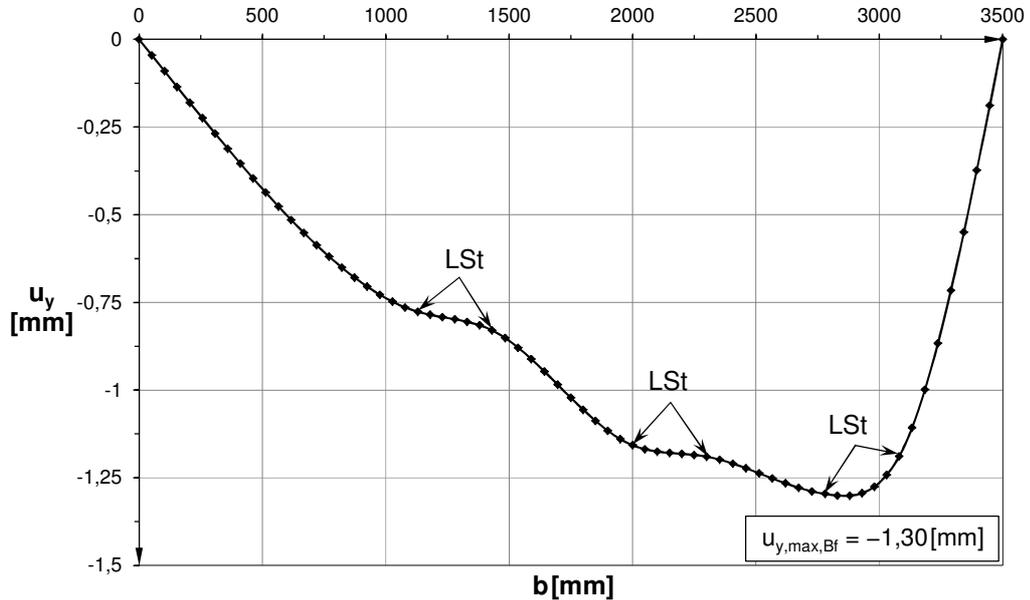


Abb. 5.88: Verformung u_y in der Mitte des Beobachtungsfeldes über die Steghöhe auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (Vertikalschnitt I) für System S4; $t_{LSt} = 6 [mm]$ – Variante 2

Die Abb. 5.89 zeigt den Verformungsverlauf u_y entlang einer Längssteife im Beobachtungsfeld mit einer beidseitig in die Randfelder fortgesetzten Schnittführung.

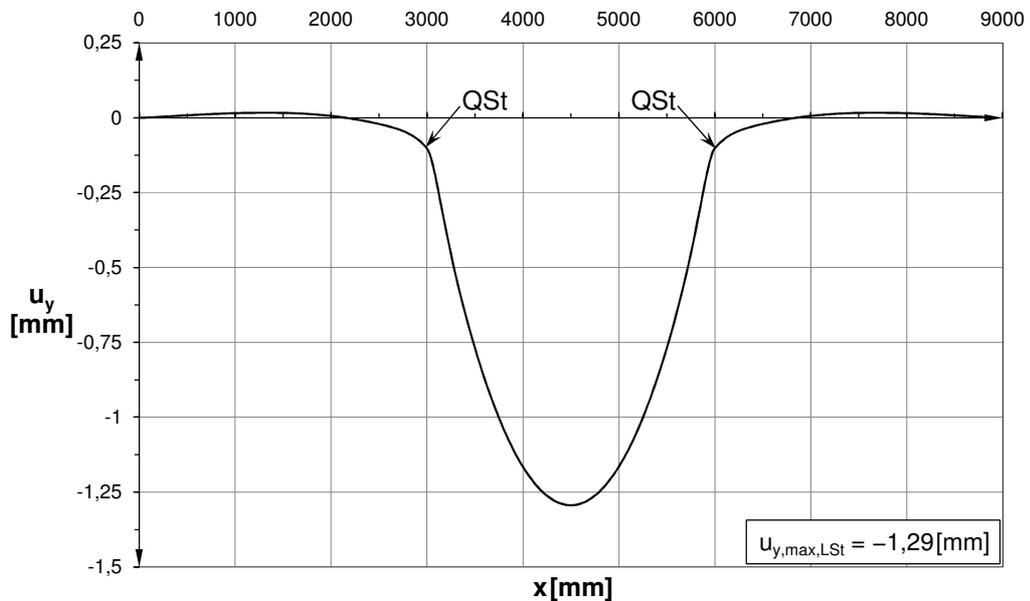


Abb. 5.89: Verformung u_y entlang einer Längssteife in Längsrichtung auf Lastniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ (Horizontalschnitt III) für System S4; $t_{LSt} = 6 [mm]$ – Variante 2

5.4.1.2 Lineare Beulanalyse (LBA)

Der gemäß der Regelung für geometrische Ersatzimperfectionen nach Eurocode 3-1-5 [1] gewählte globale und lokale Eigenwert ϕ_{cr} aus der linearen Beulberechnung (LBA) ist in Tab. 5.25 angegeben. Vergleichsweise finden sich in Klammern gesetzt die zugehörigen Eigenwerte der numerischen Traglastermittlung des identen Systems mit durchlaufenden Längssteifen aus [5].

Nr.	Eigenwert ϕ_{cr} [-]	Eigenform
3.	61,114 (52,907)	global
4.	70,143 (76,917)	lokal

Tab. 5.25: Globaler und lokaler Eigenwert ϕ_{cr} der linearen Beulanalyse für System S4; $t_{LSt} = 6$ [mm] – Variante 2

In Abb. 5.90 und Abb. 5.91 sind die zugehörigen globalen und lokalen Eigenformen für endende Längssteifen dargestellt. Die Beulamplituden treten erwartungsgemäß an der obersten Längssteife bzw. im obersten Einzelfeld nahe dem Druckrand auf.

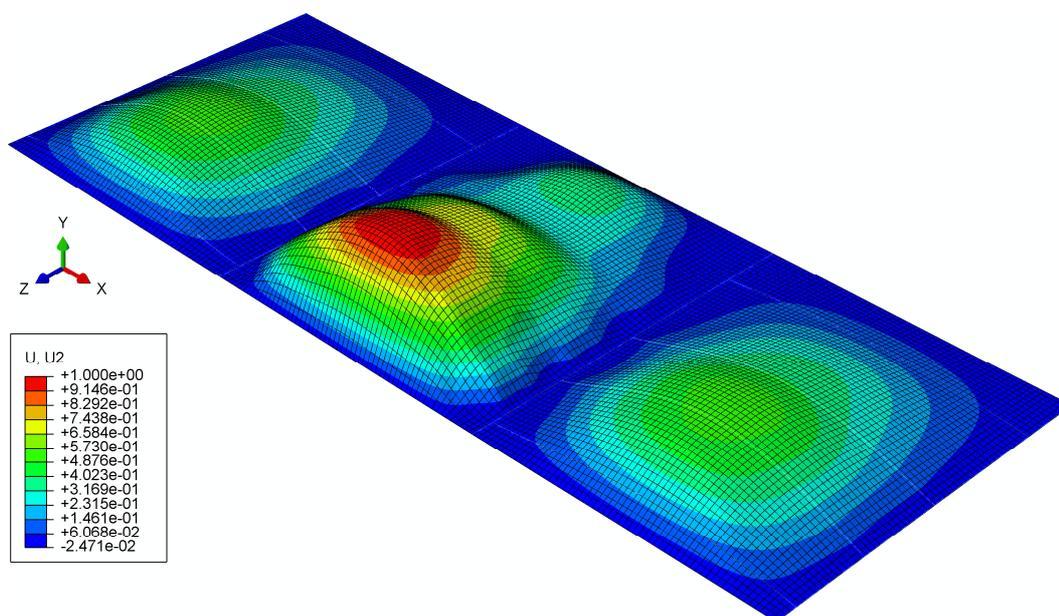


Abb. 5.90: 3. Eigenform (global), $\phi_{cr} = 61,114$ [-] für System S4; $t_{LSt} = 6$ [mm] – Variante 2

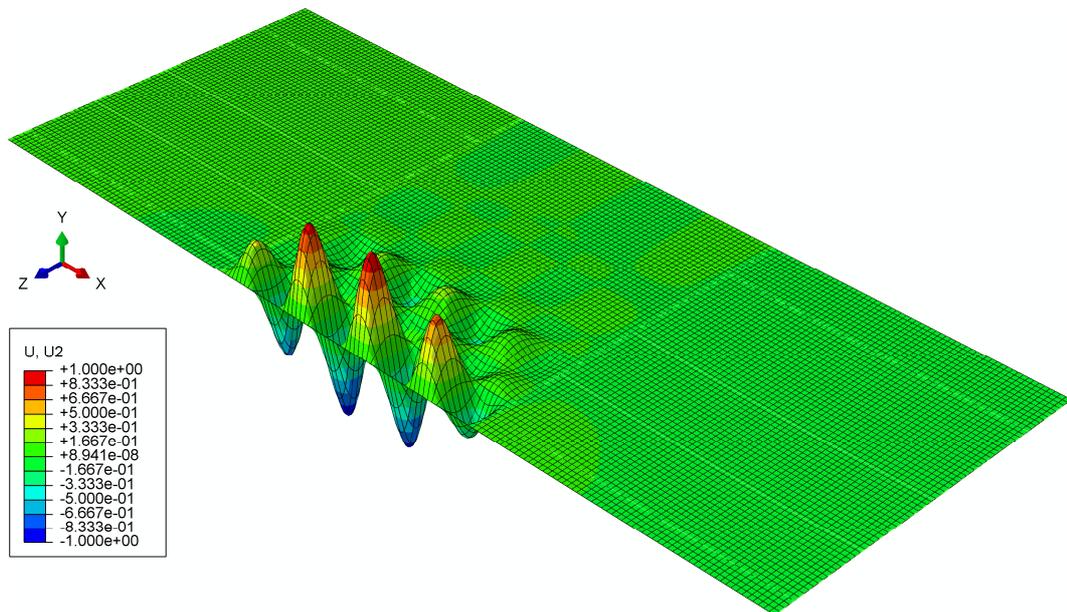


Abb. 5.91: 4. Eigenform (lokal), $\phi_{cr} = 70,143[-]$ für System S4; $t_{LSt} = 6[\text{mm}]$ – Variante 2

Die in Abb. 5.92 und Abb. 5.93 dargestellten Vertikalschnitte verlaufen durch die Amplitude der gewählten Beulform. Die globale Eigenform (Leitimperfection) wird mit dem Ansatz zu 100% in der Traglastberechnung berücksichtigt. Der zugehörige Skalierfaktor (SF) ergibt sich somit zu:

$$SF = -1,0 \cdot 1,0 \cdot \frac{3000}{400} = -7,500 [-]$$

Anmerkung:

Das negative Vorzeichen ergibt sich, da die Imperfektionsrichtung mit Druckspannungen im Stegblech maßgebend ist.

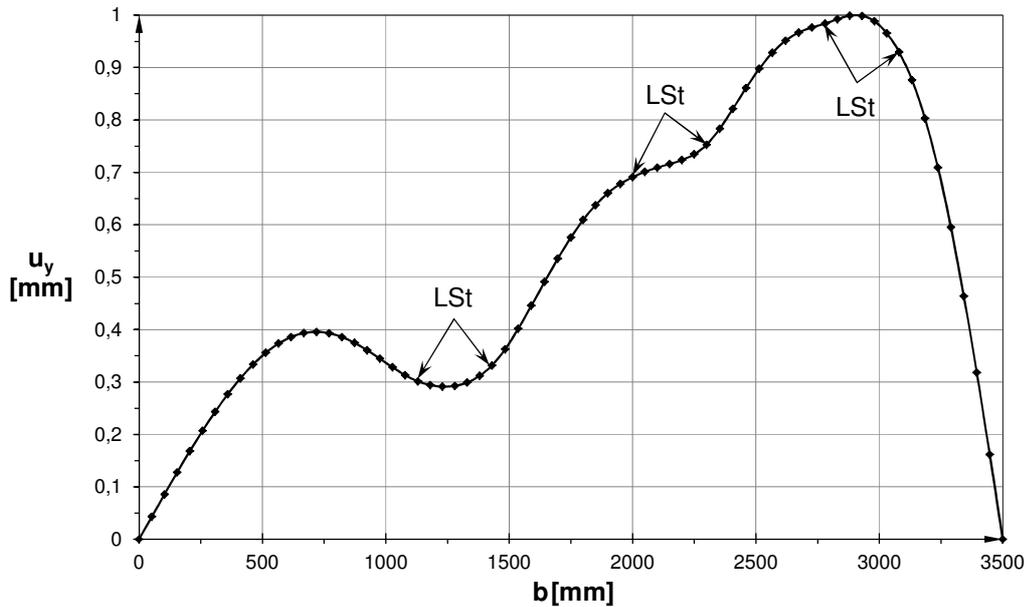


Abb. 5.92: Verformung u_y der 3. Eigenform (global) über die Steghöhe für $\bar{x} = 0,50[-]$ für System S4; $t_{LSt} = 6[\text{mm}]$ – Variante 2

Für den Skalierfaktor (SF) der lokalen Eigenform (Begleitimperfection) gilt ein Ansatz zu 70% der Bezugsgröße $b/200$ (siehe Tab. 3.1 und Abb. 3.7). Daraus folgt:

$$SF = 0,7 \cdot 1,0 \cdot \frac{422}{200} = 1,477 [-]$$

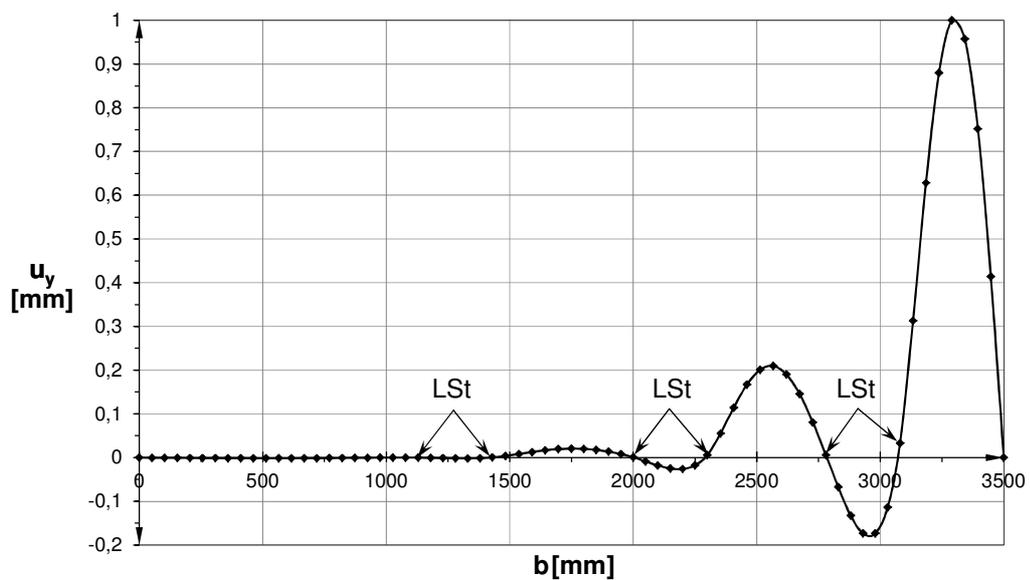


Abb. 5.93: Verformung u_y der 4. Eigenform (lokal) über die Steghöhe für $\bar{x} = 0,56[-]$ für System S4; $t_{LSt} = 6[\text{mm}]$ – Variante 2

Die Berechnung der idealen Plattenbeulspannungen $\sigma_{cr,p}$ erfolgt, wie in Abschnitt 4.1.4, auf Basis der numerischen Eigenwerte ϕ_{cr} ($= \alpha_{cr}$), welche einen Rückschluss auf die Beulwerte $k_{\sigma,p}$ lt. Tab. 5.26 (Vergleichswerte mit durchlaufenden Längssteifen aus [5] sind in Klammern gesetzt) ermöglichen.

	Einzelfeld	mittleres Teilfeld
σ_E [N/mm ²]	153,64	2,23
$\sigma_{cr,p}$ [N/mm ²]	765,05 (769,17)	611,14 (529,07)
$k_{\sigma,p}$ [-]	4,98 (5,01)	273,63 (237,25)

Tab. 5.26: Beulspannungen σ_E , $\sigma_{cr,p}$ und zugehöriger Beulwert $k_{\sigma,p}$ getrennt nach Stegfeldern für System S4; $t_{Lst} = 6$ [mm] – Variante 2

5.4.1.3 Nichtlineare Traglastberechnung (GMNIA)

Als Berechnungsgrundlage wird die maßgebende Imperfektionskombination von $-1,0 \cdot \text{glob} + 0,7 \cdot \text{lok}$ herangezogen. Dabei werden, entsprechend den genannten Vorzeichen der Kombination, die Imperfektionen immer in Richtung der Längssteifen angenommen.

Der Laststeigerungsfaktor (LSF) für die maßgebende Imperfektionskombination bei endenden und durchlaufenden Längssteifen (Klammerwert nach [5]) ist in Tab. 5.27 angegeben.

Imperfektion	LSF [-]
$-1,0 \cdot \text{glob} + 0,7 \cdot \text{lok}$	0,772 (0,776)

Tab. 5.27: Laststeigerungsfaktor (LSF) bei maßgebender Eigenwert-Kombination für System S4; $t_{Lst} = 6[\text{mm}]$ – Variante 2

Wie die Tab. 5.27 zeigt, ergibt sich für die linear veränderliche Spannungsverteilung $\psi = 0[-]$ für endende Längssteifen kaum ein Traglastabfall im Vergleich zu durchlaufenden Längssteifen.

Die Abb. 5.94 zeigt das verformte System im Traglastzustand und die Abb. 5.95 stellt die zugehörige Verformung u_y an der Stelle der Beulamplitude im Beobachtungsfeld dar. Ein unsymmetrisches Traglastbild zeichnet sich aufgrund der bei $\bar{x} = 0,56[-]$ in positiver Verformungsrichtung ($+u_y$) gelegenen Amplitude der lokalen Eigenform ab. Im Traglastzustand liegt die Verformungsamplitude jedoch aufgrund der maßgebenden lokalen Eigenformanteile in Richtung der Längssteifen ($-u_y$) bei $\bar{x} = 0,50[-]$.

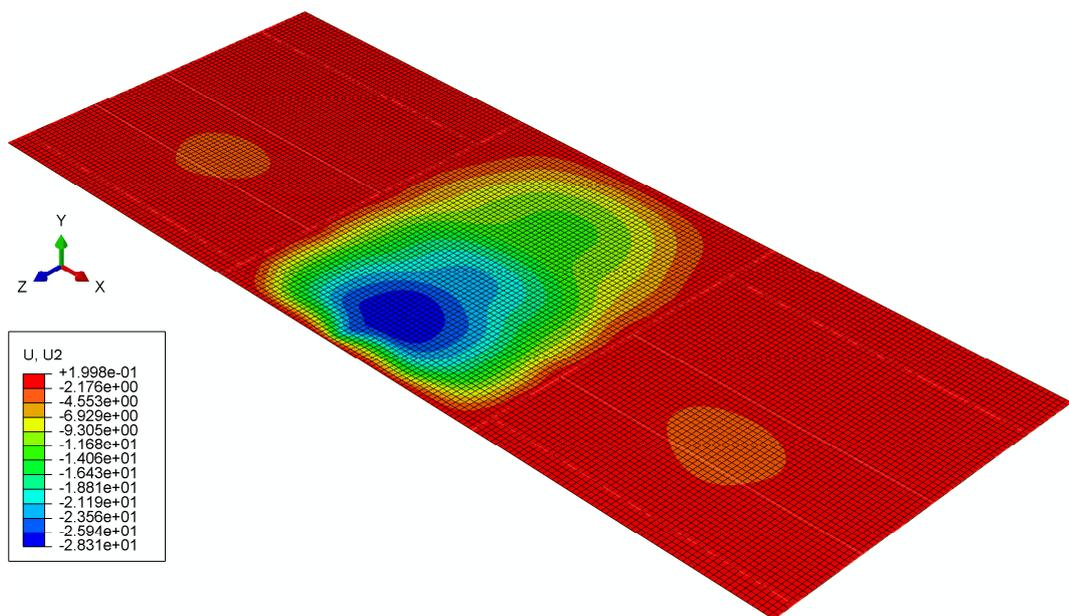


Abb. 5.94: Geometrisch nichtlineares Traglastbild mit Verformung u_y bei $LSF = 0,772[-]$ für System S4; $t_{Lst} = 6[\text{mm}]$ – Variante 2

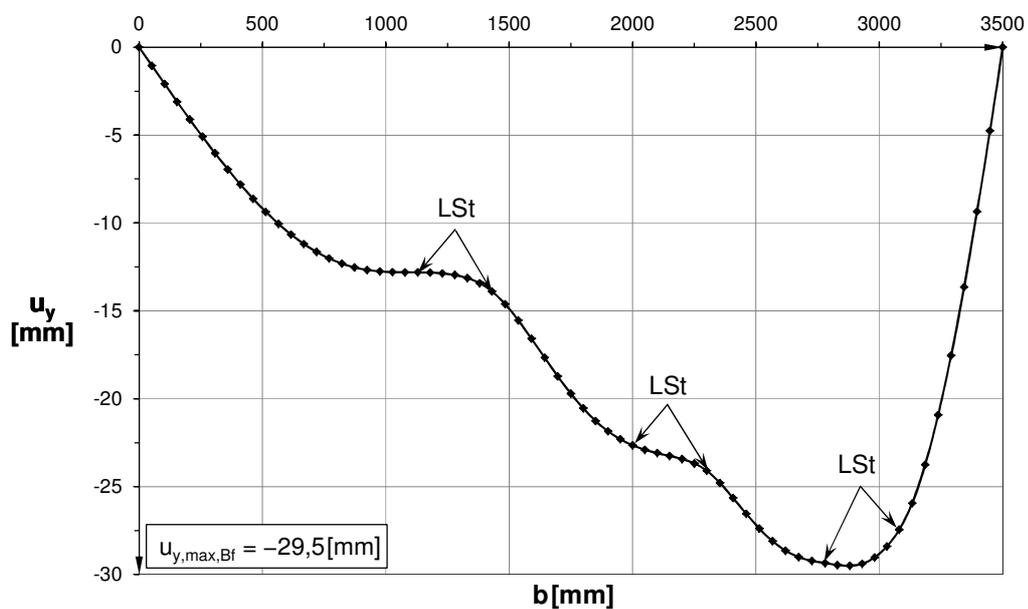


Abb. 5.95: Verformung u_y über die Steghöhe für $\bar{x} = 0,50[-]$ im Beobachtungsfeld für System S4; $t_{LSt} = 6[\text{mm}]$ – Variante 2

6 Ergebnisvergleich zwischen Systemen mit endenden und durchlaufenden Längssteifen

6.1 Numerische Traglastanalyse

6.1.1 Lineare Beulanalyse (LBA)

Die erhaltenen lokalen Eigenwerte $\phi_{cr,lok}$ zeigen, gemäß Tab. 6.1, für alle Systeme ein einheitliches Vergleichsbild. Die lokalen Eigenwerte endender Längssteifen stimmen dabei mit jenen von über alle Teilfelder durchlaufenden Längssteifen überein ($\Delta < 1\%$). Wie in Abschnitt 4.1.4 im Detail erläutert, bedarf es aufgrund der bei endenden Längssteifen unterschiedlichen Querschnittsfläche je Randfeld und jener des mittleren Teilfeldes, einer Umrechnung der Bezugsspannung $\sigma_{x,Ed,Bf}$ für das maßgebende Einzelfeld im Beobachtungsfeld.

System	ψ [-]	t_{LSt} [mm]	$\phi_{cr,lok}$ [-]		$\sigma_{cr,p,lok}$ [N/mm ²]			$k_{\sigma,p,lok}$ [-]	
			end. LSt	dl. LSt	end. LSt	dl. LSt	Δ [%]	end. LSt	dl. LSt
S1	1	8	28,929	35,407	354,08	354,07	+0,0	4,93	4,93
	1	10	28,299	36,385	361,83	363,85	-0,6	5,03	5,06
S2	1	8	26,927	34,894	349,44	348,94	+0,1	4,86	4,86
	1	10	26,103	35,915	360,44	359,15	+0,4	5,02	5,00
S3	1	8	25,360	34,718	345,25	347,18	-0,6	4,80	4,83
S4	0	6	70,143	76,917	765,05	769,17	-0,5	4,98	5,01

Tab. 6.1: Lokale Eigenwerte $\phi_{cr,lok}$, ideale Beulspannungen $\sigma_{cr,p,lok}$ und Beulwerte $k_{\sigma,p,lok}$ der linearen Beulanalyse (LBA) für endende und durchlaufende Längssteifen – Variante 2

In Abb. 6.1 ist das nahe am Druckrand gelegene, maßgebende Einzel- und das mittlere Teilfeld für die Beulwertermittlung dargestellt.

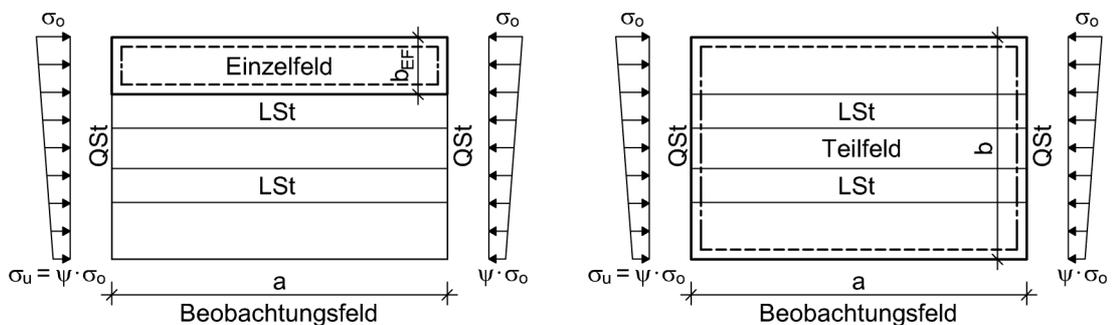


Abb. 6.1: Einzel- und Teilfeld der Beulwertanalyse

Gemäß den tatsächlichen Beulformen wird für alle Systeme das Zusammenwirken der Einzelfelder berücksichtigt. Die untersuchten Systeme S1, S2 sowie S3 (jeweils mit $\psi = 1,0[-]$) und das System S4 (mit $\psi = 0,879[-]$) liefern für das maßgebende, am Druckrand gelegene Einzelfeld Beulwerte, welche für die vorhandene Beulfeldgeometrie α ($= a/b[-]$) und Lastsituation ψ höher sind als jene nach Eurocode 3-1-5 [1] für das als isoliert, gelenkig gelagert betrachtete Einzelfeld ($k_{\sigma,p,\min} = 4,0[-]$) bzw. in Tabellenwerken wie z.B. von Klöppel/Scheer [9] – vgl. Tab 6.1.

Den Vergleich der globalen Eigenwerte $\phi_{cr, glob}$ zeigt Tab. 6.2.

System	ψ [-]	t_{LSt} [mm]	$\phi_{cr, glob}[-]$		$\sigma_{cr, p, glob}$ [N/mm ²]			$k_{\sigma, p, glob}[-]$	
			end. LSt	dl. LSt	end. LSt	dl. LSt	Δ [%]	end. LSt	dl. LSt
S1	1	8	48,014	41,232	480,14	412,32	+16,4	101,08	86,80
	1	10	51,573	44,534	515,73	445,34	+15,8	108,57	93,76
S2	1	8	n.v.	n.v.	-	-	-	-	-
	1	10							
S3	1	8	n.v.	n.v.	-	-	-	-	-
S4	0	6	61,114	52,907	611,14	529,07	+15,5	273,63	237,25

Tab. 6.2: Globale Eigenwerte $\phi_{cr, glob}$, ideale Beulspannungen $\sigma_{cr, p, glob}$ und Beulwerte $k_{\sigma, p, glob}$ der linearen Beulanalyse (LBA) für endende und durchlaufende Längssteifen – *Variante 2*

Die erhöhten globalen Eigenwerte endender Längssteifen lassen sich durch die ebenfalls gesteigerten Steifigkeitsverhältnisse aufgrund der zusätzlichen Randfeldstützung und der zugehörigen Blechdickenerhöhung der Randfeldstege erklären. Die starre Stützung (*Variante 1*) liefert dabei, paradoxerweise, die niedrigste elastische kritische Plattenbeulspannung ($\sigma_{cr, p} = 451,53$ [N/mm²]; siehe Abschnitt 4.1.4, Tab. 4.3). Dies beruht jedoch auf dem Vorhandensein des zum Beobachtungsfeld hin über eine Länge von $15 \cdot t_w$ ungestützten Randfeldbereiches. Die höchste elastische kritische Plattenbeulspannung ($\sigma_{cr, p} = 480,14$ [N/mm²]) gibt die Randfeldstützung der *Variante 2* mit identer Längssteifen-Biegesteifigkeit ($I_{z, Rf} = I_{z, Bf}$) wieder. Somit unterliegen die tatsächlichen Beulwerte – wie auch bereits für die ermittelte resultierende Traglast in Abschnitt 4.1.4 festgestellt wurde – einem unwesentlichen Einfluss der modellierten Kräfteinleitungssteifen (sehr kleine Querschnittsfläche \Rightarrow „keine“ Dehnsteifigkeit) in den Randfeldern.

6.1.2 Geometrisch und materiell nichtlineare Analyse mit Ersatzimperfektionen (GMNIA)

In Tab. 6.3 sind die Laststeigerungsfaktoren (LSF) der untersuchten Systeme für endende und durchlaufende Längssteifen mit der zugehörigen Blechdicke t_{LSt} , Steifenlage \bar{x}_{LSt} über die Steghöhe, bezogenen Knickschlankheit $\bar{\lambda}_c$ des „Längssteifenersatzstabes“ (gemäß Anhang C, Abschnitt 3) und das Trägheitsmoment $I_{LSt,br}$ des Bruttoquerschnittes (als *Modell 1* in Anhang B, Abschnitt 2.1, vorgestellt) von endenden Längssteifen wiedergegeben. Zudem ist auch die Differenz (ΔLSF) zwischen den Laststeigerungsfaktoren für die untersuchten Systeme mit endenden und durchlaufenden Längssteifen angegeben.

System	ψ [-]	t_{LSt} [mm]	Steifenlage \bar{x}_{LSt} [-]	$\bar{\lambda}_c$ [-]	$I_{LSt,br}$ [mm ⁴]	LSF [-]		ΔLSF end./dl. [%]
						end. LSt	dl. LSt	
S1	1	8	0,33; 0,66	0,973	17723028	0,557	0,670	-16,9
	1	10	0,33; 0,66	0,938	20594008	0,548	0,709	-22,7
S2	1	8	0,33; 0,66	0,526	66779052	0,624	0,853	-26,8
	1	10	0,33; 0,66	0,512	77337247	0,601	0,873	-31,2
S3	1	8	0,33; 0,66	0,376	142901191	0,620	0,866	-28,4
S4	0	6	0,16; 0,39; 0,63	1,035	16460640	0,772	0,776	-0,5

Tab. 6.3: Laststeigerungsfaktoren (LSF) der nichtlinearen Traglastanalyse (GMNIA) für endende (*Variante 2*) und durchlaufende Längssteifen

Die errechneten Laststeigerungsfaktoren endender Längssteifen – gleichbedeutend den systemweise zugehörigen, resultierenden Reduktionsfaktoren ρ_c der Beultragfähigkeit – liegen wegen des Zusatzmomentes ΔM unter jenen von durchlaufenden Längssteifen. Mit zunehmender Steifigkeit des Längssteifenbruttoquerschnittes durch die Erhöhung der Längssteifenblechdicke (für das System S1 und S2 von $t_{LSt} = 8$ [mm] auf $t_{LSt} = t_w = 10$ [mm] angehoben) bzw. der Längssteifenhöhe ($h_{LSt} = 100$ [mm] für das System S1, $h_{LSt} = 200$ [mm] für das System S2 und $h_{LSt} = 300$ [mm] für das System S3) sinkt dabei tendenziell die Traglast für Teilfelder mit endenden Längssteifen. Für die untersuchten Systeme entsteht bei konstanter „Normalkraftbeanspruchung“ ($\psi = 1,0$ [-]) eine bis zu 31% (System S2) reduzierte ertragbare Bemessungslast im Vergleich zu dem Fall mit durchlaufenden Beulsteifen. Das System S3 ist aufgrund der überhöhten Steifen ($h_{LSt} = 300$ [mm]; $a = 3\,000$ [mm]) kein baupraktisch relevantes Fallbeispiel, dient jedoch der tendenziellen Beurteilung des Traglastverhaltens zwischen Teilfeldern mit endenden und durchlaufenden Längssteifen. Die Beultragfähigkeit für System S3 nähert sich entsprechend der Knickschlankheit $\bar{\lambda}_c = 0,376$ [-] einem reinen Querschnittsversagen auf Druckbeanspruchung an. Die relative Traglastdifferenz reduziert sich bei dem Vergleich endender zu durchlaufender Beulsteifen zwischen dem

System S2 ($\Delta\text{LSF} = 27\%$ mit $\bar{\lambda}_c = 0,526[-]$) und dem System S3 ($\Delta\text{LSF} = 28\%$ mit $\bar{\lambda}_c = 0,376[-]$) wesentlich geringer als zwischen dem System S1 ($\Delta\text{LSF} = 17\%$ mit $\bar{\lambda}_c = 0,973[-]$) und dem System S2 ($\Delta\text{LSF} = 27\%$). Für das System S4 mit linear veränderlicher Druckspannungsverteilung ($\psi = 0[-]$) und einer unsymmetrischen Längssteifenverteilung (Steifenlage entlang der Steghöhe erwirkt etwa einen identen Beulwiderstand für jedes Einzelfeld) fällt die Beulstabilität für das mittlere Teilfeld mit endenden Längssteifen nur 0,5% geringer aus als bei dem gleichen System mit über alle Teilfelder durchlaufenden Beulsteifen. Der Effekt endender Längssteifen hat somit bei hohen Biegeträgern mit linear veränderlichem Druckspannungsverlauf einen deutlich geringeren Einfluss auf die Beultragfähigkeit des längsausgesteiften Teilfeldes als bei konstanter Drucknormalbeanspruchung.

Für die Systeme S1 und S2 entspricht die Traglastminderung durch die Erhöhung der Längssteifenblechdicke t_{Lst} (Verstärkung von 8[mm] auf 10[mm]) etwa einer Größe von 4% (für das System S2) bzw. 6% (für das System S1). Die Steifigkeiten des Längssteifenbruttoquerschnittes von beiden Systemen erhalten dabei einen annähernd gleichbleibenden Zuwachs von 16%. Bei größeren Blechdicken der Längssteifen entsteht eine größere Lastausmitte e_m . Daraus resultiert ein zusätzlicher Traglastverlust, da die Erhöhung des Biegemomentes ΔM offensichtlich nicht in gleichem Maße durch die ebenfalls gesteigerte Biegesteifigkeit I_z kompensiert werden kann. Das Fehlen dieses Zusatzmomentes bei durchlaufenden Längssteifen führt mit zunehmender Längssteifenblechdicke zu einer möglichen Erhöhung der ertragbaren Längsnormalspannung σ_o . Allgemein sind die Verformungen u_y des mittleren Beulfeldes mit endenden Längssteifen, entsprechend dem dort auftretenden Zusatzmoment, gegenüber dem Fall mit durchlaufenden Längssteifen wesentlich erhöht.

ERFASSUNG DER BIEGEWIRKUNG ENDENDER LÄNGSSTEIFEN MIT EINFACHEN MODELLEN

1 Grundlagen

In diesem Abschnitt werden zwei einfache Rechenmodelle für die Handrechnung angeführt, welche eine Vergleichsrechnung mit den Spannungsergebnissen aus der linearen Analyse (LA) mit dem Softwarepaket ABAQUS [4] ermöglichen.

Bei an Quersteifen endenden Längssteifen erfolgt die Lasteinleitung in das mittlere Beulfeld über die Stegbleche der beidseitig angrenzenden Randfelder. Dadurch ergibt sich eine zusätzliche Biegebeanspruchung aufgrund der einseitigen Anordnung der Längssteifen am Steg. Die Biegewirkung ist abhängig von der jeweils gewählten Bauform, Bauhöhe und Blechdicke der Längssteife. Diese Parameter werden daher in den untersuchten Systemen variiert. Die Bauart beschränkt sich dabei auf praxisgerechte trapez- und dreiecksförmige Steifenformen. Die Bauhöhe der Längssteifen h_{LSt} wird bei gleichbleibender Teilfeldgeometrie α ($= a/b[-]$) sowie Einzelfeldgeometrie α_{EF} ($= a/b_{EF}[-]$) und jeweils mit der Stegblechdicke $t_{LSt} = 8[\text{mm}]$ ausgehend von System S1 ($h_{LSt} = 100[\text{mm}]$) für das System S2 verdoppelt ($h_{LSt} = 200[\text{mm}]$) und für das System S3 verdreifacht ($h_{LSt} = 300[\text{mm}]$). Die Blechdicken der Längssteifen werden für die Systeme S1 und S2 jeweils bis zu einer Stegblechdicke $t_{LSt} = t_w = 10[\text{mm}]$ ausgeführt.

Die auftretenden Gesamtspannungen im Längssteifenquerschnitt (Längssteife und mitwirkende Stegfläche) setzen sich aus einem Normalkraft- und Biegemomentenanteil zusammen. Letzterer ergibt sich aus der Exzentrizität des Längssteifenquerschnittes zur Lasteinleitung in Stegblechmitte. Die Spannungsermittlung erfolgt, wie in der nachfolgenden Abb. 1.1 dargestellt, an Ober- und Unterseite der Längssteife (Achse m und o). Auf die Annahmen hinsichtlich der als mitwirkend angesetzten Stegblechbreite wird in Abschnitt 2.1 und 2.2 dieses Anhangs näher eingegangen.

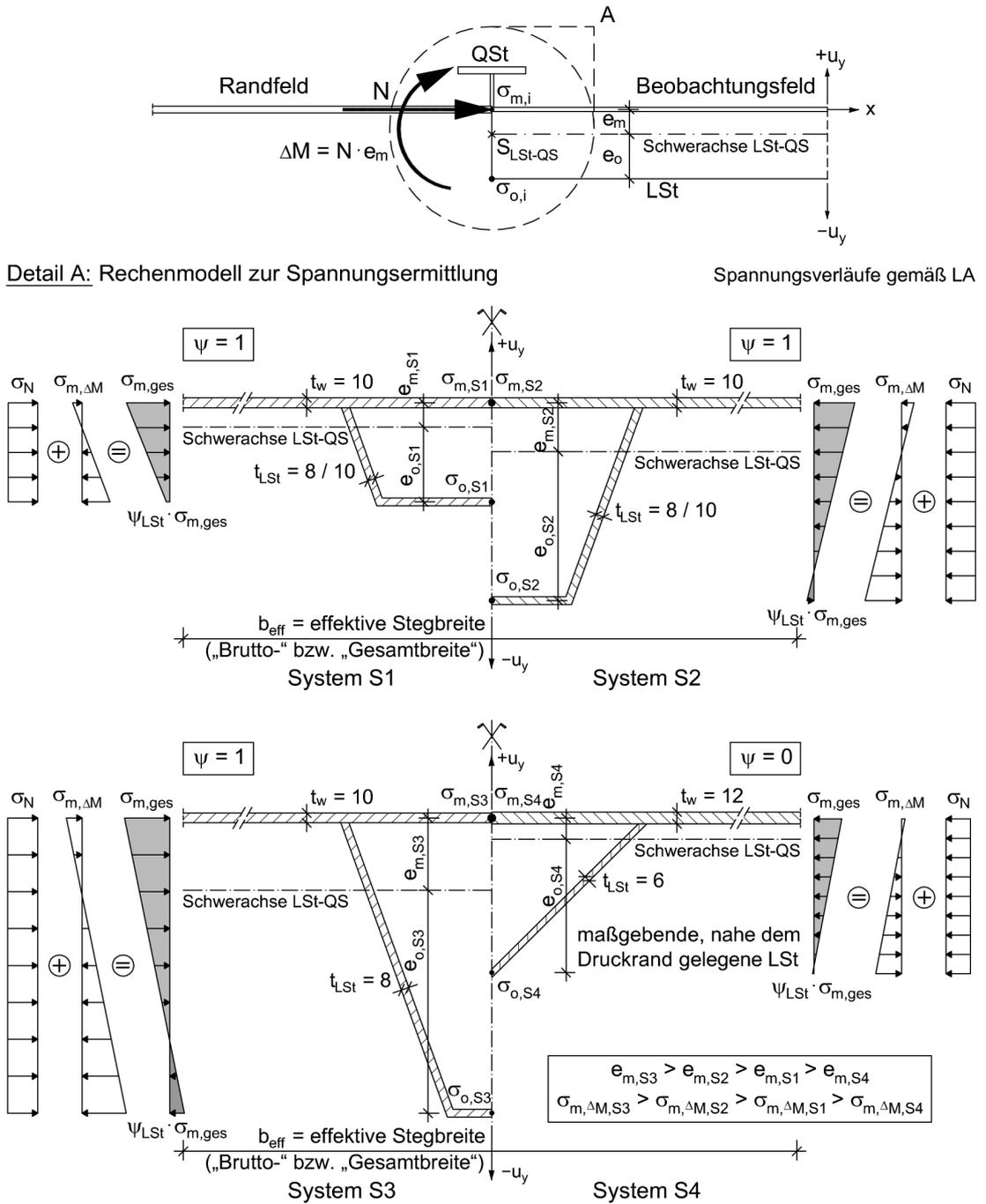


Abb. 1.1: Längssteifenquerschnitte der untersuchten Systeme mit Normalspannungsverläufen (Längssteifenhälfte systemweise dargestellt)

Das vereinfachte Rechenmodell betrachtet die Längsstiefe isoliert als Einzelstab unter Normalkraft N und Biegebeanspruchung ΔM .

2 Vorgehensweise

Aus der Systembelastung, welche sich aus der Drucknormalspannung σ_o im Stegblech und dem zugehörigen Randspannungsverhältnis ψ ergibt, wird für das Rechenmodell, die anteilige Normalkraft N sowie das zugehörige Biegemoment $\Delta M = N \cdot e_m$ für die isoliert betrachtete Längssteife ermittelt. Die Bezugslastgröße entspricht jener aus der linearen Analyse (LA), durch welche im mittleren Beulfeld unter alleiniger Längskraftbeanspruchung der Spannungszustand $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y$ erreicht wird. Damit ist ein direkter Vergleich mit dem FE-Modell möglich.

Zwei Berechnungsverfahren werden untersucht, welche sich durch die mitwirkende Querschnittsfläche des Steges unterscheiden. Diese gilt in Abhängigkeit des gewählten Rechenmodells je Steife als „Brutto-“ (*Modell 1*) bzw. „Gesamtquerschnittsfläche“ (*Modell 2*) des Steges. Die Spannungsermittlung bezieht sich immer auf die Ober- und Unterseite der Längssteife (Achse m und o in Abb. 1.1).

2.1 Längssteife mit anteiliger Stegblechmitwirkung – Modell 1

Der „Ersatzstab“ der Längssteife enthält auch den Steg, wobei jeweils 50 % des anschließenden Einzelfeldes mitwirken, wie Abb. 2.1 zeigt („Bruttobreite“ b_{br}). Für diesen „Längssteifenstab“ ist nur die Biegebeanspruchung ΔM senkrecht zur Stegebene von Bedeutung. Dies bedeutet, dass immer ein einfach-symmetrischer Querschnitt vorliegt, da die Unsymmetrie zur horizontalen Achse in Abb. 2.1 unbedeutend ist. Das gesuchte Trägheitsmoment $I_{LSt,br}$ bezieht sich somit immer auf die Achse parallel zur Stegebene. Auch die tatsächliche Schwerpunktlage in vertikaler Richtung ist ohne Belang.

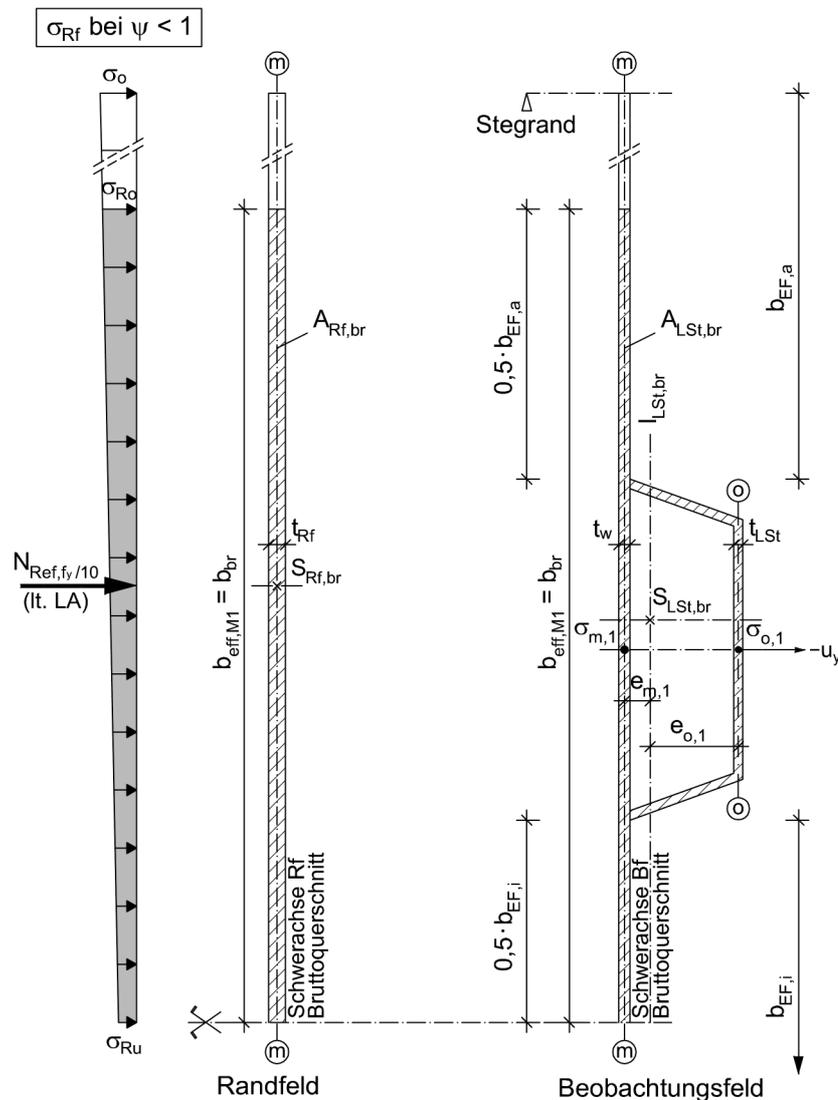


Abb. 2.1: Systemquerschnitte der Randfelder und des Beobachtungsfeldes mit anteiliger Stegblechmitwirkung und Beanspruchung für den Fall $\psi < 1,0[-]$ – Modell 1

Bei der Ermittlung der Beanspruchung dieses „Längssteifenstabes“ wird jedoch nur der Spannungsanteil innerhalb dieser Bruttobreite herangezogen. Ausgehend von den Normalspannungen des Steges im Randfeld ergibt sich für den allgemeinsten Fall ($\psi < 1,0[-]$):

$$N_{M1} = \frac{\sigma_{Ro} + \sigma_{Ru}}{2} \cdot t_{Rf} \cdot b_{br} \text{ [N]} \quad (2.1)$$

Im Falle der konstanten Drucknormalspannung ($\psi = 1,0[-]$) gilt:

$$N_{M1} = \sigma_{Rf} \cdot t_{Rf} \cdot b_{br} \text{ [N]} \quad (2.2)$$

Das zusätzliche Biegemoment ΔM errechnet sich zu:

$$\Delta M = N_{M1} \cdot e_{m,1} \text{ [Nmm]} \quad (2.3)$$

2.2 Längssteife mit vollständiger Stegblechmitwirkung – Modell 2

Die numerischen Ergebnisse gemäß der linearen Analyse (LA) in Anhang A, Abschnitt 5, zeigen Gesamtspannungsverläufe σ_{11} , welche nahezu konstant über die gesamte Steghöhe bis zu den oberen und unteren Stegrändern reichen. Dies bedeutet, dass offenbar auch der Stegrand für die Biegebeanspruchung der Längssteife vollständig aktivierbar ist. Wie Abb. 2.2 für das System S1 (sinngemäß stellvertretend für die restlichen Systeme) mit insgesamt zwei Längssteifen zeigt, wirkt außen die volle Einzelfeldbreite und innen wieder die halbe Einzelfeldbreite (Mitte zur nächstfolgenden Längssteife). Die Querschnittsermittlung erfolgt wie bei *Modell 1*. Daraus folgt, dass die Unsymmetrie zur Horizontalachse ignoriert wird und das Trägheitsmoment $I_{LSt,ges}$ nur um die vertikale, stegparallele Achse ermittelt wird. Es ergibt sich nun jedoch auch eine höhere Normalkraft N_{M2} , wie Abb. 2.2 zeigt.

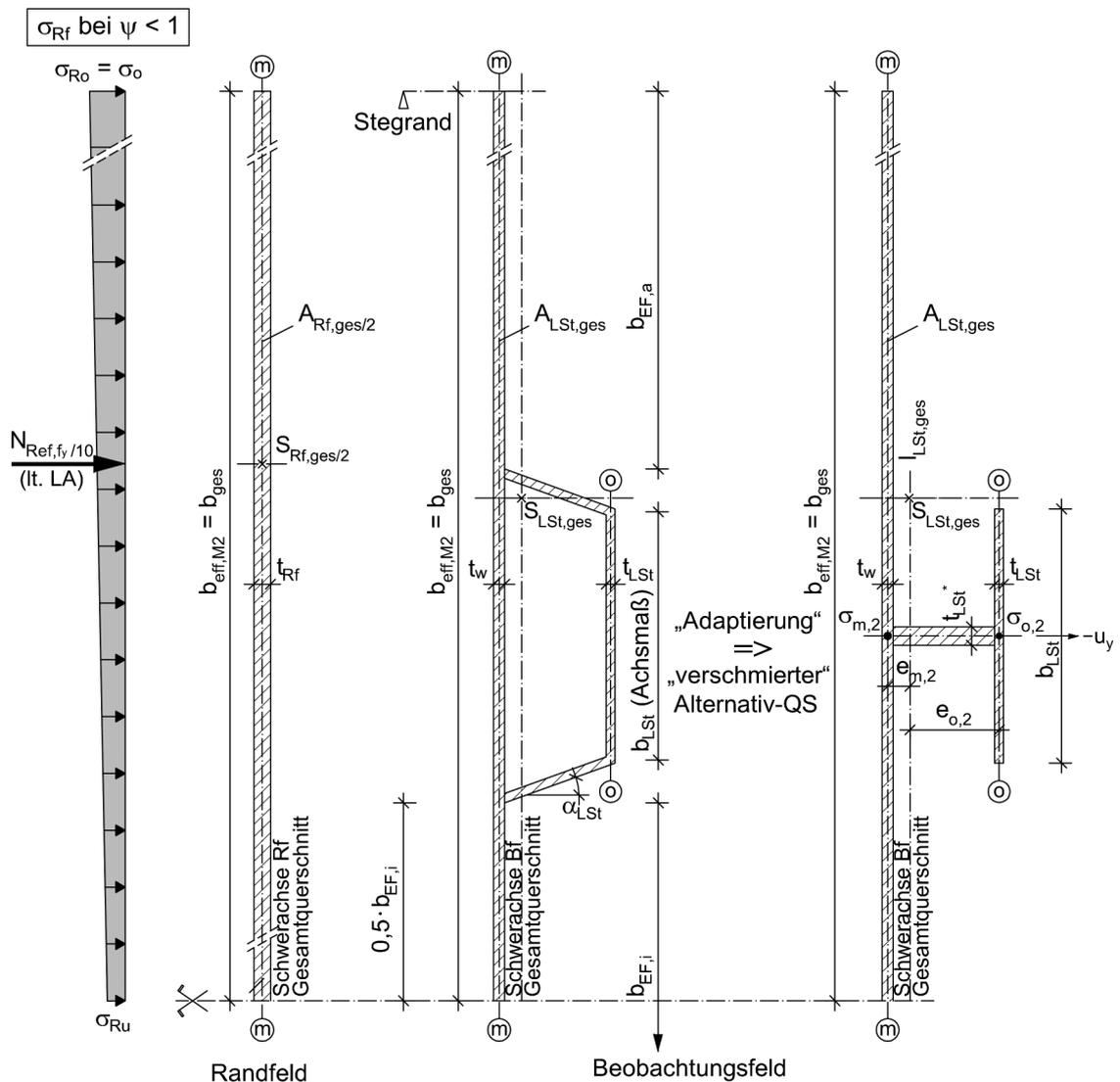


Abb. 2.2: Systemquerschnitte der Randfelder und des Beobachtungsfeldes mit vollständiger Stegblechmitwirkung und Beanspruchung für den Fall $\psi < 1,0[-]$ – Modell 2

Es ergibt sich für den allgemeinsten Fall ($\psi < 1,0[-]$):

$$N_{M2} = \frac{\sigma_{Ro} + \sigma_{Ru}}{2} \cdot t_{Rf} \cdot b_{ges} \text{ [N]} \quad (2.4)$$

Im Falle der konstanten Drucknormalspannung ($\psi = 1,0[-]$) gilt:

$$N_{M2} = \sigma_{Rf} \cdot t_{Rf} \cdot b_{ges} \text{ [N]} \quad (2.5)$$

Das zusätzliche Biegemoment ΔM errechnet sich zu:

$$\Delta M = N_{M2} \cdot e_{m,2} \text{ [Nmm]} \quad (2.6)$$

3 Ergebnisse der Rechenmodelle – elastische Biegespannung in den Längssteifen

3.1 System S1

3.1.1 System S1: $t_{LSt} = 8[\text{mm}]$

In Tab. 3.1 sind die Bezugsgrößen der Spannungsermittlung angeführt.

t_{Rf}	15[mm]
t_w	10[mm]
t_{LSt}	8[mm]
b	2000[mm]
f_y	355[N/mm ²]
σ_{Rf}	32,03[N/mm ²]
$N_{Ref,fy/10}$	480399[N]
$N_{ges,fy/10}$	960799[N]

Tab. 3.1: Bezugsgrößen beider Rechenmodelle für System S1; $t_{LSt} = 8[\text{mm}]$

Die Drucknormalkraft $N_{Ref,fy/10}$ stellt die halbe Spannungsergebnisse des Stegbleches im Randfeld dar, welche am oberen und unteren Stegblechrand der Randfelder eingeleitet wird und im mittleren Beobachtungsfeld unter reiner „Normalkraftbeanspruchung“ entsprechend der Randspannungsverteilung $\psi = 1,0[-]$ das Spannungsniveau $\sigma_{m,N,LA} = 0,1 \cdot f_y = 35,50 [\text{N/mm}^2]$ herbeiführt:

$$N_{ges,fy/10} = 2 \cdot N_{Ref,fy/10} = 2 \cdot 480399,4 = 960798,7 [\text{N}] \quad (3.1)$$

Die Normalspannung σ_{Rf} in den Randfeldern errechnet sich mit dem dort vorliegenden Flächenanteil $A_{Rf,ges}$ zu:

$$\sigma_{Rf} = \frac{N_{ges,fy/10}}{A_{Rf,ges}} = \frac{960798,7}{2000 \cdot 15} = 32,03 [\text{N/mm}^2] \quad (3.2)$$

a.) Anteilige Stegblechmitwirkung (Modell 1)

Die Abb. 3.1 zeigt die Systemquerschnitte und die einwirkenden Lastgrößen der Randfelder und des Beobachtungsfeldes für das *Modell 1*.

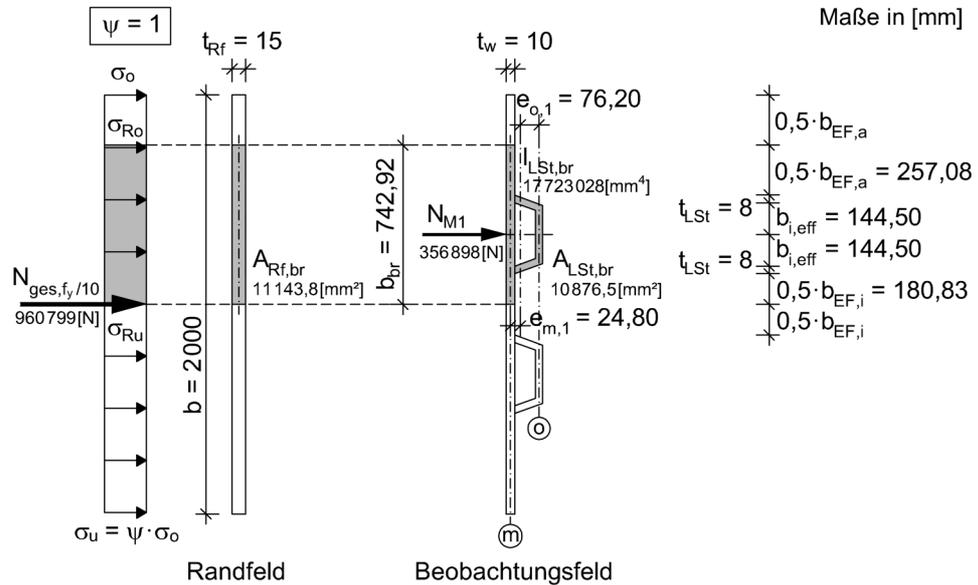


Abb. 3.1: Querschnitte und Beanspruchung für System S1; $t_{LSt} = 8 [mm]$ – *Modell 1*

Die auf den Längssteifenbruttoquerschnitt einwirkende Normalkraft N_{M1} entspricht der Nennspannung σ_{Rf} bezogen auf die anteilig mitwirkende Stegfläche des Randfeldes.

$$N_{M1} = \sigma_{Rf} \cdot t_{Rf} \cdot b_{br} = 32,03 \cdot 15 \cdot 742,92 = 356898 [N] \quad (3.3)$$

Die resultierende Fläche $A_{LSt,br}$ des Längssteifenbruttoquerschnittes mit anteilig mitwirkender Stegbreite lautet:

$$A_{LSt,br} = A_{LSt} + A_{Steg,br} = 1634,2 + 1813,1 + 7429,2 = 10876,5 [mm^2] \quad (3.4)$$

Mit dem aus [5] übernommenen Trägheitsmoment $I_{LSt,br}$ des Längssteifenbruttoquerschnittes ergibt sich für das Widerstandsmoment $W_{m,1}$:

$$W_{m,1} = \frac{I_{LSt,br}}{e_{m,1}} = \frac{17723028}{24,80} = 714638 [mm^3] \quad (3.5)$$

Die Gesamtspannung $\sigma_{m,ges,1}$ in der Mitte des anteilig mitwirkenden Steges (Druckgurt) setzt sich aus folgendem Normal- und Biegespannungsanteil zusammen:

$$\sigma_{m,ges,1} = -\frac{N_{M1}}{A_{LSt,br}} - \frac{N_{M1} \cdot e_{m,1}}{W_{m,1}} [N/mm^2] \quad (3.6)$$

$$\sigma_{m,ges,1} = -\frac{356898}{10876,5} - \frac{356898 \cdot 24,80}{714638} = -32,81 - 12,39 = -45,20 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Analog dazu wird die Gesamtspannung $\sigma_{o,ges,1}$ in der Mitte des Längssteifenaußengurtes ermittelt:

$$W_{o,1} = \frac{I_{LSt,br}}{e_{o,1}} = \frac{17723028}{76,20} = 232586 \text{ [mm}^3\text{]} \quad (3.7)$$

$$\sigma_{o,ges,1} = -\frac{N_{M1}}{A_{LSt,br}} + \frac{N_{M1} \cdot e_{o,1}}{W_{o,1}} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (3.8)$$

$$\sigma_{o,ges,1} = -\frac{356898}{10876,5} + \frac{356898 \cdot 24,80}{232586} = -32,81 + 38,06 = +5,25 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Eine Zusammenfassung der ermittelten Querschnittswerte und Spannungen für das *Modell 1* findet sich in der anschließenden Tab. 3.2 und Tab. 3.3.

$b_{eff,M1} = b_{br}$	742,92 [mm]
$e_{m,1}$	24,80 [mm]
$e_{o,1}$	76,20 [mm]
N_{M1}	356898 [N]
$A_{LSt,br}$	10876,5 [mm ²]
$I_{LSt,br}$	17723028 [mm ⁴]
$W_{m,1}$	714638 [mm ³]
$W_{o,1}$	232586 [mm ³]

Tab. 3.2: Querschnittswerte für System S1; $t_{LSt} = 8$ [mm] – *Modell 1*

Die Drucknormal- und Biegespannungsanteile sind in der nachfolgenden Tab. 3.3 getrennt angeführt. Der Biegespannungsanteil wird jeweils als Prozentsatz des Normalspannungsanteils (= 100%) angegeben.

Achse m		Achse o	
$\sigma_{m,N,1}$	$\sigma_{m,\Delta M,1}$	$\sigma_{o,N,1}$	$\sigma_{o,\Delta M,1}$
-32,81 [N/mm ²]	-12,39 [N/mm ²]	-32,81 [N/mm ²]	+38,06 [N/mm ²]
100%	$\Delta = +37,7\%$	100%	$\Delta = -116,0\%$
$\sigma_{m,ges,1} = -45,20$ [N/mm ²]		$\sigma_{o,ges,1} = +5,25$ [N/mm ²]	

Tab. 3.3: Spannungsanteile (aus N, ΔM) und Gesamtnormalspannung für System S1; $t_{LSt} = 8$ [mm] – Modell 1

In Abb. 3.2 werden die ermittelten Spannungsanteile (aus N, ΔM) und der daraus resultierende Gesamtnormalspannungsverlauf σ_{ges} für den Längssteifenquerschnitt gemäß den Ergebnissen von Modell 1 (M1) und der linearen Analyse (LA) einander gegenübergestellt. Hierbei wird immer der Drucknormalspannungsverlauf σ_N der linearen Analyse mit jenem der bisher angeführten Handrechnung gleichgesetzt. Der Gesamtspannungsverlauf σ_{ges} der linearen Analyse wird immer mittels dem im Stegblech ($\sigma_{m,ges}$ – Achse m) und im außenliegenden Längssteifengurt ($\sigma_{o,ges}$ – Achse o) gelegenen Spannungspunkt aus Anhang A, Abschnitt 5, ermittelt. Somit ist auch der Biegespannungsanteil $\sigma_{m,\Delta M}$ der linearen Analyse in vereinfachter Näherung darstellbar.

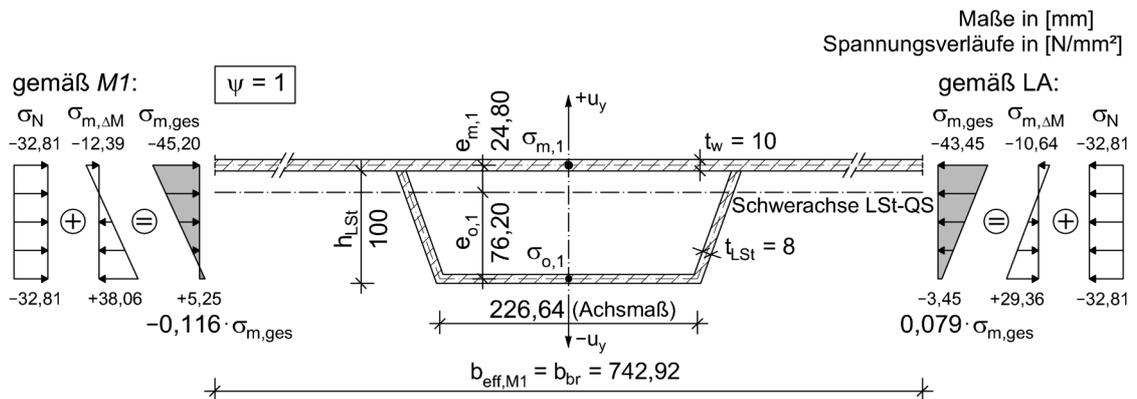


Abb. 3.2: Normalspannungsverläufe des Längssteifenquerschnittes für System S1; $t_{LSt} = 8$ [mm] – Modell 1

b.) Vollständige Stegblechmitwirkung (Modell 2)

Die Abb. 3.3 zeigt die Systemquerschnitte und die einwirkenden Lastgrößen der Randfelder und des Beobachtungsfeldes für das *Modell 2*.

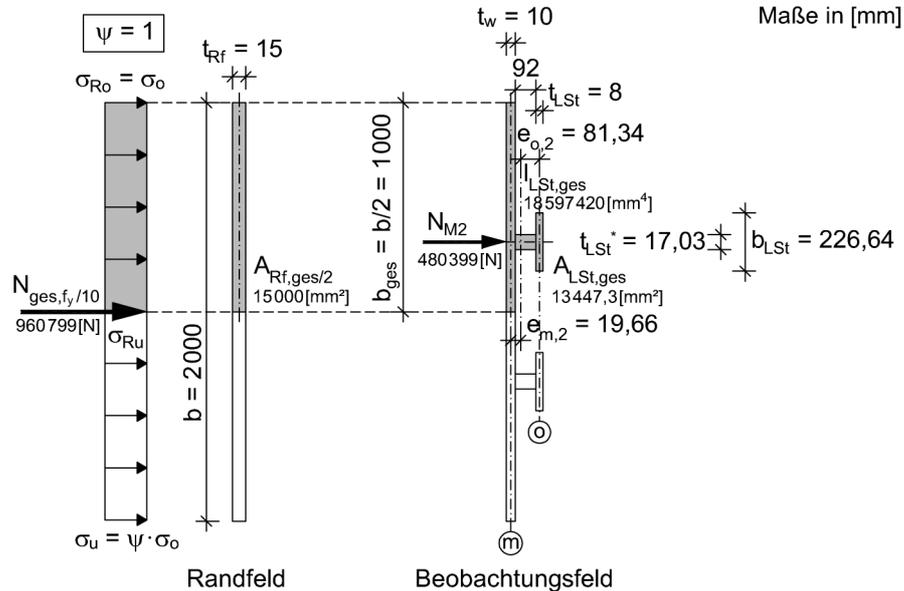


Abb. 3.3: Querschnitte und Beanspruchung für System S1; $t_{LSt} = 8$ [mm] – *Modell 2*

Das Stegblech wird bis hin zum oberen und unteren Systemrand als vollständig mitwirkend angesetzt und die auf einen Längssteifenquerschnitt einwirkende Drucknormalkraft N_{M2} daher mit der halben, in den Randfeldern eingeleiteten Drucknormalkraft $N_{ges,fy/10}$ angenommen:

$$N_{M2} = \frac{N_{ges,fy/10}}{2} = \frac{960798,7}{2} = 480399,4 \text{ [N]} \quad (3.9)$$

Der Längssteifenquerschnitt $A_{LSt,ges}$ entspricht somit dem halben Systemquerschnitt des mittleren Beobachtungsfeldes:

$$A_{LSt,ges} = A_{LSt} + A_{Steg,ges} \cdot 0,5 = 1634,2 + 1813,1 + 2000 \cdot 10 \cdot 0,5 = 13447,3 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (3.10)$$

Der geschlossene Längssteifenquerschnitt wird zu einem einfach-unsymmetrischen, offenen Äquivalentquerschnitt mit Außengurt zusammengefasst. Die Stegblechdicke t_{LSt}^* des „verschmierten“ Querschnittes errechnet sich zu:

$$t_{LSt}^* = 2 \cdot \frac{t_{LSt}}{\cos \alpha_{LSt}} = 2 \cdot \frac{8}{\cos 20} = 17,03 \text{ [mm]} \quad (3.11)$$

Die Exzentrizität $e_{m,2}$ des Schwerpunktes $S_{LSt,ges}$ des Gesamtquerschnittes nach *Modell 2* zur Stegblechmitte ergibt sich mit den vorhandenen Flächenanteilen zu:

$$e_{m,2} = \frac{\sum (A_i \cdot e_i)}{\sum A_i} = \frac{92 \cdot 17,03 \cdot 51 + 226,64 \cdot 8 \cdot 101}{1000 \cdot 10 + 92 \cdot 17,03 + 226,64 \cdot 8} = 19,66 \text{ [mm]} \quad (3.12)$$

Das Widerstandsmoment $W_{m,2}$ entspricht:

$$W_{m,2} = \frac{I_{LSt,ges}}{e_{m,2}} = \frac{18597420}{19,66} = 946145 \text{ [mm}^3\text{]} \quad (3.13)$$

Die Gesamtspannung $\sigma_{m,ges,2}$ in der Mitte des vollständig mitwirkenden Steges (Druckgurt) setzt sich aus folgendem Normal- und Biegespannungsanteil zusammen:

$$\sigma_{m,ges,2} = -\frac{N_{M2}}{A_{LSt,ges}} - \frac{N_{M2} \cdot e_{m,2}}{W_{m,2}} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (3.14)$$

$$\sigma_{m,ges,2} = -\frac{480399,4}{13447,3} - \frac{480399,4 \cdot 19,66}{946145} = -35,72 - 9,98 = -45,70 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Analog dazu wird die Gesamtspannung $\sigma_{o,ges,2}$ in der Mitte des Längssteifenaußengurtes ermittelt:

$$W_{o,2} = \frac{I_{LSt,ges}}{e_{o,2}} = \frac{18597420}{81,34} = 228627 \text{ [mm}^3\text{]} \quad (3.15)$$

$$\sigma_{o,ges,2} = -\frac{N_{M2}}{A_{LSt,ges}} + \frac{N_{M2} \cdot e_{o,2}}{W_{o,2}} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (3.16)$$

$$\sigma_{o,ges,2} = -\frac{480399,4}{13447,3} + \frac{480399,4 \cdot 19,66}{228627} = -35,72 + 41,30 = +5,58 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Anmerkung:

Eine geringfügige Abweichung des Normalspannungsanteils $\sigma_{m,N,2}$ von der Bezugsspannung $\sigma_{m,N,LA} = 0,10 \cdot f_y = 35,50 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ ist aufgrund der aus [5] übernommenen und auf gerundeten Querschnittsflächen basierenden FE-Bezugslastgrößen N_1 und N_2 (d.h. $N_{Ref,f_y/10} = N_1 = N_2$ für die Druckspannungsverteilung $\psi = 1,0[-]$) im Berechnungsablauf gegeben.

Eine Zusammenfassung der ermittelten Querschnittswerte und Spannungen für das *Modell 2* findet sich in der anschließenden Tab. 3.4 und Tab. 3.5.

$b_{\text{eff},M2} = b/2$	1 000 [mm]
t_{LSt}^*	17,03 [mm]
$e_{m,2}$	19,66 [mm]
$e_{o,2}$	81,34 [mm]
$N_{M2} = N_{\text{Ref},fy/10}$	480399 [N]
$A_{LSt,ges}$	13447,3 [mm ²]
$I_{LSt,ges}$	18597420 [mm ⁴]
$W_{m,2}$	946145 [mm ³]
$W_{o,2}$	228627 [mm ³]

Tab. 3.4: Querschnittswerte für System S1; $t_{LSt} = 8$ [mm] – *Modell 2*

Die Drucknormal- und Biegespannungsanteile sind in der nachfolgenden Tab. 3.5 getrennt angeführt. Der Biegespannungsanteil wird jeweils als Prozentsatz des Normalspannungsanteils (= 100%) angegeben.

Achse m		Achse o	
$\sigma_{m,N,2}$	$\sigma_{m,\Delta M,1}$	$\sigma_{o,N,2}$	$\sigma_{m,\Delta M,1}$
-35,72 [N/mm ²]	-9,98 [N/mm ²]	-35,72 [N/mm ²]	+41,30 [N/mm ²]
100%	$\Delta = +27,9\%$	100%	$\Delta = -115,6\%$
$\sigma_{m,ges,2} = -45,70$ [N/mm ²]		$\sigma_{o,ges,2} = +5,58$ [N/mm ²]	

Tab. 3.5: Spannungsanteile (aus N, ΔM) und Gesamtnormalspannung für System S1; $t_{LSt} = 8$ [mm] – *Modell 2*

In Abb. 3.4 werden die ermittelten Spannungsanteile (aus N , ΔM) und der daraus resultierende Gesamtnormalspannungsverlauf σ_{ges} für den Längssteifenquerschnitt gemäß den Ergebnissen von *Modell 2* ($M2$) und der linearen Analyse (LA) einander gegenübergestellt. Hierbei wird immer der Drucknormalspannungsverlauf σ_N der linearen Analyse mit jenem der bisher angeführten Handrechnung gleichgesetzt. Der Gesamtnormalspannungsverlauf σ_{ges} der linearen Analyse wird immer mittels dem im Stegblech ($\sigma_{m,ges}$ – Achse m) und im außenliegenden Längssteifengurt ($\sigma_{o,ges}$ – Achse o) gelegenen Spannungspunkt aus Anhang A, Abschnitt 5, ermittelt. Somit ist auch der Biegespannungsanteil $\sigma_{m,\Delta M}$ der linearen Analyse in vereinfachter Näherung darstellbar.

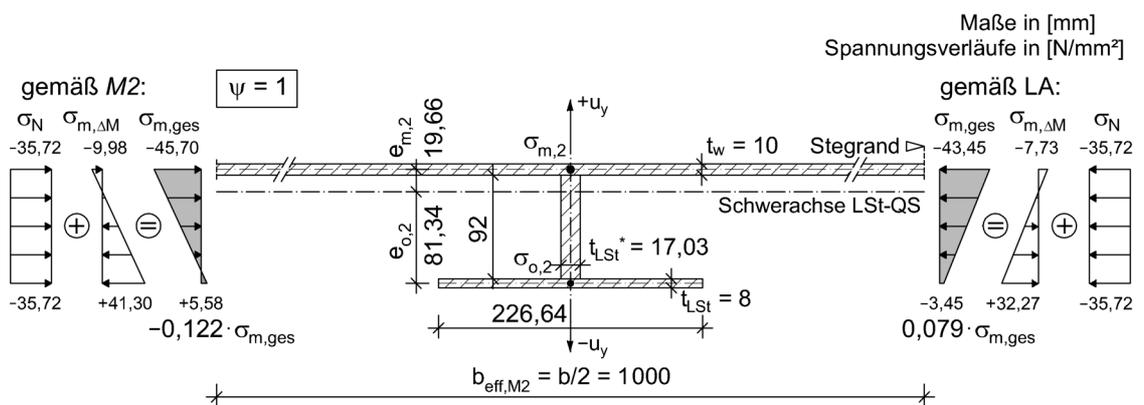


Abb. 3.4: Normalspannungsverläufe für den Längssteifenquerschnitt des Systems S1; $t_{LSt} = 8$ [mm] – *Modell 2*

3.1.2 System S1: $t_{LSt} = 10$ [mm]

In Tab. 3.6 sind die Bezugsgrößen der Spannungsermittlung angeführt.

t_{Rf}	15 [mm]
t_w	10 [mm]
t_{LSt}	10 [mm]
b	2000 [mm]
f_y	355 [N/mm ²]
σ_{Rf}	34,08 [N/mm ²]
$N_{Ref,fy/10}$	511 187 [N]
$N_{ges,fy/10}$	1 022 375 [N]

Tab. 3.6: Bezugsgrößen beider Rechenmodelle für System S1; $t_{LSt} = 10$ [mm]

a.) Anteilige Stegblechmitwirkung (*Modell 1*)

Die Abb. 3.5 zeigt die Systemquerschnitte und die einwirkenden Lastgrößen der Randfelder und des Beobachtungsfeldes für das *Modell 1*.

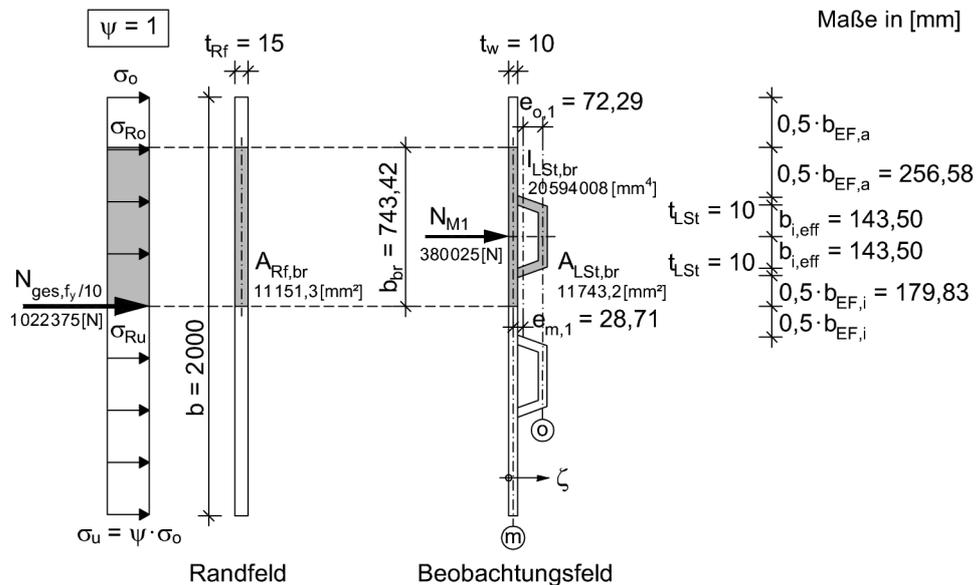


Abb. 3.5: Querschnitte und Beanspruchung für System S1; $t_{LSt} = 10$ [mm] – *Modell 1*

Eine Zusammenfassung der ermittelten Querschnittswerte und Spannungen für das *Modell 1* findet sich in der anschließenden Tab. 3.7, Tab. 3.8 und Tab. 3.9.

Querschnitt	A [mm ²]	ζ [mm]	A · ζ [mm ³]	e _i [mm]	I [mm ⁴]	A · e _i ² [mm ⁴]	I _{ges} [mm ⁴]
LSt-Stege: 2 · 102,1/10	2042,7	58	118477	24,29	1336556	1205048	2541604
LSt-Gurt: 10/226,6	2266,4	106	240235	72,29	18886,4	11843190	11862076
mitw. Steg: 10/743,4	7434,2	5	37170,8	-28,71	61951,4	6128376	6190328
Summe	11743,2		395883		1417394	19176614	20594008

Tab. 3.7: Biegesteifigkeit I_{ges} (starke Achse) der Längssteife für System S1; t_{LSt} = 10[mm] – *Modell 1*

Der Abstand ζ_s der Schwerachse des Längssteifenbruttoquerschnittes (Steife mit anteilig mitwirkendem Steg) zur der Längssteife gegenüberliegenden Stegblechoberfläche im Beobachtungsfeld entspricht:

$$\zeta_s = \frac{\sum (A \cdot \zeta)}{\sum A} = \frac{395883}{11743,2} = 33,71 \text{ [mm]} \quad (3.17)$$

Der Abstand e_{m,1} der Schwerachse des Längssteifenbruttoquerschnittes zur Stegblechachse (Achse m) des Beobachtungsfeldes ergibt sich somit zu:

$$e_{m,1} = \zeta_s - \frac{t_w}{2} = 33,71 - \frac{10}{2} = 28,71 \text{ [mm]} \quad (3.18)$$

b _{eff,M1} = b _{br}	743,42 [mm]
e _{m,1}	28,71 [mm]
e _{o,1}	72,29 [mm]
N _{M1}	380025 [N]
A _{LSt,br}	11743,2 [mm ²]
I _{LSt,br}	20594008 [mm ⁴]
W _{m,1}	717311 [mm ³]
W _{o,1}	284880 [mm ³]

Tab. 3.8: Querschnittswerte für System S1; t_{LSt} = 10[mm] – *Modell 1*

Die Drucknormal- und Biegespannungsanteile sind in der nachfolgenden Tab. 3.9 getrennt angeführt. Der Biegespannungsanteil wird jeweils als Prozentsatz des Normalspannungsanteils (= 100%) angegeben.

Achse m		Achse o	
$\sigma_{m,N,1}$	$\sigma_{m,\Delta M,1}$	$\sigma_{o,N,1}$	$\sigma_{o,\Delta M,1}$
-32,36 [N/mm ²]	-15,21 [N/mm ²]	-32,36 [N/mm ²]	+38,30 [N/mm ²]
100%	$\Delta = +47,0\%$	100%	$\Delta = -118,4\%$
$\sigma_{m,ges,1} = -47,57$ [N/mm ²]		$\sigma_{o,ges,1} = +5,94$ [N/mm ²]	

Tab. 3.9: Spannungsanteile (aus N, ΔM) und Gesamtnormalspannung für System S1; $t_{LSt} = 10$ [mm] – Modell 1

In Abb. 3.6 werden die ermittelten Spannungsanteile (aus N, ΔM) und der daraus resultierende Gesamtnormalspannungsverlauf σ_{ges} für den Längssteifenquerschnitt gemäß den Ergebnissen von Modell 1 (M1) und der linearen Analyse (LA) einander gegenübergestellt.

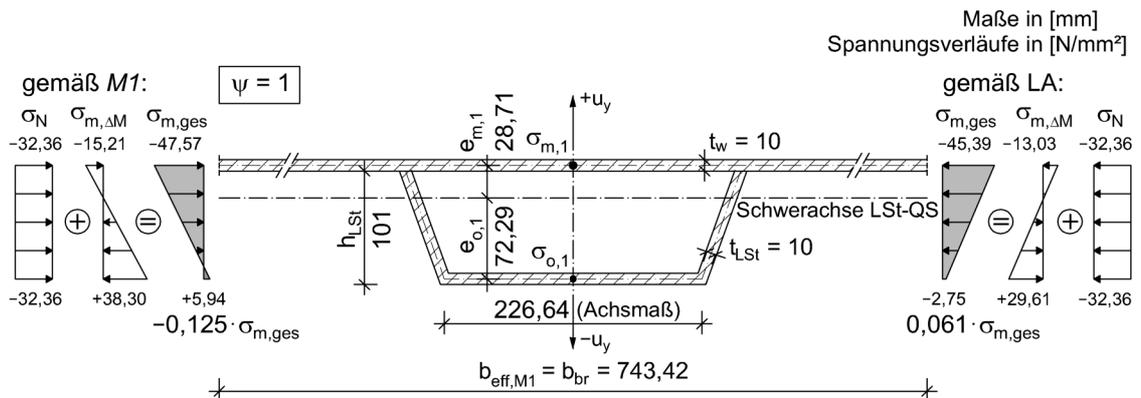


Abb. 3.6: Normalspannungsverläufe des Längssteifenquerschnittes für System S1; $t_{LSt} = 10$ [mm] – Modell 1

b.) Vollständige Stegblechmitwirkung (Modell 2)

Die Abb. 3.7 zeigt die Systemquerschnitte und die einwirkenden Lastgrößen der Randfelder und des Beobachtungsfeldes für das Modell 2.

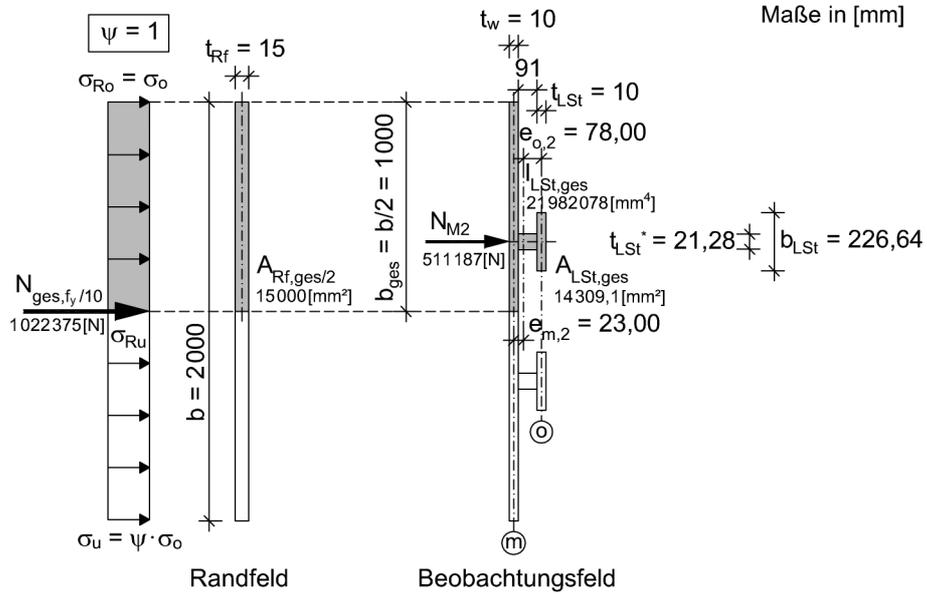


Abb. 3.7: Querschnitte und Beanspruchung für System S1; $t_{LSt} = 10$ [mm] – Modell 2

Eine Zusammenfassung der ermittelten Querschnittswerte und Spannungen für das Modell 2 findet sich in der anschließenden Tab. 3.10 und Tab. 3.11.

$b_{eff,M2} = b/2$	1000 [mm]
t_{LSt}^*	21,28 [mm]
$e_{m,2}$	23,00 [mm]
$e_{o,2}$	78,00 [mm]
$N_{M2} = N_{Ref,fy/10}$	511187 [N]
$A_{LSt,ges}$	14309,1 [mm ²]
$I_{LSt,ges}$	21982078 [mm ⁴]
$W_{m,2}$	955713 [mm ³]
$W_{o,2}$	281824 [mm ³]

Tab. 3.10: Querschnittswerte für System S1; $t_{LSt} = 10$ [mm] – Modell 2

Die Drucknormal- und Biegespannungsanteile sind in der nachfolgenden Tab. 3.11 getrennt angeführt. Der Biegespannungsanteil wird jeweils als Prozentsatz des Normalspannungsanteils (= 100%) angegeben.

Achse m		Achse o	
$\sigma_{m,N,2}$	$\sigma_{m,\Delta M,2}$	$\sigma_{o,N,2}$	$\sigma_{o,\Delta M,2}$
-35,72[N/mm ²]	-12,30[N/mm ²]	-35,72[N/mm ²]	+41,72[N/mm ²]
100%	$\Delta = +34,4\%$	100%	$\Delta = -116,8\%$
$\sigma_{m,ges,2} = -48,02$ [N/mm ²]		$\sigma_{o,ges,2} = +6,00$ [N/mm ²]	

Tab. 3.11: Spannungsanteile (aus N, ΔM) und Gesamtnormalspannung für System S1; $t_{LSt} = 10$ [mm] – Modell 2

In Abb. 3.8 werden die ermittelten Spannungsanteile (aus N, ΔM) und der daraus resultierende Gesamtnormalspannungsverlauf σ_{ges} für den Längssteifenquerschnitt gemäß den Ergebnissen von Modell 2 (M2) und der linearen Analyse (LA) einander gegenübergestellt.

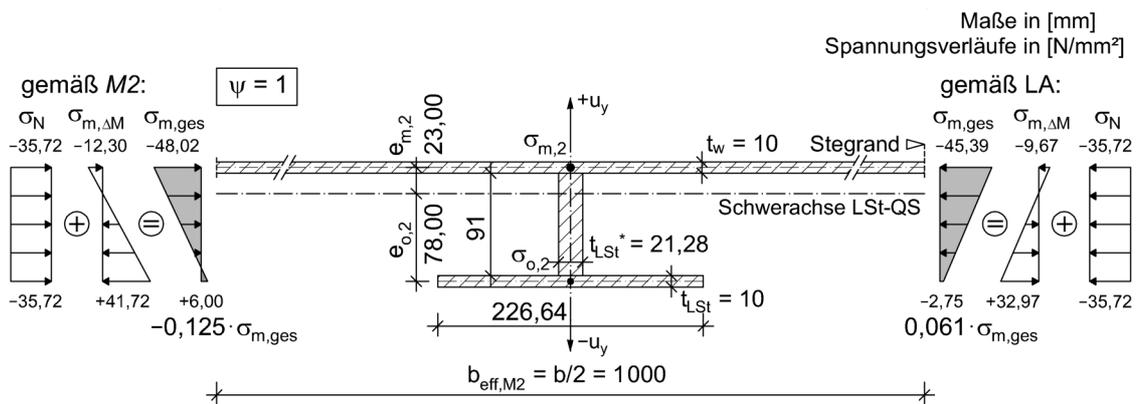


Abb. 3.8: Normalspannungsverläufe des Längssteifenquerschnittes für System S1; $t_{LSt} = 10$ [mm] – Modell 2

3.2 System S2

3.2.1 System S2: $t_{LSt} = 8$ [mm]

In Tab. 3.12 sind die Bezugsgrößen der Spannungsermittlung angeführt.

t_{Rf}	15 [mm]
t_w	10 [mm]
t_{LSt}	8 [mm]
b	2000 [mm]
f_y	355 [N/mm ²]
σ_{Rf}	34,39 [N/mm ²]
$N_{Ref,fy/10}$	515859 [N]
$N_{ges,fy/10}$	1031719 [N]

Tab. 3.12: Bezugsgrößen beider Rechenmodelle für System S2; $t_{LSt} = 8$ [mm]

a.) Anteilige Stegblechmitwirkung (*Modell 1*)

Die Abb. 3.9 zeigt die Systemquerschnitte und die einwirkenden Lastgrößen der Randfelder und des Beobachtungsfeldes für das *Modell 1*.

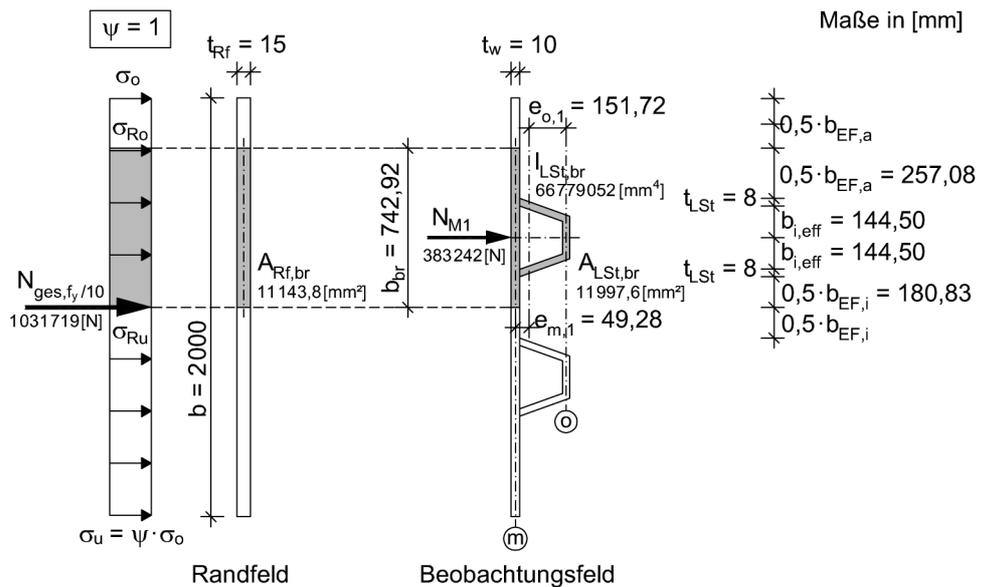


Abb. 3.9: Querschnitte und Beanspruchung für System S2; $t_{LSt} = 8$ [mm] – *Modell 1*

Eine Zusammenfassung der ermittelten Querschnittswerte und Spannungen für das *Modell 1* findet sich in der anschließenden Tab. 3.13 und Tab. 3.14.

$b_{\text{eff},M1} = b_{\text{br}}$	742,92 [mm]
$e_{m,1}$	49,28 [mm]
$e_{o,1}$	151,72 [mm]
N_{M1}	383242 [N]
$A_{LSt,br}$	11997,6 [mm ²]
$I_{LSt,br}$	66779052 [mm ⁴]
$W_{m,1}$	1355049 [mm ³]
$W_{o,1}$	440147 [mm ³]

Tab. 3.13: Querschnittswerte für System S2; $t_{LSt} = 8$ [mm] – *Modell 1*

Die Drucknormal- und Biegespannungsanteile sind in der nachfolgenden Tab. 3.14 getrennt angeführt. Der Biegespannungsanteil wird jeweils als Prozentsatz des Normalspannungsanteils (= 100%) angegeben.

Achse m		Achse o	
$\sigma_{m,N,1}$	$\sigma_{m,\Delta M,1}$	$\sigma_{o,N,1}$	$\sigma_{o,\Delta M,1}$
-31,94 [N/mm ²]	-13,94 [N/mm ²]	-31,94 [N/mm ²]	+42,91 [N/mm ²]
100%	$\Delta = +43,6\%$	100%	$\Delta = -134,3\%$
$\sigma_{m,ges,1} = -45,88$ [N/mm ²]		$\sigma_{o,ges,1} = +10,97$ [N/mm ²]	

Tab. 3.14: Spannungsanteile (aus N, ΔM) und Gesamtnormalspannung für System S2; $t_{LSt} = 8$ [mm] – *Modell 1*

In Abb. 3.10 werden die ermittelten Spannungsanteile (aus N, ΔM) und der daraus resultierende Gesamtnormalspannungsverlauf σ_{ges} für den Längssteifenquerschnitt gemäß den Ergebnissen von *Modell 1 (M1)* und der linearen Analyse (LA) einander gegenübergestellt.

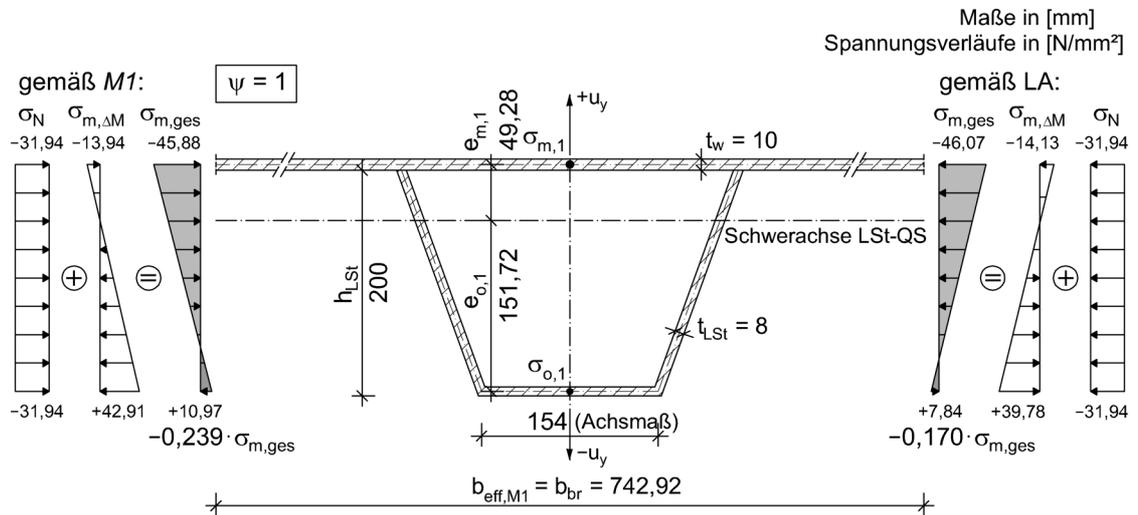


Abb. 3.10: Normalspannungsverläufe des Längssteifenquerschnittes für System S2; $t_{LSt} = 8$ [mm] – *Modell 1*

b.) Vollständige Stegblechmitwirkung (*Modell 2*)

Die Abb. 3.11 zeigt die Systemquerschnitte und die einwirkenden Lastgrößen der Randfelder und des Beobachtungsfeldes für das *Modell 2*.

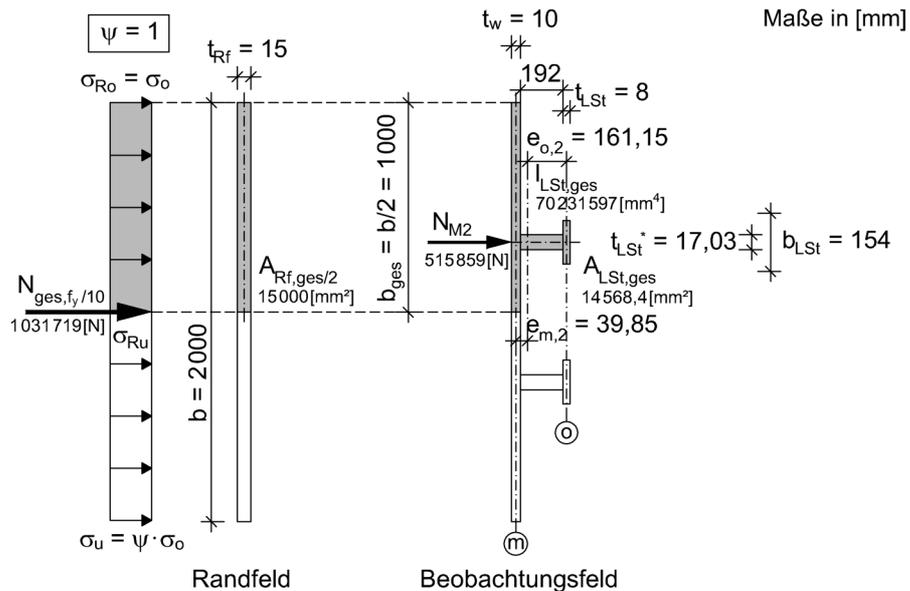


Abb. 3.11: Querschnitte und Beanspruchung für System S2; $t_{LSt} = 8$ [mm] – *Modell 2*

Eine Zusammenfassung der ermittelten Querschnittswerte und Spannungen für das *Modell 2* findet sich in der anschließenden Tab. 3.15 und Tab. 3.16.

$b_{\text{eff},M2} = b/2$	1 000 [mm]
t_{LSt}^*	17,03 [mm]
$e_{m,2}$	39,85 [mm]
$e_{o,2}$	161,15 [mm]
$N_{M2} = N_{\text{Ref},fy/10}$	515859 [N]
$A_{LSt,ges}$	14568,4 [mm ²]
$I_{LSt,ges}$	70231 597 [mm ⁴]
$W_{m,2}$	1762565 [mm ³]
$W_{o,2}$	435805 [mm ³]

Tab. 3.15: Querschnittswerte für System S2; $t_{LSt} = 8$ [mm] – *Modell 2*

Die Drucknormal- und Biegespannungsanteile sind in der nachfolgenden Tab. 3.16 getrennt angeführt. Der Biegespannungsanteil wird jeweils als Prozentsatz des Normalspannungsanteils (= 100%) angegeben.

Achse m		Achse o	
$\sigma_{m,N,2}$	$\sigma_{m,\Delta M,2}$	$\sigma_{o,N,2}$	$\sigma_{o,\Delta M,2}$
-35,41 [N/mm ²]	-11,66 [N/mm ²]	-35,41 [N/mm ²]	+47,17 [N/mm ²]
100%	$\Delta = +32,9\%$	100%	$\Delta = -133,2\%$
$\sigma_{m,ges,2} = -47,07$ [N/mm ²]		$\sigma_{o,ges,2} = +11,76$ [N/mm ²]	

Tab. 3.16: Spannungsanteile (aus N, ΔM) und Gesamtnormalspannung für System S2; $t_{LSt} = 8$ [mm] – *Modell 2*

In Abb. 3.12 werden die ermittelten Spannungsanteile (aus N , ΔM) und der daraus resultierende Gesamtnormalspannungsverlauf σ_{ges} für den Längssteifenquerschnitt gemäß den Ergebnissen von *Modell 2* ($M2$) und der linearen Analyse (LA) einander gegenübergestellt.

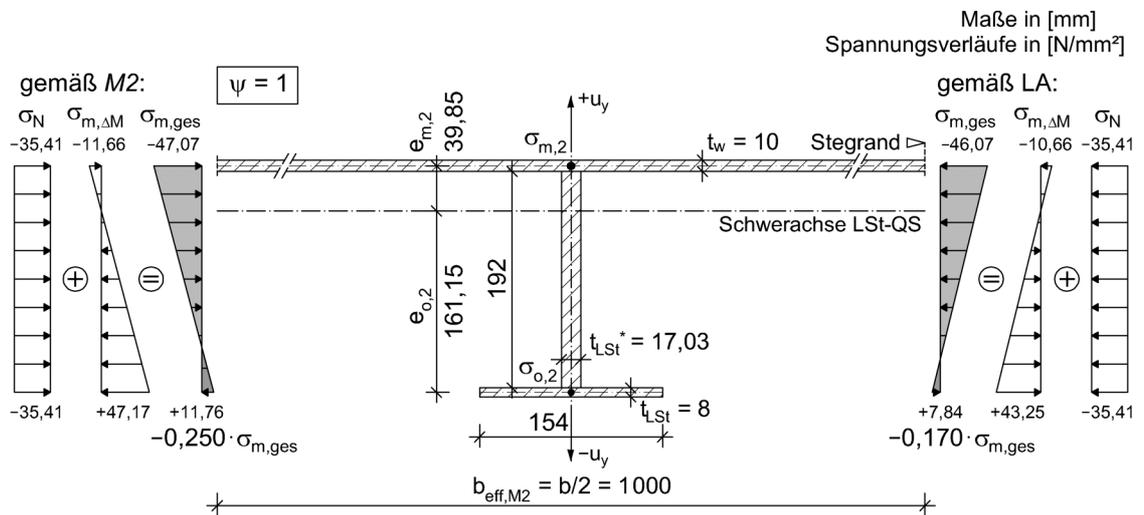


Abb. 3.12: Normalspannungsverläufe des Längssteifenquerschnittes für System S2; $t_{LSt} = 8$ [mm] – *Modell 2*

3.2.2 System S2: $t_{LSt} = 10$ [mm]

In Tab. 3.17 sind die Bezugsgrößen der Spannungsermittlung angeführt.

t_{Rf}	15 [mm]
t_w	10 [mm]
t_{LSt}	10 [mm]
b	2000 [mm]
f_y	355 [N/mm ²]
σ_{Rf}	37,09 [N/mm ²]
$N_{Ref,fy/10}$	556301 [N]
$N_{ges,fy/10}$	1 112 601 [N]

Tab. 3.17: Bezugsgrößen beider Rechenmodelle für System S2; $t_{LSt} = 10$ [mm]

a.) Anteilige Stegblechmitwirkung (*Modell 1*)

Die Abb. 3.13 zeigt die Systemquerschnitte und die einwirkenden Lastgrößen der Randfelder und des Beobachtungsfeldes für das *Modell 1*.

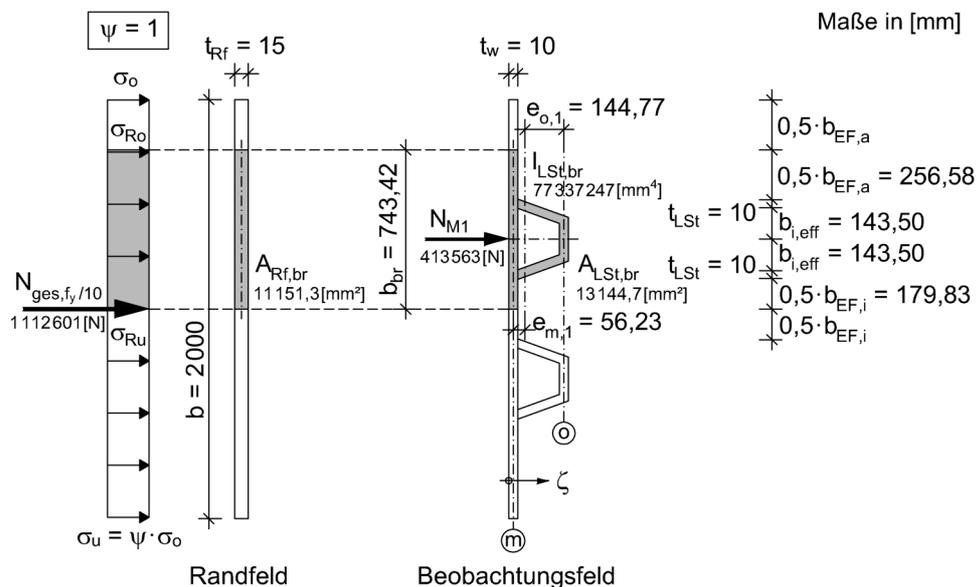


Abb. 3.13: Querschnitte und Beanspruchung für System S2; $t_{LSt} = 10$ [mm] – *Modell 1*

Eine Zusammenfassung der ermittelten Querschnittswerte und Spannungen für das *Modell 1* findet sich in der anschließenden Tab. 3.18, Tab. 3.19 und Tab. 3.20.

Querschnitt	A [mm ²]	ζ [mm]	A · ζ [mm ³]	e _i [mm]	I [mm ⁴]	A · e _i ² [mm ⁴]	I _{ges} [mm ⁴]
LSt-Stege: 2·208,5/10	4170,5	108	450416	46,77	12358422	9123391	21481813
LSt-Gurt: 10/154	1540	206	317240	144,77	12833,3	32276616	32289449
mitw. Steg: 10/743,4	7434,2	5	37170,8	-56,23	61951,4	23504034	23565985
Summe	13144,7		804827		12433207	64904040	77337247

Tab. 3.18: Biegesteifigkeit I_{ges} (starke Achse) der Längssteife für System S2; t_{LSt} = 10[mm] – *Modell 1*

$$\zeta_s = \frac{\sum (A \cdot \zeta)}{\sum A} = \frac{804827}{13144,7} = 61,23 \text{ [mm]}$$

$$e_{m,1} = \zeta_s - \frac{t_w}{2} = 61,23 - \frac{10}{2} = 56,23 \text{ [mm]}$$

b _{eff,M1} = b _{br}	743,42 [mm]
e _{m,1}	56,23 [mm]
e _{o,1}	144,77 [mm]
N _{M1}	413563 [N]
A _{LSt,br}	13144,7 [mm ²]
I _{LSt,br}	77337247 [mm ⁴]
W _{m,1}	1375373 [mm ³]
W _{o,1}	534208 [mm ³]

Tab. 3.19: Querschnittswerte für System S2; t_{LSt} = 10[mm] – *Modell 1*

Die Drucknormal- und Biegespannungsanteile sind in der nachfolgenden Tab. 3.20 getrennt angeführt. Der Biegespannungsanteil wird jeweils als Prozentsatz des Normalspannungsanteils (= 100%) angegeben.

Achse m		Achse o	
$\sigma_{m,N,1}$	$\sigma_{m,\Delta M,1}$	$\sigma_{o,N,1}$	$\sigma_{o,\Delta M,1}$
-31,46 [N/mm ²]	-16,91 [N/mm ²]	-31,46 [N/mm ²]	+43,53 [N/mm ²]
100%	$\Delta = +53,7\%$	100%	$\Delta = -138,4\%$
$\sigma_{m,ges,1} = -48,37$ [N/mm ²]		$\sigma_{o,ges,1} = +12,07$ [N/mm ²]	

Tab. 3.20: Spannungsanteile (aus N, ΔM) und Gesamtnormalspannung für System S2; $t_{LSt} = 10$ [mm] – Modell 1

In Abb. 3.14 werden die ermittelten Spannungsanteile (aus N, ΔM) und der daraus resultierende Gesamtnormalspannungsverlauf σ_{ges} für den Längssteifenquerschnitt gemäß den Ergebnissen von Modell 1 (M1) und der linearen Analyse (LA) einander gegenübergestellt.

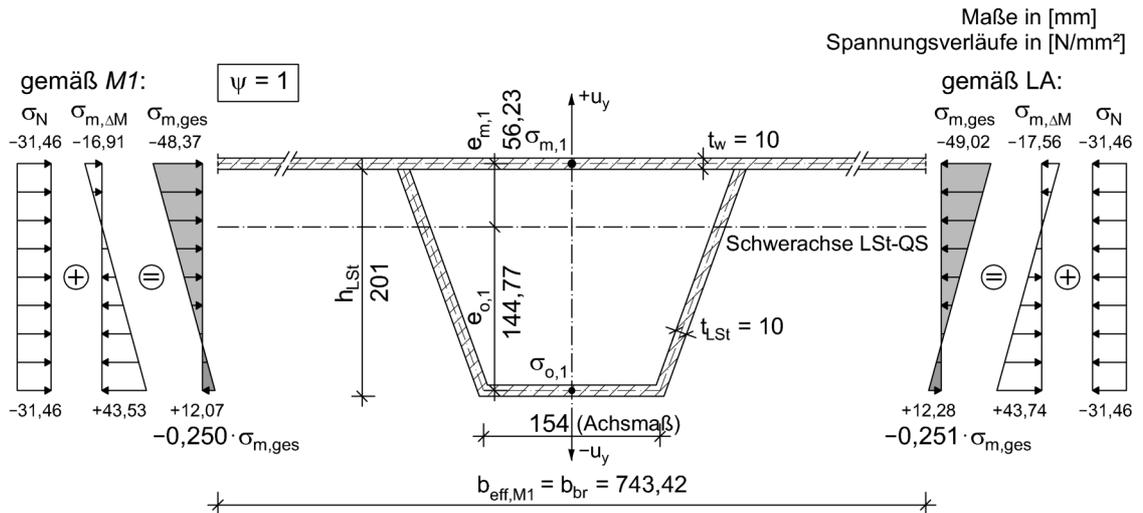


Abb. 3.14: Normalspannungsverläufe des Längssteifenquerschnittes für System S2; $t_{LSt} = 10$ [mm] – Modell 1

b.) Vollständige Stegblechmitwirkung (Modell 2)

Die Abb. 3.15 zeigt die Systemquerschnitte und die einwirkenden Lastgrößen der Randfelder und des Beobachtungsfeldes für das Modell 2.

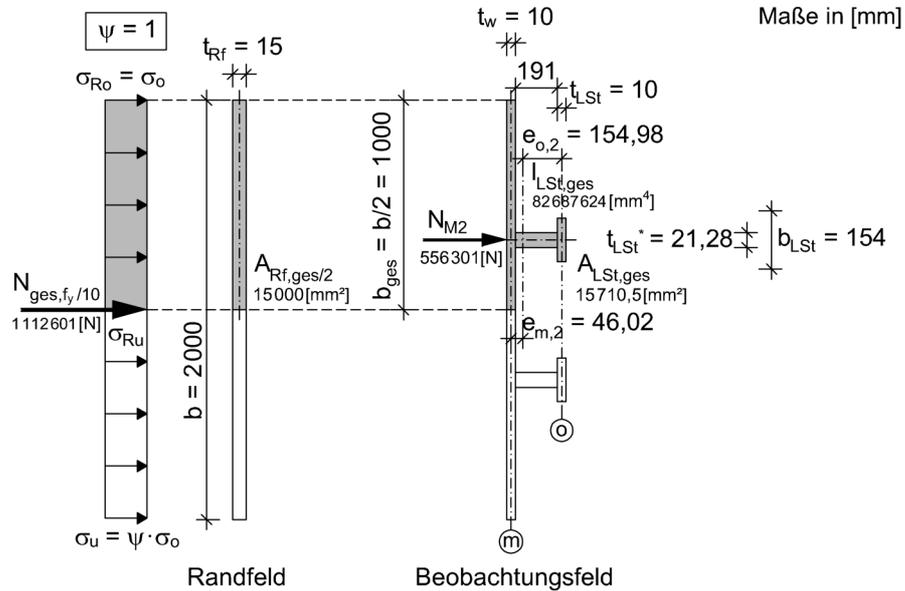


Abb. 3.15: Querschnitte und Beanspruchung für System S2; $t_{LSt} = 10$ [mm] – Modell 2

Eine Zusammenfassung der ermittelten Querschnittswerte und Spannungen für das Modell 2 findet sich in der anschließenden Tab. 3.21 und Tab. 3.22.

$b_{eff,M2} = b/2$	1000 [mm]
t_{LSt}^*	21,28 [mm]
$e_{m,2}$	46,02 [mm]
$e_{o,2}$	154,98 [mm]
$N_{M2} = N_{Ref,fy/10}$	556301 [N]
$A_{LSt,ges}$	15710,5 [mm ²]
$I_{LSt,ges}$	82687624 [mm ⁴]
$W_{m,2}$	1796928 [mm ³]
$W_{o,2}$	533524 [mm ³]

Tab. 3.21: Querschnittswerte für System S2; $t_{LSt} = 10$ [mm] – Modell 2

Die Drucknormal- und Biegespannungsanteile sind in der nachfolgenden Tab. 3.22 getrennt angeführt. Der Biegespannungsanteil wird jeweils als Prozentsatz des Normalspannungsanteils (= 100%) angegeben.

Achse m		Achse o	
$\sigma_{m,N,2}$	$\sigma_{m,\Delta M,2}$	$\sigma_{o,N,2}$	$\sigma_{o,\Delta M,2}$
-35,41 [N/mm ²]	-14,25 [N/mm ²]	-35,41 [N/mm ²]	+47,98 [N/mm ²]
100%	$\Delta = +40,2\%$	100%	$\Delta = -135,5\%$
$\sigma_{m,ges,2} = -49,66$ [N/mm ²]		$\sigma_{o,ges,2} = +12,57$ [N/mm ²]	

Tab. 3.22: Spannungsanteile (aus N, ΔM) und Gesamtnormalspannung für System S2; $t_{LSt} = 10$ [mm] – Modell 2

In Abb. 3.16 werden die ermittelten Spannungsanteile (aus N, ΔM) und der daraus resultierende Gesamtnormalspannungsverlauf σ_{ges} für den Längssteifenquerschnitt gemäß den Ergebnissen von Modell 2 (M2) und der linearen Analyse (LA) einander gegenübergestellt.

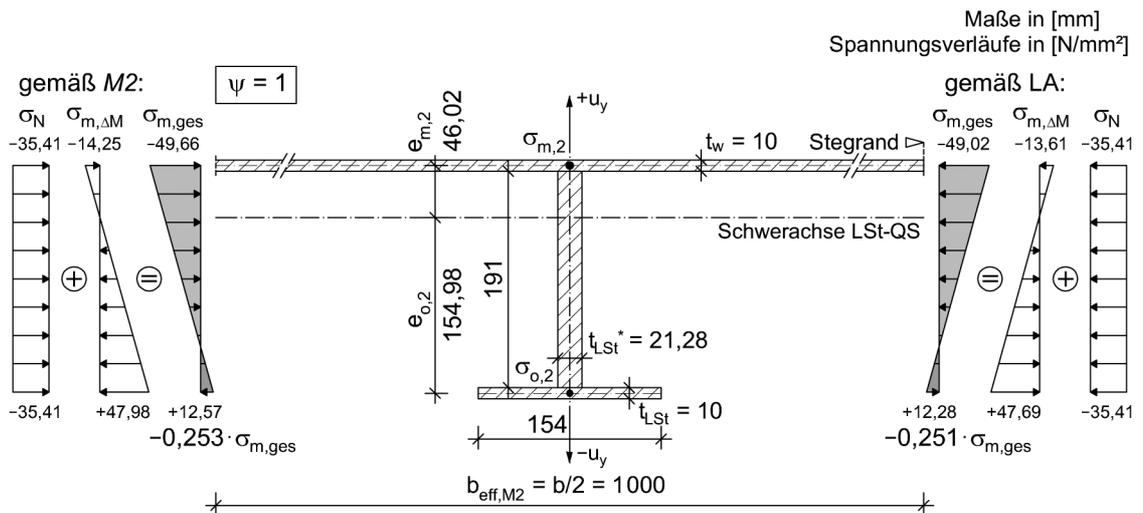


Abb. 3.16: Normalspannungsverläufe des Längssteifenquerschnittes für System S2; $t_{LSt} = 10$ [mm] – Modell 2

Eine Zusammenfassung der ermittelten Querschnittswerte und Spannungen für das *Modell 1* findet sich in der anschließenden Tab. 3.24, Tab. 3.25 und Tab. 3.26.

Querschnitt	A [mm ²]	ζ [mm]	A · ζ [mm ³]	e _i [mm]	I [mm ⁴]	A · e _i ² [mm ⁴]	I _{ges} [mm ⁴]
LSt-Stege: 2·315/8	5039,9	158	796311	79,36	36798325	31740844	68539169
LSt-Gurt: 8/80,9	647,1	306	198019	227,36	3451,3	33450967	33454418
mitw. Steg: 10/742,9	7429,2	5	37146	-73,64	619100	40288503	40907603
Summe	13116,3		1031476		37420877	105480314	142901191

Tab. 3.24: Biegesteifigkeit I_{ges} (starke Achse) der Längssteife für System S3; t_{LSt} = 8[mm] – *Modell 1*

$$\zeta_s = \frac{\sum (A \cdot \zeta)}{\sum A} = \frac{1031476}{13116,3} = 78,64 \text{ [mm]}$$

$$e_{m,1} = \zeta_s - \frac{t_w}{2} = 78,64 - \frac{10}{2} = 73,64 \text{ [mm]}$$

b _{eff,M1} = b _{br}	742,92 [mm]
e _{m,1}	73,64 [mm]
e _{o,1}	227,36 [mm]
N _{M1}	413725 [N]
A _{LSt,br}	13116,3 [mm ²]
I _{LSt,br}	142901191 [mm ⁴]
W _{m,1}	1940512 [mm ³]
W _{o,1}	628527 [mm ³]

Tab. 3.25: Querschnittswerte für System S3; t_{LSt} = 8[mm] – *Modell 1*

Die Drucknormal- und Biegespannungsanteile sind in der nachfolgenden Tab. 3.26 getrennt angeführt. Der Biegespannungsanteil wird jeweils als Prozentsatz des Normalspannungsanteils (= 100%) angegeben.

Achse m		Achse o	
$\sigma_{m,N,1}$	$\sigma_{m,\Delta M,1}$	$\sigma_{o,N,1}$	$\sigma_{o,\Delta M,1}$
-31,54 [N/mm ²]	-15,70 [N/mm ²]	-31,54 [N/mm ²]	+48,47 [N/mm ²]
100%	$\Delta = +49,8\%$	100%	$\Delta = -153,7\%$
$\sigma_{m,ges,1} = -47,24$ [N/mm ²]		$\sigma_{o,ges,1} = +16,93$ [N/mm ²]	

Tab. 3.26: Spannungsanteile (aus N, ΔM) und Gesamtnormalspannung für System S3; $t_{Lst} = 8$ [mm] – Modell 1

In Abb. 3.18 werden die ermittelten Spannungsanteile (aus N, ΔM) und der daraus resultierende Gesamtnormalspannungsverlauf σ_{ges} für den Längssteifenquerschnitt gemäß den Ergebnissen von Modell 1 (M1) und der linearen Analyse (LA) einander gegenübergestellt.

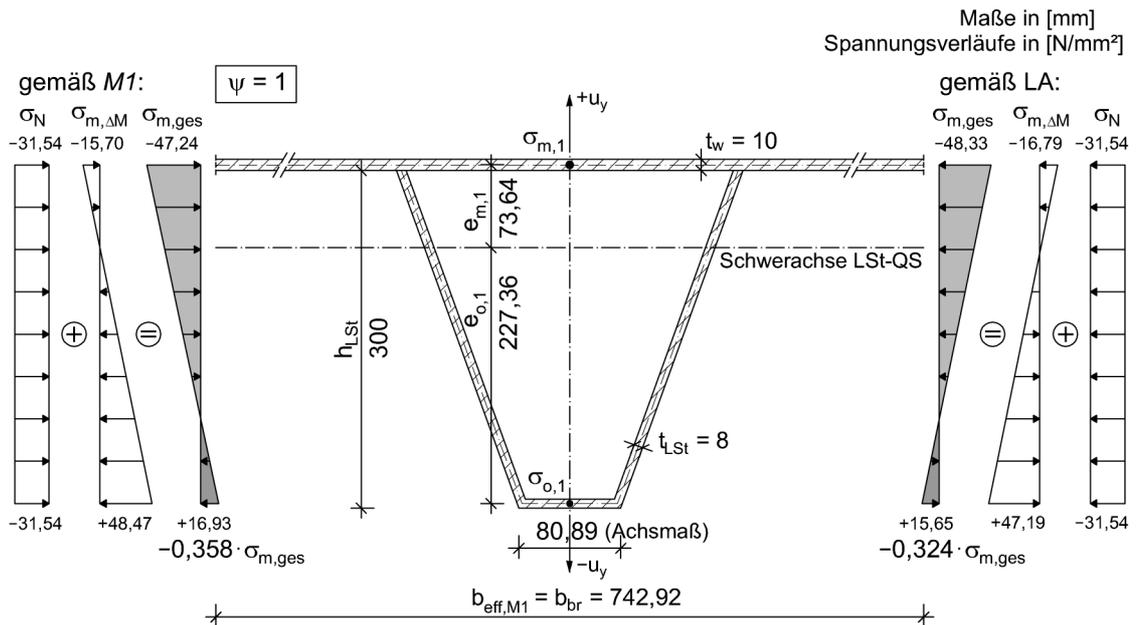


Abb. 3.18: Normalspannungsverläufe des Längssteifenquerschnitts für System S3; $t_{Lst} = 8$ [mm] – Modell 1

b.) Vollständige Stegblechmitwirkung (Modell 2)

Die Abb. 3.19 zeigt die Systemquerschnitte und die einwirkenden Lastgrößen der Randfelder und des Beobachtungsfeldes für das *Modell 2*.

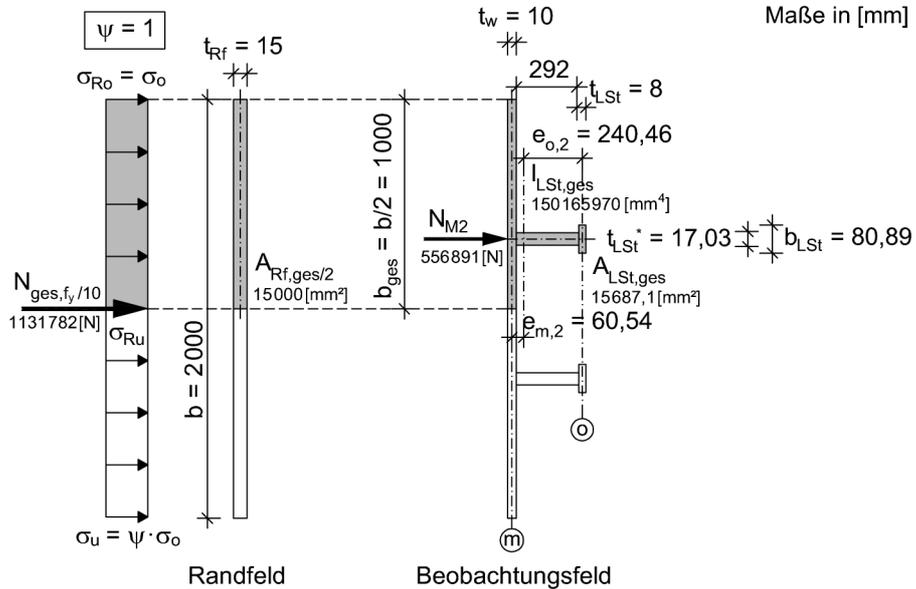


Abb. 3.19: Querschnitte und Beanspruchung für System S3; $t_{LSt} = 8$ [mm] – *Modell 2*

Eine Zusammenfassung der ermittelten Querschnittswerte und Spannungen für das *Modell 2* findet sich in der anschließenden Tab. 3.27 bzw. Tab. 3.28.

$b_{eff,M2} = b/2$	1 000 [mm]
t_{LSt}^*	17,03 [mm]
$e_{m,2}$	60,54 [mm]
$e_{o,2}$	240,46 [mm]
$N_{M2} = N_{Ref,fy/10}$	556891 [N]
$A_{LSt,ges}$	15687,1 [mm ²]
$I_{LSt,ges}$	150 165 970 [mm ⁴]
$W_{m,2}$	2480550 [mm ³]
$W_{o,2}$	624488 [mm ³]

Tab. 3.27: Querschnittswerte für System S3; $t_{LSt} = 8$ [mm] – *Modell 2*

Die Drucknormal- und Biegespannungsanteile sind in der nachfolgenden Tab. 3.28 getrennt angeführt. Der Biegespannungsanteil wird jeweils als Prozentsatz des Normalspannungsanteils (= 100%) angegeben.

Achse m		Achse o	
$\sigma_{m,N,2}$	$\sigma_{m,\Delta M,2}$	$\sigma_{o,N,2}$	$\sigma_{o,\Delta M,2}$
-35,50 [N/mm ²]	-13,59 [N/mm ²]	-35,50 [N/mm ²]	+53,98 [N/mm ²]
100%	$\Delta = +38,3\%$	100%	$\Delta = -152,1\%$
$\sigma_{m,ges,2} = -49,09$ [N/mm ²]		$\sigma_{o,ges,2} = +18,48$ [N/mm ²]	

Tab. 3.28: Spannungsanteile (aus N, ΔM) und Gesamtnormalspannung für System S3; $t_{Lst} = 8$ [mm] – Modell 2

In Abb. 3.20 werden die ermittelten Spannungsanteile (aus N, ΔM) und der daraus resultierende Gesamtnormalspannungsverlauf σ_{ges} für den Längssteifenquerschnitt gemäß den Ergebnissen von Modell 2 (M2) und der linearen Analyse (LA) einander gegenübergestellt.

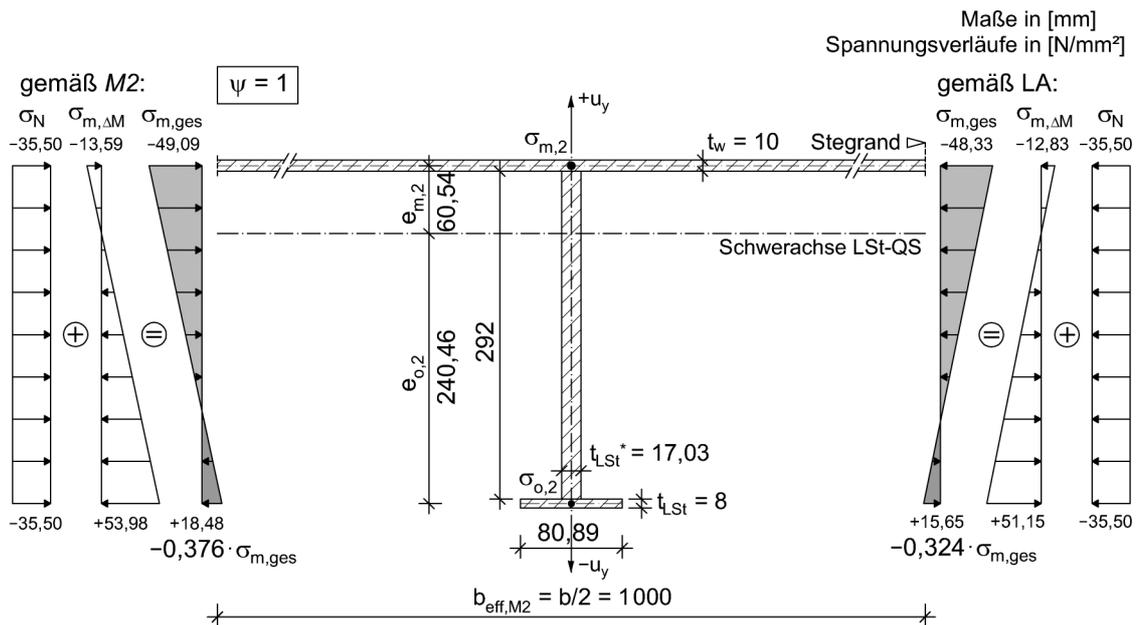


Abb. 3.20: Normalspannungsverläufe des Längssteifenquerschnittes für System S3; $t_{Lst} = 8$ [mm] – Modell 2

3.4 System S4: $t_{LSt} = 6$ [mm]

a.) Anteilige Stegblechmitwirkung (Modell 1)

Die Abb. 3.21 zeigt die Systemquerschnitte und die einwirkenden Lastgrößen der Randfelder und des Beobachtungsfeldes für das Modell 1.

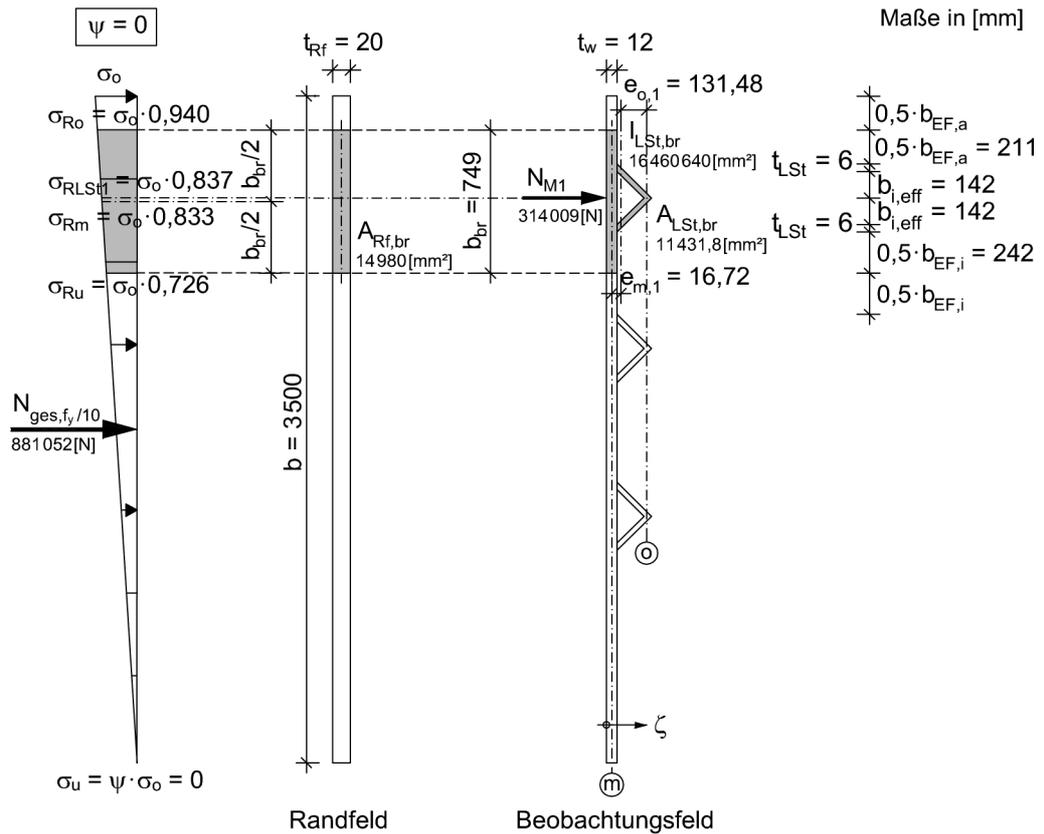


Abb. 3.21: Querschnitte und Beanspruchung für System S4; $t_{LSt} = 6$ [mm] – Modell 1

In Tab. 3.29 sind die Bezugsgrößen der Spannungsermittlung angeführt.

t_{Rf}	20 [mm]
t_w	12 [mm]
t_{LSt}	6 [mm]
b	3500 [mm]
f_y	355 [N/mm ²]
$\sigma_{Rf,o}$	25,17 [N/mm ²]
$N_{ges,fy/10}$	881 052 [N]

Tab. 3.29: Bezugsgrößen für System S4; $t_{LSt} = 6$ [mm] – Modell 1

Die obere Normalspannung $\sigma_{Rf,o}$ in den Randfeldern errechnet sich mit dem dort vorliegenden Flächenanteil $A_{Rf,ges}$ zu:

$$\sigma_{Rf,o} = \frac{N_{ges, fy/10}}{A_{Rf,ges} \cdot 0,5} = \frac{881052}{(3500 \cdot 20) \cdot 0,5} = 25,17 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (3.19)$$

Eine Zusammenfassung der ermittelten Querschnittswerte und Spannungen für das *Modell 1* findet sich in der anschließenden Tab. 3.30, Tab. 3.31 und Tab. 3.32.

Querschnitt	A [mm ²]	ζ [mm]	A · ζ [mm ³]	e_i [mm]	I [mm ⁴]	A · e_i^2 [mm ⁴]	I_{ges} [mm ⁴]
LSt-Stege: 2·203,7/6	2443,8	84,2	205765	61,48	4603198	9237882	13841079
mitw. Steg: 12/749	8988	6	53928	-16,72	107856	2511705	2619561
Summe	11431,8		259693		4711054	11749587	16460640

Tab. 3.30: Biegesteifigkeit I_{ges} (starke Achse) der Längssteife für System S4; $t_{Lst} = 6$ [mm] – *Modell 1*

$$\zeta_s = \frac{\sum (A \cdot \zeta)}{\sum A} = \frac{259693}{11431,8} = 22,72 \text{ [mm]}$$

$$e_{m,1} = \zeta_s - \frac{t_w}{2} = 22,72 - \frac{12}{2} = 16,72 \text{ [mm]}$$

$b_{eff,M1} = b_{br}$	749 [mm]
$e_{m,1}$	16,72 [mm]
$e_{o,1}$	131,48 [mm]
N_{M1}	314009 [N]
$A_{LSt,br}$	11431,8 [mm ²]
$I_{LSt,br}$	16460640 [mm ⁴]
$W_{m,1}$	984677 [mm ³]
$W_{o,1}$	125192 [mm ³]

Tab. 3.31: Querschnittswerte für System S4; $t_{Lst} = 6$ [mm] – *Modell 1*

Die Normalkraft N_{M1} der Längssteife ergibt sich zu:

$$N_{M1} = \sigma_{Rm} \cdot t_{Rf} \cdot b_{br} = \sigma_{Rf,o} \cdot 0,833 \cdot t_{Rf} \cdot b_{br} \text{ [N]} \quad (3.20)$$

$$N_{M1} = 25,17 \cdot 0,833 \cdot 20 \cdot 749 = 314009 \text{ [N]}$$

Die Drucknormal- und Biegespannungsanteile sind in der nachfolgenden Tab. 3.32 getrennt angeführt. Der Biegespannungsanteil wird jeweils als Prozentsatz des Normalspannungsanteils (= 100%) angegeben.

Achse m		Achse o	
$\sigma_{m,N,1}$	$\sigma_{m,\Delta M,1}$	$\sigma_{o,N,1}$	$\sigma_{o,\Delta M,1}$
-27,47 [N/mm ²]	-5,33 [N/mm ²]	-27,47 [N/mm ²]	+41,93 [N/mm ²]
100%	$\Delta = +19,4\%$	100%	$\Delta = -152,7\%$
$\sigma_{m,ges,1} = -32,80 \text{ [N/mm}^2\text{]}$		$\sigma_{o,ges,1} = +14,46 \text{ [N/mm}^2\text{]}$	

Tab. 3.32: Spannungsanteile (aus N, ΔM) und Gesamtnormalspannung für System S4; $t_{LSt} = 6 \text{ [mm]}$ – Modell 1

In Abb. 3.22 werden die ermittelten Spannungsanteile (aus N, ΔM) und der daraus resultierende Gesamtnormalspannungsverlauf σ_{ges} für den Längssteifenquerschnitt gemäß den Ergebnissen von Modell 1 (M1) und der linearen Analyse (LA) einander gegenübergestellt.

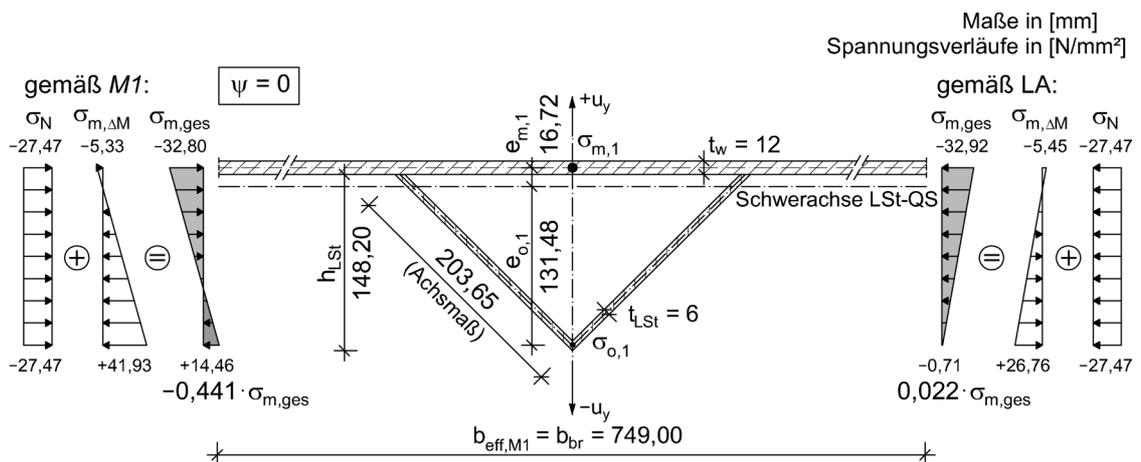


Abb. 3.22: Normalspannungsverläufe des Längssteifenquerschnittes für System S4; $t_{LSt} = 6 \text{ [mm]}$ – Modell 1

4 Ergebnisvergleich zwischen den Rechenmodellen und der linearen FE-Analyse bzgl. den Biegespannungen in den Längssteifen

Eine Gegenüberstellung der erhaltenen Ergebnisse bezüglich der Biegespannungsanteile $\sigma_{m,\Delta M}$ im Stegblech aus beiden Rechenmodellen zu jenen der numerischen Berechnung findet sich in Tab. 4.1 (für *Modell 1*) und Tab. 4.2 (für *Modell 2*). Ergänzend sind hier auch die Differenzen (ΔLSF) der später im Detail noch erläuterten Traglastfaktoren (LSF) für endende ($\Delta M = N \cdot e_m$) und durchlaufende Längssteifen (ohne ΔM) angeführt. Mit dem errechneten Normalspannungsanteil σ_N aus der Handrechnung und der aus der linearen Analyse (LA) bekannten Gesamtspannung $\sigma_{m,ges}$ wird der FE-Vergleichswert für den Biegeanteil $\sigma_{m,\Delta M}$ ermittelt. Dies entspricht der Vorgehensweise in Abschnitt 3, sodass in den nachfolgenden Tabellen die dortigen Ergebnisse nochmals zusammengefasst werden.

System	ψ [-]	t_{LSt} [mm]	Modell 1		LA	$\Delta\sigma_{m,\Delta M,1}$ M1/LA [%]	ΔLSF dl./end. [%]
			$\sigma_{N,1}$ [N/mm ²]	$\sigma_{m,\Delta M,1}$ [N/mm ²] ([% bzgl. $\sigma_{N,1}$])			
S1	1	8	-32,81 (100%)	-12,39 (37,7%)	-10,64 (32,4%)	+5,3	-16,9
	1	10	-32,36 (100%)	-15,21 (47,0%)	-13,03 (40,3%)	+6,7	-22,7
S2	1	8	-31,94 (100%)	-13,94 (43,6%)	-14,13 (44,2%)	-0,6	-26,8
	1	10	-31,46 (100%)	-16,91 (53,7%)	-17,56 (55,8%)	-2,1	-31,2
S3	1	8	-31,54 (100%)	-15,70 (49,8%)	-16,79 (53,2%)	-3,4	-28,4
S4	0	6	-27,47 (100%)	-5,33 (19,4%)	-5,45 (19,8%)	-0,4	-0,5

* gerechnet mit $\sigma_{N,1} = 100$ [%]

Tab. 4.1: Ergebnisüberblick der Vergleichsrechnung bzgl. der Längssteifenbiegewirkung – *Modell 1*

System	ψ [-]	t_{LSt} [mm]	Modell 2		LA	$\Delta\sigma_{m,\Delta M,2}$ M2/LA [%]	ΔLSF dl./end. [%]
			$\sigma_{N,2}$ [N/mm ²]	$\sigma_{m,\Delta M,2}$ [N/mm ²] ([% bzgl. $\sigma_{N,2}$])			
S1	1	8	-35,72 (100%)	-9,98 (27,9%)	-7,73 (21,6%)	+6,3	-16,9
	1	10	-35,72 (100%)	-12,30 (34,4%)	-9,67 (27,1%)	+7,3	-22,7
S2	1	8	-35,41 (100%)	-11,66 (32,9%)	-10,66 (30,1%)	+2,8	-26,8
	1	10	-35,41 (100%)	-14,25 (40,2%)	-13,61 (38,4%)	+1,8	-31,2
S3	1	8	-35,50 (100%)	-13,59 (38,3%)	-12,83 (36,1%)	+2,2	-28,4

* gerechnet mit $\sigma_{N,2} = 100$ [%]

Tab. 4.2: Ergebnisüberblick der Vergleichsrechnung bzgl. der Längssteifenbiegewirkung – *Modell 2*

Ein direkt proportionaler Zusammenhang und somit ein vereinfachter Rückschluss vom Biegespannungsanteil $\sigma_{m,\Delta M}$ auf den Traglastfaktor (LSF) lässt sich aus den Ergebnissen nicht ableiten. Hingegen ist aber die Tendenz festzustellen, dass sich die ertragbare resultierende Beultragfähigkeit bei endenden Längssteifen mit zunehmendem Biegeanteil verringert. Der „Steifigkeitsgewinn“ durch zunehmende Längssteifenhöhe (vgl. Systeme S1, S2 und S3) und Blechdicke fällt geringer aus als der durch die Biegebeanspruchung ΔM (steigende Lastausmitte e_m) hervorgerufene „Traglastverlust“. Somit gilt für die untersuchten Systeme, je höher die endenden Längssteifen bzw. deren Blechdicken sind, desto größer ist die Traglastreduktion. Darauf wird später noch näher eingegangen.

In beiden Rechenmodellen wirkt bei allen Systemen der Längssteifenaußengurt als Zuggurt. Nach den Ergebnissen der linearen Analyse (LA) trifft dies für das System S1 jedoch nicht zu. Dort liefert der außenliegende Gurt in Achse o Druckspannungen $\sigma_{o,ges} = -3,45 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ ($t_{LSt} = 8 \text{ [mm]}$) bzw. $-2,75 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ ($t_{LSt} = 10 \text{ [mm]}$) gemäß Anhang A, Abschnitt 5. In der Mittelachse der „Längssteifenspitze“ (Außenrand der Längssteife) des Systems S4 herrscht laut den numerischen Ergebnissen ebenfalls eine Druckspannung $\sigma_{o,ges} = -0,71 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ vor, während sich diese in der Handrechnung als Zugspannung errechnet. Die Achse o ist im Gegensatz zur Stegachse (Achse m) jedoch nicht maßgebend für die Nachweisführung.

Grundsätzlich liefern beide Rechenmodelle (*M1* und *M2*) eine hinreichende Treffsicherheit zur Bestimmung der Spannungsanteile im Längssteifenquerschnitt, jedoch liegt aufgrund der jeweils unterschiedlichen effektiv mitwirkenden Stegflächen („Brutto-“ b_{br} bzw. „Gesamtbreite“ b_{ges}) eine gewisse Schwankungsbreite zwischen den Spannungswerten beider Rechenmodelle vor. Generell liefert das *Modell 1* einen geringeren Normalkraftsanteil σ_N und einen höheren Biegespannungsanteil $\sigma_{m,\Delta M}$ am Stegblech. Damit weist *Modell 1* allgemein einen höheren Biegespannungsanteil auf.

INGENIEURMODELL – BIEGEKNICK- UND BEULNACHWEIS MIT ENDENDEN LÄNGSSTEIFEN

1 Grundlagen

Die Beultragfähigkeit des Teilfeldes mit endenden Längssteifen wird nach der „Methode der reduzierten Spannungen“ gemäß Eurocode 3-1-5 [1] bestimmt. Das Beulverhalten setzt sich dabei aus einem knickstabähnlichen und einem plattenartigen Mechanismus zusammen. Diese werden jeweils durch eine Interaktion des Abminderungsfaktors χ_c für Stabknicken und ρ_p für Plattenbeulen bei der Ermittlung des endgültigen Reduktionsfaktors ρ_c für die Beultragfähigkeit berücksichtigt. Die Interaktion der Abminderungsfaktoren steht in Abhängigkeit von geometriebedingten Systemgrößen (Beulfeld- und Längssteifenausbildung) und wird, wie in Abb. 1.1 dargestellt, mit dem Verhältniswert $\xi = (\sigma_{cr,p}/\sigma_{cr,c}) - 1$ zwischen alleinigem Knick- ($\xi = 0[-]$) und alleinigem Plattenbeulverhalten ($\xi = 1,0[-]$) gesteuert. Letztlich entspricht die größtmögliche ertragbare Randdruckspannung σ_o des Teilfeldes der reduzierten Fließspannung $\rho_c \cdot f_y$.

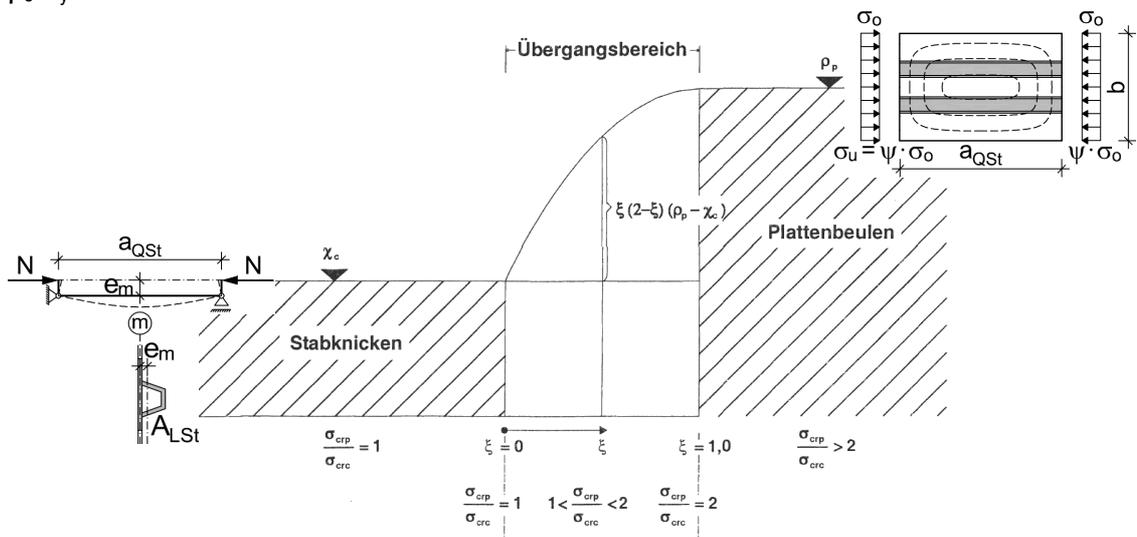


Abb. 1.1: Interaktionsbeziehung zwischen knickstabähnlichem und plattenartigem Beultragverhalten nach Eurocode 3-1-5 [1] (aus [10], ergänzt für den Fall endender Längssteifen)

Der Systemquerschnitt des mittleren Teilfeldes mit endenden Längssteifen wird, wie in Anhang B erläutert, aufgrund der exzentrischen Steifenlage zum Steg als einfachsymmetrischer Querschnitt mit zusätzlicher, konstanter Biegebeanspruchung ΔM betrachtet. Für diesen Querschnitt sind Bemessungsregeln für das alleinige Biegeknicken – unter der Beanspruchung von N und ΔM – des als „Ersatzstab“ betrachteten Längssteifenquerschnittes (Steife und effektiv mitwirkendes Stegblech) zur Ermittlung des knickstabähnlichen Verhaltens in Eurocode 3-1-1, Anhang B [3], angegeben. Die Bemessung des plattenartigen Verhaltens erfolgt nach Eurocode 3-1-5 [1]. Es wird nun für endende Längssteifen die Eurocode-Regelung teils vereinfacht angewandt und die erhaltenen Reduktionsfaktoren ρ_c der Beultragfähigkeit den tatsächlichen Traglastfaktoren (LSF) aus der geometrisch nichtlinearen FE-Studie (GMNIA) gegenübergestellt.

2 Vorgehensweise

Auf Basis des Bemessungsvorschlages für knickstabähnliches Verhalten in [5] erfolgt die Bemessung bei geschlossenen Längssteifen vereinfacht mit der Knickspannungslinie c ($\alpha = 0,49$ [-]). Mit dem dabei erhaltenen Abminderungsfaktor χ_c folgt die Berechnung nach Eurocode 3-1-1, Anhang B [3], für einfach-symmetrische Querschnitte. Die unter Druck (N) und einachsiger Biegung (ΔM) befindliche, mitwirkende Stegfläche (Achse m) wird für den Biegeknick-Nachweis (BK-NW) am „Ersatzstab“ herangezogen (siehe Abb. 2.1). Das *Modell 1* mit mitwirkenden Bruttobreiten (siehe Anhang B, Abschnitt 2.1) liefert für alle untersuchten Systeme, im Vergleich zur Bemessung nach *Modell 2* am Gesamtquerschnitt (siehe Anhang B, Abschnitt 2.2) die zutreffendere Übereinstimmung mit den numerischen Ergebnissen (Stützmethode im Randfeld nach *Variante 2*, siehe Anhang A, Abschnitt 4.1.2.1). Das *Modell 2* liefert aufgrund der gegenüber dem *Modell 1* erhöhten Querschnittsflächen eine stetige Überschätzung der Beultragfähigkeit und ist daher ausschließlich ergänzend für das System S1 ($t_{LSt} = 8$ [mm]) angeführt.

Die Längssteifen sind aufgrund ihrer geschlossenen Form als verdrehsteife Stäbe anzusehen. Unter der Voraussetzung einer ausschließlich elastischen Querschnittsausnutzung erfolgt die Einstufung der Querschnitte als „semi-kompakt“ in Klasse 3 gemäß [1]. Für den Teilsicherheitsbeiwert des Biegeknick-Nachweises gilt: $\gamma_{M1} = 1,0$ [-] (d.h. $f_{yd} = f_y$). Die Spannungsermittlung in Anhang B zeigte, dass die gedrückte Stegfläche für die Nachweisführung maßgebend ist. Folglich bezieht sich das Ingenieurmodell auf den Spannungspunkt in der Stegblechachse (Achse m). Als Bezugsgröße der Belastung dient jene Laststufe, welche bei reiner Normalkraftbeanspruchung im mittleren Beobachtungsfeld im Längssteifenquerschnitt das Auftreten der Fließspannung $f_y = 355$ [N/mm²] herbeiführt (wie bei GMNIA).

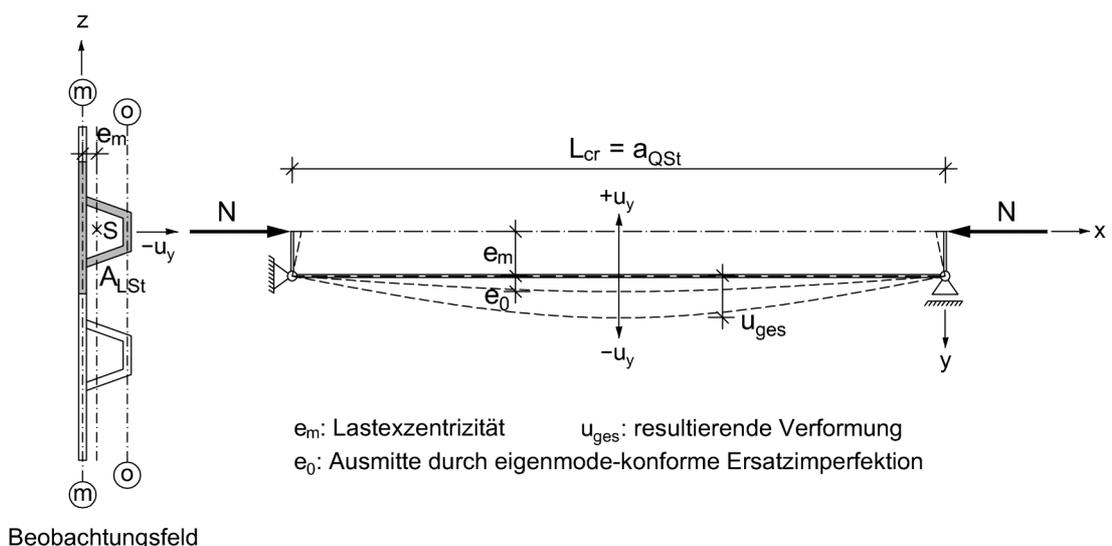


Abb. 2.1: Einfach-symmetrischer Systemquerschnitt endender Längssteifen als Ersatzstab des Biegeknick-Nachweises

3 Ergebnisse des Ingenieurmodells

Anhand des Systems S1 ($t_{LSt} = 8$ [mm]) wird das Ingenieurmodell detailliert und schematisch, stellvertretend für alle weiteren Systeme, vorgestellt. Der Berechnungsablauf bezieht sich immer auf einen Längssteifenquerschnitt und den zugehörigen Bemessungswerten in der Stegblechebene (Achse m).

3.1 System S1

3.1.1 System S1: $t_{LSt} = 8$ [mm]

Die Nachweisführung basiert auf den allgemeinen Bezugsgrößen der Tab. 3.1.

f_y	355 [N/mm ²]
γ_{M1}	1,0 [-]
N_{Ref,f_y}	4803994 [N]
N_{ges,f_y}	9607987 [N]
σ_{Rf}	320,27 [N/mm ²]

Tab. 3.1: Bezugsgrößen beider Rechenmodelle für System S1; $t_{LSt} = 8$ [mm]

Die Drucknormalkraft N_{Ref,f_y} stellt die halbe Spannungsergebnante des Stegbleches im Randfeld dar, welche dort am oberen und unteren Stegblechrand eingeleitet wird und im mittleren Beobachtungsfeld unter alleiniger „Normalkraftbeanspruchung“ entsprechend der Randspannungsverteilung $\psi = 1,0$ [-] die Fließspannung als Spannungsniveau $\sigma_{m,N,GMNIA} = f_y = 355$ [N/mm²] herbeiführt:

$$N_{ges,f_y} = 2 \cdot N_{Ref,f_y} = 2 \cdot 4803993,5 = 9607987 \text{ [N]} \quad (3.1)$$

Die Normalspannung σ_{Rf} in den Randfeldern errechnet sich mit dem dort vorliegenden Flächenanteil $A_{Rf,ges}$ zu:

$$\sigma_{Rf} = \frac{N_{ges,f_y}}{A_{Rf,ges}} = \frac{9607987}{2000 \cdot 15} = 320,27 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (3.2)$$

3.1.1.1 Anteilige Stegblechmitwirkung (*Modell 1*)

a.) Bezugsgrößen

Als Systemgrößen gelten die Querschnittsflächen der Randfelder ($A_{Rf,br}$; $A_{Rf,ges}$) sowie jene des mittleren Teilfeldes ($A_{LSt,br}$; $A_{Bf,ges}$), die „Bruttobreite“ b_{br} , die Knickstablänge a_{QSt} , die Lastausmitte $e_{m,1}$, das Trägheitsmoment $I_{LSt,br}$ und das Widerstandsmoment $W_{m,1}$ des Bruttoquerschnittes (in Achse m) gemäß der nachfolgenden Abb. 3.1 bzw. Tab. 3.2.

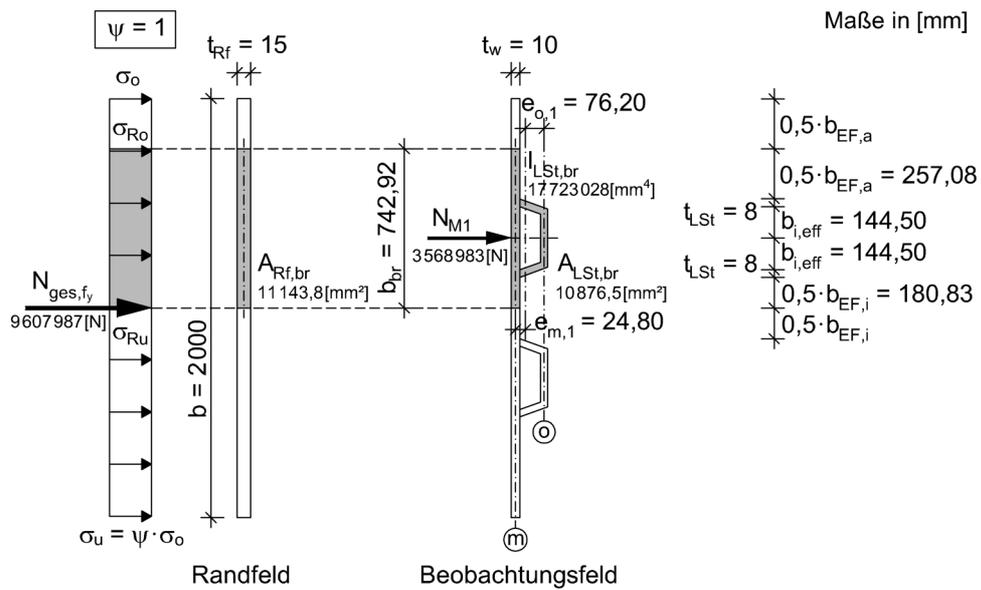


Abb. 3.1: Querschnitte und Beanspruchung für System S1; $t_{LSt} = 8$ [mm] – *Modell 1*

$A_{Rf,br}$	11 143,8 [mm ²]
$A_{Rf,ges}$	30 000 [mm ²]
$A_{LSt,br}$	10 876,5 [mm ²]
$A_{Bf,ges}$	26 894,6 [mm ²]
a_{QSt}	3 000 [mm]
$b_{eff,M1} = b_{br}$	742,92 [mm]
$e_{m,1}$	24,80 [mm]
$I_{LSt,br}$	17 723 028 [mm ⁴]
$W_{m,1}$	71 463 8 [mm ³]

Tab. 3.2: Querschnittswerte für System S1; $t_{LSt} = 8$ [mm] – *Modell 1*

Die auf den Längssteifenbruttoquerschnitt einwirkende Normalkraft N_{M1} entspricht der Nennspannung σ_{Rf} , bezogen auf die anteilig mitwirkende Stegfläche $A_{Rf,br}$ des Randfeldes und ergibt sich zu:

$$N_{M1} = \sigma_{Rf} \cdot A_{Rf,br} = 320,27 \cdot 742,92 \cdot 15 = 3568983 \text{ [N]} \quad (3.3)$$

Die Normalkraft $N_{R,fy}$ entspricht dem Querschnittswiderstand des Längssteifenbruttoquerschnittes $A_{LSt,br}$:

$$N_{R,fy} = \frac{A_{LSt,br} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{10876,5 \cdot 355}{1,0} = 3861158 \text{ [N]} \quad (3.4)$$

Die Längsnormalspannung $\sigma_{LSt,br}$ im Bruttoquerschnitt $A_{LSt,br}$ der Längssteife errechnet sich zu:

$$\sigma_{LSt,br} = \frac{N_{M1}}{A_{LSt,br}} = \frac{3568983}{10876,5} = 328,14 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (3.5)$$

Der aufgrund der Lastausmitte $e_{m,1}$ (Abstand der Schwerachse des Längssteifenbruttoquerschnittes zur Stegachse m) zusätzlich auftretende Biegemomentenanteil $M_{m,M1}$ (ΔM für *Modell 1*) ist definiert als:

$$M_{m,M1} = N_{M1} \cdot e_{m,1} = 3568983 \cdot 24,80 = 88510774 \text{ [Nmm]} \quad (3.6)$$

Für den Querschnittswiderstand $M_{R,fy}$ des Längssteifenbruttoquerschnittes gilt:

$$M_{R,fy} = \frac{W_{m,1} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{714638 \cdot 355}{1,0} = 253696573 \text{ [Nmm]} \quad (3.7)$$

Der Faktor $f_{\sigma,LSt}$ beschreibt das Verhältnis zwischen der auf den Steifenquerschnitt einwirkenden Normalkraft N_{M1} und der Querschnittstragfähigkeit $N_{R,fy}$:

$$f_{\sigma,LSt} = \frac{N_{M1}}{N_{R,fy}} = \frac{3568983}{3861158} = 0,924 \text{ [-]} \quad (3.8)$$

Anmerkung:

Der „Spannungsfaktor“ $f_{\sigma,LSt}$ ergibt sich somit für das *Modell 1* immer zu kleiner als 1,0 [-]. Er drückt aus, dass der „Längssteifenstab“ durch die konstante Druckspannung im Randfeld ohne Steifen ($A_{LSt} = 0 \text{ [mm}^2\text{]}$) eine um diesen Faktor $f_{\sigma,LSt}$ geringere Drucknormalkraft bzw. Membranspannung σ_N gegenüber dem Fall mit durchlaufenden Längssteifen erfährt (daher gilt hier: $\sigma_N = \sigma_{LSt,br} = f_{\sigma,LSt} \cdot f_y = 0,924 \cdot 355 = 328,14 \text{ [N/mm}^2\text{]}$).

In Tab. 3.3 findet sich die Zusammenfassung der ermittelten Bemessungsgrößen der Einwirkung und der Tragfähigkeit.

N_{M1}	3568983 [N]
$N_{R,fy}$	3861158 [N]
$M_{m,M1}$	88510774 [Nmm]
$M_{R,fy}$	253696573 [Nmm]
$\sigma_{LSt,br}$	328,14 [N/mm ²]
$f_{\sigma,LSt}$	0,924 [-]

Tab. 3.3: Bemessungsgrößen für System S1; $t_{LSt} = 8$ [mm] – Modell 1

b.) Knicken am Ersatzstab – zentrischer Druck mit Knickspannungslinie

Die Grundlage für die Erfassung des knickstabähnlichen Verhaltens χ_c endender Längssteifen stellt für den geschlossenen Steifenquerschnitt der Abminderungsfaktor $\chi_{c,dI}$ – gemäß dem Bemessungsvorschlag für geschlossene, durchlaufende Längssteifen in [5], vereinfacht mit der Knickspannungslinie c des Eurocode 3-1-1, Abschnitt 6.3.1.2 (1), Gl. (6.49) [2], berechnet – dar:

$$\chi_{c,dI} = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_c^2}} \text{ [-] aber } \chi_{c,dI} \leq 1,0 \quad (3.9)$$

$$\text{mit: } \Phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_c - 0,2) + \bar{\lambda}_c^2] \text{ [-]}$$

$$\alpha = 0,49 \text{ [-] für KSPL } c$$

Der Trägheitsradius i ergibt sich zu (siehe Querschnittswerte in Tab. 3.2):

$$i = \sqrt{\frac{I_{LSt,br}}{A_{LSt,br}}} = \sqrt{\frac{17723028}{10876,5}} = 40,37 \text{ [mm]} \quad (3.10)$$

Die bezogene Knickschlankheit $\bar{\lambda}_c$ des Ersatzstabes ist nach Eurocode 3-1-5, Abschnitt 4.5.3 (4), Gl. (4.11) [1], definiert als:

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{\beta_{A,c} \cdot f_y}{\sigma_{cr,c}}} \text{ [-]} \quad (3.11)$$

$$\text{mit: } \beta_{A,c} = \frac{A_{s\ell,1,\text{eff}}}{A_{s\ell,1}} [-]$$

Anmerkung:

Auf die laut Eurocode vorgesehene Reduktion $\beta_{A,c}$, gemäß dem Verhältnis der wirk-samen Querschnittsfläche $A_{s\ell,1,\text{eff}}$ unter Berücksichtigung des Beulens der an die Stei-fe angrenzenden, mitwirkenden Einzelfelder zur Bruttoquerschnittsfläche $A_{s\ell,1}$ nach *Modell 1*, wird vereinfacht, entsprechend dem Bemessungsvorschlag in [5], verzichtet (\Rightarrow Annahme: $\beta_{A,c} = 1,0 [-]$). Dies stellt eine konservative Annahme dar.

Die bezogene Knickschlankheit $\bar{\lambda}_c$ des Ersatzstabes entspricht somit:

$$\bar{\lambda}_c = \frac{a_{\text{QSt}}}{i \cdot \lambda_1} [-] \quad (3.12)$$

$$\text{mit: } \lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9 \cdot \varepsilon [-]$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} [-] \quad f_y \text{ in [N/mm}^2]$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40 [-]$$

$$\bar{\lambda}_c = \frac{3000}{40,37 \cdot 76,40} = 0,973 [-]$$

Mit der Knickspannungslinie c und dem zugehörigen Imperfektionsbeiwert $\alpha = 0,49 [-]$ errechnet sich der Abminderungsfaktor $\chi_{c,dl}$ zu:

$$\Phi = 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (0,973 - 0,2) + 0,973^2] = 1,162 [-]$$

$$\chi_{c,dl} = \frac{1}{1,162 + \sqrt{1,162^2 - 0,973^2}} = 0,556 [-]$$

Anmerkung:

Der modifizierte Imperfektionsbeiwert α_e zur „exakten“ Berücksichtigung des Imper-fektioneinflusses durch geschweißte Längssteifen bleibt in diesem Berechnungsablauf unberücksichtigt ($\alpha_e = \alpha$).

Demnach ergibt sich für die Tragfähigkeit $N_{R,LSt,dl}$ einer durchlaufenden Längssteife unter Voraussetzung der genannten Vereinfachungen der Eurocode-Regelung:

$$N_{R,LSt,dl} = N_{R,fy} \cdot \chi_{c,dl} = 3861158 \cdot 0,556 = 2146383 \text{ [N]} \quad (3.13)$$

Die Tab. 3.4 fasst den Abminderungsfaktor $\chi_{c,dl}$ mit den zugehörigen Bemessungsgrößen für das knickstabähnliche Verhalten des Ersatzstabes zusammen.

i	40,37 [mm]
λ_1	76,40 [-]
$\bar{\lambda}_c$	0,973 [-]
$\chi_{c,dl}$	0,556 [-]
$N_{R,LSt,dl}$	2 146 383 [N]

Tab. 3.4: Bemessungsgrößen für das knickstabähnliche Verhalten des Ersatzstabes für System S1; $t_{LSt} = 8$ [mm] – Modell 1

c.) Biegeknick-Nachweis und knickstabähnliches Verhalten des einfachsymmetrischen Querschnittes mit Exzentrizität

Die Bestimmung des Abminderungsfaktors χ_c für das Ingenieurmodell mit einfachsymmetrischem Querschnitt und endenden Längssteifen basiert auf Eurocode 3-1-1, Anhang B [3], und dem zuvor ermittelten Abminderungsfaktor $\chi_{c,dl}$. Der Längssteifenquerschnitt entspricht aufgrund des beulgefährdeten, mitwirkenden Stegbleches einem „Klasse 3“-Querschnitt („semi-kompakt“), hingegen gelten die Längssteifenbleche (als auch die Quersteifen) isoliert betrachtet als beulsicher. Wegen der geschlossenen Bauform werden die Längssteifenquerschnitte als verdrehsteife Ersatzstäbe angenommen.

Die Nachweisführung für Biegeknicken erfolgt nach der Interaktionsformel für Druck und Biegung nach [3], Abschnitt 6.8, Gl. (10) (Notation im Ingenieurmodell: $N_{Ed} = N_{R,LSt}$; $M_{y,Ed} = M_{R,LSt,m}$ bei 100 % Ausnutzungsgrad des BK-NW):

$$\frac{N_{R,LSt}}{\chi_{c,dl} \cdot N_{R,fy}} + k_y \cdot \frac{C_{my} \cdot N_{R,LSt} \cdot e_m}{M_{R,fy}} \leq 1,0 \quad (3.14)$$

$$\text{mit: } n_y = \frac{N_{R,LSt}}{\chi_{c,dl} \cdot N_{R,fy}} [-]$$

$$k_y = 1 + \bar{\lambda}_c \cdot n_y \leq 1 + n_y [-]$$

Für den Momentenfaktor C_{my} gilt wegen der konstanten Biegebeanspruchung:

$$C_{my} = 1,0 [-] \quad (3.15)$$

Die größtmögliche einwirkende Drucknormalbeanspruchung $N_{R,LSt}$ zur Erfüllung des Biegeknick-Nachweises (BK-NW) wird iterativ gemäß der Bemessungsgleichung (3.14) für verdrehsteife Stäbe der Querschnittsklasse 3 ermittelt:

$$\text{Iteration (Gl. (3.14))} \Rightarrow N_{R,LSt} = 1578241 \text{ [N]}$$

Die zugehörigen Beiwerte des Biegeknick-Nachweises (BK-NW) ergeben sich zu:

$$\eta_y = \frac{1578241}{0,556 \cdot 3861158} = 0,735 \text{ [-]}$$

$$k_y = 1 + 0,973 \cdot 0,735 \leq 1 + 0,735 \text{ [-]}$$

$$k_y = 1,716 \leq 1,735 \text{ [-]} \quad \checkmark$$

Die zugehörige Momentenbeanspruchung $M_{R,LSt,m}$ im Stegblech (Achse m) errechnet sich zu:

$$M_{R,LSt,m} = N_{R,LSt} \cdot e_{m,1} = 1578241 \cdot 24,80 = 39140382 \text{ [Nmm]} \quad (3.16)$$

Der Biegeknick-Nachweis (BK-NW) erfüllt sich – als Kontrolle – mit dem Ausnutzungsgrad von 100 % zu:

$$\underbrace{\frac{1578241}{0,556 \cdot 3861158}}_{0,735} + \underbrace{1,716 \cdot \frac{1,0 \cdot 39140382}{1,0 \cdot 253696573}}_{0,265} \leq 1,0 \quad \checkmark$$

$$= 0,735 + 0,265 = 1,0 \quad \checkmark$$

Der gesuchte Abminderungsfaktor χ_c für knickstabähnliches Verhalten endender Längssteifen errechnet sich aus dem Verhältnis der Normalkräfte zu:

$$\chi_c = \frac{N_{R,LSt}}{N_{R,fy}} = \frac{1578241}{3861158} = 0,409 \text{ [-]} \quad (3.17)$$

Ergänzend erfolgt – als Variante – eine Erhöhung auf den Abminderungswert χ_c^* , welcher berücksichtigt, dass die mittlere Normalspannung am Ersatzstab geringer ist als im Steg des Beobachtungsfeldes (jeweils ohne Exzentrizitätswirkung):

$$\chi_c^* = \frac{\chi_c}{f_{\sigma,LSt}} = \frac{0,409}{0,924} = 0,442 \text{ [-]} \quad (3.18)$$

Der Biegeknick-Nachweis (BK-NW), die zugehörigen Beiwerte und Biegeknicktragfähigkeiten sowie der Abminderungsfaktor χ_c (bzw. χ_c^*) für knickstabähnliches Verhalten des einfach-symmetrischen Bruttoquerschnittes sind in der anschließenden Tab. 3.5 zusammenfassend angeführt.

n_y	0,735 [-]
k_y	$1,716 \leq 1,735$ [-] ✓
k_y	1,716 [-]
C_{my}	1,0 [-]
BK-NW:	$0,735 + 0,265 = 1,0$ ✓
$N_{R,LSt}$	1578241 [N] (= $0,41 \cdot N_{R,fy}$)
$M_{R,LSt,m}$	39140382 [Nmm]
χ_c	0,409 [-]
χ_c^*	0,442 [-]

Tab. 3.5: Biegeknick-Nachweis mit resultierenden Lastgrößen und Abminderungsfaktoren des knickstabähnlichen Verhaltens für System S1; $t_{LSt} = 8$ [mm] – Modell 1

Vereinfacht kann für die Ermittlung des knickstabähnlichen Verhaltens χ_c (bzw. χ_c^*) für endende, geschlossene Längssteifen der nachfolgende Bemessungsansatz – basierend auf dem Abminderungsfaktor $\chi_{c,dI}$ für geschlossene, durchlaufende Längssteifen nach vereinfachter Eurocode-Regelung der Knickspannungslinie c – verwendet werden (vorausgesetzt wird immer der Teilsicherheitsfaktor $\gamma_{M1} = 1,0$ [-]):

$$\frac{N_{R,LSt}}{\chi_{c,dI} \cdot A_{LSt,br} \cdot f_y} + \left(1 + \bar{\lambda}_c \cdot \frac{N_{R,LSt}}{\chi_{c,dI} \cdot A_{LSt,br} \cdot f_y} \right) \cdot \frac{(0,6 + 0,4 \cdot \psi) \cdot N_{R,LSt} \cdot e_{m,1}}{W_{m,1} \cdot f_y} \quad (3.19)$$

$$\stackrel{!}{=} \frac{N_{R,LSt}}{\chi_{c,dI} \cdot f_c \cdot A_{LSt,br} \cdot f_y} \quad (3.20)$$

↓

$$\text{für } \bar{\lambda}_c \leq 1,0 \text{ [-]: } f_c = \frac{W_{m,1} \cdot f_y}{e_{m,1} \cdot (N_{R,LSt} \cdot \bar{\lambda}_c + A_{LSt,br} \cdot f_y \cdot \chi_{c,dI}) + W_{m,1} \cdot f_y} \text{ [-]} \quad (3.21)$$

$$\text{für } \bar{\lambda}_c > 1,0 \text{ [-]: } f_c = \frac{W_{m,1} \cdot f_y}{e_{m,1} \cdot (N_{R,LSt} + A_{LSt,br} \cdot f_y \cdot \chi_{c,dI}) + W_{m,1} \cdot f_y} \text{ [-]} \quad (3.22)$$

$$\text{Gesamtergebnis: } \chi_c = \chi_{c,dI} \cdot f_c \text{ [-]} \quad (3.23)$$

Mit der konservativen Annahme von $N_{R,LSt} = N_{R,fy} = A_{LSt,br} \cdot f_y$ entfällt die Iteration und es ergibt sich somit:

$$\text{für } \bar{\lambda}_c \leq 1,0 [-]: \quad f_c = \frac{W_{m,1}}{e_{m,1} \cdot A_{LSt,br} \cdot (\bar{\lambda}_c + \chi_{c,dl}) + W_{m,1}} [-] \quad (3.24)$$

$$\text{für } \bar{\lambda}_c > 1,0 [-]: \quad f_c = \frac{W_{m,1}}{e_{m,1} \cdot A_{LSt,br} \cdot (1 + \chi_{c,dl}) + W_{m,1}} [-] \quad (3.25)$$

$$f_c = \frac{714638}{24,80 \cdot 10876,5 \cdot (0,973 + 0,556) + 714638} = 0,634 [-] \quad (\text{Gl. (3.24)})$$

$$\chi_{c,konservativ} = 0,556 \cdot 0,634 = 0,352 [-] \quad (\text{Gl. (3.23)}) < \chi_{c,exakt} = 0,409 [-] \quad (\text{Gl. (3.14)})$$

Unter Berücksichtigung des Faktors $f_{\sigma,LSt}$ der effektiv belasteten Querschnittsflächen entspricht der Beiwert χ_c^* dem Knickverhalten von endenden Längssteifen:

$$\chi_c^* = \frac{\chi_{c,dl} \cdot f_c}{f_{\sigma,LSt}} = \frac{0,556 \cdot 0,634}{0,924} = 0,381 [-] \quad (3.26)$$

Auch hier ergeben sich konservative Werte gegenüber der Iteration nach Gl. (3.14).

Nachfolgend wird in Tab. 3.6 und Abb. 3.2 das knickstabähnliche Verhalten anhand weiterer angenommenen Knicklängen a_{QSt} erfasst. Vergleichsweise sind die Abminderungsfaktoren für das knickstabähnliche Verhalten von geschlossenen, endenden (χ_c bzw. χ_c^*) und durchlaufenden ($\chi_{c,dl}$ vereinfacht nach Knickspannungslinie c berechnet) Längssteifen samt dem Verhältniswert $\chi_c/\chi_{c,dl}$ bzw. $\chi_c^*/\chi_{c,dl}$ angegeben.

a_{QSt} [mm]	$\bar{\lambda}_c$ [-]	end. LSt.		dl. LSt.	$\chi_c/\chi_{c,dl}$ [-]	$\chi_c^*/\chi_{c,dl}$ [-]
		χ_c [-]	χ_c^* [-]	$\chi_{c,dl}$ [-]		
1500	0,486	0,595	0,643	0,851	0,699	0,756
2000	0,649	0,534	0,578	0,756	0,706	0,765
2500	0,811	0,471	0,510	0,655	0,719	0,779
3000	0,973	0,409	0,442	0,556	0,736	0,795
3500	1,135	0,356	0,385	0,466	0,764	0,826
4000	1,297	0,309	0,334	0,390	0,792	0,856
4500	1,459	0,268	0,290	0,328	0,817	0,884

Tab. 3.6: Knicklängen a_{QSt} mit zugehörigen Abminderungsfaktoren für knickstabähnliches Verhalten von endenden (χ_c bzw. χ_c^*) und durchlaufenden ($\chi_{c,dl}$) Längssteifen für System S1; $t_{LSt} = 8$ [mm] – Modell 1

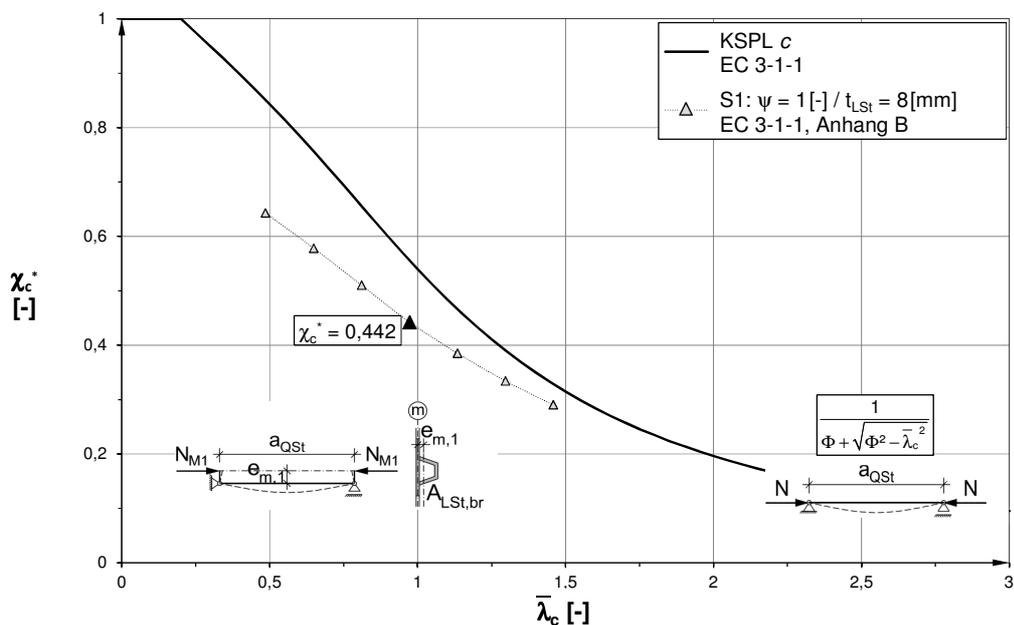


Abb. 3.2: Knickstabähnliches Verhalten des einfach-symmetrischen „Längssteifenersatzstabes“ mit den Knicklängen $a_{QSt} = 1500[mm]$ bis $4500[mm]$ (Schrittweite von $500[mm]$) für System S1; $t_{LSt} = 8[mm]$ im Vergleich zur Knickspannungslinie $c - Modell 1$

Daraus ist der Einfluss der zusätzlichen Exzentrizität $e_{m,1}$ bei endenden Längssteifen erkennbar, welcher mit kleiner werdendem Quersteifenabstand a_{QSt} zunimmt.

d.) Plattenartiges Verhalten

Die Ermittlung des Abminderungsfaktors ρ_p für plattenartiges Verhalten erfolgt nach Eurocode 3-1-5, Abschnitt 4.4 [1]. Der Lastfaktor α_{cr} wird dabei jedoch dem maßgebenden globalen Eigenwert $\phi_{cr, glob}$ aus der linearen Beulanalyse (LBA) gleichgesetzt. Mit der in der linearen Beulanalyse angesetzten Bezugsspannung $\sigma_{m,N,LBA} = \sigma_{x,Ed,Bf} = 10[N/mm^2]$ im Beobachtungsfeld (ohne Exzentrizitätswirkung) ergibt sich die elastische kritische Plattenbeulspannung $\sigma_{cr,p}$ zu:

$$\alpha_{cr} = \phi_{cr, end} = 48,014 [-] \quad (= \text{maßgebender globaler Eigenwert}) \quad (3.27)$$

$$\sigma_{cr,p} = \alpha_{cr} \cdot \sigma_{x,Ed,Bf} = 48,014 \cdot 10 = 480,14 [N/mm^2] \quad (3.28)$$

Es erfolgt gemäß [1] die Bestimmung des Faktors $\alpha_{ult,k}$ mittels dem Ansatz einer Beulvergleichsspannung wie von Greiner/Unterweger in [11] beschrieben:

$$\frac{1}{\alpha_{ult,k}} \hat{=} \frac{\sigma_v}{f_y} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y}\right)^2} [-] \quad (3.29)$$

Für den schubfreien ($\tau_{Ed} = 0$ [N/mm²]) und unter einachsiger Drucknormalbeanspruchung $\sigma_{x,Ed,Bf}$ befindlichen Querschnitt gilt:

$$\alpha_{ult,k} = \frac{f_y}{\sigma_{x,Ed,Bf}} = \frac{355}{10} = 35,5 [-] \quad (3.30)$$

Der bezogene Plattenschlankheitsgrad $\bar{\lambda}_p$ – entsprechend dem Lastgrößenverhältnis – lautet somit:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}} = \sqrt{\frac{35,5}{48,014}} = 0,860 [-] \quad (3.31)$$

Der Abminderungsfaktor ρ_p für plattenartiges Verhalten (gemäß Eurocode 3-1-5, Abschnitt 4.4, Gl. (4.2) [1], als ρ notiert) ist definiert als:

$$\rho_p = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} [-] \quad (3.32)$$

für $\bar{\lambda}_p > 0,673[-]$ und $(3 + \psi) \geq 0$

$$\rho_p = \frac{0,860 - 0,055 \cdot (3 + 1)}{0,860^2} = 0,865 [-]$$

Anmerkung:

Aufgrund der zusätzlichen, für die FE-Modellierung notwendigen Randfeldstützung ergeben sich in der linearen Beulanalyse (LBA) für alle in Anhang A, Abschnitt 4.1, angeführten Stützmethoden erhöhte globale Eigenwerte $\phi_{cr,end}$ für die Systeme mit endenden Längssteifen im Vergleich zu jenen mit durchlaufenden Längssteifen. Daher werden für das Ingenieurmodell zur Ermittlung des Plattenbeulens ρ_p die globalen Eigenwerte $\phi_{cr,dl}$ der Systeme mit durchlaufenden Längssteifen herangezogen.

Die Tab. 3.7 zeigt den Abminderungsfaktor ρ_p und die zugehörigen Bemessungsgrößen für plattenartiges Verhalten.

	end. LSt	dl. LSt	
$\alpha_{cr} = \phi_{cr,glob}$	48,014	41,232	[-]
$\sigma_{cr,p}$	480,14	412,32	[N/mm ²]
$\alpha_{ult,k}$	35,5	35,5	[-]
$\bar{\lambda}_p$	0,860	0,928	[-]
ψ	1,0	1,0	[-]
ρ_p	0,865	0,822	[-]

Tab. 3.7: Bemessungsgrößen für plattenartiges Verhalten für System S1; $t_{LSt} = 8$ [mm] – Modell 1

e.) Interaktion zwischen knickstabähnlichem und plattenartigem Verhalten

Die zuvor ermittelten Reduktionsfaktoren für knickstabähnliches (χ_c bzw. χ_c^*) und plattenartiges (ρ_p) Verhalten werden gemäß der Regelung in Eurocode 3-1-5, Abschnitt 4.5.4, Gl. (4.13) [1], miteinander kombiniert und ergeben den endgültigen Abminderungsfaktor ρ_c der Beultragfähigkeit zu:

$$\rho_c = (\rho_p - \chi_c) \cdot \xi \cdot (2 - \xi) + \chi_c \quad [-] \quad (3.33)$$

$$\text{mit: } \xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1 \quad [-] \quad \text{aber } 0 \leq \xi \leq 1$$

Angesichts der vorliegenden Normalspannungsverteilung $\psi = 1,0$ [-] wird die elastische kritische Knickspannung $\sigma_{cr,c}$ der Knickspannung $\sigma_{cr,s\ell}$ der höchstbelasteten, nahe dem Druckrand gelegenen Längssteife gemäß [1] gleichgesetzt.

$$\sigma_{cr,c} = \sigma_{cr,s\ell} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{LSt,br}}{A_{LSt,br} \cdot a_{QSt}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 17723028}{10876,5 \cdot 3000^2} = 375,25 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (3.34)$$

$$\xi = \frac{480,14}{375,25} - 1 = 0,280 \quad [-] \quad \text{für } \alpha_{cr} \text{ mit endenden Längssteifen}$$

$$\xi = \frac{412,32}{375,25} - 1 = 0,099 \quad [-] \quad \text{für } \alpha_{cr} \text{ mit durchlaufenden Längssteifen}$$

In Tab. 3.8 sind die ideale Knickspannung $\sigma_{cr,c}$ und die Interaktionsfaktoren ξ für knickstabähnliches und plattenartiges Verhalten ersichtlich.

	end. LSt	dl. LSt	
$\sigma_{cr,c} = \sigma_{cr,s\ell}$	375,25		[N/mm ²]
ξ	0,280	0,099	[-]

Tab. 3.8: Ideale Knickspannung $\sigma_{cr,c}$ und Interaktionsfaktor ξ für System S1; $t_{LSt} = 8$ [mm] – Modell 1

Mit bzw. ohne dem Faktor $f_{\sigma, \text{LSt}}$ zur Berücksichtigung der Normalspannungsdifferenz zwischen dem Stegblech und dem Längssteifenquerschnitt des mittleren Teilfeldes sowie mit dem gewählten globalen Eigenwert des Systems mit endenden ($\phi_{\text{cr, end}}$) bzw. durchlaufenden ($\phi_{\text{cr, dl}}$) Längssteifen ergeben sich nachfolgende Variationskombinationen:

„ohne $f_{\sigma, \text{LSt}}$ / mit $\phi_{\text{cr, end}}$ “:

$$\rho_c = (0,865 - 0,409) \cdot 0,280 \cdot (2 - 0,280) + 0,409 = 0,628 [-]$$

„mit $f_{\sigma, \text{LSt}}$ / mit $\phi_{\text{cr, end}}$ “:

$$\rho_c = (0,865 - 0,442) \cdot 0,280 \cdot (2 - 0,280) + 0,442 = 0,646 [-]$$

„ohne $f_{\sigma, \text{LSt}}$ / mit $\phi_{\text{cr, dl}}$ “:

$$\rho_c = (0,822 - 0,409) \cdot 0,099 \cdot (2 - 0,099) + 0,409 = 0,486 [-]$$

„mit $f_{\sigma, \text{LSt}}$ / mit $\phi_{\text{cr, dl}}$ “:

$$\rho_c = (0,822 - 0,442) \cdot 0,099 \cdot (2 - 0,099) + 0,442 = 0,514 [-]$$

Der zugehörige Laststeigerungsfaktor (LSF) aus der nichtlinearen Traglaststudie (GMNIA) nach Anhang A, Abschnitt 5 – gleichbedeutend dem endgültigen Abminderungsfaktor ρ_c , da beide auf dem Lastniveau basieren, welches den Gesamtquerschnitt $A_{\text{Bf, ges}}$ im mittleren Beobachtungsfeld unter reiner Normalkraftbeanspruchung zum Erreichen der Fließspannung $f_y = 355 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ führt – ist in Tab. 3.9 angegeben. Zudem findet sich – getrennt nach den berücksichtigten Einflussgrößen ($f_{\sigma, \text{LSt}}$; ϕ_{cr}) – eine prozentuale Gegenüberstellung des GMNIA-Laststeigerungsfaktors (LSF = 100 %) zu dem resultierenden Abminderungsfaktor ρ_c der Beultragfähigkeit des längsausgesteiften Teilfeldes mit endenden Längssteifen nach *Modell 1*.

	GMNIA	<i>Modell 1</i> mit χ_c^*		<i>Modell 1</i> mit χ_c	
		$\rho_{p, dl}$	$\rho_{p, end}$	$\rho_{p, dl}$	$\rho_{p, end}$
$\rho_c [-]$	0,557	0,514	0,646	0,486	0,628
$\Delta [\%]$	-	-7,8	+15,9	-12,7	+12,8

Tab. 3.9: Resultierende Abminderungsfaktoren ρ_c nach GMNIA (= LSF) und *Modell 1* für System S1 ($a_{\text{QSt}} = 3000 \text{ [mm]}$); $t_{\text{LSt}} = 8 \text{ [mm]}$)

In Tab. 3.10 sind die Ergebnisse für das *Modell 1* ergänzend mit der konservativen Annahme $N_{R,LSt} = N_{R,fy} = A_{LSt,br} \cdot f_y$ angeführt, die nach Gl. (3.24) ($\bar{\lambda}_c = 0,973$ für $a_{QSt} = 3000[\text{mm}]$) und Gl. (3.23) (mit χ_c) bzw. Gl. (3.26) (mit χ_c^*) bestimmt sind und keiner Iteration bedürfen.

	GMNIA	<i>Modell 1</i> mit χ_c^* (konservativ)		<i>Modell 1</i> mit χ_c (konservativ)	
		$\rho_{p,dl}$	$\rho_{p,end}$	$\rho_{p,dl}$	$\rho_{p,end}$
$\rho_c[-]$	0,557	0,464	0,614	0,441	0,599
$\Delta[\%]$	-	-16,7	+10,3	-20,9	+7,6

Tab. 3.10: Resultierende Abminderungsfaktoren ρ_c nach GMNIA (= LSF) und *Modell 1* (konservativ) für System S1 ($a_{QSt} = 3000[\text{mm}]$); $t_{LSt} = 8[\text{mm}]$

Für den konservativen Bemessungsansatz errechnet sich der resultierende Abminderungsfaktor ρ_c der Beultragfähigkeit für den Fall „mit $f_{\sigma,LSt}$ / mit $\phi_{cr,dl}$ “ (d. h. mit χ_c^* und $\rho_{p,dl}$ lt. Tab. 3.10) zu:

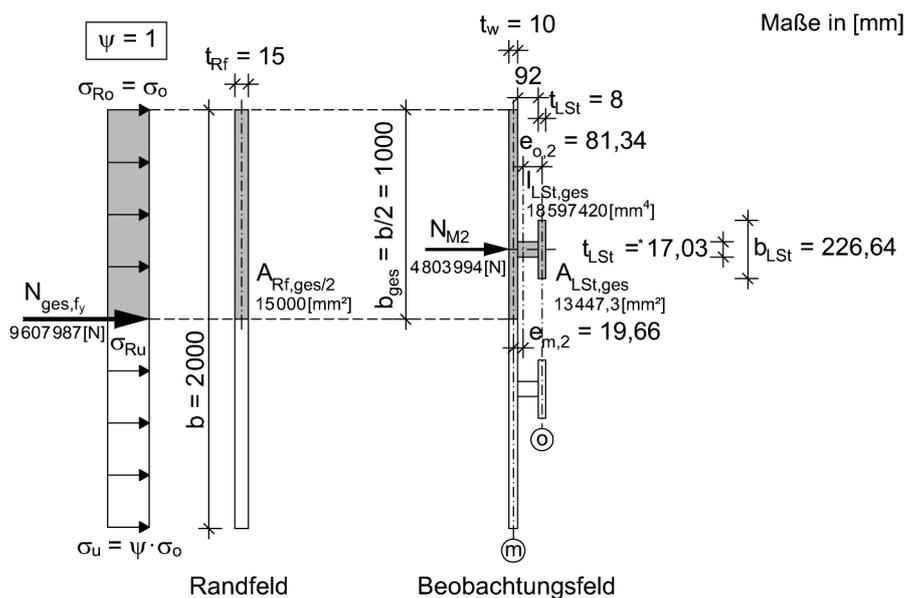
$$\rho_c = (0,822 - 0,381) \cdot 0,099 \cdot (2 - 0,099) + 0,381 = 0,464 [-]$$

Folglich lässt sich für dieses Beispiel eine hinreichende Übereinstimmung mit den numerischen Ergebnissen mittels der Kombination „mit $f_{\sigma,LSt}$ / mit $\phi_{cr,dl}$ “ erzielen.

3.1.1.2 Vollständige Stegblechmitwirkung (*Modell 2*)

a.) Bezugsgrößen

Als Systemgrößen gelten die Querschnittsflächen der Randfelder ($A_{Rf,ges/2}$; $A_{Rf,ges}$) sowie jene des mittleren Teilfeldes ($A_{LSt,ges}$; $A_{Bf,ges}$), die „Gesamtbreite“ b_{ges} ($= b/2$) je Steifenquerschnitt, die Knickstablänge a_{QSt} , die Lastausmitte $e_{m,2}$, das Trägheitsmoment $I_{LSt,ges}$ und das Widerstandsmoment $W_{m,2}$ des Gesamtquerschnittes (Achse m) gemäß der nachfolgenden Abb. 3.3. bzw. Tab. 3.11.


 Abb. 3.3: Querschnitte und Beanspruchung für System S1; $t_{LSt} = 8$ [mm] – *Modell 2*

$A_{Rf,ges/2}$	15000 [mm ²]
$A_{Rf,ges}$	30000 [mm ²]
$A_{LSt,ges} = A_{Bf,ges/2}$	13447,3 [mm ²]
$A_{Bf,ges}$	26894,6 [mm ²]
a_{QSt}	3000 [mm]
$b_{eff,M2} = b/2$	1000 [mm]
$e_{m,2}$	19,66 [mm]
$I_{LSt,ges}$	18597420 [mm ⁴]
$W_{m,2}$	946059 [mm ³]

 Tab. 3.11: Querschnittswerte für System S1; $t_{LSt} = 8$ [mm] – *Modell 2*

Mit der auf die gesamte Stegfläche $A_{Rf,ges}$ des Randfeldes einwirkenden Gesamtlast N_{ges,f_y} , welche im mittleren Beobachtungsfeld annähernd die Fließspannung f_y als Druckspannung liefert, ergibt sich die resultierende Normalkraft N_{M2} des Längssteifengesamtquerschnittes. Die Normalkraft N_{M2} entspricht somit der halben, in den Randfeldern eingeleiteten Drucknormalkraft N_{ges,f_y} :

$$N_{M2} = \frac{N_{ges,f_y} \cdot A_{Rf,ges/2}}{A_{Rf,ges}} = \frac{N_{ges,f_y}}{2} = \frac{9607987}{2} = 4803994 \text{ [N]} \quad (3.35)$$

Die Normalkraft N_{R,f_y} entspricht dem Querschnittswiderstand des Längssteifengesamtquerschnittes $A_{LSt,ges}$:

$$N_{R,f_y} = \frac{A_{LSt,ges} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{13447,3 \cdot 355}{1,0} = 4773792 \text{ [N]} \quad (3.36)$$

Die Längsnormalspannung $\sigma_{LSt,ges}$ im Gesamtquerschnitt $A_{LSt,ges}$ einer Längssteife errechnet sich zu:

$$\sigma_{LSt,ges} = \frac{N_{M2}}{A_{LSt,ges}} = \frac{4803994}{13447,3} = 357,25 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (3.37)$$

Der aufgrund der Lastausmitte $e_{m,2}$ (Abstand der Schwerachse des Längssteifengesamtquerschnittes zur Stegachse m) zusätzlich auftretende Biegemomentenanteil $M_{m,M2}$ (ΔM für *Modell 2*) ist definiert als:

$$M_{m,M2} = N_{M2} \cdot e_{m,2} = 4803994 \cdot 19,66 = 94435880 \text{ [Nmm]} \quad (3.38)$$

Für den Querschnittswiderstand M_{R,f_y} des Längssteifengesamtquerschnittes gilt:

$$M_{R,f_y} = \frac{W_{m,2} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{946059 \cdot 355}{1,0} = 335850831 \text{ [Nmm]} \quad (3.39)$$

Der Faktor $f_{\sigma,LSt}$ beschreibt das Verhältnis zwischen der auf den Steifenquerschnitt einwirkenden Normalkraft N_{M2} und der Querschnittstragfähigkeit N_{R,f_y} :

$$f_{\sigma,LSt} = \frac{N_{M2}}{N_{R,f_y}} = \frac{4803994}{4773792} = 1,006 \text{ [-]} \quad (3.40)$$

Anmerkung:

Der „Spannungsfaktor“ $f_{\sigma,LSt}$ ergibt sich somit für das *Modell 2* immer zu 1,0[-] aufgrund der je Steife vollständig mitwirkenden Stegbreite b_{ges} (= $b/2$ für das System S1). Eine geringfügige Abweichung davon ist aufgrund der aus [5] übernommenen und auf gerundeten Querschnittsflächen basierenden FE-Bezugslastgrößen N_1 und N_2 (d.h. $N_{Ref,f_y} = N_1 = N_2$ für die Druckspannungsverteilung $\psi = 1,0[-]$) im Berechnungsablauf gegeben.

In Tab. 3.12 findet sich die Zusammenfassung der ermittelten Bemessungsgrößen der Einwirkung und der Tragfähigkeit.

N_{M2}	4803994 [N]
$N_{R,fy}$	4773792 [N]
$M_{m,M2}$	94435880 [Nmm]
$M_{R,fy,m}$	335850831 [Nmm]
$\sigma_{LSt,ges} \approx f_y$	357,25 [N/mm ²]
$f_{\sigma,LSt}$	1,006 [-]

Tab. 3.12: Bemessungsgrößen für System S1; $t_{LSt} = 8$ [mm] – Modell 2

b.) Knicken am Ersatzstab – zentrischer Druck mit Knickspannungslinie

Die Grundlage für die Erfassung des knickstabähnlichen Verhaltens χ_c endender Längssteifen stellt für den geschlossenen Steifenquerschnitt der Abminderungsfaktor $\chi_{c,dI}$ – gemäß dem Bemessungsvorschlag für geschlossene, durchlaufende Längssteifen in [5], vereinfacht mit der Knickspannungslinie c des Eurocode 3-1-1 [2] berechnet – dar.

Die Tab. 3.13 fasst den Abminderungsfaktor $\chi_{c,dI}$ mit den zugehörigen Bemessungsgrößen für das knickstabähnliche Verhalten des Ersatzstabes zusammen.

i	37,19 [mm]
λ_1	76,40 [-]
$\bar{\lambda}_c$	1,056 [-]
$\chi_{c,dI}$	0,508 [-]
$N_{R,LSt,dI}$	2426045 [N]

Tab. 3.13: Bemessungsgrößen für das knickstabähnliche Verhalten des Ersatzstabes für System S1; $t_{LSt} = 8$ [mm] – Modell 2

c.) Biegeknick-Nachweis und knickstabähnliches Verhalten des einfach-symmetrischen Querschnittes mit Exzentrizität

Die Bestimmung des Abminderungsfaktors χ_c für das Ingenieurmodell mit einfach-symmetrischem Querschnitt und endenden Längssteifen basiert auf Eurocode 3-1-1, Anhang B [3], und dem zuvor ermittelten Abminderungsfaktor $\chi_{c,dl}$.

Der Biegeknick-Nachweis (BK-NW), die zugehörigen Beiwerte und Biegeknicktragfähigkeiten sowie der Abminderungsfaktor χ_c (hier ident zu χ_c^*) für knickstabähnliches Verhalten des einfach-symmetrischen Gesamtquerschnittes sind in der anschließenden Tab. 3.14 zusammenfassend angeführt.

n_y	0,796 [-]
k_y	$1,841 \leq 1,796 [-]$ x
k_y	1,796 [-]
C_{my}	1,0 [-]
BK-NW:	$0,796 + 0,204 = 1,0$ ✓
$N_{R,LSt}$	1944393 [N] (= $0,41 \cdot N_{R,fy}$)
$M_{R,LSt}$	38222455 [Nmm]
$\chi_c = \chi_c^*$	0,405 [-]

Tab. 3.14: Biegeknick-Nachweis mit resultierenden Lastgrößen und Abminderungsfaktoren des knickstabähnlichen Verhaltens für System S1; $t_{LSt} = 8$ [mm] – *Modell 2*

Nachfolgend wird in Tab. 3.15 und Abb. 3.4 das knickstabähnliche Verhalten anhand weiterer angenommenen Knicklängen a_{QSt} erfasst. Vergleichsweise sind die Abminderungsfaktoren für das knickstabähnliche Verhalten von geschlossenen, endenden ($\chi_c = \chi_c^*$) und durchlaufenden ($\chi_{c,dl}$ vereinfacht nach Knickspannungslinie c berechnet) Längssteifen samt dem Verhältniswert $\chi_c/\chi_{c,dl}$ angegeben.

a_{QSt} [mm]	$\bar{\lambda}_c$ [-]	end. LSt.	dl. LSt.	$\chi_c/\chi_{c,dl}$ [-]
		$\chi_c = \chi_c^*$ [-]	$\chi_{c,dl}$ [-]	
1500	0,528	0,591	0,827	0,715
2000	0,704	0,534	0,722	0,740
2500	0,880	0,470	0,612	0,768
3000	1,056	0,405	0,508	0,797
3500	1,232	0,345	0,419	0,823
4000	1,408	0,294	0,346	0,850
4500	1,584	0,251	0,289	0,869

Tab. 3.15: Knicklängen a_{QSt} mit zugehörigen Abminderungsfaktoren für knickstabähnliches Verhalten von endenden ($\chi_c = \chi_c^*$) und durchlaufenden ($\chi_{c,dl}$) Längssteifen für System S1; $t_{LSt} = 8$ [mm] – Modell 2

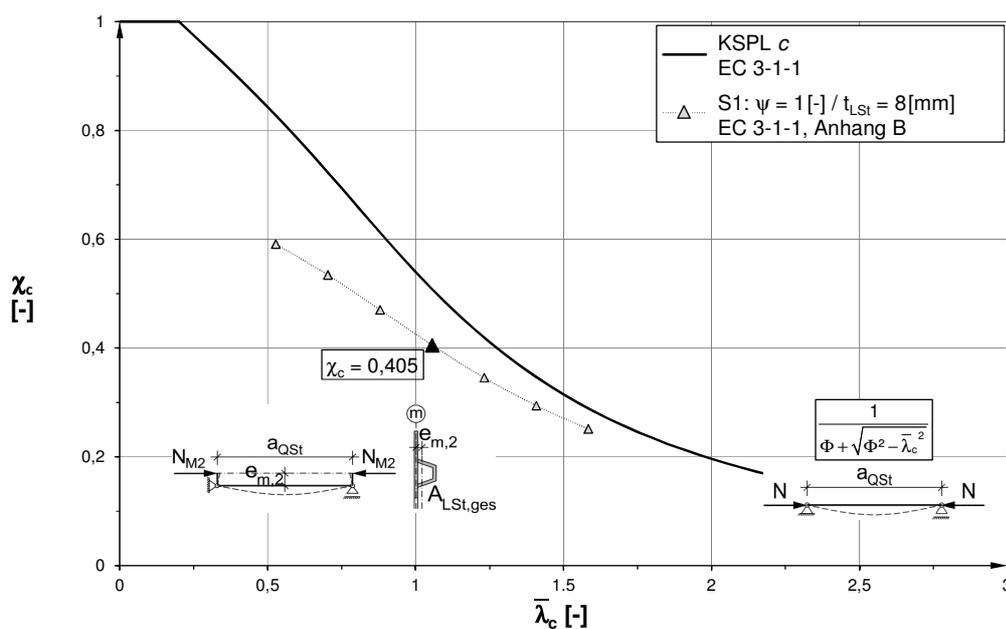


Abb. 3.4: Knickstabähnliches Verhalten des einfach-symmetrischen „Längssteifenersatzstabes“ mit den Knicklängen $a_{QSt} = 1500$ [mm] bis 4500 [mm] (Schrittweite von 500 [mm]) für System S1; $t_{LSt} = 8$ [mm] im Vergleich zur Knickspannungslinie c – Modell 2

Daraus ist der Einfluss der zusätzlichen Exzentrizität $e_{m,2}$ bei endenden Längssteifen erkennbar, welcher mit kleiner werdendem Quersteifenabstand a_{QSt} zunimmt.

d.) Plattenartiges Verhalten

Die Ermittlung des Abminderungsfaktors ρ_p für plattenartiges Verhalten erfolgt nach Eurocode 3-1-5 [1]. Der Lastfaktor α_{cr} wird dabei jedoch dem maßgebenden globalen Eigenwert $\phi_{cr, glob}$ aus der linearen Beulanalyse (LBA) gleichgesetzt.

Die Tab. 3.16 zeigt den Abminderungsfaktor ρ_p und die zugehörigen Bemessungsgrößen für plattenartiges Verhalten.

	end. LSt	dl. LSt	
$\alpha_{cr} = \phi_{cr, glob}$	48,014	41,232	[-]
$\sigma_{cr, p}$	480,14	412,32	[N/mm ²]
$\alpha_{ult, k}$	35,5	35,5	[-]
$\bar{\lambda}_p$	0,860	0,928	[-]
ψ	1,0	1,0	[-]
ρ_p	0,865	0,822	[-]

Tab. 3.16: Bemessungsgrößen für plattenartiges Verhalten für System S1; $t_{LSt} = 8$ [mm] – *Modell 2*

e.) Interaktion zwischen plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten

Die zuvor ermittelten Reduktionsfaktoren für knickstabähnliches ($\chi_c = \chi_c^*$) und plattenartiges (ρ_p) Verhalten werden gemäß der Regelung in Eurocode 3-1-5 [1] miteinander kombiniert und ergeben den endgültigen Abminderungsfaktor ρ_c der Beultragfähigkeit.

Angesichts der vorliegenden Normalspannungsverteilung $\psi = 1,0$ [-] wird die elastische kritische Knickspannung $\sigma_{cr, c}$ der Knickspannung $\sigma_{cr, s\ell}$ der höchstbelasteten, nahe dem Druckrand gelegenen Längssteife gemäß [1] gleichgesetzt.

$$\sigma_{cr, c} = \sigma_{cr, s\ell} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{LSt, br}}{A_{LSt, br} \cdot a_{QSt}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 18597420}{13447,3 \cdot 3000^2} = 318,49 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

In Tab. 3.17 sind die ideale Knickspannung $\sigma_{cr,c}$ und die Interaktionsfaktoren ξ für knickstabähnliches und plattenartiges Verhalten ersichtlich.

	end. LSt	dl. LSt	
$\sigma_{cr,c} = \sigma_{cr,s\ell}$	318,49		[N/mm ²]
ξ	0,508	0,295	[-]

Tab. 3.17: Ideale Knickspannung $\sigma_{cr,c}$ und Interaktionsfaktor ξ für System S1; $t_{LSt} = 8$ [mm] – *Modell 2*

Der zugehörige Laststeigerungsfaktor (LSF) aus der nichtlinearen Traglaststudie (GMNIA) nach Anhang A, Abschnitt 5, ist in Tab. 3.18 angegeben. Zudem findet sich – getrennt nach den berücksichtigten Einflussgrößen ($f_{\sigma,LSt}$; ϕ_{cr}) – eine prozentuale Gegenüberstellung des GMNIA-Laststeigerungsfaktors (LSF = 100 %) zu dem resultierenden Abminderungsfaktor ρ_c der Beultragfähigkeit des längsausgesteiften Teilfeldes mit endenden Längssteifen nach *Modell 2* für den exakten und konservativen Ansatz mit der Annahme $N_{R,LSt} = N_{R,fy} = A_{LSt,br} \cdot f_y$ (keine Iteration für χ_c erforderlich).

	GMNIA	<i>Modell 2</i> mit χ_c		<i>Modell 2</i> mit χ_c (konservativ)	
		$\rho_{p,dl}$	$\rho_{p,end}$	$\rho_{p,dl}$	$\rho_{p,end}$
ρ_c [-]	0,557	0,614	0,754	0,591	0,742
Δ [%]	-	+10,3	+35,3	+6,1	+33,3

Tab. 3.18: Resultierende Abminderungsfaktoren ρ_c nach GMNIA (= LSF) und *Modell 2* für System S1 ($a_{QSt} = 3000$ [mm]); $t_{LSt} = 8$ [mm]

Anmerkung:

Für *Modell 2* gilt $\chi_c = \chi_c^*$.

3.1.2 System S1: $t_{LSt} = 10$ [mm] / Modell 1

a.) Bezugsgrößen

Der Nachweisführung basiert auf den allgemeinen Bezugsgrößen der Tab. 3.19.

f_y	355 [N/mm ²]
γ_{M1}	1,0 [-]
$N_{Ref,fy}$	5111874 [N]
$N_{ges,fy}$	10223748 [N]
σ_{Rf}	340,79 [N/mm ²]

Tab. 3.19: Bezugsgrößen für System S1; $t_{LSt} = 10$ [mm] – Modell 1

Als Systemgrößen gelten die Querschnittsflächen der Randfelder ($A_{Rf,br}$; $A_{Rf,ges}$) sowie jene des mittleren Teilfeldes ($A_{LSt,br}$; $A_{Bf,ges}$), die „Bruttobreite“ b_{br} , die Knickstablänge a_{QSt} , die Lastausmitte $e_{m,1}$, das Trägheitsmoment $I_{LSt,br}$ und das Widerstandsmoment $W_{m,1}$ des Bruttoquerschnittes (in Achse m) gemäß der nachfolgenden Abb. 3.5. bzw. Tab. 3.20.

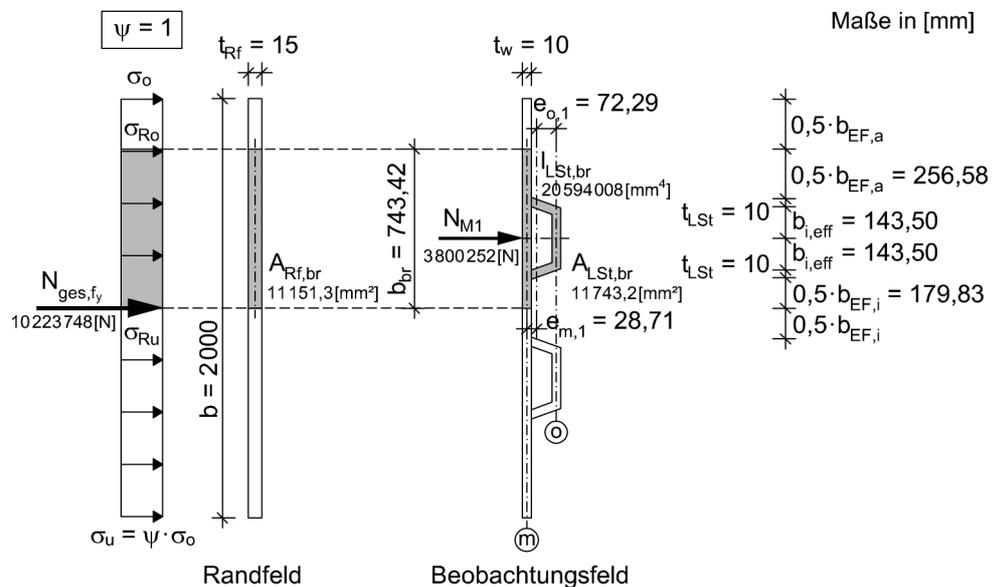


Abb. 3.5: Querschnitte und Beanspruchung für Systems S1; $t_{LSt} = 10$ [mm] – Modell 1

$A_{Rf,br}$	11 151,3 [mm ²]
$A_{Rf,ges}$	30000 [mm ²]
$A_{LSt,br}$	11 743,2 [mm ²]
$A_{Bf,ges}$	28618,1 [mm ²]
a_{QSt}	3000 [mm]
$b_{eff,M1} = b_{br}$	743,42 [mm]
$e_{m,1}$	28,71 [mm]
$I_{LSt,br}$	20594008 [mm ⁴]
$W_{m,1}$	717311 [mm ³]

Tab. 3.20: Querschnittswerte für System S1; $t_{LSt} = 10$ [mm] – Modell 1

In Tab. 3.21 findet sich die Zusammenfassung der ermittelten Bemessungsgrößen der Einwirkung und der Tragfähigkeit.

N_{M1}	3800252 [N]
$N_{R,fy}$	4 168849 [N]
$M_{m,M1}$	109105245 [Nmm]
$M_{R,fy}$	254645519 [Nmm]
$\sigma_{LSt,br}$	323,61 [N/mm ²]
$f_{\sigma,LSt}$	0,912 [-]

Tab. 3.21: Bemessungsgrößen für System S1; $t_{LSt} = 10$ [mm] – Modell 1

b.) Knicken am Ersatzstab – zentrischer Druck mit Knickspannungslinie

Die Grundlage für die Erfassung des knickstabähnlichen Verhaltens χ_c endender Längssteifen stellt für den geschlossenen Steifenquerschnitt der Abminderungsfaktor $\chi_{c,dI}$ – gemäß dem Bemessungsvorschlag für geschlossene, durchlaufende Längssteifen in [5], vereinfacht mit der Knickspannungslinie c des Eurocode 3-1-1 [2] berechnet – dar.

Die Tab. 3.22 fasst den Abminderungsfaktor $\chi_{c,dl}$ mit den zugehörigen Bemessungsgrößen für das knickstabähnliche Verhalten des Ersatzstabes zusammen.

i	41,88 [mm]
λ_1	76,40 [-]
$\bar{\lambda}_c$	0,938 [-]
$\chi_{c,dl}$	0,577 [-]
$N_{R,LSt,dl}$	2404849 [N]

Tab. 3.22: Bemessungsgrößen für das knickstabähnliche Verhalten des Ersatzstabes für System S1; $t_{LSt} = 10$ [mm] – Modell 1

c.) Biegeknick-Nachweis und knickstabähnliches Verhalten des einfach-symmetrischen Querschnittes mit Exzentrizität

Die Bestimmung des Abminderungsfaktors χ_c für das Ingenieurmodell mit einfach-symmetrischem Querschnitt und endenden Längssteifen basiert auf Eurocode 3-1-1, Anhang B [3], und dem zuvor ermittelten Abminderungsfaktor $\chi_{c,dl}$.

Der Biegeknick-Nachweis (BK-NW), die zugehörigen Beiwerte und Biegeknicktragfähigkeiten sowie der Abminderungsfaktor χ_c (bzw. χ_c^*) für knickstabähnliches Verhalten des einfach-symmetrischen Bruttoquerschnittes sind in der anschließenden Tab. 3.23 zusammenfassend angeführt.

n_y	0,691 [-]
k_y	$1,648 \leq 1,691$ [-] ✓
k_y	1,648 [-]
C_{my}	1,0 [-]
BK-NW:	$0,691 + 0,309 = 1,0$ ✓
$N_{R,LSt}$	1662053 [N] (= 0,40 · $N_{R,ly}$)
$M_{R,LSt}$	47717546 [Nmm]
χ_c	0,399 [-]
χ_c^*	0,437 [-]

Tab. 3.23: Biegeknick-Nachweis mit resultierenden Lastgrößen und Abminderungsfaktoren des knickstabähnlichen Verhaltens für System S1; $t_{LSt} = 10$ [mm] – Modell 1

Nachfolgend wird in Tab. 3.24 und Abb. 3.6 das knickstabähnliche Verhalten anhand weiterer angenommenen Knicklängen a_{QSt} erfasst. Vergleichsweise sind die Abminderungsfaktoren für das knickstabähnliche Verhalten von geschlossenen, endenden (χ_c bzw. χ_c^*) und durchlaufenden ($\chi_{c,dl}$ vereinfacht nach Knickspannungslinie c berechnet) Längssteifen samt dem Verhältniswert $\chi_c/\chi_{c,dl}$ bzw. $\chi_c^*/\chi_{c,dl}$ angegeben.

a_{QSt} [mm]	$\bar{\lambda}_c$ [-]	end. LSt.		dl. LSt.	$\chi_c/\chi_{c,dl}$ [-]	$\chi_c^*/\chi_{c,dl}$ [-]
		χ_c [-]	χ_c^* [-]	$\chi_{c,dl}$ [-]		
1500	0,469	0,563	0,617	0,860	0,655	0,717
2000	0,625	0,510	0,559	0,770	0,662	0,726
2500	0,781	0,454	0,498	0,674	0,674	0,739
3000	0,938	0,399	0,437	0,577	0,692	0,757
3500	1,094	0,350	0,384	0,487	0,719	0,789
4000	1,250	0,307	0,337	0,410	0,749	0,822
4500	1,407	0,269	0,295	0,347	0,775	0,850

Tab. 3.24: Knicklängen a_{QSt} mit zugehörigen Abminderungsfaktoren für knickstabähnliches Verhalten von endenden (χ_c bzw. χ_c^*) und durchlaufenden ($\chi_{c,dl}$) Längssteifen für System S1; $t_{LSt} = 10$ [mm] – Modell 1

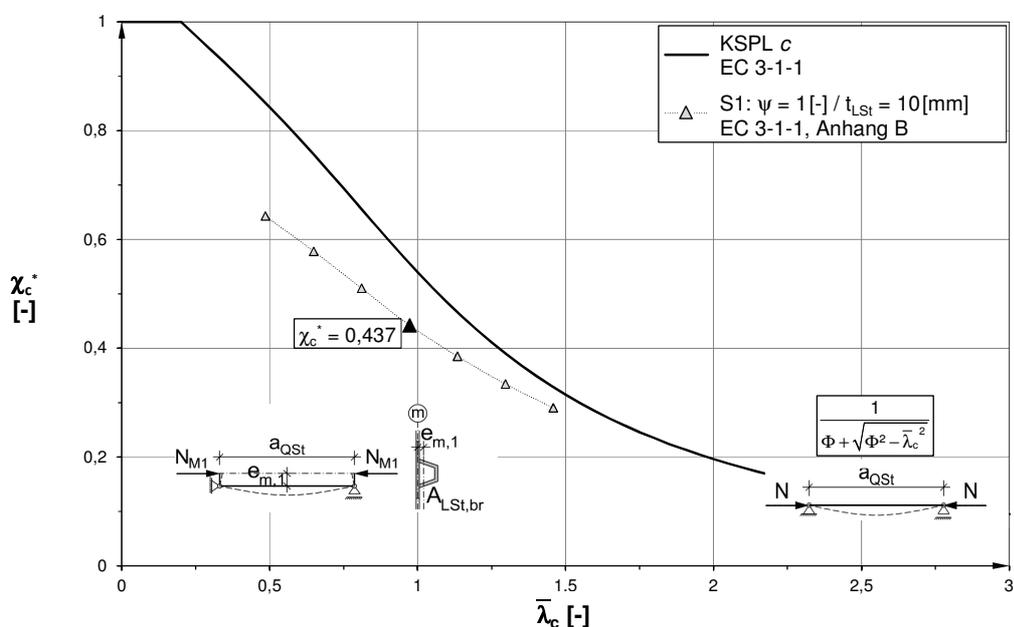


Abb. 3.6: Knickstabähnliches Verhalten des einfach-symmetrischen „Längssteifenersatzstabes“ mit den Knicklängen $a_{QSt} = 1500$ [mm] bis 4500 [mm] (Schrittweite von 500 [mm]) für System S1; $t_{LSt} = 10$ [mm] im Vergleich zur Knickspannungslinie c – Modell 1

Daraus ist der Einfluss der zusätzlichen Exzentrizität $e_{m,1}$ bei endenden Längssteifen erkennbar, welcher mit kleiner werdendem Quersteifenabstand a_{QSt} zunimmt.

d.) Plattenartiges Verhalten

Die Ermittlung des Abminderungsfaktors ρ_p für plattenartiges Verhalten erfolgt nach Eurocode 3-1-5 [1]. Der Lastfaktor α_{cr} wird dabei jedoch dem maßgebenden globalen Eigenwert $\phi_{cr, glob}$ aus der linearen Beulanalyse (LBA) gleichgesetzt.

Die Tab. 3.25 zeigt den Abminderungsfaktor ρ_p und die zugehörigen Bemessungsgrößen für plattenartiges Verhalten.

	end. LSt	dl. LSt	
$\alpha_{cr} = \phi_{cr, glob}$	51,573	44,534	[-]
$\sigma_{cr, p}$	515,73	445,34	[N/mm ²]
$\alpha_{ult, k}$	35,5	35,5	[-]
$\bar{\lambda}_p$	0,830	0,893	[-]
ψ	1,0	1,0	[-]
ρ_p	0,886	0,844	[-]

Tab. 3.25: Bemessungsgrößen für plattenartiges Verhalten für System S1; $t_{LSt} = 10$ [mm] – Modell 1

e.) Interaktion zwischen plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten

Die zuvor ermittelten Reduktionsfaktoren für knickstabähnliches (χ_c bzw. χ_c^*) und plattenartiges (ρ_p) Verhalten werden gemäß der Regelung in Eurocode 3-1-5 [1] miteinander kombiniert und ergeben den endgültigen Abminderungsfaktor ρ_c der Beultragfähigkeit.

Angesichts der vorliegenden Normalspannungsverteilung $\psi = 1,0$ [-] wird die elastische kritische Knickspannung $\sigma_{cr, c}$ der Knickspannung $\sigma_{cr, s\ell}$ der höchstbelasteten, nahe dem Druckrand gelegenen Längssteife gemäß [1] gleichgesetzt.

$$\sigma_{cr, c} = \sigma_{cr, s\ell} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{LSt, br}}{A_{LSt, br} \cdot a_{QSt}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 20594008}{11743,2 \cdot 3000^2} = 403,86 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

In Tab. 3.26 sind die ideale Knickspannung $\sigma_{cr,c}$ und die Interaktionsfaktoren ξ für knickstabähnliches und plattenartiges Verhalten ersichtlich.

	end. LSt	dl. LSt	
$\sigma_{cr,c} = \sigma_{cr,s\ell}$	403,86		[N/mm ²]
ξ	0,277	0,103	[-]

Tab. 3.26: Ideale Knickspannung $\sigma_{cr,c}$ und Interaktionsfaktor ξ für System S1; $t_{LSt} = 10$ [mm] – *Modell 1*

Der zugehörige Laststeigerungsfaktor (LSF) aus der nichtlinearen Traglaststudie (GMNIA) nach Anhang A, Abschnitt 5, ist in Tab. 3.27 angegeben. Zudem findet sich – getrennt nach den berücksichtigten Einflussgrößen ($f_{\sigma,LSt}$; ϕ_{cr}) – eine prozentuale Gegenüberstellung des GMNIA-Laststeigerungsfaktors (LSF = 100 %) zu dem resultierenden Abminderungsfaktor ρ_c der Beultragfähigkeit des längsausgesteiften Teilfeldes mit endenden Längssteifen nach *Modell 1*.

	GMNIA	<i>Modell 1 mit χ_c^*</i>		<i>Modell 1 mit χ_c</i>	
		$\rho_{p,dl}$	$\rho_{p,end}$	$\rho_{p,dl}$	$\rho_{p,end}$
ρ_c [-]	0,548	0,517	0,651	0,485	0,631
Δ [%]	-	-5,7	+18,9	-11,4	+15,2

Tab. 3.27: Resultierende Abminderungsfaktoren ρ_c nach GMNIA (= LSF) und *Modell 1* für System S1 ($a_{QSt} = 3000$ [mm]); $t_{LSt} = 10$ [mm]

In Tab. 3.28 sind die Ergebnisse für das *Modell 1* mit der konservativen Annahme $N_{R,LSt} = N_{R,fy} = A_{LSt,br} \cdot f_y$ angeführt (keine Iteration für χ_c bzw. χ_c^* erforderlich).

	GMNIA	<i>Modell 1 mit χ_c^* (konservativ)</i>		<i>Modell 1 mit χ_c (konservativ)</i>	
		$\rho_{p,dl}$	$\rho_{p,end}$	$\rho_{p,dl}$	$\rho_{p,end}$
ρ_c [-]	0,548	0,462	0,616	0,436	0,599
Δ [%]	-	-15,7	+12,4	-20,5	+9,3

Tab. 3.28: Resultierende Abminderungsfaktoren ρ_c nach GMNIA (= LSF) und *Modell 1* (konservativ) für System S1 ($a_{QSt} = 3000$ [mm]); $t_{LSt} = 10$ [mm]

Folglich lässt sich für dieses Beispiel eine hinreichende Übereinstimmung mit den numerischen Ergebnissen mittels der Kombination „mit $f_{\sigma,LSt}$ / mit $\phi_{cr,dl}$ “ erzielen.

3.2 System S2

3.2.1 System S2: $t_{LSt} = 8[\text{mm}]$ / Modell 1

a.) Bezugsgrößen

Die Nachweisführung basiert auf den allgemeinen Bezugsgrößen der Tab. 3.29.

f_y	355 [N/mm ²]
γ_{M1}	1,0 [-]
$N_{Ref,fy}$	5158594 [N]
$N_{ges,fy}$	10317188 [N]
σ_{Rf}	343,91 [N/mm ²]

Tab. 3.29: Bezugsgrößen für System S2; $t_{LSt} = 8[\text{mm}]$ – Modell 1

Als Systemgrößen gelten die Querschnittsflächen der Randfelder ($A_{Rf,br}$; $A_{Rf,ges}$) sowie jene des mittleren Teilfeldes ($A_{LSt,br}$; $A_{Bf,ges}$), die „Bruttobreite“ b_{br} , die Knickstablänge a_{QSt} , die Lastausmitte $e_{m,1}$, das Trägheitsmoment $I_{LSt,br}$ und das Widerstandsmoment $W_{m,1}$ des Bruttoquerschnittes (in Achse m) gemäß der nachfolgenden Abb. 3.7. bzw. Tab. 3.30.

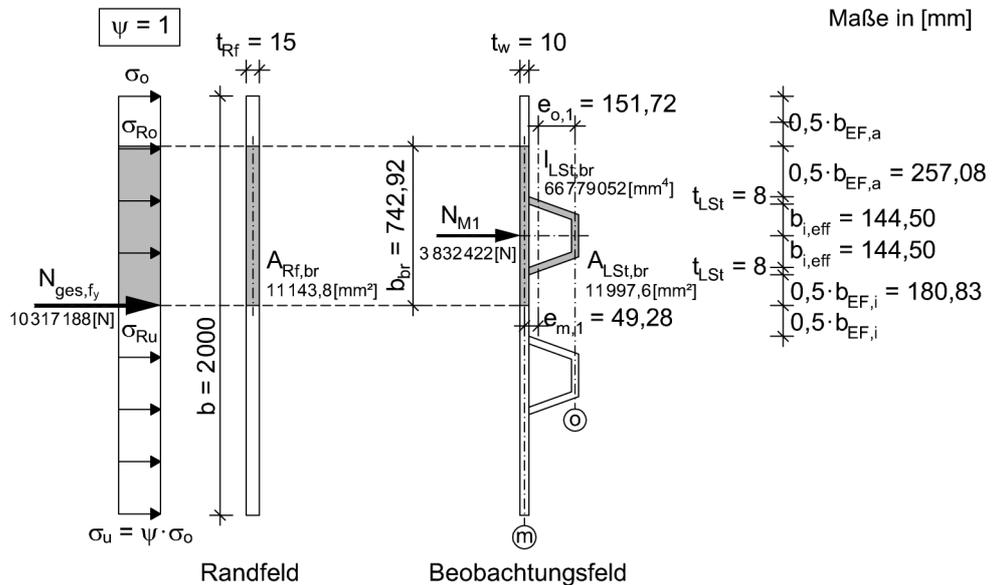


Abb. 3.7: Querschnitte und Beanspruchung des Systems S2; $t_{LSt} = 8[\text{mm}]$ – Modell 1

$A_{Rf,br}$	11 143,8 [mm ²]
$A_{Rf,ges}$	30000 [mm ²]
$A_{LSt,br}$	11 997,6 [mm ²]
$A_{Bf,ges}$	29 136,8 [mm ²]
a_{QSt}	3000 [mm]
b_{br}	742,92 [mm]
$e_{m,1}$	49,28 [mm]
$I_{LSt,br}$	66779052 [mm ⁴]
$W_{m,1}$	1 355094 [mm ³]

Tab. 3.30: Querschnittswerte für System S2; $t_{LSt} = 8$ [mm] – *Modell 1*

In Tab. 3.31 findet sich die Zusammenfassung der ermittelten Bemessungsgrößen der Einwirkung und der Tragfähigkeit.

N_{M1}	3832422 [N]
$N_{R,fy}$	4259154 [N]
$M_{m,M1}$	188861779 [Nmm]
$M_{R,fy}$	481058508 [Nmm]
$\sigma_{LSt,br}$	319,43 [N/mm ²]
$f_{\sigma,LSt}$	0,900 [-]

Tab. 3.31: Bemessungsgrößen für System S2; $t_{LSt} = 8$ [mm] – *Modell 1*

b.) Knicken am Ersatzstab – zentrischer Druck mit Knickspannungslinie

Die Grundlage für die Erfassung des knickstabähnlichen Verhaltens χ_c endender Längssteifen stellt für den geschlossenen Steifenquerschnitt der Abminderungsfaktor $\chi_{c,dI}$ – gemäß dem Bemessungsvorschlag für geschlossene, durchlaufende Längssteifen in [5], vereinfacht mit der Knickspannungslinie c des Eurocode 3-1-1 [2] berechnet – dar.

Die Tab. 3.32 fasst den Abminderungsfaktor $\chi_{c,dl}$ mit den zugehörigen Bemessungsgrößen für das knickstabähnliche Verhalten des Ersatzstabes zusammen.

i	74,61 [mm]
λ_1	76,40 [-]
$\bar{\lambda}_c$	0,526 [-]
$\chi_{c,dl}$	0,828 [-]
$N_{R,LSt,dl}$	3527212 [N]

Tab. 3.32: Bemessungsgrößen für das knickstabähnliche Verhalten des Ersatzstabes für System S2; $t_{LSt} = 8$ [mm] – Modell 1

c.) Biegeknick-Nachweis und knickstabähnliches Verhalten des einfach-symmetrischen Querschnittes mit Exzentrizität

Die Bestimmung des Abminderungsfaktors χ_c für das Ingenieurmodell mit einfach-symmetrischem Querschnitt und endenden Längssteifen basiert auf Eurocode 3-1-1, Anhang B [3], und dem zuvor ermittelten Abminderungsfaktor $\chi_{c,dl}$.

Der Biegeknick-Nachweis (BK-NW), die zugehörigen Beiwerte und Biegeknicktragfähigkeiten sowie der Abminderungsfaktor χ_c (bzw. χ_c^*) für knickstabähnliches Verhalten des einfach-symmetrischen Bruttoquerschnittes sind in der anschließenden Tab. 3.33 zusammenfassend angeführt.

n_y	0,672 [-]
k_y	$1,353 \leq 1,672$ [-] ✓
k_y	1,353 [-]
C_{my}	1,0 [-]
BK-NW:	$0,672 + 0,328 = 1,0$ ✓
$N_{R,LSt}$	2368751 [N] (= $0,56 \cdot N_{R,ly}$)
$M_{R,LSt}$	116732053 [Nmm]
χ_c	0,556 [-]
χ_c^*	0,618 [-]

Tab. 3.33: Biegeknick-Nachweis mit resultierenden Lastgrößen und Abminderungsfaktoren des knickstabähnlichen Verhaltens für System S2; $t_{LSt} = 8$ [mm] – Modell 1

Nachfolgend wird in Tab. 3.34 und Abb. 3.8 das knickstabähnliche Verhalten anhand weiterer angenommenen Knicklängen a_{QSt} erfasst. Vergleichsweise sind die Abminderungsfaktoren für das knickstabähnliche Verhalten von geschlossenen, endenden (χ_c bzw. χ_c^*) und durchlaufenden ($\chi_{c,dl}$ vereinfacht nach Knickspannungslinie c berechnet) Längssteifen samt dem Verhältniswert $\chi_c/\chi_{c,dl}$ bzw. $\chi_c^*/\chi_{c,dl}$ angegeben.

a_{QSt} [mm]	$\bar{\lambda}_c$ [-]	end. LSt.		dl. LSt.	$\chi_c/\chi_{c,dl}$ [-]	$\chi_c^*/\chi_{c,dl}$ [-]
		χ_c [-]	χ_c^* [-]	$\chi_{c,dl}$ [-]		
1500	0,263	0,647	0,719	0,968	0,668	0,743
2000	0,351	0,617	0,685	0,923	0,668	0,742
2500	0,439	0,587	0,652	0,877	0,669	0,743
3000	0,526	0,556	0,618	0,828	0,671	0,746
3500	0,614	0,525	0,584	0,777	0,676	0,752
4000	0,702	0,493	0,548	0,724	0,681	0,757
4500	0,790	0,461	0,513	0,669	0,689	0,767

Tab. 3.34: Knicklängen a_{QSt} mit zugehörigen Abminderungsfaktoren für knickstabähnliches Verhalten von endenden (χ_c bzw. χ_c^*) und durchlaufenden ($\chi_{c,dl}$) Längssteifen für System S2; $t_{LSt} = 8$ [mm] – Modell 1

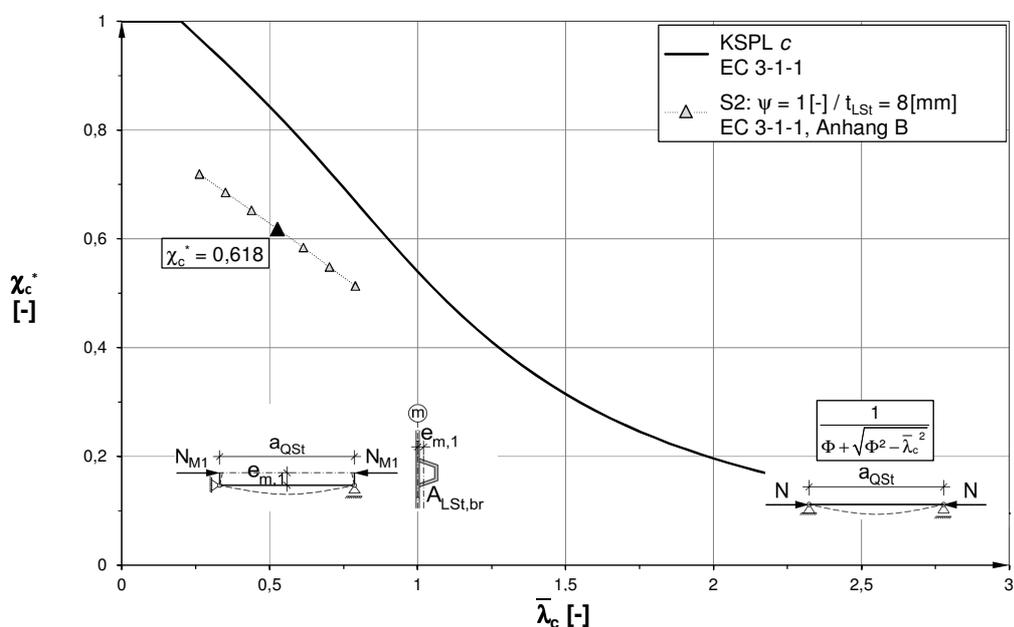


Abb. 3.8: Knickstabähnliches Verhalten des einfach-symmetrischen „Längssteifenersatzstabes“ mit den Knicklängen $a_{QSt} = 1500$ [mm] bis 4500 [mm] (Schrittweite von 500 [mm]) für System S2; $t_{LSt} = 8$ [mm] im Vergleich zur Knickspannungslinie c – Modell 1

Daraus ist der Einfluss der zusätzlichen Exzentrizität $e_{m,1}$ bei endenden Längssteifen erkennbar, welcher mit kleiner werdendem Quersteifenabstand a_{QSt} zunimmt.

d.) Plattenartiges Verhalten

Die Ermittlung des Abminderungsfaktors ρ_p für plattenartiges Verhalten erfolgt nach Eurocode 3-1-5 [1]. Stellvertretend für den aufgrund der hohen Systemsteifigkeit in der linearen Beulanalyse (LBA) nicht ermittelbaren, globalen Eigenwert $\phi_{cr, glob}$ wird hier der lokale Eigenwert $\phi_{cr, lok}$ angeführt. Dieser bleibt in der Nachweisführung jedoch unberücksichtigt, da nur knickstabähnliches Verhalten zum Tragen kommt ($\xi = 0[-]$).

Die Tab. 3.35 zeigt den Abminderungsfaktor ρ_p und die zugehörigen Bemessungsgrößen für plattenartiges Verhalten.

	end. LSt	dl. LSt	
$\alpha_{cr} = \phi_{cr, lok}$	26,927	34,894	[-]
$\sigma_{cr, p}$	269,27	348,94	[N/mm ²]
$\alpha_{ult, k}$	35,5	35,5	[-]
$\bar{\lambda}_p$	1,148	1,009	[-]
ψ	1,0	1,0	[-]
ρ_p	0,704	0,775	[-]

Tab. 3.35: Bemessungsgrößen für plattenartiges Verhalten für System S2; $t_{LSt} = 8$ [mm] – *Modell 1*

e.) Interaktion zwischen plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten

Die zuvor ermittelten Reduktionsfaktoren für knickstabähnliches (χ_c bzw. χ_c^*) und plattenartiges (ρ_p) Verhalten werden gemäß der Regelung in Eurocode 3-1-5 [1] miteinander kombiniert und ergeben den endgültigen Abminderungsfaktor ρ_c der Beultragfähigkeit.

Angesichts der vorliegenden Normalspannungsverteilung $\psi = 1,0[-]$ wird die elastische kritische Knickspannung $\sigma_{cr, c}$ der Knickspannung $\sigma_{cr, sl}$ der höchstbelasteten, nahe dem Druckrand gelegenen Längssteife gemäß [1] gleichgesetzt.

$$\sigma_{cr, c} = \sigma_{cr, sl} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{LSt, br}}{A_{LSt, br} \cdot a_{QSt}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 66779052}{11997,6 \cdot 3000^2} = 1281,80 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

In Tab. 3.36 sind die ideale Knickspannung $\sigma_{cr,c}$ und die Interaktionsfaktoren ξ für knickstabähnliches und plattenartiges Verhalten ersichtlich.

	end. LSt	dl. LSt	
$\sigma_{cr,c} = \sigma_{cr,s\ell}$	1281,80		[N/mm ²]
ξ	0	0	[-]

Tab. 3.36: Ideale Knickspannung $\sigma_{cr,c}$ und Interaktionsfaktor ξ für System S2; $t_{LSt} = 8$ [mm] – *Modell 1*

Der zugehörige Laststeigerungsfaktor (LSF) aus der nichtlinearen Traglaststudie (GMNIA) nach Anhang A, Abschnitt 5, ist in Tab. 3.37 angegeben. Zudem findet sich – getrennt nach den berücksichtigten Einflussgrößen ($f_{\sigma,LSt}$; ϕ_{cr}) – eine prozentuale Gegenüberstellung des GMNIA-Laststeigerungsfaktors (LSF = 100 %) zu dem resultierenden Abminderungsfaktor ρ_c der Beultragfähigkeit des längsausgesteiften Teilfeldes mit endenden Längssteifen nach *Modell 1*.

	GMNIA	<i>Modell 1</i> mit χ_c^*		<i>Modell 1</i> mit χ_c	
		$\rho_{p,dl}$	$\rho_{p,end}$	$\rho_{p,dl}$	$\rho_{p,end}$
ρ_c [-]	0,624	0,618	0,618	0,556	0,556
Δ [%]	-	-0,9	-0,9	-10,9	-10,9

Tab. 3.37: Resultierende Abminderungsfaktoren ρ_c nach GMNIA (= LSF) und *Modell 1* für System S2 ($a_{QSt} = 3000$ [mm]); $t_{LSt} = 8$ [mm]

In Tab. 3.38 sind die Ergebnisse für das *Modell 1* mit der konservativen Annahme $N_{R,LSt} = N_{R,fy} = A_{LSt,br} \cdot f_y$ angeführt (keine Iteration für χ_c bzw. χ_c^* erforderlich).

	GMNIA	<i>Modell 1</i> mit χ_c^* (konservativ)		<i>Modell 1</i> mit χ_c (konservativ)	
		$\rho_{p,dl}$	$\rho_{p,end}$	$\rho_{p,dl}$	$\rho_{p,end}$
ρ_c [-]	0,624	0,578	0,578	0,521	0,521
Δ [%]	-	-7,3	-7,3	-16,6	-16,6

Tab. 3.38: Resultierende Abminderungsfaktoren ρ_c nach GMNIA (= LSF) und *Modell 1* (konservativ) für System S2 ($a_{QSt} = 3000$ [mm]); $t_{LSt} = 8$ [mm]

Folglich lässt sich für dieses Beispiel eine hinreichende Übereinstimmung mit den numerischen Ergebnissen mittels der Kombination „mit $f_{\sigma,LSt}$ / mit $\phi_{cr,dl}$ “ erzielen.

3.2.2 System S2: $t_{LSt} = 10$ [mm] / Modell 1

a.) Bezugsgrößen

Die Nachweisführung basiert auf den allgemeinen Bezugsgrößen der Tab. 3.39.

f_y	355 [N/mm ²]
γ_{M1}	1,0 [-]
$N_{Ref,fy}$	5563005 [N]
$N_{ges,fy}$	11126011 [N]
σ_{Rf}	370,87 [N/mm ²]

Tab. 3.39: Bezugsgrößen beider Rechenmodelle für System S2; $t_{LSt} = 10$ [mm]

Als Systemgrößen gelten die Querschnittsflächen der Randfelder ($A_{Rf,br}$; $A_{Rf,ges}$) sowie jene des mittleren Teilfeldes ($A_{LSt,br}$; $A_{Bf,ges}$), die „Bruttobreite“ b_{br} , die Knickstablänge a_{QSt} , die Lastausmitte $e_{m,1}$, das Trägheitsmoment $I_{LSt,br}$ und das Widerstandsmoment $W_{m,1}$ des Bruttoquerschnittes (in Achse m) gemäß der nachfolgenden Abb. 3.9 bzw. Tab. 3.40.

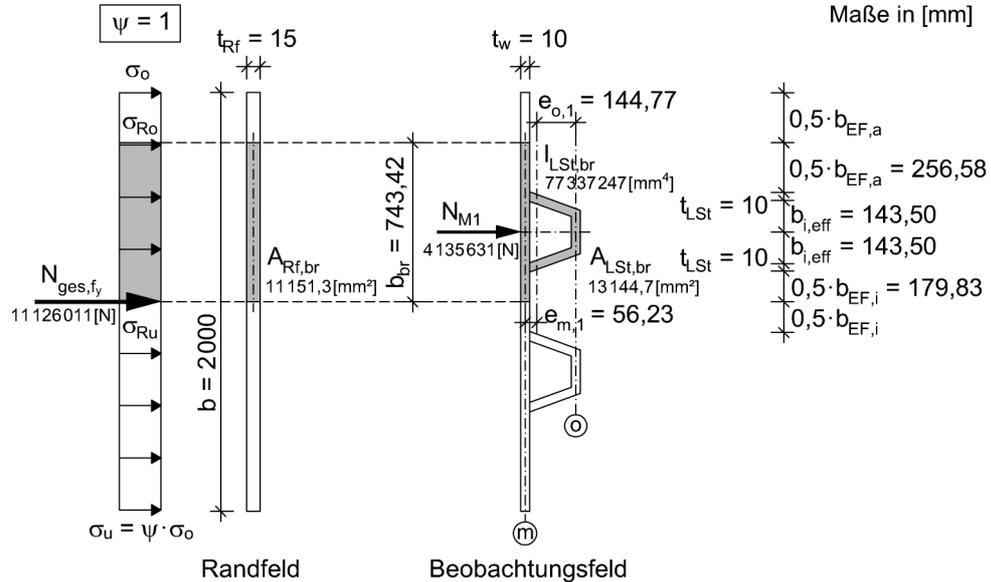


Abb. 3.9: Querschnitte und Beanspruchung des Systems S2; $t_{LSt} = 10$ [mm] – Modell 1

$A_{Rf,br}$	11 151,3 [mm ²]
$A_{Rf,ges}$	30000 [mm ²]
$A_{LSt,br}$	13 144,7 [mm ²]
$A_{Bf,ges}$	31 421 [mm ²]
a_{QSt}	3000 [mm]
b_{br}	743,42 [mm]
$e_{m,1}$	56,23 [mm]
$I_{LSt,br}$	77337247 [mm ⁴]
$W_{m,1}$	1 375373 [mm ³]

Tab. 3.40: Querschnittswerte für System S2; $t_{LSt} = 10$ [mm] – Modell 1

In Tab. 3.41 findet sich die Zusammenfassung der ermittelten Bemessungsgrößen der Einwirkung und der Tragfähigkeit.

N_{M1}	4 135 631 [N]
$N_{R,fy}$	4 666 364 [N]
$M_{m,M1}$	232 546 525 [Nmm]
$M_{R,fy}$	488 257 563 [Nmm]
$\sigma_{LSt,br}$	314,62 [N/mm ²]
$f_{\sigma,LSt}$	0,886 [-]

Tab. 3.41: Bemessungsgrößen für System S2; $t_{LSt} = 10$ [mm] – Modell 1

b.) Knicken am Ersatzstab – zentrischer Druck mit Knickspannungslinie

Die Grundlage für die Erfassung des knickstabähnlichen Verhaltens χ_c endender Längssteifen stellt für den geschlossenen Steifenquerschnitt der Abminderungsfaktor $\chi_{c,dI}$ – gemäß dem Bemessungsvorschlag für geschlossene, durchlaufende Längssteifen in [5], vereinfacht mit der Knickspannungslinie c des Eurocode 3-1-1 [2] berechnet – dar.

Die Tab. 3.42 fasst den Abminderungsfaktor $\chi_{c,dl}$ mit den zugehörigen Bemessungsgrößen für das knickstabähnliche Verhalten des Ersatzstabes zusammen.

i	76,60 [mm]
λ_1	76,40 [-]
$\bar{\lambda}_c$	0,512 [-]
$\chi_{c,dl}$	0,836 [-]
$N_{R,LSt,dl}$	3902446 [N]

Tab. 3.42: Bemessungsgrößen für das knickstabähnliche Verhalten des Ersatzstabes für System S2; $t_{LSt} = 10$ [mm] – Modell 1

c.) Biegeknick-Nachweis und knickstabähnliches Verhalten des einfach-symmetrischen Querschnittes mit Exzentrizität

Die Bestimmung des Abminderungsfaktors χ_c für das Ingenieurmodell mit einfach-symmetrischem Querschnitt und endenden Längssteifen basiert auf Eurocode 3-1-1, Anhang B [3], und dem zuvor ermittelten Abminderungsfaktor $\chi_{c,dl}$.

Der Biegeknick-Nachweis (BK-NW), die zugehörigen Beiwerte und Biegeknicktragfähigkeiten sowie der Abminderungsfaktor χ_c (bzw. χ_c^*) für knickstabähnliches Verhalten des einfach-symmetrischen Bruttoquerschnittes sind in der anschließenden Tab. 3.43 zusammenfassend angeführt.

n_y	0,628 [-]
k_y	$1,321 \leq 1,628$ [-] ✓
k_y	1,321 [-]
C_{my}	1,0 [-]
BK-NW:	$0,628 + 0,372 = 1,0$ ✓
$N_{R,LSt}$	2450664 [N] (= $0,53 \cdot N_{R,fy}$)
$M_{R,LSt}$	137800847 [Nmm]
χ_c	0,525 [-]
χ_c^*	0,593 [-]

Tab. 3.43: Biegeknick-Nachweis mit resultierenden Lastgrößen und Abminderungsfaktoren des knickstabähnlichen Verhaltens für System S2; $t_{LSt} = 10$ [mm] – Modell 1

Nachfolgend wird in Tab. 3.44 und Abb. 3.10 das knickstabähnliche Verhalten anhand weiterer angenommenen Knicklängen a_{QSt} erfasst. Vergleichsweise sind die Abminderungsfaktoren für das knickstabähnliche Verhalten von geschlossenen, endenden (χ_c bzw. χ_c^*) und durchlaufenden ($\chi_{c,dl}$ vereinfacht nach Knickspannungslinie c berechnet) Längssteifen samt dem Verhältniswert $\chi_c/\chi_{c,dl}$ bzw. $\chi_c^*/\chi_{c,dl}$ angegeben.

a_{QSt} [mm]	$\bar{\lambda}_c$ [-]	end. LSt.		dl. LSt.	$\chi_c/\chi_{c,dl}$ [-]	$\chi_c^*/\chi_{c,dl}$ [-]
		χ_c [-]	χ_c^* [-]	$\chi_{c,dl}$ [-]		
1500	0,256	0,605	0,683	0,972	0,622	0,703
2000	0,341	0,578	0,653	0,928	0,623	0,704
2500	0,427	0,552	0,622	0,883	0,625	0,704
3000	0,512	0,525	0,593	0,836	0,628	0,709
3500	0,597	0,497	0,561	0,787	0,632	0,713
4000	0,683	0,469	0,530	0,735	0,638	0,721
4500	0,768	0,441	0,497	0,682	0,647	0,729

Tab. 3.44: Knicklängen a_{QSt} mit zugehörigen Abminderungsfaktoren für knickstabähnliches Verhalten von endenden (χ_c bzw. χ_c^*) und durchlaufenden ($\chi_{c,dl}$) Längssteifen für System S2; $t_{LSt} = 10$ [mm] – Modell 1

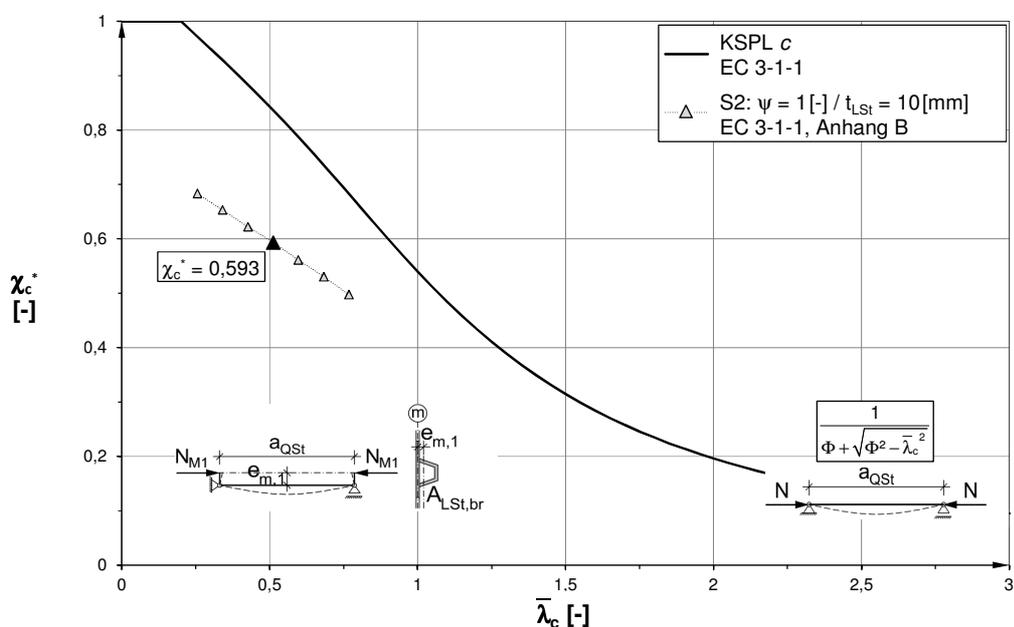


Abb. 3.10: Knickstabähnliches Verhalten des einfach-symmetrischen „Längssteifenersatzstabes“ mit den Knicklängen $a_{QSt} = 1500$ [mm] bis 4500 [mm] (Schrittweite von 500 [mm]) für System S2; $t_{LSt} = 10$ [mm] im Vergleich zur Knickspannungslinie c – Modell 1

Daraus ist der Einfluss der zusätzlichen Exzentrizität $e_{m,1}$ bei endenden Längssteifen erkennbar, welcher mit kleiner werdendem Quersteifenabstand a_{QSt} zunimmt.

d.) Plattenartiges Verhalten

Die Ermittlung des Abminderungsfaktors ρ_p für plattenartiges Verhalten erfolgt nach Eurocode 3-1-5 [1]. Stellvertretend für den aufgrund der hohen Systemsteifigkeit in der linearen Beulanalyse (LBA) nicht ermittelbaren, globalen Eigenwert $\phi_{cr, glob}$ wird hier der lokale Eigenwert $\phi_{cr, lok}$ angeführt. Dieser bleibt in der Nachweisführung jedoch unberücksichtigt, da nur knickstabähnliches Verhalten zum Tragen kommt ($\xi = 0[-]$).

Die Tab. 3.45 zeigt den Abminderungsfaktor ρ_p und die zugehörigen Bemessungsgrößen für plattenartiges Verhalten.

	end. LSt	dl. LSt	
$\alpha_{cr} = \phi_{cr, lok}$	26,103	35,915	[-]
$\sigma_{cr, p}$	261,03	359,15	[N/mm ²]
$\alpha_{ult, k}$	35,5	35,5	[-]
$\bar{\lambda}_p$	1,166	0,994	[-]
ψ	1,0	1,0	[-]
ρ_p	0,696	0,783	[-]

Tab. 3.45: Bemessungsgrößen für plattenartiges Verhalten für System S2; $t_{LSt} = 10$ [mm] – Modell 1

e.) Interaktion zwischen plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten

Die zuvor ermittelten Reduktionsfaktoren für knickstabähnliches (χ_c bzw. χ_c^*) und plattenartiges (ρ_p) Verhalten werden gemäß der Regelung in Eurocode 3-1-5 [1] miteinander kombiniert und ergeben den endgültigen Abminderungsfaktor ρ_c der Beultragfähigkeit.

Angesichts der vorliegenden Normalspannungsverteilung $\psi = 1,0[-]$ wird die elastische kritische Knickspannung $\sigma_{cr, c}$ der Knickspannung $\sigma_{cr, s\ell}$ der höchstbelasteten, nahe dem Druckrand gelegenen Längssteife gemäß [1] gleichgesetzt.

$$\sigma_{cr, c} = \sigma_{cr, s\ell} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{LSt, br}}{A_{LSt, br} \cdot a_{QSt}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 77337247}{13144,7 \cdot 3000^2} = 1354,92 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

In Tab. 3.46 sind die ideale Knickspannung $\sigma_{cr,c}$ und die Interaktionsfaktoren ξ für knickstabähnliches und plattenartiges Verhalten ersichtlich.

	end. LSt	dl. LSt	
$\sigma_{cr,c} = \sigma_{cr,s\ell}$	1354,92		[N/mm ²]
ξ	0	0	[-]

Tab. 3.46: Ideale Knickspannung $\sigma_{cr,c}$ und Interaktionsfaktor ξ für System S2; $t_{LSt} = 10$ [mm] – *Modell 1*

Der zugehörige Laststeigerungsfaktor (LSF) aus der nichtlinearen Traglaststudie (GMNIA) nach Anhang A, Abschnitt 5, ist in Tab. 3.47 angegeben. Zudem findet sich – getrennt nach den berücksichtigten Einflussgrößen ($f_{\sigma,LSt}$; ϕ_{cr}) – eine prozentuale Gegenüberstellung des GMNIA-Laststeigerungsfaktors (LSF = 100 %) zu dem resultierenden Abminderungsfaktor ρ_c der Beultragfähigkeit des längsausgesteiften Teilfeldes mit endenden Längssteifen nach *Modell 1*.

	GMNIA	<i>Modell 1</i> mit χ_c^*		<i>Modell 1</i> mit χ_c	
		$\rho_{p,dl}$	$\rho_{p,end}$	$\rho_{p,dl}$	$\rho_{p,end}$
ρ_c [-]	0,601	0,593	0,593	0,525	0,525
Δ [%]	-	-1,4	-1,4	-12,6	-12,6

Tab. 3.47: Resultierende Abminderungsfaktoren ρ_c nach GMNIA (= LSF) und *Modell 1* für System S2 ($a_{QSt} = 3000$ [mm]); $t_{LSt} = 10$ [mm]

In Tab. 3.48 sind die Ergebnisse für das *Modell 1* mit der konservativen Annahme $N_{R,LSt} = N_{R,fy} = A_{LSt,br} \cdot f_y$ angeführt (keine Iteration für χ_c bzw. χ_c^* erforderlich).

	GMNIA	<i>Modell 1</i> mit χ_c^* (konservativ)		<i>Modell 1</i> mit χ_c (konservativ)	
		$\rho_{p,dl}$	$\rho_{p,end}$	$\rho_{p,dl}$	$\rho_{p,end}$
ρ_c [-]	0,601	0,547	0,547	0,485	0,485
Δ [%]	-	-9,0	-9,0	-19,3	-19,3

Tab. 3.48: Resultierende Abminderungsfaktoren ρ_c nach GMNIA (= LSF) und *Modell 1* (konservativ) für System S2 ($a_{QSt} = 3000$ [mm]); $t_{LSt} = 10$ [mm]

Folglich lässt sich für dieses Beispiel eine hinreichende Übereinstimmung mit den numerischen Ergebnissen mittels der Kombination „mit $f_{\sigma,LSt}$ / mit $\phi_{cr,dl}$ “ erzielen.

3.3 System S3: $t_{LSt} = 8[\text{mm}]$ / Modell 1

a.) Bezugsgrößen

Die Nachweisführung basiert auf den allgemeinen Bezugsgrößen der Tab. 3.49.

f_y	355[N/mm ²]
γ_{M1}	1,0[-]
$N_{Ref,fy}$	5568908[N]
$N_{ges,fy}$	11137816[N]
σ_{Rf}	371,26[N/mm ²]

Tab. 3.49: Bezugsgrößen für System S3; $t_{LSt} = 8[\text{mm}]$ – Modell 1

Als Systemgrößen gelten die Querschnittsflächen der Randfelder ($A_{Rf,br}$; $A_{Rf,ges}$) sowie jene des mittleren Teilfeldes ($A_{LSt,br}$; $A_{Bf,ges}$), die „Bruttobreite“ b_{br} , die Knickstablänge a_{QSt} , die Lastausmitte $e_{m,1}$, das Trägheitsmoment $I_{LSt,br}$ und das Widerstandsmoment $W_{m,1}$ des Bruttoquerschnittes (in Achse m) gemäß der nachfolgenden Abb. 3.11. bzw. Tab. 3.50.

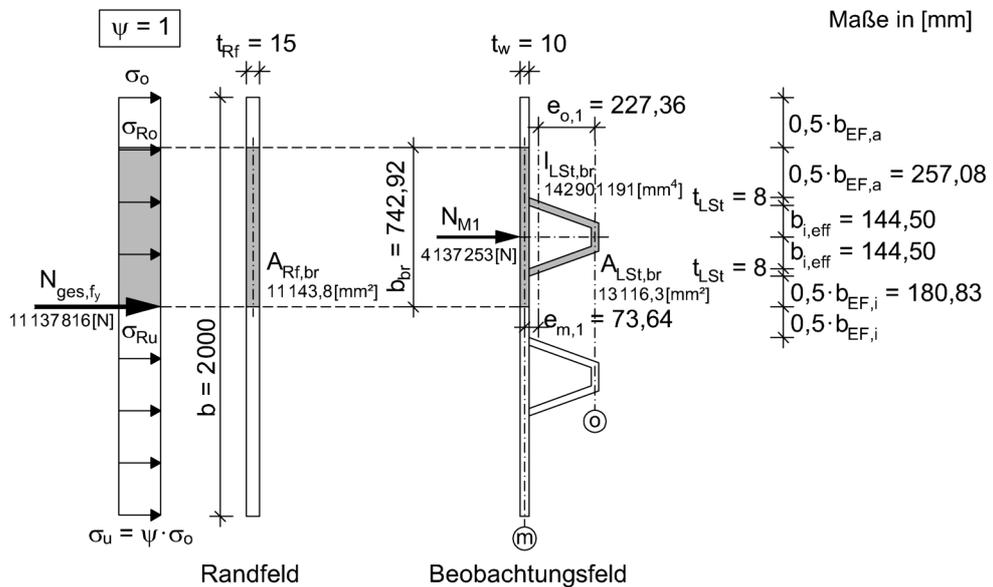


Abb. 3.11: Querschnitte und Beanspruchung des Systems S3; $t_{LSt} = 8[\text{mm}]$ – Modell 1

$A_{Rf,br}$	11 143,8 [mm ²]
$A_{Rf,ges}$	30000 [mm ²]
$A_{LSt,br}$	13 116,3 [mm ²]
$A_{Bf,ges}$	31 374,1 [mm ²]
a_{QSt}	3000 [mm]
b_{br}	742,92 [mm]
$e_{m,1}$	73,64 [mm]
$I_{LSt,br}$	142901 191 [mm ⁴]
$W_{m,1}$	1 940 512 [mm ³]

Tab. 3.50: Querschnittswerte für System S3; $t_{LSt} = 8$ [mm] – *Modell 1*

In Tab. 3.51 findet sich die Zusammenfassung der ermittelten Bemessungsgrößen der Einwirkung und der Tragfähigkeit.

N_{M1}	4 137 253 [N]
$N_{R,fy}$	4 656 274 [N]
$M_{m,M1}$	304 671 363 [Nmm]
$M_{R,fy}$	688 881 717 [Nmm]
$\sigma_{LSt,br}$	315,43 [N/mm ²]
$f_{\sigma,LSt}$	0,889 [-]

Tab. 3.51: Bemessungsgrößen für System S3; $t_{LSt} = 8$ [mm] – *Modell 1*

b.) Knicken am Ersatzstab – zentrischer Druck mit Knickspannungslinie

Die Grundlage für die Erfassung des knickstabähnlichen Verhaltens χ_c endender Längssteifen stellt für den geschlossenen Steifenquerschnitt der Abminderungsfaktor $\chi_{c,dI}$ – gemäß dem Bemessungsvorschlag für geschlossene, durchlaufende Längssteifen in [5], vereinfacht mit der Knickspannungslinie c des Eurocode 3-1-1 [2] berechnet – dar.

Die Tab. 3.52 fasst den Abminderungsfaktor $\chi_{c,dl}$ mit den zugehörigen Bemessungsgrößen für das knickstabähnliche Verhalten des Ersatzstabes zusammen.

i	104,38 [mm]
λ_1	76,40 [-]
$\bar{\lambda}_c$	0,376 [-]
$\chi_{c,dl}$	0,910 [-]
$N_{R,LSt,dl}$	4236439 [N]

Tab. 3.52: Bemessungsgrößen für das knickstabähnliche Verhalten des Ersatzstabes für System S3; $t_{LSt} = 8$ [mm] – Modell 1

c.) Biegeknick-Nachweis und knickstabähnliches Verhalten des einfach-symmetrischen Querschnittes mit Exzentrizität

Die Bestimmung des Abminderungsfaktors χ_c für das Ingenieurmodell mit einfach-symmetrischem Querschnitt und endenden Längssteifen basiert auf Eurocode 3-1-1, Anhang B [3], und dem zuvor ermittelten Abminderungsfaktor $\chi_{c,dl}$.

Der Biegeknick-Nachweis (BK-NW), die zugehörigen Beiwerte und Biegeknicktragfähigkeiten sowie der Abminderungsfaktor χ_c (bzw. χ_c^*) für knickstabähnliches Verhalten des einfach-symmetrischen Bruttoquerschnittes sind in der anschließenden Tab. 3.53 zusammenfassend angeführt.

n_y	0,640 [-]
k_y	$1,241 \leq 1,640$ [-] ✓
k_y	1,241 [-]
C_{my}	1,0 [-]
BK-NW:	$0,640 + 0,360 = 1,0$ ✓
$N_{R,LSt}$	2712400 [N] (= $0,58 \cdot N_{R,fy}$)
$M_{R,LSt}$	199743765 [Nmm]
χ_c	0,583 [-]
χ_c^*	0,656 [-]

Tab. 3.53: Biegeknick-Nachweis mit resultierenden Lastgrößen und Abminderungsfaktoren des knickstabähnlichen Verhaltens für System S3; $t_{LSt} = 8$ [mm] – Modell 1

Nachfolgend wird in Tab. 3.54 und Abb. 3.12 das knickstabähnliche Verhalten anhand weiterer angenommenen Knicklängen a_{QSt} erfasst. Vergleichsweise sind die Abminderungsfaktoren für das knickstabähnliche Verhalten von geschlossenen, endenden (χ_c bzw. χ_c^*) und durchlaufenden ($\chi_{c,dl}$ vereinfacht nach Knickspannungslinie c berechnet) Längssteifen samt dem Verhältniswert $\chi_c/\chi_{c,dl}$ bzw. $\chi_c^*/\chi_{c,dl}$ angegeben.

a_{QSt} [mm]	$\bar{\lambda}_c$ [-]	end. LSt.		dl. LSt.	$\chi_c/\chi_{c,dl}$ [-]	$\chi_c^*/\chi_{c,dl}$ [-]
		χ_c [-]	χ_c^* [-]	$\chi_{c,dl}$ [-]		
1500	0,188	0,644	0,726	1,000	0,644	0,726
2000	0,251	0,623	0,702	0,974	0,640	0,721
2500	0,314	0,603	0,678	0,942	0,640	0,720
3000	0,376	0,583	0,656	0,910	0,641	0,721
3500	0,439	0,562	0,633	0,877	0,641	0,722
4000	0,502	0,542	0,610	0,842	0,644	0,724
4500	0,564	0,521	0,586	0,806	0,646	0,727

Tab. 3.54: Knicklängen a_{QSt} mit zugehörigen Abminderungsfaktoren für knickstabähnliches Verhalten von endenden (χ_c bzw. χ_c^*) und durchlaufenden ($\chi_{c,dl}$) Längssteifen für System S3; $t_{LSt} = 8$ [mm] – Modell 1

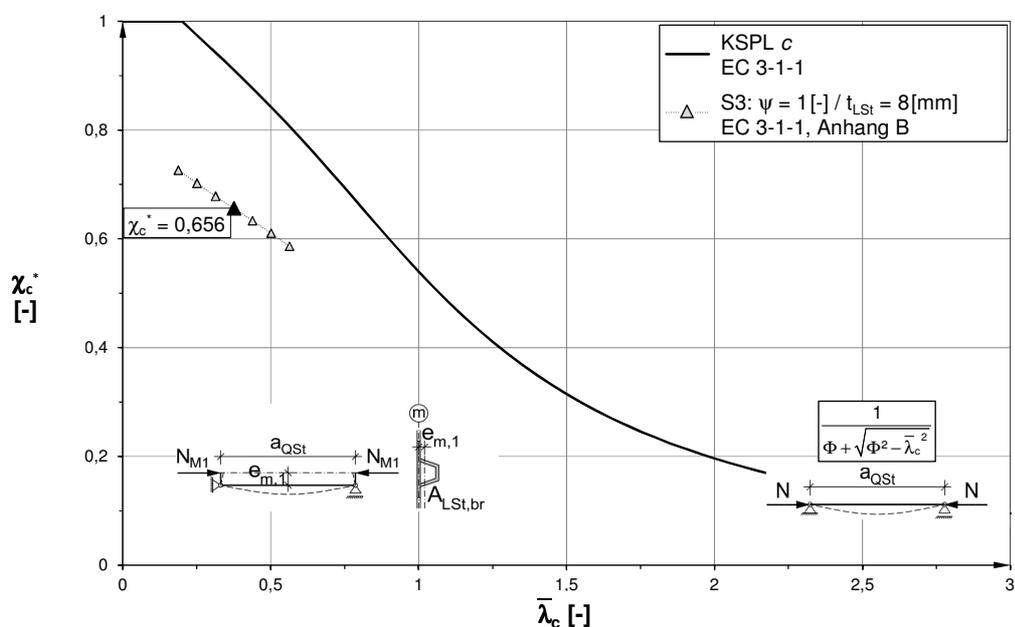


Abb. 3.12: Knickstabähnliches Verhalten des einfach-symmetrischen „Längssteifenersatzstabes“ mit den Knicklängen $a_{QSt} = 1500$ [mm] bis 4500 [mm] (Schrittweite von 500 [mm]) für System S3; $t_{LSt} = 8$ [mm] im Vergleich zur Knickspannungslinie c – Modell 1

Daraus ist der Einfluss der zusätzlichen Exzentrizität $e_{m,1}$ bei endenden Längssteifen erkennbar, welcher mit kleiner werdendem Quersteifenabstand a_{QSt} zunimmt.

d.) Plattenartiges Verhalten

Die Ermittlung des Abminderungsfaktors ρ_p für plattenartiges Verhalten erfolgt nach Eurocode 3-1-5 [1]. Stellvertretend für den aufgrund der hohen Systemsteifigkeit in der linearen Beulanalyse (LBA) nicht ermittelbaren, globalen Eigenwert $\phi_{cr, glob}$ wird hier der lokale Eigenwert $\phi_{cr, lok}$ angeführt. Dieser bleibt in der Nachweisführung jedoch unberücksichtigt, da nur knickstabähnliches Verhalten zum Tragen kommt ($\xi = 0[-]$).

Die Tab. 3.55 zeigt den Abminderungsfaktor ρ_p und die zugehörigen Bemessungsgrößen für plattenartiges Verhalten.

	end. LSt	dl. LSt	
$\alpha_{cr} = \phi_{cr, lok}$	25,360	34,718	[-]
$\sigma_{cr, p}$	253,60	347,18	[N/mm ²]
$\alpha_{ult, k}$	35,5	35,5	[-]
$\bar{\lambda}_p$	1,183	1,011	[-]
ψ	1,0	1,0	[-]
ρ_p	0,688	0,774	[-]

Tab. 3.55: Bemessungsgrößen für plattenartiges Verhalten für System S3; $t_{LSt} = 8[\text{mm}]$ – Modell 1

e.) Interaktion zwischen plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten

Die zuvor ermittelten Reduktionsfaktoren für knickstabähnliches (χ_c bzw. χ_c^*) und plattenartiges (ρ_p) Verhalten werden gemäß der Regelung in Eurocode 3-1-5 [1] miteinander kombiniert und ergeben den endgültigen Abminderungsfaktor ρ_c der Beultragfähigkeit.

Angesichts der vorliegenden Normalspannungsverteilung $\psi = 1,0[-]$ wird die elastische kritische Knickspannung $\sigma_{cr, c}$ der Knickspannung $\sigma_{cr, s\ell}$ der höchstbelasteten, nahe dem Druckrand gelegenen Längssteife gemäß [1] gleichgesetzt.

$$\sigma_{cr, c} = \sigma_{cr, s\ell} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{LSt, br}}{A_{LSt, br} \cdot a_{QSt}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 142901191}{13116,3 \cdot 3000^2} = 2509,01 [\text{N/mm}^2]$$

In Tab. 3.56 sind die ideale Knickspannung $\sigma_{cr,c}$ und die Interaktionsfaktoren ξ für knickstabähnliches und plattenartiges Verhalten ersichtlich.

	end. LSt	dl. LSt	
$\sigma_{cr,c} = \sigma_{cr,s\ell}$	2509,01		[N/mm ²]
ξ	0	0	[-]

Tab. 3.56: Ideale Knickspannung $\sigma_{cr,c}$ und Interaktionsfaktor ξ für System S3; $t_{LSt} = 8$ [mm] – *Modell 1*

Der zugehörige Laststeigerungsfaktor (LSF) aus der nichtlinearen Traglaststudie (GMNIA) nach Anhang A, Abschnitt 5, ist in Tab. 3.57 angegeben. Zudem findet sich – getrennt nach den berücksichtigten Einflussgrößen ($f_{\sigma,LSt}$; ϕ_{cr}) – eine prozentuale Gegenüberstellung des GMNIA-Laststeigerungsfaktors (LSF = 100 %) zu dem resultierenden Abminderungsfaktor ρ_c der Beultragfähigkeit des längsausgesteiften Teilfeldes mit endenden Längssteifen nach *Modell 1*.

	GMNIA	<i>Modell 1</i> mit χ_c^*		<i>Modell 1</i> mit χ_c	
		$\rho_{p,dl}$	$\rho_{p,end}$	$\rho_{p,dl}$	$\rho_{p,end}$
ρ_c [-]	0,620	0,656	0,656	0,583	0,583
Δ [%]	-	+5,8	+5,8	-6,0	-6,0

Tab. 3.57: Resultierende Abminderungsfaktoren ρ_c nach GMNIA (= LSF) und *Modell 1* für System S3 ($a_{QSt} = 3000$ [mm]); $t_{LSt} = 8$ [mm]

In Tab. 3.58 sind die Ergebnisse für das *Modell 1* mit der konservativen Annahme $N_{R,LSt} = N_{R,fy} = A_{LSt,br} \cdot f_y$ angeführt (keine Iteration für χ_c bzw. χ_c^* erforderlich).

	GMNIA	<i>Modell 1</i> mit χ_c^* (konservativ)		<i>Modell 1</i> mit χ_c (konservativ)	
		$\rho_{p,dl}$	$\rho_{p,end}$	$\rho_{p,dl}$	$\rho_{p,end}$
ρ_c [-]	0,620	0,624	0,624	0,555	0,555
Δ [%]	-	+0,7	+0,7	-10,5	-10,5

Tab. 3.58: Resultierende Abminderungsfaktoren ρ_c nach GMNIA (= LSF) und *Modell 1* für System S3 (konservativ) ($a_{QSt} = 3000$ [mm]); $t_{LSt} = 8$ [mm]

Folglich lässt sich für dieses Beispiel eine hinreichende Übereinstimmung mit den numerischen Ergebnissen mittels der Kombination „ohne $f_{\sigma,LSt}$ / mit $\phi_{cr,dl}$ “ erzielen.

3.4 System S4: $t_{LSt} = 6[\text{mm}]$ / *Modell 1*

a.) Bezugsgrößen

Die Nachweisführung basiert auf den allgemeinen Bezugsgrößen der Tab. 3.59.

f_y	355 [N/mm ²]
γ_{M1}	1,0 [-]
$N_{ges,fy}$	8810523 [N]
$\sigma_{Rf,o}$	251,73 [N/mm ²]

Tab. 3.59: Bezugsgrößen für System S4; $t_{LSt} = 6[\text{mm}]$ – *Modell 1*

Die obere Normalspannung im Randfeld $\sigma_{Rf,o}$ errechnet sich dabei zu (vgl. Abb. 3.13):

$$\sigma_{Rf,o} = \frac{N_{ges,fy}}{A_{Rf,ges} \cdot 0,5} = \frac{8810523}{70000 \cdot 0,5} = 251,73 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (3.41)$$

Daraus ergibt sich die resultierende Normalkraft N_{M1} der Längssteife zu:

$$N_{M1} = \sigma_{Rm} \cdot t_{Rf} \cdot b_{br} = \sigma_{Rf,o} \cdot 0,833 \cdot t_{Rf} \cdot b_{br} \text{ [N]} \quad (3.42)$$

$$N_{M1} = 251,73 \cdot 0,833 \cdot 20 \cdot 749 = 3140086 \text{ [N]}$$

Als Systemgrößen gelten die Querschnittsflächen der Randfelder ($A_{Rf,br}$; $A_{Rf,ges}$) sowie jene des mittleren Teilfeldes ($A_{LSt,br}$; $A_{Bf,ges}$), die „Bruttobreite“ b_{br} , die Knickstablänge a_{QSt} , die Lastausmitte $e_{m,1}$, das Trägheitsmoment $I_{LSt,br}$ und das Widerstandsmoment $W_{m,1}$ des Bruttoquerschnittes (in Achse m) gemäß der nachfolgenden Abb. 3.13 bzw. Tab. 3.60.

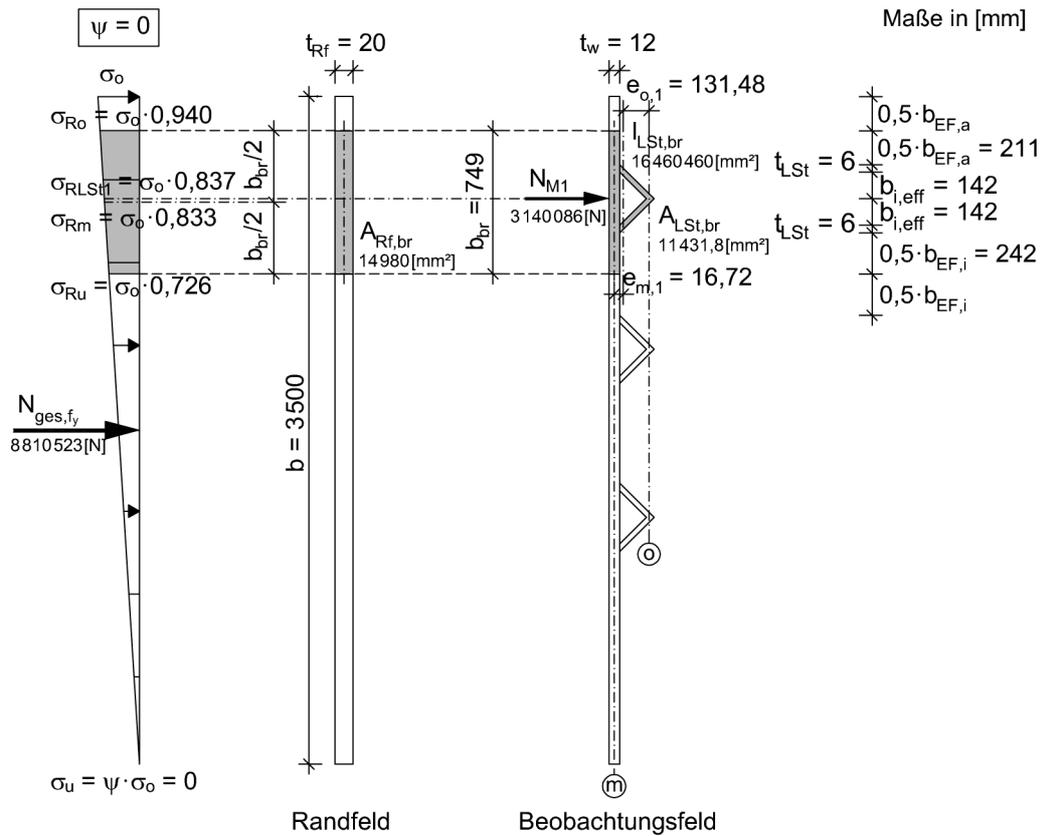


Abb. 3.13: Querschnitte und Beanspruchung des Systems S4; $t_{LSt} = 6 [mm]$ – Modell 1

$A_{Rf,br}$	14980 [mm ²]
$A_{Rf,ges}$	70000 [mm ²]
$A_{LSt,br}$	11431,8 [mm ²]
$A_{Bf,ges}$	49331,3 [mm ²]
a_{QSt}	3000 [mm]
b_{br}	749 [mm]
$e_{m,1}$	16,72 [mm]
$I_{LSt,br}$	16460640 [mm ⁴]
$W_{m,1}$	984677 [mm ³]

Tab. 3.60: Querschnittswerte für System S4; $t_{LSt} = 6 [mm]$ – Modell 1

In Tab. 3.61 findet sich die Zusammenfassung der ermittelten Bemessungsgrößen der Einwirkung und der Tragfähigkeit.

N_{M1}	3 140 086 [N]
$N_{R,fy}$	4 058 276 [N]
$M_{m,M1}$	52 492 138 [Nmm]
$M_{R,fy}$	349 560 461 [Nmm]
$\sigma_{LSt,br}$	274,68 [N/mm ²]
$f_{\sigma,LSt}$	0,774 [-]

Tab. 3.61: Bemessungsgrößen für System S4; $t_{LSt} = 6$ [mm] – Modell 1

b.) Knicken am Ersatzstab – zentrischer Druck mit Knickspannungslinie

Die Grundlage für die Erfassung des knickstabähnlichen Verhaltens χ_c endender Längssteifen stellt für den geschlossenen Steifenquerschnitt der Abminderungsfaktor $\chi_{c,dI}$ – gemäß dem Bemessungsvorschlag für geschlossene, durchlaufende Längssteifen in [5], vereinfacht mit der Knickspannungslinie c des Eurocode 3-1-1 [2] berechnet – dar.

Die Tab. 3.62 fasst den Abminderungsfaktor $\chi_{c,dI}$ mit den zugehörigen Bemessungsgrößen für das knickstabähnliche Verhalten des Ersatzstabes zusammen.

i	37,95 [mm]
λ_1	76,40 [-]
$\bar{\lambda}_c$	1,035 [-]
$\chi_{c,dI}$	0,520 [-]
$N_{R,LSt,dI}$	2 110 289 [N]

Tab. 3.62: Bemessungsgrößen für das knickstabähnliche Verhalten des Ersatzstabes für System S4; $t_{LSt} = 6$ [mm] – Modell 1

c.) Biegeknick-Nachweis und knickstabähnliches Verhalten des einfach-symmetrischen Querschnittes mit Exzentrizität

Die Bestimmung des Abminderungsfaktors χ_c für das Ingenieurmodell mit einfach-symmetrischem Querschnitt und endenden Längssteifen basiert auf Eurocode 3-1-1, Anhang B [3], und dem zuvor ermittelten Abminderungsfaktor $\chi_{c,dl}$.

Der Biegeknick-Nachweis (BK-NW), die zugehörigen Beiwerte und Biegeknicktragfähigkeiten sowie der Abminderungsfaktor χ_c (bzw. χ_c^*) für knickstabähnliches Verhalten des einfach-symmetrischen Bruttoquerschnittes sind in der anschließenden Tab. 3.63 zusammenfassend angeführt.

n_y	0,844 [-]
k_y	$1,873 \leq 1,844$ [-] x
k_y	1,844 [-]
C_{my}	1,0 [-]
BK-NW:	$0,844 + 0,156 = 1,0$ ✓
$N_{R,LSt}$	1 780 693 [N] (= $0,44 \cdot N_{R,fy}$)
$M_{R,LSt}$	29767465 [Nmm]
χ_c	0,438 [-]
χ_c^*	0,567 [-]

Tab. 3.63: Biegeknick-Nachweis mit resultierenden Lastgrößen und Abminderungsfaktoren des knickstabähnlichen Verhaltens für System S4; $t_{LSt} = 6$ [mm] – *Modell 1*

Der Gesamtspannungsverlauf σ_{11} der nichtlinearen Traglastanalyse (GMNIA) zeigt in der nachfolgenden Abb. 3.14, dass die bemessungsbestimmende Fließspannung $f_y = 355[\text{N/mm}^2]$ bereits im Stegblech innerhalb der obersten Längssteife ($b_{i,\text{eff}}$) am Druckrand vorliegt.

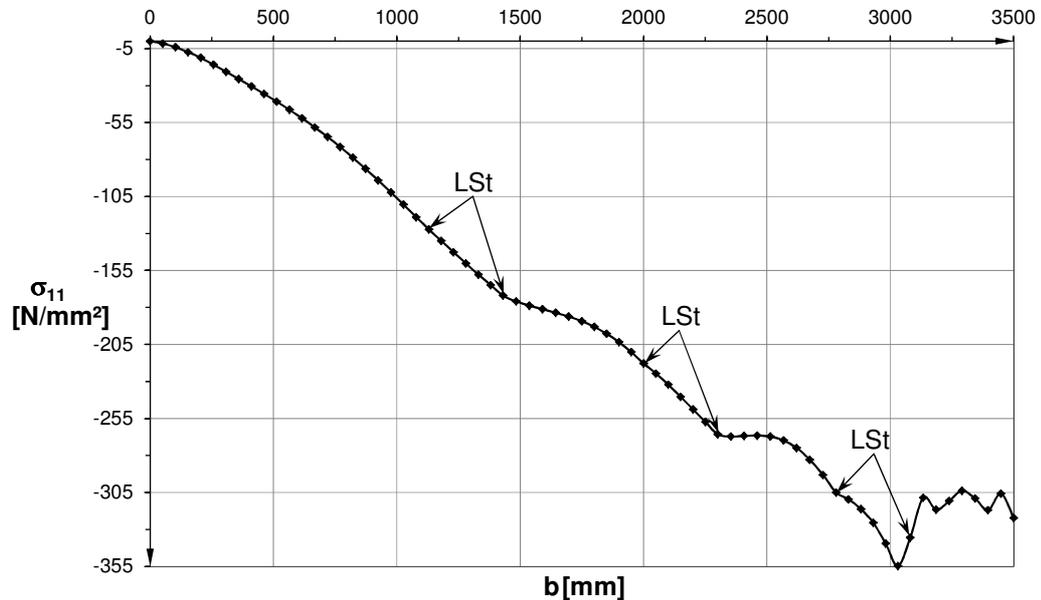


Abb. 3.14: Nichtlineare Gesamtspannung σ_{11} ($= \sigma_{m,N} + \sigma_{m,\Delta M}$) über die Steghöhe für $\bar{\chi} = 0,50[-]$ des Beobachtungsfeldes im Traglastzustand ($\text{LSF} = 0,772[-]$) für System S4

Anmerkung:

Für die Systeme S1, S2 und S3 (jeweils mit $\psi = 1,0[-]$) wird die Fließspannung $f_y = 355[\text{N/mm}^2]$ in der nichtlinearen Betrachtung im Traglastzustand im mittleren Einzel-feld zwischen den beiden Längssteifen bzw. unmittelbar in der außenliegenden Anschlusskante der Längssteifen zu den äußeren, am Druckrand gelegenen Einzel-feldern ($\sigma_o = \sigma_u$ für $\psi = 1,0[-]$) erreicht.

Nachfolgend wird in Tab. 3.64 und Abb. 3.15 das knickstabähnliche Verhalten anhand weiterer angenommenen Knicklängen a_{QSt} erfasst. Vergleichsweise sind die Abminderungsfaktoren für das knickstabähnliche Verhalten von geschlossenen, endenden (χ_c bzw. χ_c^*) und durchlaufenden ($\chi_{c,dl}$ vereinfacht nach Knickspannungslinie c berechnet) Längssteifen samt dem Verhältniswert $\chi_c/\chi_{c,dl}$ bzw. $\chi_c^*/\chi_{c,dl}$ angegeben.

a_{QSt} [mm]	$\bar{\lambda}_c$ [-]	end. LSt.		dl. LSt.	$\chi_c/\chi_{c,dl}$ [-]	$\chi_c^*/\chi_{c,dl}$ [-]
		χ_c [-]	χ_c^* [-]	$\chi_{c,dl}$ [-]		
1500	0,517	0,678	0,876	0,833	0,814	1,052
2000	0,690	0,598	0,773	0,731	0,818	1,057
2500	0,862	0,516	0,667	0,623	0,828	1,071
3000	1,035	0,438	0,567	0,520	0,842	1,090
3500	1,207	0,372	0,481	0,430	0,865	1,119
4000	1,380	0,316	0,408	0,357	0,885	1,143
4500	1,571	0,269	0,347	0,298	0,903	1,164

Tab. 3.64: Knicklängen a_{QSt} mit zugehörigen Abminderungsfaktoren für knickstabähnliches Verhalten von endenden (χ_c bzw. χ_c^*) und durchlaufenden ($\chi_{c,dl}$) Längssteifen für System S4; $t_{LSt} = 6$ [mm] – Modell 1

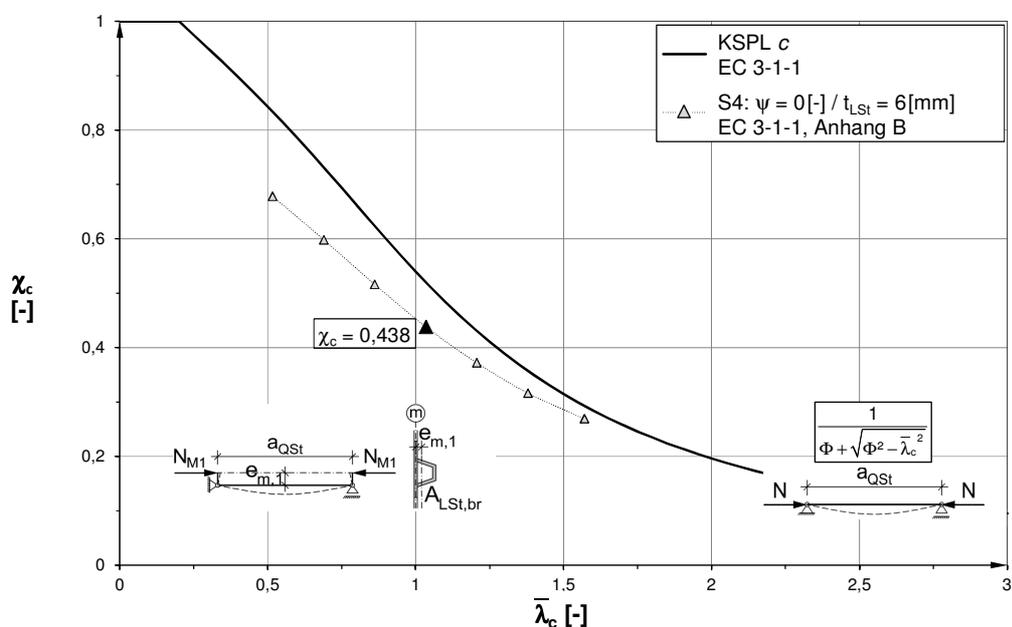


Abb. 3.15: Knickstabähnliches Verhalten des einfach-symmetrischen „Längssteifenersatzstabes“ mit den Knicklängen $a_{QSt} = 1500$ [mm] bis 4500 [mm] (Schrittweite von 500 [mm]) für System S4; $t_{LSt} = 6$ [mm] im Vergleich zur Knickspannungslinie c – Modell 1

Daraus ist der Einfluss der zusätzlichen Exzentrizität $e_{m,1}$ bei endenden Längssteifen erkennbar, welcher mit kleiner werdendem Quersteifenabstand a_{QSt} zunimmt.

d.) Plattenartiges Verhalten

Die Ermittlung des Abminderungsfaktors ρ_p für plattenartiges Verhalten erfolgt nach Eurocode 3-1-5 [1]. Der Lastfaktor α_{cr} wird dabei jedoch dem maßgebenden globalen Eigenwert $\phi_{cr, glob}$ aus der linearen Beulanalyse (LBA) gleichgesetzt.

Die Tab. 3.65 zeigt den Abminderungsfaktor ρ_p und die zugehörigen Bemessungsgrößen für plattenartiges Verhalten.

	end. LSt	dl. LSt	
$\alpha_{cr} = \phi_{cr, glob}$	61,114	52,907	[-]
$\sigma_{cr, p}$	611,14	529,07	[N/mm ²]
$\alpha_{ult, k}$	35,5	35,5	[-]
$\bar{\lambda}_p$	0,762	0,819	[-]
ψ	0	0	[-]
ρ_p	1,000	0,975	[-]

Tab. 3.65: Bemessungsgrößen für plattenartiges Verhalten für System S4; $t_{LSt} = 6$ [mm] – *Modell 1*

e.) Interaktion zwischen plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten

Die zuvor ermittelten Reduktionsfaktoren für knickstabähnliches (χ_c bzw. χ_c^*) und plattenartiges (ρ_p) Verhalten werden gemäß der Regelung in Eurocode 3-1-5 [1] miteinander kombiniert und ergeben den endgültigen Abminderungsfaktor ρ_c der Beultragfähigkeit.

Die elastische kritische Knickspannung $\sigma_{cr, c}$ wird der Knickspannung $\sigma_{cr, s\ell}$ der höchstbelasteten, nahe dem Druckrand gelegenen Längssteife gemäß dem Bemessungsvorschlag in [5] – auch bei der vorliegenden linear veränderlichen Normalspannungsverteilung $\psi = 0$ [-] – gleichgesetzt.

$$\sigma_{cr, c} = \sigma_{cr, s\ell} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{LSt, br}}{A_{LSt, br} \cdot a_{QSt}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 16460640}{11431,8 \cdot 3000^2} = 331,60 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

In Tab. 3.66 sind die ideale Knickspannung $\sigma_{cr,c}$ und die Interaktionsfaktoren ξ für knickstabähnliches und plattenartiges Verhalten ersichtlich.

	end. LSt	dl. LSt	
$\sigma_{cr,c} = \sigma_{cr,s\ell}$	331,60		[N/mm ²]
ξ	0,843	0,596	[-]

Tab. 3.66: Ideale Knickspannung $\sigma_{cr,c}$ und Interaktionsfaktor ξ für System S4; $t_{LSt} = 6$ [mm] – *Modell 1*

Der zugehörige Laststeigerungsfaktor (LSF) aus der nichtlinearen Traglaststudie (GMNIA) nach Anhang A, Abschnitt 5, ist in Tab. 3.67 angegeben. Zudem findet sich – getrennt nach den berücksichtigten Einflussgrößen ($f_{\sigma,LSt}$; ϕ_{cr}) – eine prozentuale Gegenüberstellung des GMNIA-Laststeigerungsfaktors (LSF = 100 %) zu dem resultierenden Abminderungsfaktor ρ_c der Beultragfähigkeit des längsausgesteiften Teilfeldes mit endenden Längssteifen nach *Modell 1*.

	GMNIA	<i>Modell 1</i> mit χ_c^*		<i>Modell 1</i> mit χ_c	
		$\rho_{p,dl}$	$\rho_{p,end}$	$\rho_{p,dl}$	$\rho_{p,end}$
ρ_c [-]	0,772	0,908	0,989	0,887	0,986
Δ [%]	-	+17,6	+28,2	+14,9	+27,7

Tab. 3.67: Resultierende Abminderungsfaktoren ρ_c nach GMNIA (= LSF) und *Modell 1* für System S4 ($a_{QSt} = 3000$ [mm]); $t_{LSt} = 6$ [mm]

In Tab. 3.68 sind die Ergebnisse für das *Modell 1* mit der konservativen Annahme $N_{R,LSt} = N_{R,fy} = A_{LSt,br} \cdot f_y$ angeführt (keine Iteration für χ_c bzw. χ_c^* erforderlich).

	GMNIA	<i>Modell 1</i> mit χ_c^* (konservativ)		<i>Modell 1</i> mit χ_c (konservativ)	
		$\rho_{p,dl}$	$\rho_{p,end}$	$\rho_{p,dl}$	$\rho_{p,end}$
ρ_c [-]	0,772	0,900	0,988	0,881	0,985
Δ [%]	-	+16,6	+28,0	+14,1	+27,6

Tab. 3.68: Resultierende Abminderungsfaktoren ρ_c nach GMNIA (= LSF) und *Modell 1* (konservativ) für System S4 ($a_{QSt} = 3000$ [mm]); $t_{LSt} = 6$ [mm]

Für *Modell 1* ergibt sich somit eine Überschätzung von 15% für die resultierende Beultragfähigkeit.

Mit der Annahme von $\psi = 1,0[-]$ für die Ermittlung des Reduktionsfaktors ρ_p für Plattenbeulen nach *Winter* gemäß Eurocode 3-1-5 [1] – wie in [5] für das gleiche System mit durchlaufenden Längssteifen vorgeschlagen – ergibt sich gemäß den nachfolgenden Tab. 3.69 bis Tab. 3.71 eine reduzierte Überschätzung der Beultragfähigkeit von 6%.

	end. LSt.	dl. LSt.	
$\alpha_{cr} = \phi_{cr, glob}$	61,114	52,907	[-]
$\sigma_{cr, p}$	611,14	529,07	[N/mm ²]
$\alpha_{ult, k}$	35,5	35,5	[-]
$\bar{\lambda}_p$	0,762	0,819	[-]
ψ	1,0	1,0	[-]
ρ_p	0,933	0,893	[-]

Tab. 3.69: Bemessungsgrößen für plattenartiges Verhalten für System S4; $t_{LSt} = 6$ [mm] – *Modell 1* mit der Annahme von $\psi = 1,0[-]$ für die Ermittlung des plattenartigen Verhalten s

	GMNIA	<i>Modell 1</i> mit χ_c^*		<i>Modell 1</i> mit χ_c	
		$\rho_{p, dl}$	$\rho_{p, end}$	$\rho_{p, dl}$	$\rho_{p, end}$
$\rho_c[-]$	0,772	0,840	0,924	0,819	0,921
Δ [%]	-	+8,7	+19,7	+6,0	+19,3

Tab. 3.70: Resultierende Abminderungsfaktoren ρ_c nach GMNIA (= LSF) und *Modell 1* für System S4 ($a_{QSt} = 3000$ [mm]); $t_{LSt} = 6$ [mm] – mit der Annahme von $\psi = 1,0[-]$ für die Ermittlung des plattenartigen Verhaltens

Ergänzend sind in Tab. 3.71 die Ergebnisse für das *Modell 1* mit der modifizierten Ermittlung des Reduktionsfaktor ρ_p für plattenartiges Verhalten (Annahme: $\psi = 1,0[-]$) und der konservativen Annahme $N_{R, LSt} = N_{R, fy} = A_{LSt, br} \cdot f_y$ (keine Iteration für χ_c bzw. χ_c^* erforderlich) angeführt.

	GMNIA	<i>Modell 1</i> mit χ_c^* (konservativ)		<i>Modell 1</i> mit χ_c (konservativ)	
		$\rho_{p, dl}$	$\rho_{p, end}$	$\rho_{p, dl}$	$\rho_{p, end}$
$\rho_c[-]$	0,772	0,832	0,923	0,813	0,920
Δ [%]	-	+7,7	+19,6	+5,2	+19,2

Tab. 3.71: Resultierende Abminderungsfaktoren ρ_c nach GMNIA (= LSF) und *Modell 1* (konservativ) für System S4 ($a_{QSt} = 3000$ [mm]); $t_{LSt} = 6$ [mm] – mit der Annahme von $\psi = 1,0[-]$ für die Ermittlung des plattenartigen Verhaltens

Wird die elastische, kritische Knickspannung $\sigma_{cr,c}$ versuchsweise mittels der in Eurocode 3-1-5 [1] vorgesehenen Extrapolation der Knickspannung $\sigma_{cr,s\ell}$ der nahe am Druckrand gelegenen Längssteife ermittelt (vgl. Abb. 3.13), ergibt sich entsprechend der nachfolgenden Tab. 3.72 bis Tab. 3.74 eine Unterschätzung von 4% der Beultragfähigkeit mit der Kombination „ohne $f_{\sigma,LSt}$ / mit $\phi_{cr,dl}$ “. Das plattenartige Verhalten ρ_p wird hier mit der tatsächlichen Normalspannungsverteilung $\psi = 0[-]$ berechnet.

$$\sigma_{cr,c} = \frac{b}{b \cdot 0,837} \cdot \sigma_{cr,s\ell} \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\sigma_{cr,c} = \frac{3500}{3500 \cdot 0,837} \cdot \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 16460640}{11431,8 \cdot 3000^2} = 396,17 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

	end. LSt.	dl. LSt.	
$\sigma_{cr,c} = 1/0,837 \cdot \sigma_{cr,s\ell}$	396,17		[N/mm ²]
ξ	0,543	0,335	[-]

Tab. 3.72: Ideale Knickspannung $\sigma_{cr,c}$ und Interaktionsfaktor ξ für System S4; $t_{LSt} = 6$ [mm] – *Modell 1* mit der Extrapolation von $\sigma_{cr,c}$ nach Eurocode 3-1-5 [1]

	GMNIA	<i>Modell 1</i> mit χ_c^*		<i>Modell 1</i> mit χ_c	
		$\rho_{p,dl}$	$\rho_{p,end}$	$\rho_{p,dl}$	$\rho_{p,end}$
$\rho_c[-]$	0,772	0,795	0,909	0,738	0,883
Δ [%]	-	+2,9	+17,8	-4,4	+14,3

Tab. 3.73: Resultierende Abminderungsfaktoren ρ_c nach GMNIA (= LSF) und *Modell 1* für System S4 ($a_{QSt} = 3000$ [mm]); $t_{LSt} = 6$ [mm] – mit der Extrapolation von $\sigma_{cr,c}$ nach Eurocode 3-1-5 [1]

Ergänzend sind in Tab. 3.74 die Ergebnisse für das *Modell 1* unter Berücksichtigung der Extrapolationsregelung zur Ermittlung der idealen Knickspannung $\sigma_{cr,c}$ nach Eurocode 3-1-5 [1] und der konservativen Annahme $N_{R,LSt} = N_{R,fy} = A_{LSt,br} \cdot f_y$ (keine Iteration für χ_c bzw. χ_c^* erforderlich) angeführt.

	GMNIA	<i>Modell 1</i> mit χ_c^* (konservativ)		<i>Modell 1</i> mit χ_c (konservativ)	
		$\rho_{p,dl}$	$\rho_{p,end}$	$\rho_{p,dl}$	$\rho_{p,end}$
$\rho_c[-]$	0,772	0,774	0,899	0,722	0,875
Δ [%]	-	+0,2	+16,5	-6,5	+13,3

Tab. 3.74: Resultierende Abminderungsfaktoren ρ_c nach GMNIA (= LSF) und *Modell 1* (konservativ) für System S4 ($a_{QSt} = 3000$ [mm]); $t_{LSt} = 6$ [mm] – mit der Extrapolation von $\sigma_{cr,c}$ nach Eurocode 3-1-5 [1]

4 Ergebnisvergleich zwischen dem Ingenieurmodell und der nichtlinearen FE-Analyse

Nachfolgend erfolgt in Tab. 4.1 bis Tab. 4.4. zusammenfassend ein Ergebnisvergleich zwischen dem vorgeschlagenen Ingenieurmodell (*Modell 1*) – unter Berücksichtigung der zusätzlichen Exzentrizität der Längssteifen bei der Ermittlung der Tragfähigkeit χ_c für das knickstabähnliche Verhalten – und den numerischen Traglastberechnungen (GMNIA). Darüber hinaus erfolgt auch der Vergleich für die Modifikation von χ_c (Wert χ_c^*) mit Erfassung der geringeren Normalspannungsbeanspruchung in der Längssteife gegenüber dem Fall mit durchlaufenden Längssteifen.

System	ψ [-]	t_{LSt} [mm]	<i>Modell 1</i> – „ohne $f_{\sigma,LSt}$ / mit $\phi_{cr,end}$ “				GMNIA	$\Delta(\rho_c/LSF)$ $M1/GMNIA$ [%]
			χ_c [-]	$\rho_{p,end}$ [-]	ξ [-]	ρ_c [-]	LSF [-]	
S1	1	8	0,409	0,865	0,280	0,629	0,557	+12,9
	1	10	0,399	0,886	0,277	0,631	0,548	+15,2
S2	1	8	0,556	0,704	0	0,556	0,624	-10,9
	1	10	0,525	0,696	0	0,525	0,601	-12,6
S3	1	8	0,583	0,688	0	0,583	0,620	-6,0
S4	0	6	0,438	1,0	0,843	0,986	0,772	+27,7

Tab. 4.1: Ergebnisüberblick der Beultragfähigkeit für *Modell 1* – „ohne $f_{\sigma,LSt}$ / mit $\phi_{cr,end}$ “

System	ψ [-]	t_{LSt} [mm]	<i>Modell 1</i> – „mit $f_{\sigma,LSt}$ / mit $\phi_{cr,end}$ “				GMNIA	$\Delta(\rho_c/LSF)$ $M1/GMNIA$ [%]
			χ_c^* [-]	$\rho_{p,end}$ [-]	ξ [-]	ρ_c [-]	LSF [-]	
S1	1	8	0,442	0,865	0,280	0,646	0,557	+15,9
	1	10	0,437	0,886	0,277	0,651	0,548	+18,8
S2	1	8	0,618	0,704	0	0,618	0,624	-1,0
	1	10	0,593	0,696	0	0,593	0,601	-1,3
S3	1	8	0,656	0,688	0	0,656	0,620	+5,8
S4	0	6	0,567	1,0	0,843	0,989	0,772	+28,2

Tab. 4.2: Ergebnisüberblick der Beultragfähigkeit für *Modell 1* – „mit $f_{\sigma,LSt}$ / mit $\phi_{cr,end}$ “

System	ψ [-]	t_{LSt} [mm]	Modell 1 – „ohne $f_{\sigma,LSt}$ / mit $\phi_{cr,dI}$ “				GMNIA	$\Delta(\rho_c/LSF)$ M1/GMNIA [%]
			χ_c [-]	$\rho_{p,dI}$ [-]	ξ [-]	ρ_c [-]	LSF [-]	
S1	1	8	0,409	0,822	0,099	0,487	0,557	-12,6
	1	10	0,399	0,844	0,103	0,486	0,548	-11,3
S2	1	8	0,556	0,775	0	0,556	0,624	-10,9
	1	10	0,525	0,783	0	0,525	0,601	-12,6
S3	1	8	0,583	0,774	0	0,583	0,620	-6,0
S4	0	6	0,438	0,975	0,596	0,887	0,772	+14,9

Tab. 4.3: Ergebnisüberblick der Beultragfähigkeit für Modell 1 – „ohne $f_{\sigma,LSt}$ / mit $\phi_{cr,dI}$ “

System	ψ [-]	t_{LSt} [mm]	Modell 1 – „mit $f_{\sigma,LSt}$ / mit $\phi_{cr,dI}$ “				GMNIA	$\Delta(\rho_c/LSF)$ M1/GMNIA [%]
			χ_c^* [-]	$\rho_{p,dI}$ [-]	ξ [-]	ρ_c [-]	LSF [-]	
S1	1	8	0,442	0,822	0,099	0,514	0,557	-7,7
	1	10	0,437	0,844	0,103	0,517	0,548	-5,7
S2	1	8	0,618	0,775	0	0,618	0,624	-1,0
	1	10	0,593	0,783	0	0,593	0,601	-1,3
S3	1	8	0,656	0,774	0	0,656	0,620	+5,8
S4	0	6	0,567	0,975	0,596	0,908	0,772	+17,6

Tab. 4.4: Ergebnisüberblick der Beultragfähigkeit für Modell 1 – „mit $f_{\sigma,LSt}$ / mit $\phi_{cr,dI}$ “

Der konservative Ansatz $N_{R,LSt} = N_{R,fy}$, welcher keine Iteration erfordert, liefert die Ergebnisse nach Tab. 4.5 bis Tab. 4.8.

System	ψ [-]	t_{LSt} [mm]	Modell 1 (konservativ) – „ohne $f_{\sigma,LSt}$ / mit $\phi_{cr,end}$ “				GMNIA	$\Delta(\rho_c/LSF)$ M1/GMNIA [%]
			χ_c [-]	$\rho_{p,end}$ [-]	ξ [-]	ρ_c [-]	LSF [-]	
S1	1	8	0,353	0,865	0,280	0,600	0,557	+7,6
	1	10	0,337	0,886	0,277	0,599	0,548	+9,3
S2	1	8	0,521	0,704	0	0,521	0,624	-16,5
	1	10	0,485	0,696	0	0,485	0,601	-19,3
S3	1	8	0,555	0,688	0	0,555	0,620	-10,5
S4	0	6	0,402	1,0	0,843	0,985	0,772	+27,6

Tab. 4.5: Ergebnisüberblick der Beultragfähigkeit für Modell 1 (konservativ) – „ohne $f_{\sigma,LSt}$ / mit $\phi_{cr,end}$ “

System	ψ [-]	t_{LSt} [mm]	Modell 1 (konservativ) – „mit $f_{\sigma,LSt}$ / mit $\phi_{cr,end}$ “				GMNIA	$\Delta(\rho_c/LSF)$ M1/GMNIA [%]
			χ_c^* [-]	$\rho_{p,end}$ [-]	ξ [-]	ρ_c [-]	LSF [-]	
S1	1	8	0,381	0,865	0,280	0,614	0,557	+10,3
	1	10	0,370	0,886	0,277	0,616	0,548	+12,5
S2	1	8	0,578	0,704	0	0,578	0,624	-7,4
	1	10	0,547	0,696	0	0,547	0,601	-9,0
S3	1	8	0,624	0,688	0	0,624	0,620	+0,6
S4	0	6	0,519	1,0	0,843	0,988	0,772	+28,0

Tab. 4.6: Ergebnisüberblick der Beultragfähigkeit für Modell 1 (konservativ) – „mit $f_{\sigma,LSt}$ / mit $\phi_{cr,end}$ “

System	ψ [-]	t_{LSt} [mm]	Modell 1 (konservativ) – „ohne $f_{\sigma,LSt}$ / mit $\phi_{cr,dl}$ “				GMNIA	$\Delta(\rho_c/LSF)$ M1/GMNIA [%]
			χ_c [-]	$\rho_{p,dl}$ [-]	ξ [-]	ρ_c [-]	LSF [-]	
S1	1	8	0,353	0,822	0,099	0,441	0,557	-20,8
	1	10	0,337	0,844	0,103	0,436	0,548	-20,4
S2	1	8	0,521	0,775	0	0,521	0,624	-16,5
	1	10	0,485	0,783	0	0,485	0,601	-19,3
S3	1	8	0,555	0,774	0	0,555	0,620	-10,5
S4	0	6	0,402	0,975	0,596	0,881	0,772	+14,1

Tab. 4.7: Ergebnisüberblick der Beultragfähigkeit für Modell 1 (konservativ) – „ohne $f_{\sigma,LSt}$ / mit $\phi_{cr,dl}$ “

System	ψ [-]	t_{LSt} [mm]	Modell 1 (konservativ) – „mit $f_{\sigma,LSt}$ / mit $\phi_{cr,dl}$ “				GMNIA	$\Delta(\rho_c/LSF)$ M1/GMNIA [%]
			χ_c^* [-]	$\rho_{p,dl}$ [-]	ξ [-]	ρ_c [-]	LSF [-]	
S1	1	8	0,381	0,822	0,099	0,464	0,557	-16,7
	1	10	0,370	0,844	0,103	0,462	0,548	-15,7
S2	1	8	0,578	0,775	0	0,578	0,624	-7,4
	1	10	0,547	0,783	0	0,547	0,601	-9,0
S3	1	8	0,624	0,774	0	0,624	0,620	+0,6
S4	0	6	0,519	0,975	0,596	0,900	0,772	+16,6

Tab. 4.8: Ergebnisüberblick der Beultragfähigkeit für Modell 1 (konservativ) – „mit $f_{\sigma,LSt}$ / mit $\phi_{cr,dl}$ “

Für das System S1 liegt gemäß dem errechneten Verhältnisfaktor ξ vorwiegend ein knickstabähnliches Verhalten vor. Für die Systeme S2 und S3 bildet sich aufgrund der hohen bzw. überhöhten Längssteifen jeweils ein reines Knickstabverhalten ($\xi = 0[-]$) aus. Hingegen gibt das System S4 ein überwiegendes Plattenbeulen wieder. Anzumerken ist, dass dieses unterschiedliche Tragverhalten real nicht unbedingt vorliegen muss, sondern die Interpretation des Beiwertes ξ im vereinfachten Berechnungsmodell darstellt. Die unterschiedliche Verhaltensweise ist durch die geometrischen Systemgrößen bestimmt, welche – unter Voraussetzung gleicher Knicklängen a_{QSt} – die Längssteifenbauform, insbesondere deren Biegesteifigkeit aus der Stegblechebene und die, durch die vorliegende Lasteinwirkung ψ und Teilfeldgeometrie $\alpha (= a/b[-])$ bestimmte, maßgebende globale Beulform sind. Das *Modell 1* mit der Kombination „mit $f_{\sigma, LSt}$ / mit $\phi_{cr, dl}$ “ liefert für die Systeme S1 und S2 durchwegs konservative Ergebnisse für die Beultragfähigkeit. Dabei wird die Beultragfähigkeit im Vergleich zu den GMNIA-Ergebnissen für das System S1 bis zu 8 % und für das System S2 bis zu 1 % unterschätzt. Für das System S3 liefert die Kombination „ohne $f_{\sigma, LSt}$ / mit $\phi_{cr, dl}$ “ eine Unterschätzung der tatsächlichen Beultragfähigkeit von 6 %. Unter Berücksichtigung des Faktors $f_{\sigma, LSt}$ ergibt sich dabei bereits eine Überschätzung von 6 %. Das System S3 stellt jedoch aufgrund der kleinen bezogenen Knickschlankheit ein baupraktisch irrelevantes Fallbeispiel dar und dient grundsätzlich der tendenziellen Beurteilung der Traglastdifferenz (ΔLSF) zwischen endenden und durchlaufenden Längssteifen für den Fall geringer Knickgefährdung (Annäherung an Querschnittsnachweis; siehe Ergebnisvergleich in Anhang A, Abschnitt 6). Das System S4 liefert für das *Modell 1* eine Überschätzung des Beulwiderstandes von 15 %. Mit dem Ansatz von $\psi = 1,0 [-]$ für die Ermittlung der bezogenen Plattenschlankheit $\bar{\lambda}_p$ lässt sich diese Überschätzung auf 6% reduzieren.

Grundsätzlich liefert für die untersuchten Fälle auch der angeführte konservative Ansatz $N_{R, LSt} = N_{R, fy} = A_{LSt, br} \cdot f_y$, welcher keine Iteration zur Ermittlung von χ_c bedarf, eine hinreichende Näherung für die Ermittlung der Beultragfähigkeit des längsausgesteiften Teilfeldes.

Die Ergebnisse bezüglich des knickstabähnlichen Verhaltens sind in Abb. 4.1 und jene der resultierenden Beultragfähigkeit sind in Abb. 4.2 für alle untersuchten Systeme zusammenfassend dargestellt.

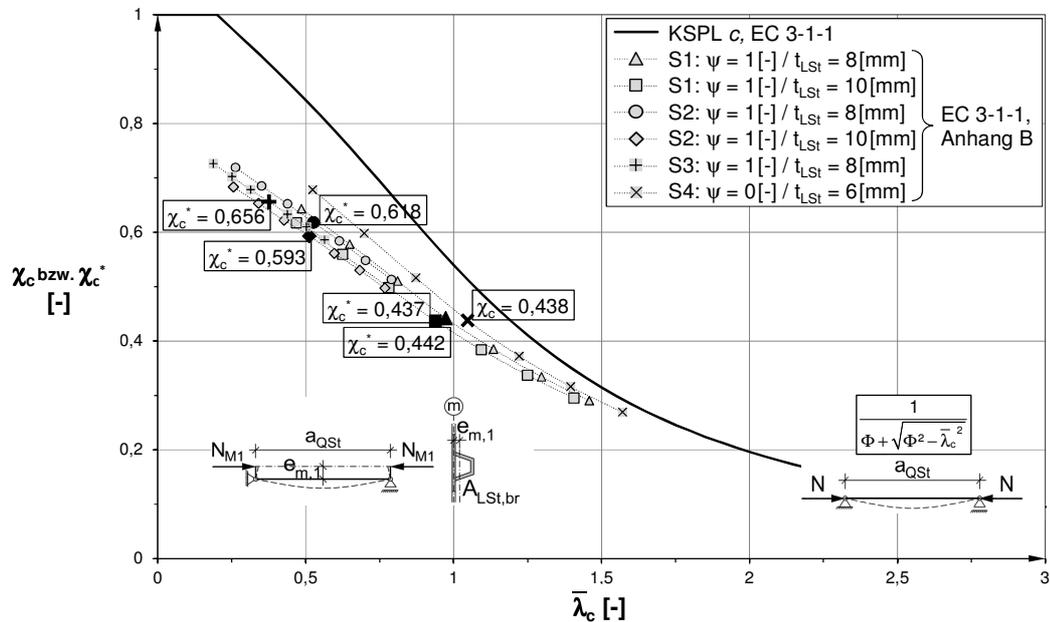


Abb. 4.1: Ergebnisübersicht für das knickstabähnliche Verhalten des „Längssteifenersatzstabes“ von endenden Längssteifen mit der Knicklänge $a_{QSt} = 1500[mm]$ bis $4500[mm]$ (Schrittweite von $500[mm]$) aller Systeme für *Modell 1*

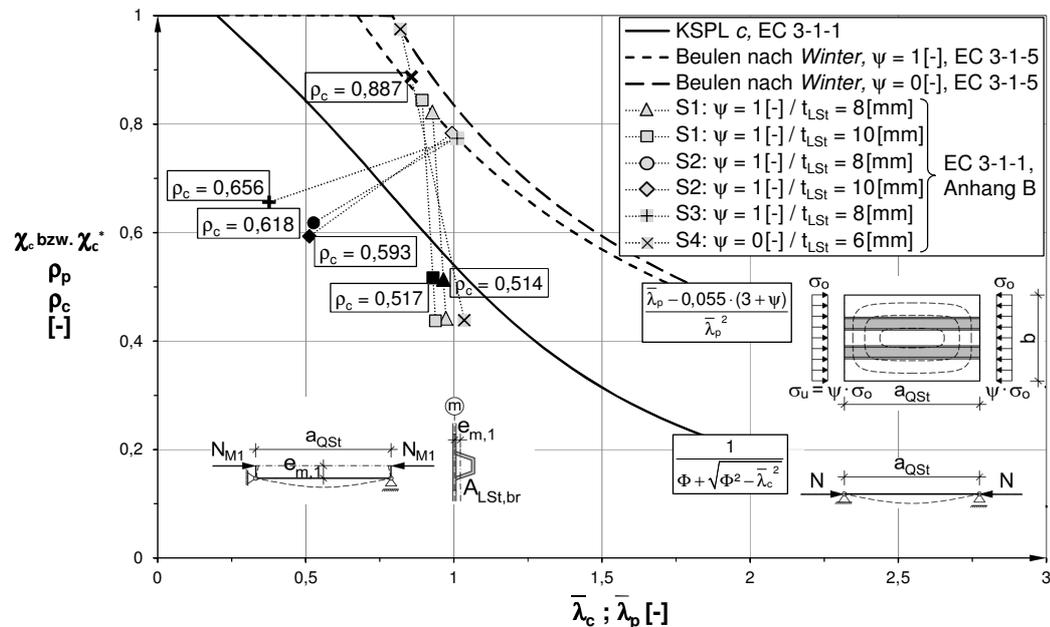


Abb. 4.2: Ergebnisübersicht der Abminderungsfaktoren χ_c bzw. χ_c^* , ρ_p und ρ_c für die Ermittlung der resultierenden Beultragfähigkeit von Teilfeldern mit endenden Längssteifen aller Systeme für *Modell 1*

Um den Einfluss der zusätzlichen Exzentrizität bei endenden Längssteifen zu zeigen, erfolgt ein Ergebnisvergleich für den Abminderungsfaktor des knickstabähnlichen Verhaltens mit (χ_c bzw. χ_c^*) und ohne ($\chi_{c,dI}$) Exzentrizität (siehe Tab. 4.9). Dabei wird auch die Länge des Beulfeldes variiert, wobei jedoch die Längssteifengeometrie, wie für $a_{QSt} = 3000$ [mm], beibehalten wird. Während sich für die Systeme S1 und S4 das Verhältnis der Abminderungsfaktoren $\chi_c^*/\chi_{c,dI}$ bzw. $\chi_c/\chi_{c,dI}$ mit größer werdender bezogener Schlankheit $\bar{\lambda}_c$ merkbar erhöht, bleibt dieses für die Systeme S2 und S3 nahezu unverändert bestehen.

a_{QSt} [mm]	$\chi_c^*/\chi_{c,dI}$ [-]					$\chi_c/\chi_{c,dI}$ [-]
	S1		S2		S3	S4
	$t_{LSt} = 8$ [mm]	$t_{LSt} = 10$ [mm]	$t_{LSt} = 8$ [mm]	$t_{LSt} = 10$ [mm]	$t_{LSt} = 8$ [mm]	$t_{LSt} = 6$ [mm]
1500	0,756	0,717	0,743	0,703	0,726	0,814
2000	0,765	0,726	0,743	0,704	0,721	0,818
2500	0,779	0,739	0,743	0,704	0,721	0,828
3000	0,795	0,757	0,746	0,709	0,721	0,842
3500	0,826	0,789	0,752	0,713	0,722	0,865
4000	0,856	0,822	0,757	0,721	0,724	0,885
4500	0,884	0,850	0,767	0,729	0,727	0,903

Tab. 4.9: Vergleich des Abminderungsfaktor-Verhältnisses $\chi_c^*/\chi_{c,dI}$ bzw. $\chi_c/\chi_{c,dI}$ für *Modell 1*

BERECHNUNGSEINGABE DER NUMERISCHEN TRAGLASTANALYSE MIT ABAQUS

1 Grundlagen

Dieser Anhang beinhaltet die Berechnungseingabe für die geometrisch und materiell nichtlineare Traglastanalyse mit Ersatzimperfectionen (GMNIA) zur Ermittlung des Laststeigerungsfaktors (LSF) von System S1 ($\alpha = 1,5[-]$ / $t_{LSt} = 8[\text{mm}]$ / $\psi = 1,0[-]$ / *Variante 2*) mittels des FE-Programmes ABAQUS Standard [4]. Die in Anhang A, Abschnitt 3, erläuterte FE-Modellierung basiert auf den Voruntersuchungen von Systemen mit durchlaufenden Längssteifen aus [5]. Die nachfolgende parametrisierte Eingabedatei steht sinngemäß stellvertretend für alle geometrisch linearen (LA und LBA) und nichtlinearen Analysen (GMNIA) aller untersuchten Systeme, welche sich durch unterschiedliche Geometriegrößen (b , b_{EF} , h_{LSt} , h_{QSt} , t_{Rf} , t_w), Lastniveaus (N_1 , N_2), Randbedingungen ($I_{z,Bf}$) und Imperfektionsansätze ($\phi_{cr,glob}$, $\phi_{cr,lok}$) unterscheiden.

2 Parametrisierte Eingabe

```
*HEADING
DA KASSIN:
Beultragfaehigkeit laengsausgesteifter Teilfelder mit endenden Laengssteifen
BEAM/SHELL ELEMENTE
SI units (N, mm, MPa)
1-Achse horizontal, 3-Achse vertikal
*PREPRINT, ECHO=NO, MODEL=YES, HISTORY=YES
**
***** MODEL DATA
**
*****
***** Steg
*****
*NODE
100001, 0., 0., 0.
100361, 9000., 0., 0.
150001, 0., 0., 258.3333
150361, 9000., 0., 258.3333
200001, 0., 0., 516.6667
200361, 9000., 0., 516.6667
260001, 0., 0., 816.6667
260361, 9000., 0., 816.6667
290001, 0., 0., 1000.
290361, 9000., 0., 1000.
320001, 0., 0., 1183.3333
320361, 9000., 0., 1183.3333
380001, 0., 0., 1483.3333
380361, 9000., 0., 1483.3333
430001, 0., 0., 1741.6667
430361, 9000., 0., 1741.6667
480001, 0., 0., 2000.
480361, 9000., 0., 2000.
*NGEN, NSET=Randli1
100001, 150001, 5000
*NGEN, NSET=Randre1
100361, 150361, 5000
*NGEN, NSET=Randli2
150001, 200001, 5000
*NGEN, NSET=Randre2
150361, 200361, 5000
*NGEN, NSET=Randli3
200001, 260001, 5000
```

```
*NGEN, NSET=Randre3
200361, 260361, 5000
*NGEN, NSET=Randli4
260001, 290001, 5000
*NGEN, NSET=Randre4
260361, 290361, 5000
*NGEN, NSET=Randli5
290001, 320001, 5000
*NGEN, NSET=Randre5
290361, 320361, 5000
*NGEN, NSET=Randli6
320001, 380001, 5000
*NGEN, NSET=Randre6
320361, 380361, 5000
*NGEN, NSET=Randli7
380001, 430001, 5000
*NGEN, NSET=Randre7
380361, 430361, 5000
*NGEN, NSET=Randli8
430001, 480001, 5000
*NGEN, NSET=Randre8
430361, 480361, 5000
*NSET, NSET=Randli
Randli1, Randli2, Randli3, Randli4, Randli5, Randli6, Randli7, Randli8
*NSET, NSET=Randre
Randre1, Randre2, Randre3, Randre4, Randre5, Randre6, Randre7, Randre8
*NFILL, NSET=Steg
Randli, Randre, 360, 1
**
*NSET, NSET=StegQS1, GENERATE
100001, 480001, 10000
*NSET, NSET=StegQS2, GENERATE
100121, 480121, 10000
*NSET, NSET=StegQS3, GENERATE
100241, 480241, 10000
*NSET, NSET=StegQS4, GENERATE
100361, 480361, 10000
*NSET, NSET=StegLS1u, GENERATE
200121, 200241, 1
*NSET, NSET=StegLS1o, GENERATE
260121, 260241, 1
*NSET, NSET=StegLS2u, GENERATE
320121, 320241, 1
*NSET, NSET=StegLS2o, GENERATE
```

```
380121, 380241, 1
*NSET, NSET=StegLSRfli1, GENERATE
150001, 150121, 1
*NSET, NSET=StegLSRfre1, GENERATE
150241, 150361, 1
*NSET, NSET=StegLSRfli2, GENERATE
290001, 290121, 1
*NSET, NSET=StegLSRfre2, GENERATE
290241, 290361, 1
*NSET, NSET=StegLSRfli3, GENERATE
430001, 430121, 1
*NSET, NSET=StegLSRfre3, GENERATE
430241, 430361, 1
**
*ELEMENT, TYPE=S8R
1100001, 100001, 100003, 110003, 110001, 100002, 105003, 110002, 105001
*ELGEN, ELSET=Stegli
1100001, 60, 2, 1, 38, 10000, 10000
*ELEMENT, TYPE=S8R
2100001, 100121, 100123, 110123, 110121, 100122, 105123, 110122, 105121
*ELGEN, ELSET=Stegm
2100001, 60, 2, 1, 38, 10000, 10000
*ELEMENT, TYPE=S8R
3100001, 100241, 100243, 110243, 110241, 100242, 105243, 110242, 105241
*ELGEN, ELSET=Stegre
3100001, 60, 2, 1, 38, 10000, 10000
*ELSET, ELSET=Stegs
Stegli, Stegre
*SHELL SECTION, ELSET=Stegs, MATERIAL=Stahl
15
*SHELL SECTION, ELSET=Stegm, MATERIAL=Stahl
10
*****
***** Laengsteifen *****
**Laengsteife unten
*NCOPY, CHANGE NUMBER=300000, OLD SET=StegLS1u, REFLECT=LINE, NEW
SET=LS1u
3000., 0., 516.6667, 6000., 0., 516.6667
*NCOPY, CHANGE NUMBER=248000, OLD SET=StegLS1o, REFLECT=LINE, NEW
SET=LS1o
3000., 0., 816.6667, 6000., 0., 816.6667
*NODE
502121, 3000., -101., 553.348
```

```
502241, 6000., -101., 553.348
506121, 3000., -101., 779.985
506241, 6000., -101., 779.985
*NGEN, NSET=LS1Randliu
500121, 502121, 500
*NGEN, NSET=LS1Randlim
502121, 506121, 500
*NGEN, NSET=LS1Randlio
506121, 508121, 500
*NGEN, NSET=LS1Randreu
500241, 502241, 500
*NGEN, NSET=LS1Randrem
502241, 506241, 500
*NGEN, NSET=LS1Randreo
506241, 508241, 500
*NSET, NSET=LS1Randli
LS1Randliu, LS1Randlim, LS1Randlio
*NSET, NSET=LS1Randre
LS1Randreu, LS1Randrem, LS1Randreo
*NFILL, NSET=LS1
LS1Randli, LS1Randre, 120, 1
**
*ELEMENT, TYPE=S8R
5000001, 500121, 500123, 501123, 501121, 500122, 500623, 501122, 500621
*ELGEN, ELSET=LS1
5000001, 60, 2, 1, 8, 1000, 1000
*SHELL SECTION, ELSET=LS1, MATERIAL=Stahl
8
**
**Laengssteife oben
*NCOPY, CHANGE NUMBER=280000, OLD SET=StegLS2u, REFLECT=LINE, NEW
SET=LS2u
3000., 0., 1183.3333, 6000., 0., 1183.3333
*NCOPY, CHANGE NUMBER=228000, OLD SET=StegLS2o, REFLECT=LINE, NEW
SET=LS2o
3000., 0., 1483.3333, 6000., 0., 1483.3333
*NODE
602121, 3000., -101., 1220.015
602241, 6000., -101., 1220.015
606121, 3000., -101., 1446.652
606241, 6000., -101., 1446.652
*NGEN, NSET=LS2Randliu
600121, 602121, 500
*NGEN, NSET=LS2Randlim
```

```
602121, 606121, 500
*NGEN, NSET=LS2Randlio
606121, 608121, 500
*NGEN, NSET=LS2Randreu
600241, 602241, 500
*NGEN, NSET=LS2Randrem
602241, 606241, 500
*NGEN, NSET=LS2Randreo
606241, 608241, 500
*NSET, NSET=LS2Randli
LS2Randliu, LS2Randlim, LS2Randlio
*NSET, NSET=LS2Randre
LS2Randreu, LS2Randrem, LS2Randreo
*NFILL, NSET=LS2
LS2Randli, LS2Randre, 120, 1
**
*ELEMENT, TYPE=S8R
6000001, 600121, 600123, 601123, 601121, 600122, 600623, 601122, 600621
*ELGEN, ELSET=LS2
6000001, 60, 2, 1, 8, 1000, 1000
*SHELL SECTION, ELSET=LS2, MATERIAL=Stahl
8
**
**Krafteinleitungslaengssteifen Randfelder
*NCOPY, CHANGE NUMBER=5000000, OLD SET=StegLSRfli1, REFLECT=LINE,
NEW SET=LSRfli1
0., 0., 258.3333, 3000., 0., 258.3333
*NCOPY, CHANGE NUMBER=6000000, OLD SET=StegLSRfre1, REFLECT=LINE,
NEW SET=LSRfre1
6000., 0., 258.3333, 9000., 0., 258.3333
*NCOPY, CHANGE NUMBER=5000000, OLD SET=StegLSRfli2, REFLECT=LINE,
NEW SET=LSRfli2
0., 0., 1000., 3000., 0., 1000.
*NCOPY, CHANGE NUMBER=6000000, OLD SET=StegLSRfre2, REFLECT=LINE,
NEW SET=LSRfre2
6000., 0., 1000., 9000., 0., 1000.
*NCOPY, CHANGE NUMBER=5000000, OLD SET=StegLSRfli3, REFLECT=LINE,
NEW SET=LSRfli3
0., 0., 1741.6667, 3000., 0., 1741.6667
*NCOPY, CHANGE NUMBER=6000000, OLD SET=StegLSRfre3, REFLECT=LINE,
NEW SET=LSRfre3
6000., 0., 1741.6667, 9000., 0., 1741.6667
**
*ELEMENT, TYPE=B31
```

```
11000001, 5150001, 5150003
*ELGEN, ELSET=LSRfli1
11000001, 60, 2, 1
*ELEMENT, TYPE=B31
12000001, 6150241, 6150243
*ELGEN, ELSET=LSRfre1
12000001, 60, 2, 1
*ELEMENT, TYPE=B31
13000001, 5290001, 5290003
*ELGEN, ELSET=LSRfli2
13000001, 60, 2, 1
*ELEMENT, TYPE=B31
14000001, 6290241, 6290243
*ELGEN, ELSET=LSRfre2
14000001, 60, 2, 1
*ELEMENT, TYPE=B31
15000001, 5430001, 5430003
*ELGEN, ELSET=LSRfli3
15000001, 60, 2, 1
*ELEMENT, TYPE=B31
16000001, 6430241, 6430243
*ELGEN, ELSET=LSRfre3
16000001, 60, 2, 1
*ELSET, ELSET=LSRf
LSRfli1, LSRfre1, LSRfli2, LSRfre2, LSRfli3, LSRfre3
**
*BEAM GENERAL SECTION, ELSET=LSRf
100., 17723028.2, 0., 177230.282, 177230.282
0., 0., 1.
210000.
*****
***** Quersteifen *****
*****
*NCOPY, CHANGE NUMBER=1000000, OLD SET=StegQS1, REFLECT=LINE,
NEW SET=QS1
0., 0., 0., 0., 0., 2000.
*NCOPY, CHANGE NUMBER=2000000, OLD SET=StegQS2, REFLECT=LINE,
NEW SET=QS2
3000., 0., 0., 3000., 0., 2000.
*NCOPY, CHANGE NUMBER=3000000, OLD SET=StegQS3, REFLECT=LINE,
NEW SET=QS3
6000., 0., 0., 6000., 0., 2000.
*NCOPY, CHANGE NUMBER=4000000, OLD SET=StegQS4, REFLECT=LINE,
NEW SET=QS4
```

```
9000., 0., 0., 9000., 0., 2000.
**
*ELEMENT, TYPE=B31
7000001, 1100001, 1110001
*ELGEN, ELSET=QS1
7000001, 38, 10000, 1
*ELEMENT, TYPE=B31
8000001, 2100121, 2110121
*ELGEN, ELSET=QS2
8000001, 38, 10000, 1
*ELEMENT, TYPE=B31
9000001, 3100241, 3110241
*ELGEN, ELSET=QS3
9000001, 38, 10000, 1
*ELEMENT, TYPE=B31
10000001, 4100361, 4110361
*ELGEN, ELSET=QS4
10000001, 38, 10000, 1
*ELSET, ELSET=QS1234
QS1, QS2, QS3, QS4
**
*BEAM SECTION, ELSET=QS1234, MATERIAL=Stahl, SECTION=I
125., 120., 200., 0., 20., 0., 10.
-1., 0., 0.
*****
***** Materialguete
*****
*MATERIAL, NAME=Stahl
*ELASTIC
210000., 0.3
*PLASTIC
355.
*****
***** MPC
*****
**Slider linker Rand
*NSET, NSET=SliderRli, GENERATE
105001, 475001, 5000
*MPC
SLIDER, SliderRli, 100001, 480001
**
**Slider rechter Rand
*NSET, NSET=SliderRre, GENERATE
105361, 475361, 5000
```

```
*MPC
SLIDER, SliderRre, 100361, 480361
*MPC
TIE, LS1u, StegLS1u
*MPC
TIE, LS1o, StegLS1o
*MPC
TIE, LS2u, StegLS2u
*MPC
TIE, LS2o, StegLS2o
*MPC
TIE, QS1, StegQS1
*MPC
TIE, QS2, StegQS2
*MPC
TIE, QS3, StegQS3
*MPC
TIE, QS4, StegQS4
*MPC
TIE, LSRfli1, StegLSRfli1
*MPC
TIE, LSRfre1, StegLSRfre1
*MPC
TIE, LSRfli2, StegLSRfli2
*MPC
TIE, LSRfre2, StegLSRfre2
*MPC
TIE, LSRfli3, StegLSRfli3
*MPC
TIE, LSRfre3, StegLSRfre3
*****
***** Gruppierung *****
*****
*NSET, NSET=Rand, GENERATE
100002, 100360, 1
480002, 480360, 1
*NSET, NSET=Stegm, ELSET=Stegm
*****
***** Randbedingungen *****
*****
*BOUNDARY
Rand, 2
100001, 2
480001, 2
```

100361, 2
480361, 2
100001, 3
100361, 3
290181, 1

***** *Imperfektion*

*IMPERFECTION, FILE=LBA_S1_t8, STEP=1

1, 1.799595000

31, -5.405054807

**

***** HISTORY DATA

**

***** *Nichtlineare Traglastanalyse (GMNIA)*

*STEP, NLGEOM, INC=150

*STATIC, RIKS

0.01, , , 0.01

*CLOAD, FOLLOWER, OP=NEW

100001, 1, 4803993.48

480001, 1, 4803993.48

100361, 1, -4803993.48

480361, 1, -4803993.48

*OUTPUT, FIELD

*NODE OUTPUT

U, RF

*ELEMENT OUTPUT

S, E, SF, SSAVG

*NODE PRINT, NSET=Stegm

U

RF

*EL PRINT, ELSET=Stegm

S

SF

*END STEP