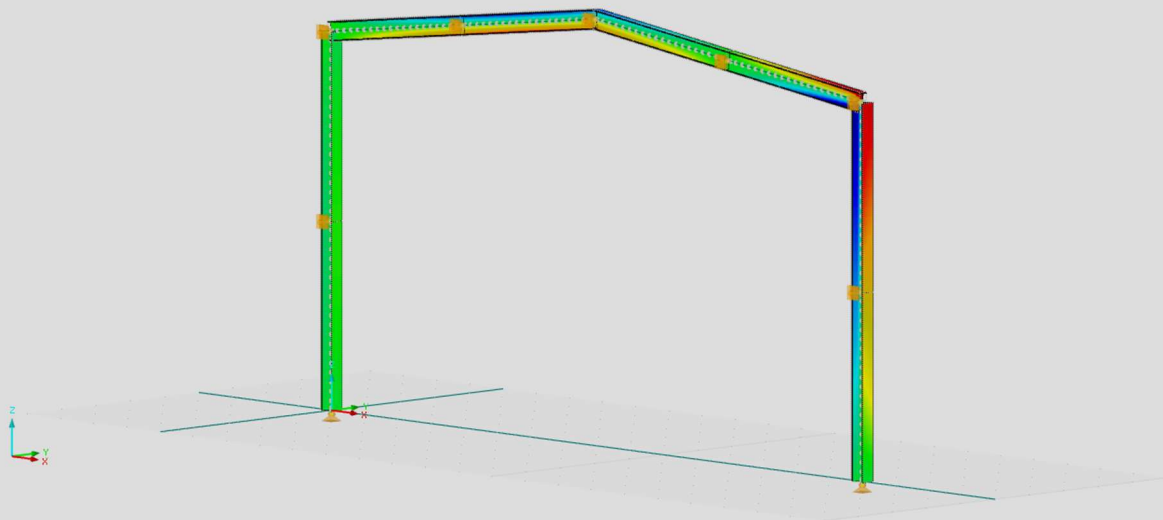


Vergleich der derzeitigen und zukünftigen Stahlbaunorm EN 1993-1-1 anhand von Musterbeispielen



D-5/83/2020

Ploier Heinz
Institut für Stahlbau
Technische Universität Graz

Technische Universität Graz
Fakultät für Bauingenieurwissenschaften
Institut für Stahlbau



Vergleich der derzeitigen und zukünftigen Stahlbaunorm EN 1993-1-1 anhand von Musterbeispielen

Masterarbeit

eingereicht von

Heinz Ploier

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

Zweitbetreuer: Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Markus Kettler

Drittbetreuer: Dipl.-Ing. BSc. Christoph Derler

Graz, am 3. Juni 2020

Kurzbeschreibung

Durch die Neuauflage der aktuell gültigen Stahlbau-Grundnorm EN 1993-1-1 haben sich mitunter auch inhaltliche Änderungen in einigen Abschnitten ergeben. Um die Änderungen bzw. deren Auswirkungen auf die Bemessungspraxis aufzuzeigen, wurden im Rahmen dieser Masterarbeit Musterbeispiele ausgearbeitet, die sich — wie auch die Schwerpunkte der inhaltlichen Änderungen — in 3 Kapitel einteilen lassen:

- Systemstabilität
- Stabstabilität
- Querschnittstragfähigkeit

Daraus ergibt sich die Gliederung dieser Arbeit in die oben genannten 3 Hauptkapitel. Innerhalb dieser Kapitel werden zunächst die inhaltlichen Änderungen zwischen der Neuauflage von EN 1993-1-1 (in der Folge bezeichnet als „EC3-neu“) und der aktuell noch gültigen Version (in der Folge bezeichnet als „EC3-alt“) überblicksmäßig dargelegt und diese im Anschluss durch konkrete Berechnungsbeispiele illustriert.

In den Beispielen wurde Hauptaugenmerk auf die Gegenüberstellung der „alten“ und „neuen“ Fassung von EN 1993-1-1 gelegt, sodass etwaige Änderungen auch quantitativ erkennbar werden. Alle Teile, die sich auf „EC3-alt“ beziehen, wurden zur besseren Erkennbarkeit in einem dezenten Grau hinterlegt. Zu jedem Berechnungsschritt ist zusätzlich auch die zugehörige Normenpassage, sowohl der „alten“ als auch der „neuen“ Fassung von EN 1993-1-1, angeführt. Bei Berechnungen, die nach „alter“ und „neuer“ Fassung von EN 1993-1-1 in gleicher Weise erfolgen, sich jedoch dafür unterschiedliche Ergebnisse aufgrund von Änderungen in den Eingangsparametern ergeben, wurden die Ergebnisse nach „EC3-alt“ rechtsbündig und grau hinterlegt in eckigen Klammern der Vollständigkeit halber mitangeführt.

Abstract

The new version of the European Standard for the Design of Steel Structures EN 1993-1-1 comes with content-related changes in various sections. To demonstrate the changes as well as its effects on the design practice, this Master thesis provides worked examples that are structured in 3 main chapters as follows:

- Stability of systems
- Stability of members
- Resistance of cross sections

Within those main chapters, the content-related changes between the new version (in the following referred to as „EC3-new“) and the actually valid version of EN 1993-1-1 (in the following referred to as „EC3-old“) are presented in detail to provide an overview and furthermore underlined with individual worked examples.

Therefore, the comparison of the „old“ and „new“ version of EN 1993-1-1 does not only show the content-related changes, but also the quantitative effects of them. All parts that refer to „EC3-old“ are shaded with a decent gray. For all steps in the calculations, the relevant sections of the European Standards are mentioned for both the old and the new version of EN 1993-1-1. When calculations are performed identically in „EC3-new“ and „EC3-old“ but have different results (caused by changes in the determination of the parameters), the results referring to „EC3-old“ are added right-justified, gray-shaded in square brackets.

Danksagung

Der größte Dank richtet sich an meine Eltern, die mich zu dem Menschen machten, der ich heute bin. Ihr habt mich stets unterstützt wo auch immer ihr konntet und mir jede Entscheidungsfreiheit überlassen, welchen Lebensweg ich einschlagen möchte. Durch eure Großzügigkeit und den emotionalen Rückhalt habt ihr dieses Studium erst möglich gemacht.

Meine äußerste Dankbarkeit richtet sich selbstverständlich auch an die Technische Universität Graz, an das Institut für Stahlbau unter der Leitung von Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Harald Unterwiesing und meine Betreuer Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Markus Kettler und Dipl. Ing. Christoph Derler. Vielen Dank für die angenehme, lehrreiche und zielführende Zusammenarbeit.

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.

.....

Datum

.....

Unterschrift

Symbole und Abkürzungen

• Versagensmechanismen

LTB	lateral torsional buckling — Biegedrillknicken zufolge Biegung
TFB	torsional flexural buckling — Biegedrillknicken zufolge Normalkraft
BDK	Biegedrillknicken
BK_{yy}	Biegeknicken um die y-Achse
BK_{zz}	Biegeknicken um die z-Achse

• Schnittkräfte und Spannungen

M	Biegemoment
N	Normalkraft
V	Querkraft
B	Wölbbimoment
σ	Spannung
ψ	Verhältnis der Randspannungen am Querschnittsteil

• Materialkennwerte

E	Elastizitätsmodul
G	Schubmodul
f_y	Fließgrenze, Streckgrenze
ν	Poissonzahl

• Querschnittskennwerte

A	Querschnittsfläche
W	Widerstandsmoment
S	elastisches Flächenmoment 1. Grades
Z	plastisches Flächenmoment 1. Grades
I	Flächenträgheitsmoment (Flächenmoment 2. Grades)

• Indizes

f	Flansch [engl. „flange“]
w	Steg [engl. „web“]
s	klein [engl. „small“; <i>Anm.: Flansch bei monosymmetrischen Querschnitten</i>]
l	groß [engl. „large“; <i>Anm.: Flansch bei monosymmetrischen Querschnitten</i>]
el	elastisch
pl	plastisch
ep	elasto-plastisch
E	Einwirkung [engl. „effect“]
R	Widerstand [engl. „resistance“]
d	design
k	charakteristisch
cr	kritisch (Verzweigungslast)
y	um die y-Achse
z	um die z-Achse
p	polar
ω	Wölbkraft
T	Torsion

• Sonstiges

KSL	Knickspannungslinie
$GMNIA$	[engl. „Geometrically and Materially Nonlinear Analysis with Imperfections“]

Inhaltsverzeichnis

Kurzbeschreibung	iii
Abstract	v
Danksagung	vii
Eidesstattliche Erklärung	ix
Symbole und Abkürzungen	xi
1 Einleitung	1
2 Systemstabilität	3
2.1 Beispiel: Rahmentragwerk	6
2.1.1 Nachweisverfahren EM EN 1993-1-1 Pkt.7.2.2(9)	27
2.1.2 Nachweisverfahren M3 EN 1993-1-1 Pkt.7.2.2(7a)	40
2.1.3 Nachweisverfahren M4 EN 1993-1-1 Pkt.7.2.2(7b)	52
2.1.4 Nachweisverfahren M5 EN 1993-1-1 Pkt.7.2.2(8)	72
2.1.5 Gegenüberstellung der Ergebnisse	76
3 Stabstabilität	77
3.1 Biegeknicken unter zentrischer Drucknormalkraft	79
3.1.1 Beispiel: Biegeknicken unter zentrischer Drucknormalkraft N_{Ed} .	80
3.2 Biegedrillknicken unter alleinigem Biegemoment	87
3.2.1 Beispiel: Biegedrillknicken unter alleinigem Biegemoment $M_{y,Ed}$.	90
3.3 Drill- bzw. Biegedrillknicken unter zentrischer Drucknormalkraft	100

3.3.1	Beispiel: Drill- bzw. Biegedrillknicken unter zentrischer Drucknormalkraft N_{Ed}	102
3.4	Stabilität doppeltsymmetrischer Querschnitte unter Druck und Biegung	111
3.4.1	Beispiel: Biegedrillknicken doppeltsymmetrischer Querschnitte unter Biegemoment $M_{y,Ed}$ und Drucknormalkraft N_{Ed}	113
3.5	Stabilität monosymmetrischer Querschnitte unter Druck und Biegung	132
3.5.1	Beispiel: Biegedrillknicken monosymmetrischer Querschnitte unter Biegemoment $M_{y,Ed}$ und Drucknormalkraft N_{Ed}	134
4	Querschnittstragfähigkeit	153
4.1	Querschnittsklassifizierung	156
4.2	Neues, alternatives Bemessungskonzept zur wirtschaftlicheren Ausnutzung von Querschnitten der Klasse 3	157
4.2.1	Beispiel: Tragfähigkeit semi-kompakter Querschnitte nach EN 1993-1-1-„neu“: Anhang B — HEAA-300 unter zweiachsiger Biegung und Druck	161
4.2.2	Beispiel: Tragfähigkeit semi-kompakter Querschnitte nach EN 1993-1-1-„neu“: Anhang B — IPE-500 unter einachsiger Biegung und Druck	180
4.3	Neue Querschnittsinteraktion für die Bemessung von Querschnitten der Klassen 1 und 2 unter Biegung und Wölbkrafttorsion	197
4.3.1	Beispiel: Exzentrisch eingeleitete Vertikallast	198
4.4	Neues Berechnungsmodell für den Widerstand unausgesteifter Stegbleche gegenüber lokalen Querlasten	204
4.4.1	Beispiel: Steifenlose Krafteinleitung	206
	Literatur	211
	Abbildungsverzeichnis	213
	Tabellenverzeichnis	221

1 Einleitung

Im Kapitel **2 Systemstabilität** werden anhand eines baupraktischen Zweigelenkrahmens die neu in EN 1993-1-1 definierten, verschiedenen Methoden der Tragwerksberechnung durchgeführt. Es wird zunächst auf die Anwendungsgrenzen der jeweiligen Methoden eingegangen und deren Anwendbarkeit anhand des Beispiels überprüft. In einem weiteren Schritt werden die Imperfektionen in Form von globaler Anfangsschiefstellung und lokalen Stabvorkrümmungen berechnet. Im Zuge dessen wird auch als Alternative die Eigenmode-konforme Imperfektion ermittelt, welche anstelle einer Kombination der eben erwähnten geometrischen Ersatzimperfektionen (Schiefstellung + Vorkrümmungen) am System aufgebracht werden kann. Eine räumliche Traglastrechnung nach Theorie II. Ordnung unter Berücksichtigung aller Imperfektionen - wie es die anspruchsvollste Methode der Tragwerksberechnung (Methode M5) vorsieht - kann aufgrund der zu berücksichtigenden Effekte aus Wölbkrafttorsion nur durch hochstehende Softwarepakete wie beispielsweise ABAQUS exakt bestimmt werden, da hierfür auch der Verwölbungsfreiheitsgrad berücksichtigt werden muss. Aufgrund der Tatsache, dass ABAQUS jedoch vorwiegend im Wissenschaftsbereich verwendet wird, wurde in dieser Arbeit auch Wert darauf gelegt, für den Anwender praktische (Näherungs-)Lösungswege mit Stabwerksprogrammen wie RFEM zur Verfügung zu stellen. Das Kapitel 2 wird durch eine Gegenüberstellung der Ausnutzungsgrade der einzelnen Methoden der Tragwerksberechnung abgeschlossen.

Das Kapitel **3 Stabstabilität** beschreibt die Änderungen bezüglich dem Stabilitätsverhalten von Einzelstäben und verdeutlicht diese durch Berechnungsbeispiele unter Berücksichtigung verschiedener Belastungskombinationen und Randbedingungen. Unter anderem wird auf die Belastungssituationen „alleinige Druckbeanspruchung“, „alleinige Biegebeanspruchung“ und „kombinierte Beanspruchung aus Drucknormalkraft und Biegemoment“ eingegangen. Weiters wird der Fall eines Druckstabes mit gebundener Drehachse untersucht, bei dem das Drillknicken zur maßgebenden Versagensform wird. Abschließend wird auch das Stabilitätsverhalten von monosymmetrischen Querschnitten behandelt, das sich zum Teil deutlich von jenem von doppelsymmetrischen Querschnitten unterscheidet.

Zuletzt wird im Kapitel **4 Querschnittstragfähigkeit** in erster Linie auf das neue Bemessungsmodell zur Berechnung der Tragfähigkeit von Querschnitten der Klasse 3 (semikomakte Querschnitte) eingegangen. Das Wesentliche daran ist die neu formulierte Möglichkeit, teilplastische Tragreserven von Querschnitten der Klasse 3 — die bisher rein elastisch zu bemessen waren — in Rechnung zu stellen. Diese neue Regelung ist darauf zurückzuführen, dass beim Übergang von Querschnittsklasse 3 auf 2 es bisher zu einem mechanisch nicht rechtfertigbarem Sprung in der Tragfähigkeit gekommen ist (reinelastische bzw. vollplastische Tragfähigkeit). Die Neuauflage von EN 1993-1-1 bietet nun die Möglichkeit, zutreffende elasto-plastische Querschnittstragfähigkeiten zu interpolieren. Die weiteren Neuerungen betreffen ein ergänzendes Interaktionsmodell bei gleichzeitiger Wirkung von Biegemoment und Wölbbimoment sowie ein vereinfachtes Verfahren zur Ermittlung des Widerstands unausgesteifter Stegbleche gegenüber lokalen Querlasten.

2 Systemstabilität

Zum Thema Systemstabilität haben sich in der Neuauflage von EN 1993-1-1 Änderungen und Ergänzungen in folgenden Bereichen ergeben:

- 1) Berücksichtigung von Stabilitätseffekten in der globalen Tragwerksberechnung
- 2) Abbildung des plastischen Materialverhaltens in der Systemberechnung
- 3) c/t -Grenzwerte zur Querschnittsklassifizierung
- 4) Methoden der globalen Tragwerksberechnung für Nachweise im ULS
- 5) Imperfektionen

1) Berücksichtigung von Stabilitätseffekten in der globalen Tragwerksberechnung

In EN 1993-1-1: Pkt. 7.2.1 findet sich nun eine neue Definition der Abgrenzungskriterien hinsichtlich einer Systemberechnung nach Theorie I./ Theorie II. Ordnung, sprich ab wann lokale und/oder globale Stabilitätseffekte in der Systemberechnung mitzuerfassen sind. Dazu ist für die Ermittlung des Verzweigungslastfaktors α_{cr} künftig zwischen lokalem Stabknicken ($\alpha_{cr,ns}$. . . „non-sway“) und globalem Ausweichen des Systems ($\alpha_{cr,sw}$. . . „sway“) zu differenzieren. Die Effekte aus Theorie II. Ordnung (lokal und global) dürfen nur vernachlässigt werden wenn:

$$\alpha_{cr,ns} = \frac{F_{cr,ns}}{F_{Ed}} \geq k_0 (= 25) \quad \text{und} \quad \alpha_{cr,sw} = \frac{F_{cr,sw}}{F_{Ed}} \geq 10$$

Zusätzlich werden die vereinfachten Berechnungsformeln zur Ermittlung von $\alpha_{cr,sw}$ für Rahmentragwerken von Hallen und Geschoßbauten in EN 1993-1-1: Pkt. 7.2.1(10)B richtiggestellt.

2) Abbildung des plastischen Materialverhaltens in der Systemberechnung

Die Anwendbarkeit der Fließgelenktheorie bei der plastischen Systemberechnung wird im Hinblick auf die verwendete Stahlsorte und den vorliegenden Materialeigenschaften limitiert. Die Regelungen hierzu finden sich in EN 1993-1-1: Pkt. 7.4 bzw. 7.6.

3) c/t -Grenzwerte zur Querschnittsklassifizierung

Die geänderten c/t -Klassifizierungsgrenzwerte für beidseitig gestützte Querschnittsteile unter Druck sind in EN 1993-1-1: Tab. 7.3 (siehe auch Abbildung 2.1) zu finden. Des Weiteren werden die Klassifizierungsgrenzwerte für runde Hohlprofile geändert und Klassifizierungsgrenzwerte für elliptische Hohlprofile neu aufgenommen, wobei bei diesen ein äquivalenter Durchmesser d_e zu verwenden ist.

Internal compression parts			
Key 1 Axis of bending			
Stress distribution in parts (compression positive)			
Class 1	$c/t \leq 72 \epsilon$	$c/t \leq 28 \epsilon$	when $\alpha_c > 0,5$: $c/t \leq \frac{126 \epsilon}{5,5 \alpha_c - 1}$ when $\alpha_c \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{36 \epsilon}{\alpha_c}$
Class 2	$c/t \leq 83 \epsilon$	$c/t \leq 34 \epsilon$	when $\alpha_c > 0,5$: $c/t \leq \frac{188 \epsilon}{6,53 \alpha_c - 1}$ when $\alpha_c \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5 \epsilon}{\alpha_c}$
Stress distribution in parts (compression positive)			
Class 3	$c/t \leq 121 \epsilon$	$c/t \leq 38 \epsilon$	when $\psi > -1$: $c/t \leq \frac{38 \epsilon}{0,608 + 0,343 \psi + 0,049 \psi^2}$ when $\psi \leq -1^a$: $\frac{c}{t} \leq 60,5 \epsilon (1 - \psi)$

Abbildung 2.1: Klassifizierungsgrenzwerte beidseitig gestützter Querschnittsteile (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 7.3) — **Anm.:** Druckspannungen sind hier positiv definiert.

Hinweis: Geänderte c/t -Grenzwerte sind in Abbildung 2.1 durch dicke Rahmenlinien hervorgehoben.

4) Methoden der globalen Tragwerksberechnung für Nachweise im ULS

Die in EN 1993-1-1: Pkt. 7.2.2 angeführten Methoden der Tragwerksberechnung (M0, M1, M2, M3, M4, M5, EM) werden in Anlehnung an die bisher in ÖNORM B 1993-1-1: Abschnitt 7 vorgesehenen Verfahren nun auch in EN 1993-1-1 eingeführt. Abbildung 2.2 zeigt den Entscheidungsbaum zur Methodenwahl basierend auf den Verzweigungslastfaktoren $\alpha_{cr,ns}$ und $\alpha_{cr,sw}$.

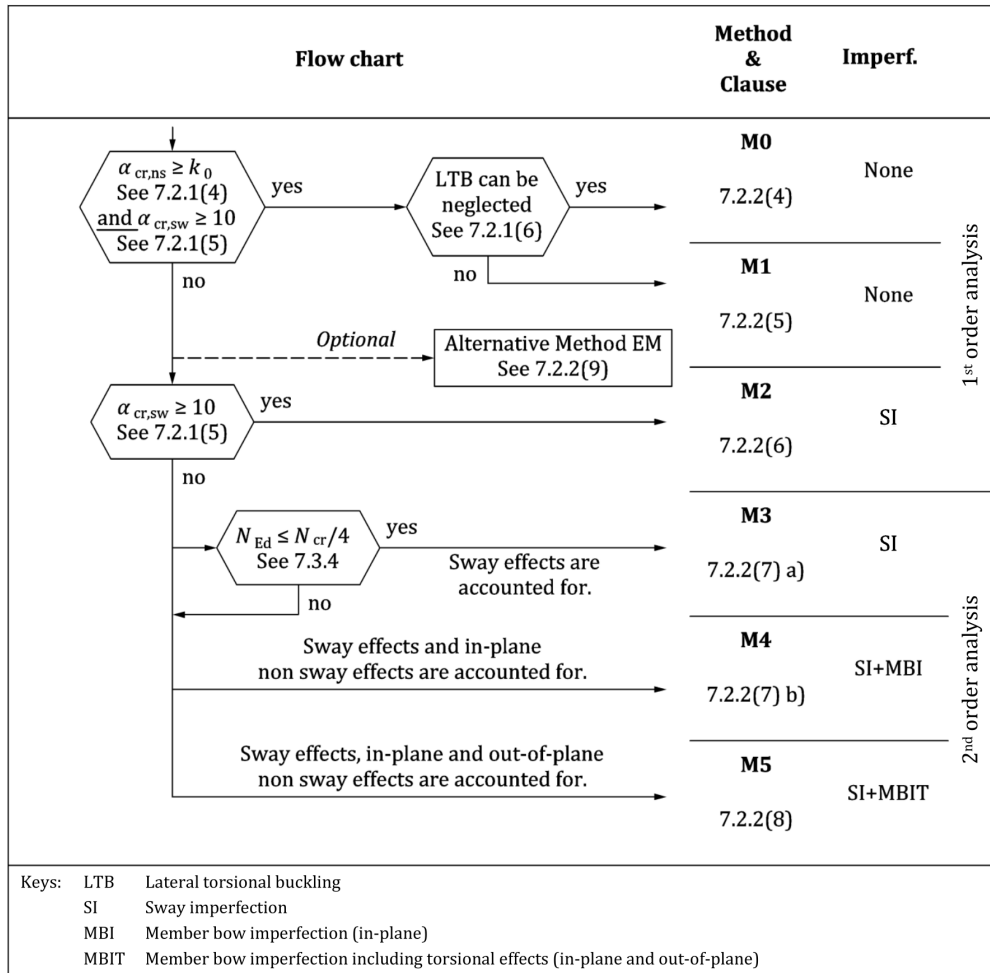


Abbildung 2.2: Flussdiagramm zu den Methoden der Tragwerksberechnung (Auszug aus EN 1993-1-1: Abb. 7.3)

5) Imperfektionen

Es gibt Änderungen bei den Werten der anzusetzenden Anfangsschiefstellung ϕ_0 , bei deren Ermittlung künftig auch zwischen elastischer und plastischer Systemberechnung differenziert wird. Zusätzlich entfällt die untere Begrenzung des Faktors α_h (mit $\frac{2}{3}$).

Auch die Werte für die Stabvorkrümmung e_0 - sowohl für das Biegeknicken als auch für das Biegedrillknicken - werden neu festgelegt. Für das Biegeknicken muss nun auch die Stahlgüte und die Ausweichrichtung (y-y bzw. z-z) berücksichtigt werden. Bei Verwendung von Eigenmode-konformen Imperfektionen ist die Definition des Amplitudenwertes η_{init} , mit welchem die anzusetzende Eigenform zu skalieren ist, zu beachten.

2.1 Beispiel: Rahmentragwerk

Gegeben sei der in Abbildung 2.3 dargestellte Zweigelenk-Rahmen, bestehend aus Stützen aus HEA-320-Profilen sowie einem Riegel aus IPE-400-Profilen, jeweils gefertigt aus Stahl der Stahlgüte S235. Der Rahmen ist an den Fußpunkten jeweils gelenkig gelagert. Die Rahmenecken sowie die Firstverbindung sind biegesteif ausgeführt. Aufgrund der Aussteifungssituation sind alle Stäbe an den Enden sowie auch in Stabmitte sowohl gegen seitliches Ausweichen um z-z (d.h. in Richtung der y-Achse) als auch gegen Verdrehung um x-x gehindert. Als Beanspruchung erfährt das System eine Kombination aus Eigengewicht, Nutz-, Schnee- und Windlasten.

• Anlageverhältnisse und statisches System:

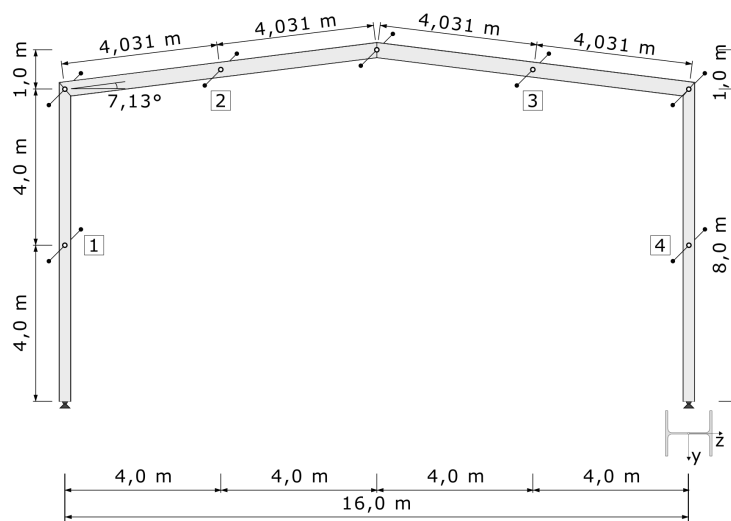


Abbildung 2.3: Statisches System des Rahmentragwerks

• Querschnitte:

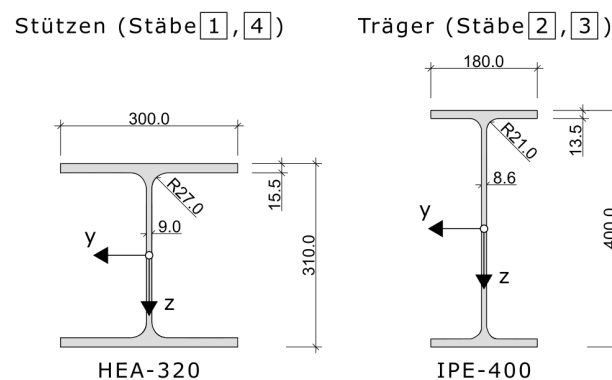


Abbildung 2.4: Abmessungen der verwendeten Profile

• **Bemessungslasten:**

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird ein resultierender Gesamtlastfall (bestehend aus Lastfall 1 und 2 gemäß Abbildung 2.5) untersucht. Dieser deckt die Bemessungswerte der Einzelbeanspruchungen aus ständiger Last, Schnee, Nutzlast und Wind ab. Die Normalkraft in den Stützen wird bewusst erhöht, sodass der Hallenrahmen - verglichen mit praktischen Fällen - eine deutlich erhöhte Knickgefahr aufweist.

- Linienlast aus Eigengewicht, Nutzlast und Schnee: $(g + q + s)_d = 8,1 \text{ kN/m}$
- Einzellast aus Nutzlast: $Q_d = 100 \text{ kN}$
- Windlast „Druckseite“: $w_{1,d} = 3,2 \text{ kN/m}$
- Windlast „Sogseite“: $w_{2,d} = -1,2 \text{ kN/m}$

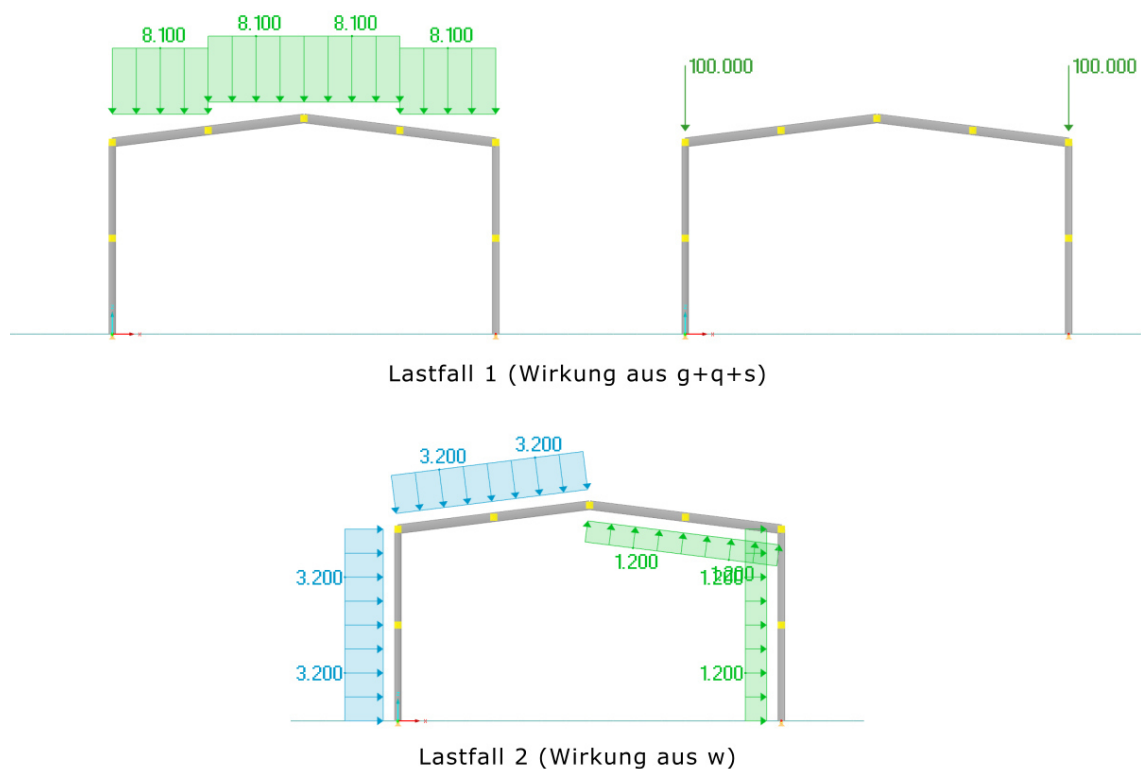


Abbildung 2.5: γ_F -fache charakteristische Lasten (Bemessungslasten)

• **Material:** Stahl S235

- $f_{yd} = 235 \text{ N/mm}^2$
- $E_s = 210.000 \text{ N/mm}^2$
- $\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1,0$
- $\gamma_{M,0} = \gamma_{M,1} = 1,0$

• **Querschnittskennwerte:**

Tabelle 2.1: Querschnittskennwerte HEA-320 (Stützenprofil)

$h = 31,0\text{cm}$	$b = 30,0\text{cm}$	$t_f = 1,55\text{cm}$	$t_w = 0,9\text{cm}$
$I_y = 22930\text{cm}^4$	$I_z = 6990\text{cm}^4$	$i_y = 13,6\text{cm}$	$i_z = 7,49\text{cm}$
$W_{el,y} = 1480\text{cm}^3$	$W_{el,z} = 466\text{cm}^3$	$W_{pl,y} = 1628\text{cm}^3$	$W_{pl,z} = 710\text{cm}^3$
$A = 124,0\text{cm}^2$	$G = 81000\text{kN/mm}^2$	$I_T = 108\text{cm}^4$	$I_\omega = 15,12 * 10^5\text{cm}^6$

Tabelle 2.2: Querschnittskennwerte IPE-400 (Trägerprofil)

$h = 40,0\text{cm}$	$b = 18,0\text{cm}$	$t_f = 1,35\text{cm}$	$t_w = 0,86\text{cm}$
$I_y = 23130\text{cm}^4$	$I_z = 1320\text{cm}^4$	$i_y = 16,5\text{cm}$	$i_z = 3,95\text{cm}$
$W_{el,y} = 1160\text{cm}^3$	$W_{el,z} = 146\text{cm}^3$	$W_{pl,y} = 1307\text{cm}^3$	$W_{pl,z} = 229\text{cm}^3$
$A = 84,5\text{cm}^2$	$G = 81000\text{kN/mm}^2$	$I_T = 51,1\text{cm}^4$	$I_\omega = 4,90 * 10^5\text{cm}^6$

• **Berechnungsannahmen:**

- elastische Systemberechnung
- plastische Querschnittsausnutzung
- starres Last-Verformungsverhalten der Knoten (Rahmenecken)
- Bauwerks-Boden-Interaktion bleibt unberücksichtigt, Modellierung als starre Auflagerbedingung

Bemessungsschnittkräfte nach Theorie I. Ordnung (ohne Imperfektionen)

Nachfolgend dargestellt sind die Schnittkraftverläufe (Bemessungswerte) am Hallenrahmen nach Theorie I. Ordnung, ohne Imperfektionen und unter der Wirkung des Gesamtlastfalls (LF1 + LF2).

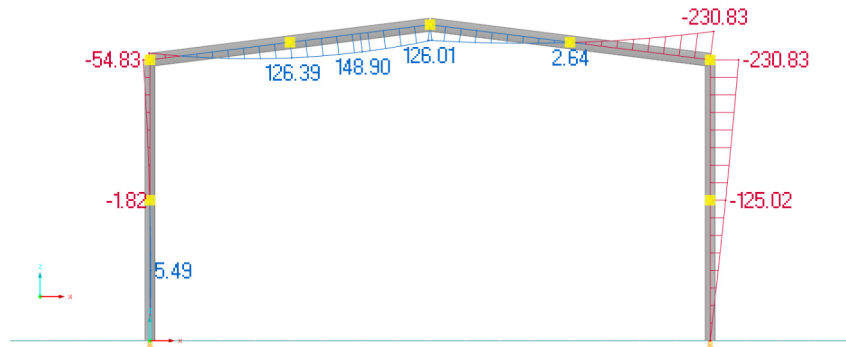


Abbildung 2.6: Bemessungsbiegemomente $M_{y,Ed}^{I.O.}$ [kNm]

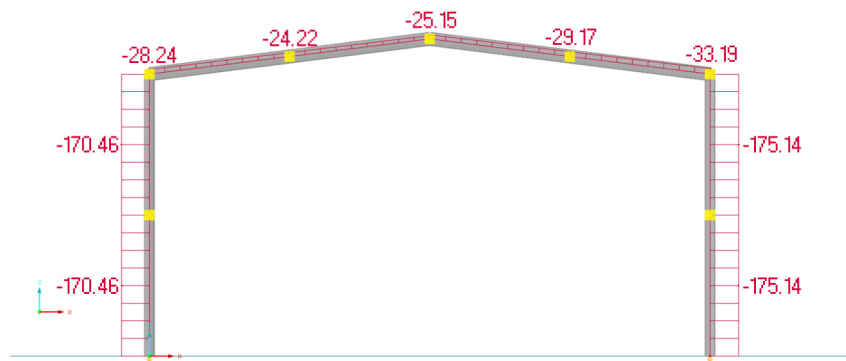


Abbildung 2.7: Bemessungsnormalkräfte $N_{Ed}^{I.O.}$ [kN]

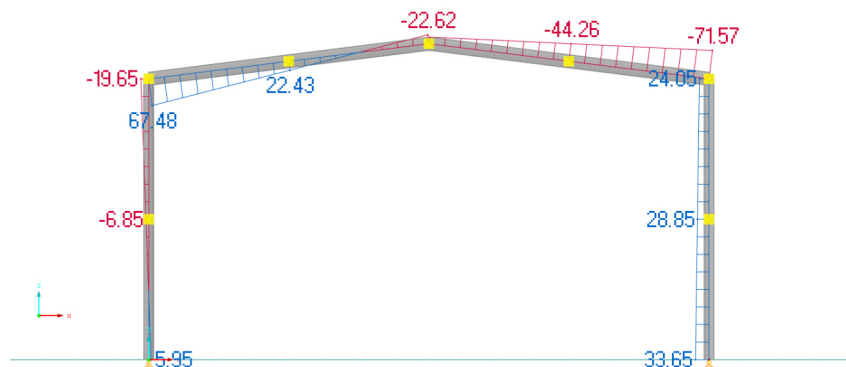


Abbildung 2.8: Bemessungsquerkräfte $V_{z,Ed}^{I.O.}$ [kN]

Querschnittsklassifizierung
EN 1993-1-1 Pkt. 7.5

Tabelle 2.3 zeigt die für den HEA-320 zutreffenden Werte für c und t des Steg- bzw. Flanschblechs; Tabelle 2.4 zeigt dies für das IPE-400-Profil. Der Wert c steht hierbei für die ungestützte Länge des gedrückten Blechs, t ist die zugehörige Blechdicke.

Tabelle 2.3: HEA-320: Werte für c und t bzw. c/t

HEA-320	c [mm]	t [mm]	c/t [-]
Steg	225,0	9,0	25,00
Flansch	118,5	15,5	7,65

Tabelle 2.4: IPE-400: Werte für c und t bzw. c/t

IPE-400	c [mm]	t [mm]	c/t [-]
Steg	331,0	8,6	38,49
Flansch	64,7	13,5	4,79

Die Stütze (HEA-320) wird am Stützenfuß des Stabs 4 klassifiziert ($N_{Ed} = -175,14kN$), da dies die ungünstigste Stelle ist (rein gedrückter Querschnitt). Für den Riegel (IPE-400) wird die Querschnittsklassifizierung unmittelbar am rechten Rahmeneck vorgenommen ($N_{Ed} = -33,19kN$, $M_{Ed} = -230,83kN$).

Hinweis: Geänderte Klassifizierungsgrenzwerte für beidseitig gestützte Querschnittsteile in „EC3-neu“.

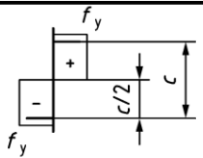
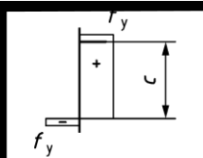

Stress distribution in parts (compression positive)			
Class 1	$c/t \leq 72 \varepsilon$	$c/t \leq 28 \varepsilon$	when $\alpha_c > 0,5$: $c/t \leq \frac{126 \varepsilon}{5,5 \alpha_c - 1}$ when $\alpha_c \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{36 \varepsilon}{\alpha_c}$
Class 2	$c/t \leq 83 \varepsilon$	$c/t \leq 34 \varepsilon$	when $\alpha_c > 0,5$: $c/t \leq \frac{188 \varepsilon}{6,53 \alpha_c - 1}$ when $\alpha_c \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5 \varepsilon}{\alpha_c}$

Abbildung 2.9: Klassifizierungsgrenzwerte Stegblech (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 7.3)

Stress distribution in parts (compression positive)			
Class 1	$c/t \leq 9 \varepsilon$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha_c}$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha_c \sqrt{\alpha_c}}$
Class 2	$c/t \leq 10 \varepsilon$	$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha_c}$	$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha_c \sqrt{\alpha_c}}$

Abbildung 2.10: Klassifizierungsgrenzwerte Flanschblech (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 7.3)

Aufgrund der kombinierten Beanspruchung aus $N + M$ im Trägerprofil (IPE-400) ist hier vorweg die Lage der plastischen Nulllinie - ausgedrückt durch den Lageparameter α_c - zu bestimmen.

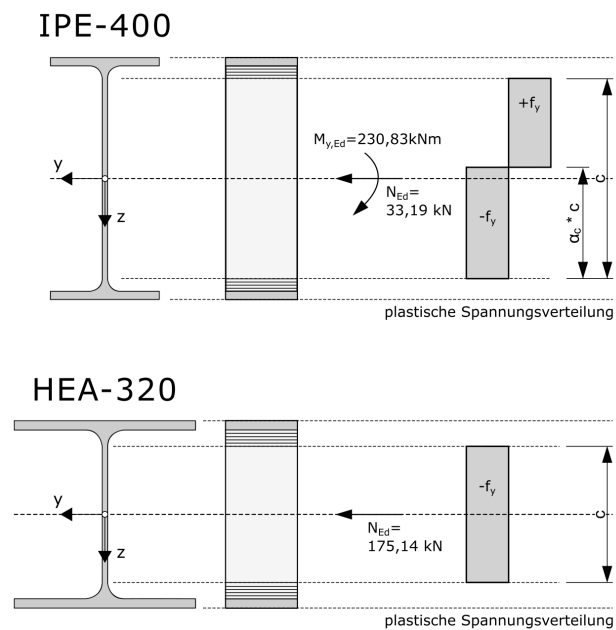


Abbildung 2.11: Plastische Spannungsverteilungen im jeweils maßgebenden Querschnitt in Stütze und Träger

Der Lageparameter α_c lässt sich über die nachfolgende Formel bestimmen:

$$\alpha_c = 0,5 * \left(1 + \frac{N_{Ed}}{c * t_w * f_y}\right) \quad (2.1)$$

$$\alpha_c = 0,5 * \left(1 + \frac{N_{Ed}}{c * t_w * f_y}\right) = 0,5 * \left(1 + \frac{33,19}{33,10 * 0,86 * 23,5}\right) = 0,525 > 0,5$$

Mit dem Materialparameter $\epsilon = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1,0$ für S235 ergibt sich die Querschnittseinteilung wie folgt:

Riegel:

Steg:

$$\frac{c}{t} = 38,49 \leq \left(\frac{c}{t}\right)_{\text{grenz}, QK1} = \frac{126 * \epsilon}{5,5 * \alpha_c - 1} = \frac{126 * 1,0}{5,5 * 0,525 - 1} = 66,75 \rightarrow QK1$$

Flansch:

$$\frac{c}{t} = 4,79 \leq \left(\frac{c}{t}\right)_{\text{grenz}, QK1} = 9 * \epsilon = 9 * 1,0 = 9,00 \rightarrow QK1$$

Stütze:

Steg:

$$\frac{c}{t} = 25,00 \leq \left(\frac{c}{t}\right)_{\text{grenz}, QK1} = 28 * \epsilon = 28 * 1,0 = 28,00 \rightarrow QK1$$

Flansch:

$$\frac{c}{t} = 7,65 \leq \left(\frac{c}{t}\right)_{\text{grenz}, QK1} = 9 * \epsilon = 9 * 1,0 = 9,00 \rightarrow QK1$$

Die Querschnittsklasse des Gesamtquerschnitts ergibt sich aus der höchsten Querschnittsklasse der einzelnen Blechteile (hier: Steg- bzw. Gurtblech). Da sowohl Steg- als auch Flanschblech beider Profile in Querschnittsklasse 1 fallen, sind sowohl der HEA-320 als auch der IPE-400-Querschnitt für die vorliegende Belastung als Kombination von Druck und Biegung QKL1 zuzuordnen. Somit können plastische Widerstandsgrößen verwendet werden.

— nach „EC3-alt“

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 5.5

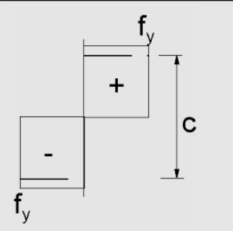
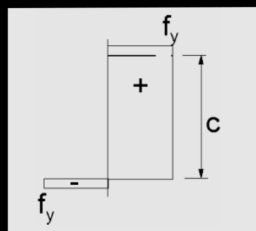
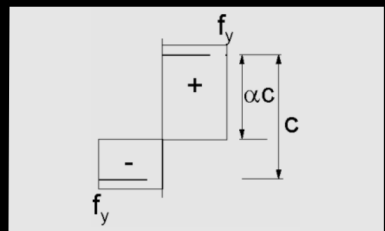
Spannungsverteilung über Querschnittsteile (Druck positiv)			
1	$clt \leq 72\epsilon$	$clt \leq 33\epsilon$	für $\alpha > 0,5$: $clt \leq \frac{396\epsilon}{13\alpha - 1}$ für $\alpha \leq 0,5$: $clt \leq \frac{36\epsilon}{\alpha}$
2	$clt \leq 83\epsilon$	$clt \leq 38\epsilon$	für $\alpha > 0,5$: $clt \leq \frac{456\epsilon}{13\alpha - 1}$ für $\alpha \leq 0,5$: $clt \leq \frac{41,5\epsilon}{\alpha}$

Abbildung 2.12: Klassifizierungsgrenzwerte des Stegblechs (Auszug aus EN 1993-1-1-„alt“: Tab. 5.2)

Riegel:

Steg:

$$\frac{c}{t} = 38,49 \leq \left(\frac{c}{t}\right)_{\text{grenz,QK1}} = \frac{396 * \epsilon}{13 * \alpha_c - 1} = \frac{396 * 1,0}{13 * 0,525 - 1} = 67,98 \rightarrow QK1$$

Flansch:

$$\frac{c}{t} = 4,79 \leq \left(\frac{c}{t}\right)_{\text{grenz,QK1}} = 9 * \epsilon = 9 * 1,0 = 9,00 \rightarrow QK1$$

→ Gesamtquerschnitt: Klasse 1

Stütze:

Steg:

$$\frac{c}{t} = 25,00 \leq \left(\frac{c}{t}\right)_{\text{grenz,QK1}} = 33 * \epsilon = 33 * 1,0 = 33,00 \rightarrow QK1$$

Flansch:

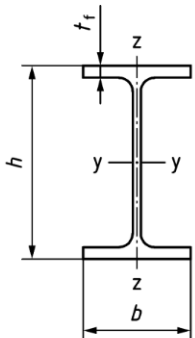
$$\frac{c}{t} = 7,65 \leq \left(\frac{c}{t}\right)_{\text{grenz,QK1}} = 9 * \epsilon = 9 * 1,0 = 9,00 \rightarrow QK1$$

→ Gesamtquerschnitt: Klasse 1

Knicklinienzuordnung, Imperfektionsfaktoren α für Träger und Stütze

• Imperfektionsfaktoren α_y und α_z für das Biegeknicken EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.1.3

Bei der Ermittlung der Imperfektionsfaktoren α für das Biegeknicken wird zunächst unterschieden, ob das Querschnittsverhältnis h/b größer oder kleiner als 1,2 ist, bzw. ob die Blechdicke des Flansches t_f über oder unter dem jeweiligen Grenzwert liegt und zuletzt welche Stahlgüte das Profil aufweist.

Cross-section	Limits	Buckling about axis	Buckling curve		
			S235 S275 S355 S420	S460 Up to S700 inclusive	
	$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40$ mm	y-y: a z-z: b	a ₀ a	
		$t_f > 40$ mm	y-y: b z-z: c	a b	
	$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100$ mm	y-y: b z-z: c	b c	a b
		$t_f > 100$ mm	y-y: d z-z: d	d d	a c

Stütze
 Träger

Abbildung 2.13: Ermittlung der Knickspannungslinie (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.3)

Buckling curve	a ₀	a	b	c	d
Imperfection factor α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Abbildung 2.14: Zugehörige Werte der Imperfektionsfaktoren (EN 1993-1-1: Tab. 8.2)

Stütze:

$h/b = 310/300 = 1,03 < 1,2$
 $t_f = 15,5\text{mm} < 100\text{mm}$

Ausweichen um y-y: $b \rightarrow \alpha_y = 0,34$
 Ausweichen um z-z: $c \rightarrow \alpha_z = 0,49$

Träger:

$h/b = 400/180 = 2,22 > 1,2$
 $t_f = 13,5\text{mm} < 40\text{mm}$

Ausweichen um y-y: $a \rightarrow \alpha_y = 0,21$
 Ausweichen um z-z: $b \rightarrow \alpha_z = 0,34$

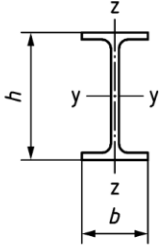
In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.1.2

• Imperfektionsfaktor α_{LT} für das Biegedrillknicken

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.2.3

Bei der Ermittlung des Imperfektionsfaktors α_{LT} für das Biegedrillknicken wird zunächst unterschieden, ob das Querschnittsverhältnis h/b größer oder kleiner als 1,2 ist, bzw. ob die Blechdicke des Flansches t_f über oder unter 40mm liegt.

Cross-section		Limits		α_{LT}
Rolled I-sections		$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	$0,12 \sqrt{\frac{W_{el,y}}{W_{el,z}}}$ but: $\alpha_{LT} \leq 0,34$
			$t_f > 40 \text{ mm}$	$0,16 \sqrt{\frac{W_{el,y}}{W_{el,z}}}$ but: $\alpha_{LT} \leq 0,49$
		$h/b \leq 1,2$	—	$0,16 \sqrt{\frac{W_{el,y}}{W_{el,z}}}$ but: $\alpha_{LT} \leq 0,49$

Stütze
 Träger

Abbildung 2.15: Ermittlung des Imperfektionsfaktors α_{LT} (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.5)

Stütze:

$$h/b = 310/300 = 1,03 < 1,2$$

$$t_f = 13,5 \text{ mm} < 40 \text{ mm}$$

$$\alpha_{LT} = 0,16 * \sqrt{\frac{1480}{466}} = \underline{0,285} < 0,49$$

Träger:

$$h/b = 400/180 = 2,22 > 1,2$$

$$\alpha_{LT} = 0,12 * \sqrt{\frac{1160}{146}} = \underline{0,338} < 0,34$$

— nach „EC3-alt“

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.2.3

Querschnitt	Grenzen	Biegedrillknicklinien
gewaltes I-Profil	$h/b \leq 2$	b
	$h/b > 2$	c
geschweißtes I-Profil	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d

Abbildung 2.16: Zuordnung der Knickspannungslinie (EN 1993-1-1-„alt“: Tab. 6.5)

Stütze:

$$h/b = 310/300 = 1,03 < 2,0$$

$$t_f = 15,5 \text{ mm} < 100 \text{ mm}$$

Ausweichen BDK: $b \rightarrow \alpha_{LT} = 0,34$

Träger:

$$h/b = 400/180 = 2,22 > 2,0$$

$$t_f = 13,5 \text{ mm} < 40 \text{ mm}$$

Ausweichen BDK: $c \rightarrow \alpha_{LT} = 0,49$

Kriterien zur Auswahl der Berechnungsmethode

• Verzweigungslastfaktoren $\alpha_{cr,ns}$ und $\alpha_{cr,sw}$

Zur Bestimmung der Verzweigungslastfaktoren α_{cr} wird eine lineare Stabilitätsanalyse unter der Wirkung des Gesamtlastfalls mittels räumlichen Stabwerksprogramms (RFEM) durchgeführt. Bei der Ermittlung von $\alpha_{cr,ns}$ („non-sway“) wird zwischen Knicken in ($\alpha_{cr,ns,in}$) und aus der Rahmenebene ($\alpha_{cr,ns,out}$) differenziert. Die Ergebnisse sind nachfolgend angeführt:

— Verzweigungslastfaktor $\alpha_{cr,sw}$ (seitliches Ausweichen des Systems)

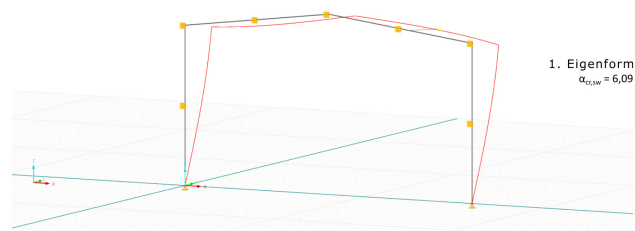


Abbildung 2.17: 1. Eigenform des Systems mit $\alpha_{cr,sw} = 6,09$

— Verzweigungslastfaktor $\alpha_{cr,ns,in}$ (lokales Stabknicken in der Rahmenebene)

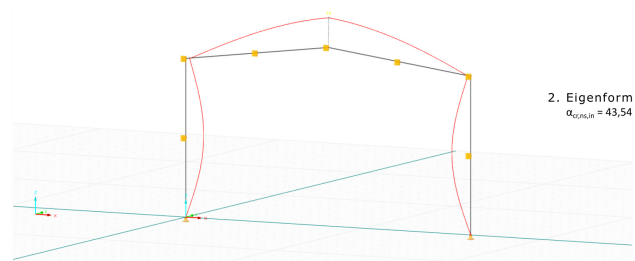


Abbildung 2.18: 2. Eigenform des Systems mit $\alpha_{cr,ns,in} = 43,54$

— Verzweigungslastfaktor $\alpha_{cr,ns,out}$ (lokales Stabknicken aus der Rahmenebene)

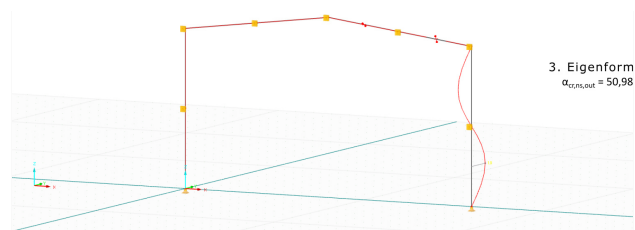


Abbildung 2.19: 3. Eigenform des Systems mit $\alpha_{cr,ns,out} = 50,98$

• **ALTERNATIV: Bestimmung von $\alpha_{cr,sw}$ über vereinfachten Ansatz**

Zusätzlich wird in EN 1993-1-1: Pkt. 7.2.1(10)B ein vereinfachtes Verfahren vorgestellt, welches zur Bestimmung von $\alpha_{cr,sw}$ bei Hallenrahmen mit einer Dachneigung von weniger als 1:2 (26°) und Rahmentragwerken des Geschosßbaus angewendet werden kann.

$$\alpha_{cr,sw} = \frac{K_{st} * H_{st}}{F_{Ed}} \geq 10 \quad (2.2)$$

— mit:

$K_{st} = \frac{H_f}{\Delta_f}$... horizontale Ersatzwegfedersteifigkeit des Rahmens [kN/m]
 H_f ... eine fiktive Horizontalkraft an der Oberkante des Rahmens (hier: 1 kN)
 Δ_f ... Horizontalverformung an der Oberkante des Rahmens infolge der Wirkung von H_f

F_{Ed} ... die Summe der vertikalen Bemessungslasten [kN]

H_{st} ... die Höhe des Rahmens [m] (hier: bis Rahmenfirstpunkt)

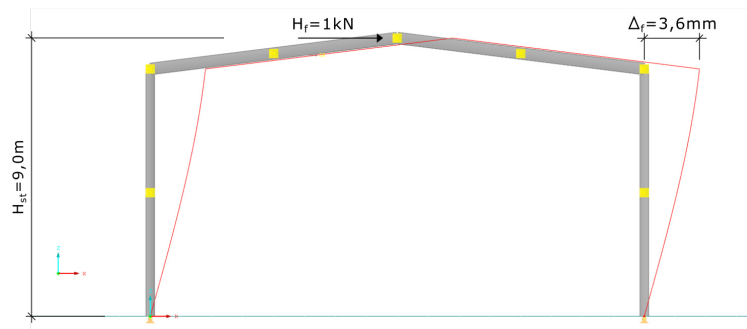


Abbildung 2.20: Verschiebefigur zufolge der fiktiven Horizontalkraft $H_f = 1\text{ kN}$

$$F_{Ed} = A_{v,Ed} + B_{v,Ed} = 345,6\text{ kN}$$

— mit:

$A_{v,Ed}, B_{v,Ed}$... Bemessungswerte der Auflagerkräfte unter Wirkung des Gesamtlastfalls

$$K_{st} = \frac{1\text{ kN}}{3,6 * 10^{-3}\text{ m}} = 277,8\text{ kN/m}$$

$$\alpha_{cr,sw} \approx \frac{277,8 * 9,0}{345,6} = 7,23$$

— nach „EC3-alt“

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 5.2.1(4)B

Die vereinfachte Formel zur Ermittlung des Laststeigerungsfaktors α_{cr} war gemäß EN 1993-1-1-„alt“: Pkt. 5.2.1(4)B ebenfalls bei Hallenrahmen mit einer Dachneigung von weniger als 1:2 (26°) und Rahmentragwerken des Geschößbaus anwendbar. Diese unterscheidet sich jedoch von der zuvor präsentierten Formel in „EC3-neu“ aufgrund der in DERLER [2020] beschriebenen Gründen und liefert unsichere Ergebnisse:

$$\alpha_{cr} = \frac{H_{Ed}}{V_{Ed}} * \frac{h}{\delta_{H,Ed}} \geq 10 \quad (2.3)$$

— mit:

H_{Ed} ... Bemessungswert der gesamten horizontalen Last

$$\begin{aligned} H_{Ed} &= w_{d,1} * (l_1 + l_2 * \sin(7,125)) + w_{d,2} * (l_3 * \sin(7,125) + l_4) = \\ &= 3,2 * (8,0 + \sqrt{8,0^2 + 1,0^2} * \sin(7,125)) + 1,2 * (\sqrt{8,0^2 + 1,0^2} * \sin(7,125) + 8,0) \\ &= 39,60 \text{ kN} \end{aligned}$$

V_{Ed} ... Bemessungswert der gesamten vertikalen Last (entspricht der Summe der Bemessungswerte der vertikalen Auflagerkräfte)

$$V_{Ed} = A_v + B_v = 175,14 + 170,46 = 345,60 \text{ kN}$$

$\delta_{H,Ed}$... die Horizontalverschiebung des Rahmenfirstpunktes

h ... die Rahmen- bzw. Stockwerkshöhe

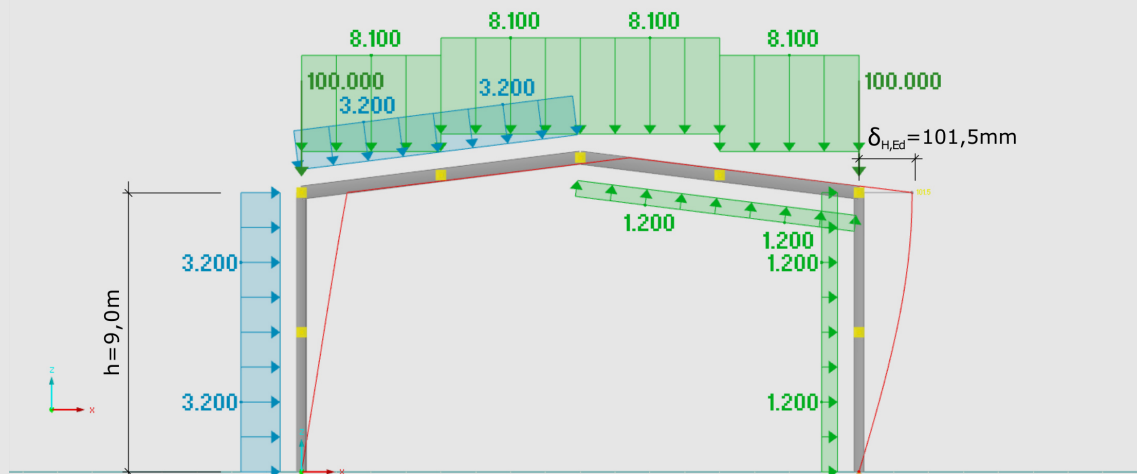


Abbildung 2.21: Verschiebefigur zufolge der Bemessungslasten

$$\alpha_{cr} = \frac{39,60}{345,60} * \frac{9000}{101,5} = 10,16$$

• Beurteilung der Biegedrillknickgefahr

Biegedrillknicken bzw. die daraus entstehenden Effekte Th. II. Ordnung in der Systemberechnung dürfen vernachlässigt werden, falls zumindest eine der in EN 1993-1-1: Pkt. 7.2.1(6) angeführten Bedingungen zutrifft:

- verdrehsteife Querschnitte wie z.B. Hohl- bzw. Kastenprofile
- einfach- oder doppelsymmetrische Querschnitte mit Momentenbelastung ausschließlich um die schwache Achse
- ausreichende Halterung des Druckflansches
- Einhaltung der Grenzschlankheit für Biegedrillknicken

→ Da keine dieser Bedingungen zutrifft, sind Biegedrillknickeffekte zu berücksichtigen. Die Berechnungsmethode M0 entfällt dadurch!

• Erfassung der Stabvorkrümmungen

Unabhängig vom Gesamtstabilitätsverhalten, bzw. den dafür bereits zuvor ermittelten Verzweigungslastfaktoren $\alpha_{cr,ns}$ und $\alpha_{cr,sw}$ sieht die Regelung aus EN 1993-1-1: Pkt. 7.3.4 eine zwingende Erfassung von Stabvorkrümmungen für jeden druckbeanspruchten Stab in der Systemberechnung vor, für den die folgenden beiden Bedingungen zutreffen:

- a) mindestens 1 biegesteif angeschlossenes Bauteilende
- b) $N_{Ed} > 0,25 * N_{cr}$

Nachdem Bedingung a) für alle Stäbe des Rahmentragwerks gilt, ist Bedingung b) zu prüfen. N_{Ed} ist hierbei die Größe der einwirkenden Druckkraft, N_{cr} ist die kritische Verzweigungslast für Biegeknicken in der Ebene, wobei jeder Stab isoliert, unter der Annahme von gelenkig angeschlossenen Stabenden, zu betrachten ist.

Stab	$N_{Ed}^{I.O.}$ [kN]*	I_y [cm ⁴]	$L=L_k$ [cm]	N_{cr} [kN]	N_{Ed}/N_{cr}
1	170,46	22930	800,0	7425,8	0,023
4	175,14				0,024
2	28,24	23130	806,2	7375,8	≪
3	33,19				≪

* siehe Abb. 2.7; Druckkraft positiv

Abbildung 2.22: Vergleich von N_{cr} mit N_{Ed}

→ Ein zwingender Ansatz von Stabvorkrümmungen ist aufgrund von $N_{Ed}/N_{cr} < 0,25$ für keinen der Stäbe notwendig.

• **Anwendbarkeit der Berechnungsmethoden gemäß EN 1993-1-1 Pkt. 7.2.2**

Um zu prüfen, welche der in EN 1993-1-1: Pkt. 7.2.2 vorgesehenen Berechnungsmethoden für das gegenständliche Beispiel anwendbar sind, werden die zuvor ermittelten Laststeigerungsfaktoren mit den für die jeweilige Methode vorgegebenen Anwendungsvoraussetzungen gegenübergestellt.

	Anwendungsvoraussetzungen für Methode						
	M0	M1	EM	M2	M3	M4	M5
BDK nicht auszuschließen	BDK vernachlässigbar 7.2.1(6) ✗		keine			keine	keine
$\alpha_{cr,sw}=6,09$	$\alpha_{cr,sw}>10$ 7.2.1(5) ✗	$\alpha_{cr,sw}>10$ 7.2.1(5) ✗		$\alpha_{cr,sw}>10$ 7.2.1(5) ✗			
$\alpha_{cr,ns,in}=43,58$	$\alpha_{cr,ns}>25$ 7.2.1(4) ✓	$\alpha_{cr,ns}>25$ 7.2.1(4) ✓					
$\alpha_{cr,ns,out}=50,98$							
$N_{Ed}/N_{cr}<0,25$				$N_{Ed}/N_{cr}<0,25$ 7.3.4 ✓			
Im Bsp. anwendbar?	nein	nein	ja	nein	ja	ja	ja

Abbildung 2.23: Prüfung der Anwendungsvoraussetzungen der jeweiligen Methoden

— nach „EC3-alt“

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 5.2.2

Zur Stabilität von Bauteilen wurden in EN 1993-1-1-„alt“: Pkt. 5.2.2 Vorgaben zur Berücksichtigung der Effekte aus Theorie II. Ordnung gemacht. Die genaue Vorgangsweise wurde im nationalen Anwendungsdokument definiert. Alle Berechnungsverfahren aus ÖNORM B 1993-1-1: Pkt. 7.1.2 bis 7.1.5 waren anwendbar.

• Übersicht über die Methoden der Tragwerksberechnung gem. EN 1993-1-1 Pkt.7.2.2

EC3-neu		EC3-alt	
Bezeichnung	Berechnungsverfahren	Berechnungsverfahren	Im Beispiel anwendbar
	Voraussetzungen		
M0	7.2.1: (4), (5), (6)		
M1	7.2.1: (4), (5), (6)		
EM	Keine	4	
M2	7.2.1: (5)		
M3	7.3.4	3	
M4 (a)	Keine	2(a)	Alle Berechnungsverfahren anwendbar
M4 (b)		2(b)	
M5	Keine	1	

Schnittkraftberechnung	Imperfektionen	Nachweise
Th. 1. O.	Keine	QS
Th. 1. O.	Keine	QS + BDK aus der Ebene
Th. 1. O.	Keine	BK in der Ebene mit L_k und BDK aus der Ebene
Th. 1. O.	Schiefstellung in Ebene	BK in der Ebene mit $L_k \leq L$ und BDK aus der Ebene
Ebene Th. 2. O.	Schiefstellung in Ebene	BK in der Ebene mit $L_k \leq L$ und BDK aus der Ebene
Ebene Th. 2. O.	Schiefstellung und Vorkrümmung in Ebene	QS und BDK aus der Ebene
	Schlankheitsabhängige Imperfektionen	
Räumliche Th. 2. O.	Schiefstellung und Vorkrümmung räumlich	QS

Abbildung 2.24: Übersicht über die Methoden der Tragwerksberechnung, Charakteristika und Anwendbarkeit

Geometrische Ersatzimperfektionen**EN 1993-1-1 Pkt.7.3.2****• Globale Anfangsschiefstellung****EN 1993-1-1 Pkt. 7.3.2(2)**

Zunächst kann durch das Kriterium in EN 1993-1-1: Pkt. 7.3.2(4)B überprüft werden, ob die Schiefstellung vernachlässigt werden kann. Dies trifft zu, wenn die nachfolgende Bedingung (2.4) erfüllt ist:

$$H_{Ed} \geq 0,15 * F_{Ed} \quad (2.4)$$

— mit:

 H_{Ed} ... gesamte einwirkende horizontale Belastung

$$\begin{aligned} H_{Ed} &= w_{d,1} * (l_1 + l_2 * \sin(7,125)) + w_{d,2} * (l_3 * \sin(7,125) + l_4) = \\ &= 3,2 * (8,0 + \sqrt{8,0^2 + 1,0^2} * \sin(7,125)) + 1,2 * (\sqrt{8,0^2 + 1,0^2} * \sin(7,125) + 8,0) \\ &= 39,60 \text{ kN} \end{aligned}$$

 F_{Ed} ... gesamte einwirkende vertikale Belastung

$$F_{Ed} = A_v + B_v = 175,14 + 170,46 = 345,6 \text{ kN}$$

$$H_{Ed} = 35,75 < 0,15 * F_{Ed} = 0,15 * 345,6 = 51,84 \text{ kN}$$

Somit muss die Schiefstellung berücksichtigt werden.

Die Ermittlung der globalen Anfangsschiefstellung erfolgt anhand der nachfolgenden Gleichung (2.5) aus EN 1993-1-1: Pkt. 7.3.2(2):

$$\phi = \phi_0 * \alpha_h * \alpha_m \quad (2.5)$$

— mit:

 ϕ_0 ... Basiswert der Anfangsschiefstellung

— 1/400 bei elastischer Querschnittsausnutzung

— 1/200 bei plastischer Querschnittsausnutzung

 α_h ... Abminderungsfaktor in Abhängigkeit der Tragwerkshöhe H

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{H}} = \frac{2}{\sqrt{8}} = 0,707 \leq 1,0$$

 α_m ... Abminderungsfaktor in Abhängigkeit der Stützenanzahl m in einer Reihe

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 * (1 + \frac{1}{m})} = \sqrt{0,5 * (1 + \frac{1}{2})} = 0,866 \leq 1,0$$

$$\phi = \frac{1}{200} * 0,707 * 0,866 = 0,003062 = \frac{1}{326,6}$$

— nach „EC3-alt“

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 5.3.2

— mit:

ϕ_0 ... Basiswert der Anfangsschiefstellung
— 1/200 unabhängig davon ob elastische oder plastische Systemberechnung

α_h ... Abminderungsfaktor in Abhängigkeit der Tragwerkshöhe H

$$2/3 \leq \alpha_h = \frac{2}{\sqrt{H}} = \frac{2}{\sqrt{8}} = 0,707 \leq 1,0$$

α_m ... Abminderungsfaktor in Abhängigkeit der Stützenanzahl m in einer Reihe

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 * (1 + \frac{1}{m})} = \sqrt{0,5 * (1 + \frac{1}{2})} = 0,866 \leq 1,0$$

$$\phi = \frac{1}{200} * 0,707 * 0,866 = 0,003062 = \frac{1}{326,6}$$

• Lokale Vorkrümmung

EN 1993-1-1 Pkt. 7.3.3

— für Biegeknicken

EN 1993-1-1 Pkt. 7.3.3.1

$$e_{0,y,pl} = \frac{\alpha}{\epsilon} * \beta * L \quad (2.6)$$

— mit:

β ... Referenzkrümmung (hier plastische QS-Ausnutzung, Knicken um y-y)

α ... Imperfektionsbeiwert

ϵ ... Materialparameter (hier 1,0 für S235)

L ... Bauteillänge (hier: $L = L_{c,y}$)

Buckling about axis	Elastic cross-section verification	Plastic cross-section verification
y-y	1/110	1/75
z-z	1/200	1/68

Abbildung 2.25: Zugehörige Werte für β (EN 1993-1-1: Tab. 7.1)

Stütze:

$L = 8,0m; \alpha = 0,34$ (KSL b)

$$e_{0,y,pl} = \frac{0,34}{1,0} * \frac{1}{75} * 8000 = 36,3mm$$

Träger:

$L = 8,062m; \alpha = 0,21$ (KSL a)

$$e_{0,y,pl} = \frac{0,21}{1,0} * \frac{1}{75} * 8062 = 22,6mm$$

— für Biegedrillknicken

EN 1993-1-1 Pkt. 7.3.3.2

$$e_{0,LT} = \beta_{LT} * \frac{L}{\epsilon} \tag{2.7}$$

— mit:

β_{LT} ... Referenzkrümmung für Biegedrillknicken

ϵ ... Materialparameter (hier 1,0 für S235)

L ... Bauteillänge (hier: $L = L_{c,LT}$)

Cross-section	Condition	Elastic cross-section verification	Plastic cross-section verification
rolled	$h/b \leq 2,0$	1/250	1/200
	$h/b > 2,0$	1/200	1/150
welded	$h/b \leq 2,0$	1/200	1/150
	$h/b > 2,0$	1/150	1/100

Stütze
 Träger

Abbildung 2.26: Zugehörige Werte für β_{LT} (EN 1993-1-1: Tab. 7.2)

Stütze:

$$e_{0,LT,pl} = \frac{1}{200} * \frac{4000}{1,0} = 20,0mm$$

Träger:

$$e_{0,LT,pl} = \frac{1}{150} * \frac{4031}{1,0} = 26,9mm$$

— nach „EC3-alt“

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 5.3.2

Die Vorgangsweise zur Ermittlung der Vorkrümmungen ist für Biegeknicken und Biegedrillknicken ident:

AC Knicklinie nach Tabelle 6.2 AC	elastische Berechnung	plastische Berechnung
	A1 e_0/L A1	A1 e_0/L A1
a ₀	1/350	1/300
a	1/300	1/250
b	1/250	1/200
c	1/200	1/150
d	1/150	1/100

Stütze
 Träger

Abbildung 2.27: Designwerte der Stabvorkrümmung (EN 1993-1-1-„alt“: Tab. 5.1)

Stütze:

$$e_{0,y,pl} = \frac{8000}{200} = 40,0mm$$

$$e_{0,LT,pl} = \frac{4000}{200} = 20,0mm$$

Träger:

$$e_{0,y,pl} = \frac{8062}{250} = 32,2mm$$

$$e_{0,LT,pl} = \frac{4031}{150} = 26,9mm$$

• **ALTERNATIV zu Schiefstellung + Stabvorkrümmung: Eigenmode-konforme Imperfektionen**

Gemäß EN 1993-1-1: Pkt. 7.3.6(1) lässt sich die Eigenmode-konforme Imperfektion durch die folgende Gleichung bestimmen:

$$\eta_{init}(x) = e_{0,m} * \frac{N_{cr,m}}{EI_m * |\eta''_{cr}|} * \eta_{cr}(x) \quad (2.8)$$

— mit:

m ... Index der den kritischen Querschnitt (höchster Ausnutzungsgrad zufolge $M+N$ nach Theorie II. Ordnung an der imperfekten Struktur) bezeichnet (hier: Querschnitt der rechten Stütze, unmittelbar an der Rahmenecke)

$$e_{0,m} = \alpha_m * (\bar{\lambda}_m - 0,2) * \frac{M_{Rk,m}}{N_{Rk,m}} \text{ für } \bar{\lambda}_m > 0,2$$

$$\bar{\lambda}_m = \sqrt{\frac{N_{Rk,m}}{N_{cr,m}}}$$

α_m ... Imperfektionsfaktor (hier: des Stützenquerschnitts HEA-320; $\alpha_m = 0,34$)

$N_{cr,m} = \alpha_{cr} * N_{Ed,m}$... kritische Normalkraft im kritischen Querschnitt

α_{cr} ... kritischer Laststeigerungsfaktor der maßgebenden Eigenform (1. Eigenform: $\alpha_{cr} = 6,09$)

$M_{Rk,m}$... charakteristischer Wert der Biegetragfähigkeit im kritischen Querschnitt

$N_{Rk,m}$... charakteristischer Wert der Normalkrafttragfähigkeit im kritischen Querschnitt

$EI_m * |\eta''_{cr}|$... Absolutwert des Biegemoments im kritischen Querschnitt

$\eta_{cr}(x)$... relevante Versagensform

Somit lässt sich die Schlankheit an der kritischen Stelle $\bar{\lambda}_m$ und in weiterer Folge $e_{0,d}$ bestimmen (**Anm.:** mit plastischer Querschnittstragfähigkeit der Stütze):

$$\bar{\lambda}_m = \sqrt{\frac{N_{Rk,m}}{N_{cr,m}}} = \sqrt{\frac{124,0 * 23,5}{6,09 * 175,14}} = 1,653$$

$$e_{0,m} = \alpha_m * (\bar{\lambda}_m - 0,2) * \frac{M_{Rk,m}}{N_{Rk,m}} = 0,34 * (1,653 - 0,2) * \frac{1628 * 23,5}{124 * 23,5} * 10^1 = 64,86 \text{ mm}$$

Berücksichtigung von V und N im Querschnittsnachweis **EN 1993-1-1 Pkt. 8.2****• Querkraft**

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v * (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M,0}} = \frac{27,9 * (23,5 / \sqrt{3})}{1,0} = 378,54 kN$$

$$A_v = h * t_w = 31,0 * 0,9 = 27,9 cm^2$$

Gemäß EN 1993-1-1: Pkt. 8.2.8 (3) muss kein kombinierter Nachweis für Biegung und Querkraft geführt werden, sofern gilt:

$$V_{Ed} = 24,05 kN < 0,5 * V_{pl,Rd} = 0,5 * 378,54 = 189,27 kN \checkmark$$

Gemäß EN 1993-1-1: Pkt. 8.2.6 (6) müssen unausgesteifte Stegbleche nicht extra nachgewiesen werden, sofern gilt:

$$h_w / t_w = 22,5 / 0,9 = 25 < 72 * \frac{\epsilon}{\eta} = 72 * \frac{1,0}{1,2} = 60 \checkmark$$

→ Querkraft ist im QS-Nachweis nicht zu berücksichtigen.

→ Nachweis gegen Schubbeulen bei unausgesteiften Stegblechen nicht erforderlich.

• Normalkraft

$$N_{pl,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M,0}} = \frac{124,0 * 23,5}{1,0} = 2914,0 kN$$

Gemäß EN 1993-1-1: Pkt. 8.2.9.1 (4) muss kein kombinierter Nachweis für Biegung und Normalkraft geführt werden, sofern gilt:

$$N_{Ed} = 175,14 kN < 0,25 * N_{pl,Rd} = 0,25 * 2914,0 = 728,5 kN \checkmark$$

$$N_{Ed} = 175,14 kN < 0,5 * \frac{h_w * t_w * f_y}{\gamma_{M,0}} = 0,5 * \frac{22,5 * 0,9 * 23,5}{1,0} = 237,94 kN \checkmark$$

→ Normalkraft ist im QS-Nachweis nicht zu berücksichtigen.

2.1.1 Nachweisverfahren EM

EN 1993-1-1 Pkt.7.2.2(9)

Für das Verfahren EM (Ersatzstabverfahren) gelten keine besonderen Voraussetzungen. Es werden keine Imperfektionen angesetzt und die Schnittkräfte nach Theorie I. Ordnung ermittelt. Dementsprechend sind folgende Nachweise jeweils am Ersatzstab zu führen:

- y-y: Stabnachweis BK_{yy} mit $L_{k,y}$ und $M_y^{Th.I.O.}$
- z-z: Stabnachweis BDK (BK_{zz}) mit $M_y^{Th.II.O.}$

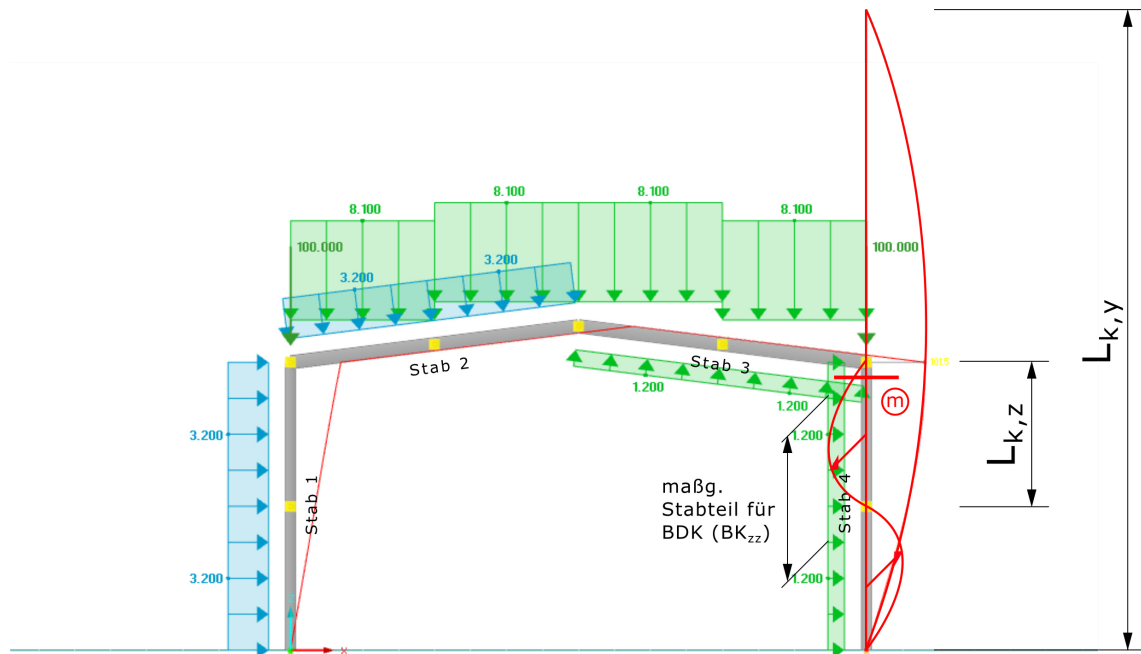


Abbildung 2.28: Verformungsfigur und Knicklängen $L_{k,y}$ und $L_{k,z}$ für den maßgebenden Stab 4

Schnittkräfte nach Theorie I. Ordnung
--

Die Schnittkräfte nach Theorie I. Ordnung (ohne Imperfektionen) in der rechten Rahmenstütze (Stab 4), direkt unter der Rahmenecke (bemessungsbestimmender Querschnitt m) betragen (vgl. Abbildungen 2.6 - 2.8):

- Biegemoment $M_{y,Ed} = 230,83 kNm$
- Normalkraft $N_{Ed} = 175,14 kN$
- Querkraft $V_{z,Ed} = 24,05 kN$

Erhöhtes Biegemoment nach Theorie II. Ordnung
EN 1993-1-1 Pkt. 7.2.2(11)

Beim Ersatzstabverfahren sind für den Nachweis des Ausweichens aus der Ebene die durch die Verformung des Systems entstehenden erhöhten Randmomente $M_{y,Ed}^{Th.II.O.}$ zu verwenden. Dies erfordert zusätzlich eine Schnittkraftberechnung nach Theorie II. Ordnung. Ein für die Handrechnung geeignetes Verfahren zur Ermittlung von Schnittkräften II. Ordnung stellt die Erhöhung der Schnittkräfte nach Theorie I. Ordnung aus dem antisymmetrischen Lastanteil mittels sogenanntem Dischingerfaktor k_{sw} dar. Die Voraussetzung für die Anwendbarkeit dieser Näherungsmethode ist ein Verzweigungslastfaktor von $\alpha_{cr,sw} \geq 3,0$.

$$k_{sw} = 1 / (1 - 1 / \alpha_{cr,sw}) \quad (2.9)$$

$$k_{sw} = 1 / (1 - 1 / 6,09) = 1,197 \quad (\alpha_{cr,sw} \text{ siehe Abbildung 2.17})$$

Die Lasten aus Eigengewicht, Nutzlasten und Schnee ($LF1 : g + q + s$) wirken symmetrisch am Rahmentragwerk und führen auch bei Tragwerksverformung zu keiner Erhöhung der Biegemomente. Eine Erhöhung der Schnittkräfte infolge Th. II. Ordnung ergibt sich lediglich für den Lastfall Wind. Dieser muss in weiterer Folge in einen symmetrischen und antisymmetrischen Lastanteil zerlegt werden, wobei nur der antisymmetrische Anteil zu einer Erhöhung der Biegemomente nach Th. II. Ordnung führt.

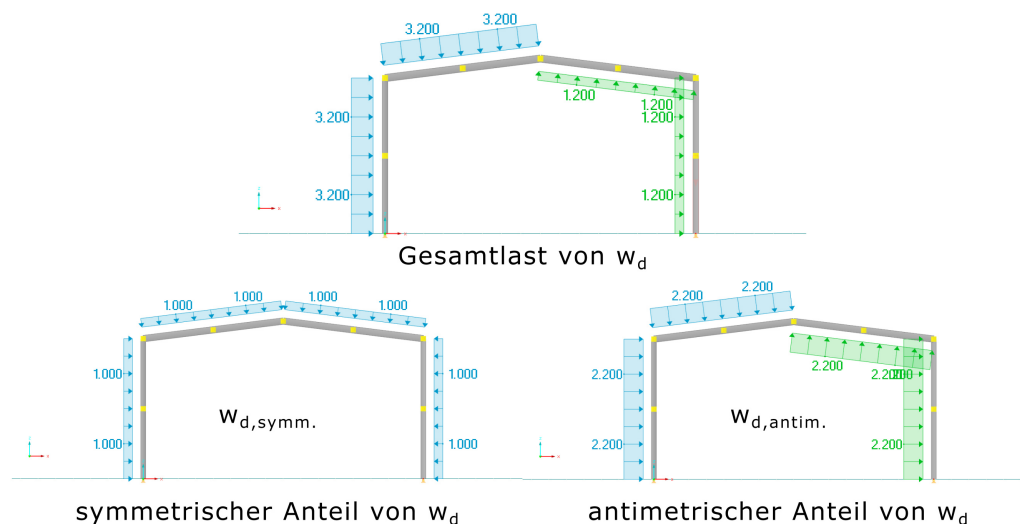


Abbildung 2.29: Aufteilung der Gesamlast aus w_d in symmetrischen und antisymmetrischen Lastanteil

Als nächsten Schritt werden nun die Momentenverläufe für den symm. ($g+q+s+w_{symm.}$) bzw. antim. ($w_{antim.}$) Lastanteil berechnet und anschließend die Momente zufolge des antisymmetrischen Anteils durch den Faktor k_{sw} erhöht.

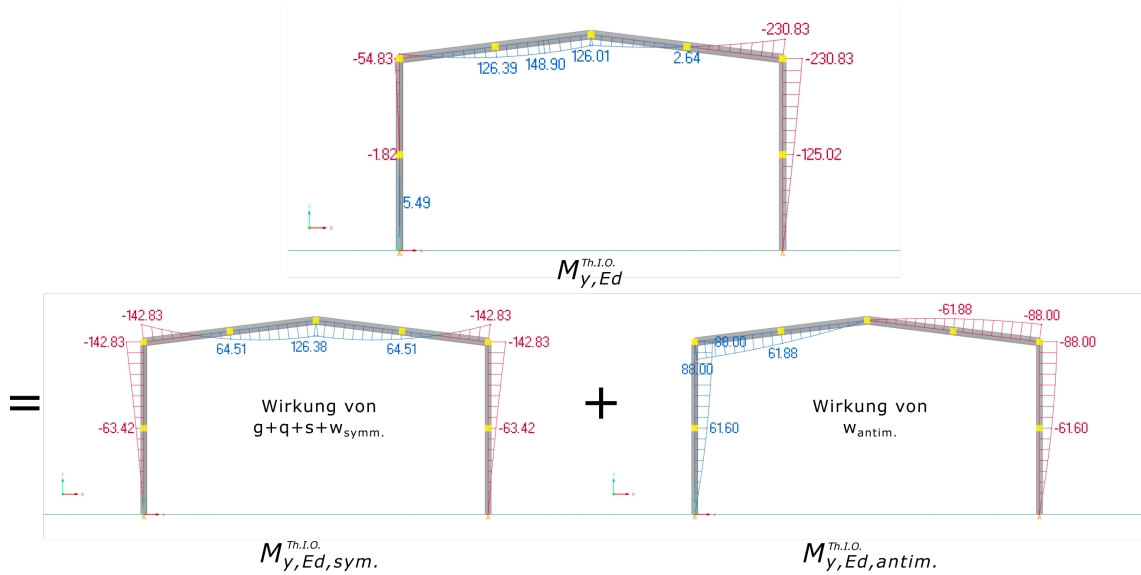


Abbildung 2.30: Momentenverlauf nach Theorie I. Ordnung zufolge der Gesamtlast sowie der symmetrischen und antisymmetrischen Lastanteile

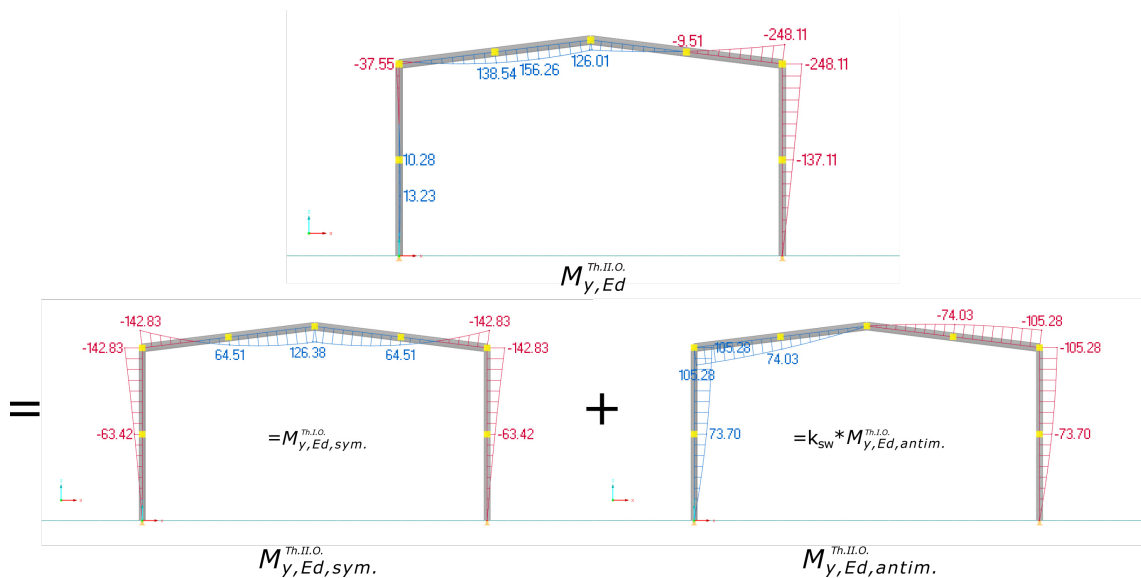


Abbildung 2.31: Momentenverlauf nach Theorie II. Ordnung zufolge der Gesamtlast sowie der symmetrischen und antisymmetrischen Lastanteile

Querschnittsnachweis**EN 1993-1-1 Pkt. 8.2.5**

Der maßgebende Querschnitt ist die rechte Rahmenecke:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,Rd}} = \frac{M_{y,Ed}}{W_{pl,y} * \frac{f_y}{\gamma_{M0}}} = \frac{230,83 * 10^2}{1628 * \frac{23,5}{1,0}} = 0,603$$

(**Anmerkung:** Die Interaktion mit N_{Ed} darf aufgrund $N_{Ed} < 0,25 * N_{pl,Rd}$ vernachlässigt werden.)

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.2.5

Ersatzstabnachweise**EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.3**

• **Knicklängen $L_{k,y}$ und $L_{k,z}$**

$$\alpha_{cr} = \frac{N_{cr}}{N_{Ed}} \rightarrow N_{cr} = \alpha_{cr} * N_{Ed} = 6,09 * 175,15 = 1066,6 \text{ kN}$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2}{L_{k,y}^2} * EI_y \rightarrow L_{k,y} = \sqrt{\frac{\pi^2 * EI_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{\pi^2 * 21000 * 22930}{1066,6}} = 2110,9 \text{ cm}$$

$$L_{k,z} = L/2 = 400 \text{ cm}$$

• **Schlankheitsgrade $\bar{\lambda}_y$ und $\bar{\lambda}_z$ für das Biegeknicken**

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.1.2

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{N_{pl}}{N_{cr,y}}} = \frac{L_{cr,y}}{i_y * \lambda_1} = \frac{2110,9}{13,6 * 93,9} = 1,653$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{N_{pl}}{N_{cr,z}}} = \frac{L_{cr,z}}{i_z * \lambda_1} = \frac{400}{7,49 * 93,9} = 0,569$$

— mit:

$$\lambda_1 = \pi * \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi * \sqrt{\frac{21000}{23,5}} = 93,9$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.1.3

• Schlankheitsgrad $\bar{\lambda}_{LT}$ für das Biegedrillknicken

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.2.2

$$\bar{\lambda}_{LT} = \bar{\lambda}_z * k_p * k_c \quad (2.10)$$

$$k_p = \frac{0,9}{\left[1 + \frac{1}{20} * \left(\frac{\bar{\lambda}_z * \lambda_1}{h/t_f}\right)^2\right]^{0,25}} = \frac{0,9}{\left[1 + \frac{1}{20} * \left(\frac{0,569 * 93,9}{310/15,5}\right)^2\right]^{0,25}} = 0,834$$

Anmerkung: Der Faktor 0,9 berücksichtigt die erhöhte Torsionssteifigkeit von Walzprofilen.

Der Momentenverlauf wird idealisiert linear über den betreffenden Stababschnitt angenommen. Da der Nachweis in der Rahmenebene mit Schnittkräften nach Theorie I. Ordnung geführt wird und der Nachweis aus der Rahmenebene die Effekte aus Theorie II. Ordnung berücksichtigt, muss auch ψ und alle davon abhängigen Faktoren mit den Stabendmomenten sowohl nach Theorie I. als auch II. Ordnung berechnet werden.

$$\psi^I = \frac{125,02}{230,83} = 0,542$$

$$\psi^{II} = \frac{137,11}{248,11} = 0,553$$

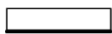

Load case	Factor f_M	Factor k_c
$M = \text{uniform}$ 	1,00	1,00
M  ψM $-1 \leq \psi \leq +1$	$1,25 - 0,1 \psi - 0,15 \psi^2$	$\frac{1}{1,33 - 0,33 \psi}$

Abbildung 2.32: Ermittlung der Faktoren f_M und k_c (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.6)

$$k_c^I = \frac{1}{1,33 - 0,33 * \psi} = \frac{1}{1,33 - 0,33 * 0,542} = 0,869$$

$$k_c^{II} = 0,871$$

Somit ergibt sich die bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}_{LT}$ für das Biegedrillknicken wie folgt:

$$\bar{\lambda}_{LT}^I = \bar{\lambda}_z * k_p * k_c = 0,569 * 0,834 * 0,869 = 0,412$$

$$\bar{\lambda}_{LT}^{II} = 0,413$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.2.3

• **Abminderungsfaktoren χ_y und χ_z für das Biegeknicken** EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.1.3

$$\phi = 0,5 * [1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \quad (2.11)$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad (2.12)$$

Einsetzen der bezogenen Schlankheiten und der Imperfektionsfaktoren in die Gleichungen (2.11) und (2.12) liefert die Werte für ϕ_i und die Knickabminderungsfaktoren χ_i :

$$\phi_y = 0,5 * [1 + 0,34 * (1,653 - 0,2) + 1,653^2] = 2,113$$

$$\chi_y = \frac{1}{2,113 + \sqrt{2,113^2 - 1,653^2}} = 0,292$$

$$\phi_z = 0,5 * [1 + 0,49 * (0,569 - 0,2) + 0,569^2] = 0,752$$

$$\chi_z = \frac{1}{0,752 + \sqrt{0,752^2 - 0,569^2}} = 0,804$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.1.2

• **Momentenfaktor f_M für das Biegedrillknicken** EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.2.3

Die Ermittlung des Faktors f_M erfolgt ebenfalls entsprechend der Formeln aus Abbildung 2.32, mit dem für die vorliegende Biegemomentenverteilung zutreffenden Verhältnis der Randmomente ψ^I bzw. ψ^{II} :

$$f_M = 1,25 - 0,10 * \psi - 0,15 * \psi^2 \quad (2.13)$$

$$f_M^I = 1,25 - 0,10 * 0,542 - 0,15 * 0,542^2 = 1,152$$

$$f_M^{II} = 1,149$$

• **Abminderungsfaktor χ_{LT} für das Biegedrillknicken** **EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.2.3**

Bei der Ermittlung des Faktors ϕ_{LT} haben sich grundlegende Änderungen gegenüber „EC3-alt“ ergeben. Die Regelungen befinden sich in EN 1993-1-1: Pkt. 8.3.2.3. Die überarbeitete Formel in „EC3-neu“ berücksichtigt den veränderlichen Momentenverlauf in Form von f_M , sowie den mechanisch wesentlichen Faktor $\bar{\lambda}_{LT}/\bar{\lambda}_z$.

$$\phi_{LT} = 0,5 * \left[1 + f_M * \left(\left(\frac{\bar{\lambda}_{LT}}{\bar{\lambda}_z} \right)^2 * \alpha_{LT} * (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right) \right] \quad (2.14)$$

$$\chi_{LT} = \frac{f_M}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - f_M * \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad (2.15)$$

Die für die Berechnung von ϕ_{LT} und χ_{LT} benötigten Variablen wurden bereits im vorigen Abschnitt berechnet und können direkt in (2.14) bzw. in (2.15) eingesetzt werden:

$$\phi_{LT}^I = 0,5 * \left[1 + 1,152 * \left(\left(\frac{0,412}{0,569} \right)^2 * 0,285 * (0,569 - 0,2) + 0,412^2 \right) \right] = 0,630$$

$$\phi_{LT}^{II} = 0,630$$

$$\chi_{LT}^I = \frac{1,152}{0,630 + \sqrt{0,630^2 - 1,152 * 0,412^2}} = 1,069 > \underline{1,0}$$

$$\chi_{LT}^{II} = 1,066 > \underline{1,0}$$

— nach „EC3-alt“

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.2.3

Der Abminderungsfaktor χ_{LT} war bisher definiert mit:

$$\phi_{LT} = 0,5 * [1 + \alpha_{LT} * \bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2] \quad (2.16)$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad (2.17)$$

In EN 1993-1-1, alt: Pkt. 6.3.2.3(1) wurden folgende Werte für den Parameter β und die Plateaulänge $\bar{\lambda}_{LT,0}$ empfohlen:

$$\beta = 0,75$$

$$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4$$

Einsetzen der empfohlenen Werte in (2.16) bzw. in (2.17) ergibt:

$$\phi_{LT}^I = 0,5 * [1 + 0,34 * (0,412 - 0,4) + 0,75 * 0,412^2] = 0,566 \quad \phi_{LT}^{II} = 0,566$$

$$\chi_{LT}^I = \frac{1}{0,566 + \sqrt{0,566^2 - 0,75 * 0,412^2}} = 0,995 \quad \chi_{LT}^{II} = 0,995$$

Weiters war eine entsprechende Modifikation von χ_{LT} aufgrund einer begünstigenden Momentenverteilung (erfasst durch den Faktor f) gestattet:

$$f = 1 - 0,5 * (1 - k_c) * [1 - 2 * (\bar{\lambda}_{LT} - 0,8)^2] \quad (2.18)$$

$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f} \quad (2.19)$$

$$f^I = 1 - 0,5 * (1 - 0,869) * [1 - 2 * (0,412 - 0,8)^2] = 0,954 \leq 1,0 \quad f^{II} = 0,955$$

$$\chi_{LT,mod}^I = \frac{0,995}{0,954} = 1,043 \geq 1,0 \quad \chi_{LT,mod}^{II} = 1,042 \geq 1,0$$

• Momentenbeiwerte C_{my} und C_{mLT}

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.3(10)

Um die Momentenbeiwerte $C_{m,i}$ bestimmen zu können, wird der zum jeweils zutreffenden Stababschnitt zugehörige Biegemomentenverlauf M_y benötigt.

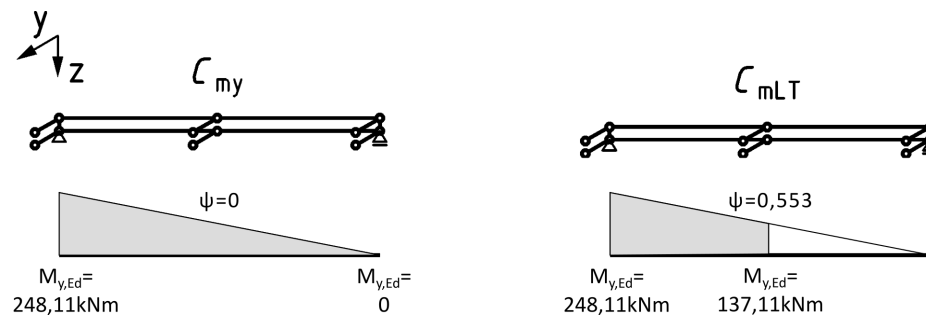


Abbildung 2.33: Relevante Stababschnitte und zugehörige Momentenverläufe zur Bestimmung der Momentenbeiwerte C_{my} und C_{mLT}

Wie aus Abbildung 2.33 ersichtlich muss zur Bestimmung von C_{mLT} der Bereich zwischen den Zwischenabstützungen mit der größeren Momentenbeanspruchung betrachtet werden. Bei Anwendung der Methode EM und Knicken in Form seitlichen Ausweichens wird in EN 1993-1-1: Pkt. 8.3.3(11) empfohlen, unabhängig vom Momentenverlauf M_y für C_{my} den Wert 0,9 anzusetzen.


Moment diagram	Range	C_{my} and C_{mz} and C_{mLT}
	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,6 + 0,4\psi \geq 0,4$

Abbildung 2.34: Ermittlung der äquivalenten Momentenbeiwerte (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.9)

$$C_{my} = 0,9 \quad (\text{da } BK_{yy} \text{ in Form von seitlichem Ausweichen der Stützen})$$

$$C_{mLT} = 0,6 + 0,4 * \psi^{II} = 0,6 + 0,4 * 0,553 = 0,821$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Anhang B

• Interaktionsfaktoren

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.3(8)

Zunächst ist durch das Abgrenzungskriterium (2.20) zu überprüfen, ob es sich beim vorliegenden offenen Querschnitt um ein verdrehweiches oder verdrehsteifes Profil handelt. Das Abgrenzungskriterium für verdrehsteife Profile lautet:

$$\bar{\lambda}_{LT,lim} = \bar{\lambda}_{LT,0} * \sqrt{1 - \bar{\lambda}_z^2 * \chi_z} \quad (2.20)$$

Der Vergleich der Schlankheit für das Biegedrillknicken mit dem Abgrenzungskriterium nach (2.20) liefert:

$$\bar{\lambda}_{LT} = 0,412 > \bar{\lambda}_{LT,lim} = 0,4 * \sqrt{1 - 0,569^2 * 0,804} = 0,344$$

— mit:

$$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4$$

Damit ist das Profil unter der vorliegenden Belastung und Lagerung als verdrehweich einzustufen.

Um die Interaktionsfaktoren berechnen zu können, müssen zunächst die Ausnutzungsgrade n_y und n_z anhand der folgenden Gleichungen bestimmt werden:

$$n_y = \frac{N_{Ed}}{\chi_y * N_{Rk} / \gamma_{M1}} \quad (2.21)$$

$$n_z = \frac{N_{Ed}}{\chi_z * N_{Rk} / \gamma_{M1}} \quad (2.22)$$

Einsetzen in (2.21) und (2.22) liefert:

$$n_y = \frac{175,14}{0,292 * 2914 / 1,0} = 0,206$$

$$n_z = \frac{175,14}{0,804 * 2914 / 1,0} = 0,075$$

Die Interaktionsfaktoren werden anhand der Tabellen in den nachfolgenden Abbildungen ermittelt, wobei hier zwischen den jeweiligen Querschnittsklassen unterschieden werden muss.

Plastic cross-sectional properties Class 1, Class 2, Class 3 (with W_{ep} according to Annex B)	Elastic cross-sectional properties Class 3 (with W_{el}), Class 4
For $\bar{\lambda}_y < 1,0$: $k_{yy} = C_{my}[1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) n_y]$	For $\bar{\lambda}_y < 1,0$: $k_{yy} = C_{my}(1 + 0,6 \bar{\lambda}_y n_y)$
For $\bar{\lambda}_y \geq 1,0$: $k_{yy} = C_{my}(1 + 0,8 n_y)$	For $\bar{\lambda}_y \geq 1,0$: $k_{yy} = C_{my}(1 + 0,6 n_y)$
$k_{yz} = 0,6 k_{zz}$, see Table 8.8	$k_{yz} = k_{zz}$, see Table 8.8
NOTE 1 See (9) for n_y .	
NOTE 2 See (10) and Table 8.9 for C_{my} .	

Abbildung 2.35: Ermittlung des Interaktionsfaktors k_{yy} (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.7)

Type of section	Plastic cross-sectional properties Class 1, Class 2, Class 3 (with W_{ep} according to Annex B)	Elastic cross-sectional properties Class 3 (with W_{el}), Class 4
k_{zy}	Not susceptible to LT-buckling	$k_{zy} = 0,6 k_{yy}$ See Table 8.7.
	Susceptible to LT-buckling	For $\bar{\lambda}_z < 1,0$: $k_{zy} = 1 - \frac{0,1 \bar{\lambda}_z n_z}{C_{mLT} - 0,25}$ but $k_{zy} \leq 0,6 + \bar{\lambda}_z$ for $\bar{\lambda}_z < 0,4$ For $\bar{\lambda}_z \geq 1,0$: $k_{zy} = 1 - \frac{0,1 n_z}{C_{mLT} - 0,25}$
k_{zz}	I-sections	For $\bar{\lambda}_z < 1,0$: $k_{zz} = C_{mz}[1 + (2 \bar{\lambda}_z - 0,6) n_z]$ For $\bar{\lambda}_z \geq 1,0$: $k_{zz} = C_{mz}(1 + 1,4 n_z)$
	Rectangular, circular or elliptical hollow sections	For $\bar{\lambda}_z < 1,0$: $k_{zz} = C_{mz}[1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) n_z]$ For $\bar{\lambda}_z \geq 1,0$: $k_{zz} = C_{mz}[1 + 0,8 n_z]$

Abbildung 2.36: Ermittlung des Interaktionsfaktors k_{zy} (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.8)

Da keine Momentenbelastung um die Achse z-z am System angreift, werden lediglich die Interaktionsfaktoren k_{yy} und k_{zy} benötigt. Diese errechnen sich gemäß der Abbildungen 2.35 und 2.36 wie folgt:

Für $\bar{\lambda}_y = 1,653 \geq 1,0$:

$$k_{yy} = C_{my} * (1 + 0,8 * n_y) = 0,9 * (1 + 0,8 * 0,206) = 1,048$$

Für verdrehweichen Querschnitt, mit $\bar{\lambda}_z = 0,569 < 1,0$:

$$k_{zy} = 1 - \frac{0,1 * \bar{\lambda}_z * n_z}{C_{mLT} - 0,25} = 1 - \frac{0,1 * 0,569 * 0,075}{0,821 - 0,25} = 0,993$$

— nach „EC3-alt“

EN 1993-1-1-„alt“ Anhang B

Bei der Ermittlung der Interaktionsfaktoren gibt es keine Veränderungen zwischen „EC3-alt“ und „EC3-neu“. Das Alternativverfahren 2 aus EN 1993-1-1-„alt“: Anhang B wurde in den Haupttext aufgenommen und befindet sich in der Neuauflage in EN 1993-1-1: Pkt. 8.3.3(8).

• Nachweisgleichungen für BK_{yy} und $BDK(BK_{zz})$ EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.3(5)

Das Nachweisformat für kombinierte Beanspruchung aus Biegung $M_{y,Ed}$ und Drucknormalkraft N_{Ed} sieht nach EN 1993-1-1: Pkt. 8.3.3(5) wie folgt aus:

$$y - y : \frac{N_{Ed}}{\chi_y * \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} * \frac{M_{y,Ed}^{Th.I.O}}{\chi_{LT} * \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0 \quad (2.23)$$

$$z - z : \frac{N_{Ed}}{\chi_z * \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} * \frac{M_{y,Ed}^{Th.II.O}}{\chi_{LT} * \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0 \quad (2.24)$$

Durch das Einsetzen aller ermittelten Unbekannten wird nun in (2.23) der Nachweis für Ausweichen um y-y und durch (2.24) für Ausweichen um z-z geführt:

$$y - y : \frac{175,14}{0,292 * 2914} + 1,048 * \frac{230,83}{1,0 * 382,58} = 0,838 \leq 1,0 \quad [0,838]$$

$$z - z : \frac{175,14}{0,804 * 2914} + 0,993 * \frac{248,11}{1,0 * 382,58} = 0,719 \leq 1,0 \quad [0,719]$$

— mit:

$$\frac{N_{Rk}}{\gamma_{M,1}} = N_{pl,Rd} = \frac{124 * 23,5}{1,0} = 2914kN$$

$$\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M,1}} = M_{pl,y,Rd} = \frac{1628 * 23,5}{1,0} * 10^{-2} = 382,58kNm$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.3(4)

2.1.2 Nachweisverfahren M3

EN 1993-1-1 Pkt.7.2.2(7a)

Das Verfahren M3 ist anwendbar, wenn die globale Anfangsschiefstellung bzw. die daraus resultierenden globalen Effekte nach Theorie II. Ordnung berücksichtigt werden müssen ($\alpha_{cr,sw} < 10$), die lokalen Vorkrümmungen jedoch aufgrund von N_{Ed}/N_{cr} nicht unmittelbar in der Systemberechnung zu erfassen sind. Die folgenden Nachweise sind zu führen:

- y-y: Stabnachweis BK_{yy} mit $L_{k,y} = L$ und $M_y^{Th.II.O.}$
- z-z: Stabnachweis $BDK(BK_{zz})$ mit $M_y^{Th.II.O.}$

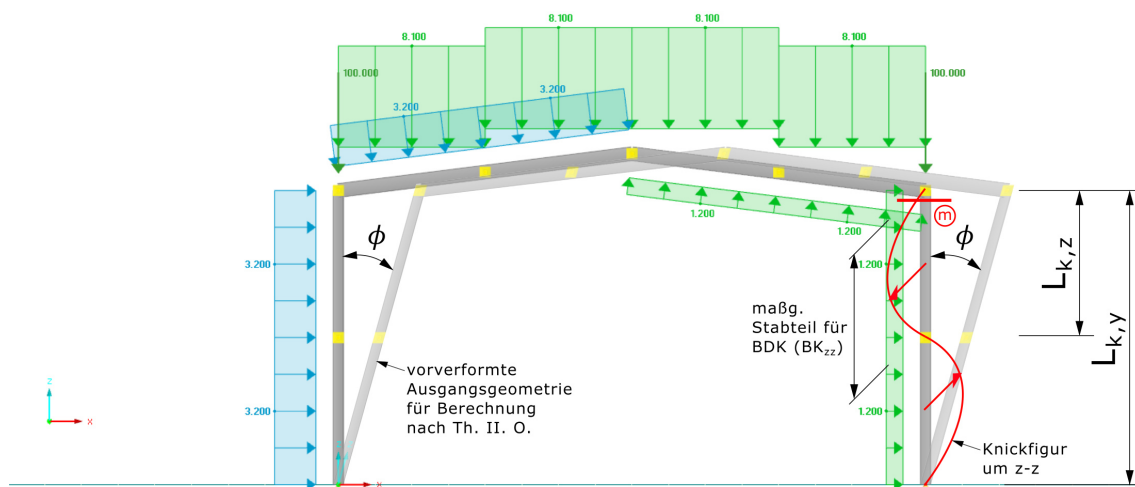


Abbildung 2.37: Anzusetzende Imperfektionen und Knicklängen $L_{k,y}$ und $L_{k,z}$ für den maßgebenden Stab 4

Der Wert der anzusetzenden globalen Anfangsschiefstellung wurde bereits ermittelt und beträgt:

$$\phi = 0,003062 = \frac{1}{326,6}$$

Diese Anfangsschiefstellung lässt sich entweder als Vorverformung oder mittels horizontaler Ersatzlasten F_h am System anbringen:

- horizontale Vorverformung in Höhe der Rahmenecke:
 $8000 * 0,003062 = 24,495\text{mm}$

- Ersatzlast:

$$F_h = F_{h,1} + F_{h,2} = N_{Ed,1} * \phi + N_{Ed,2} * \phi = (N_{Ed,1} + N_{Ed,2}) * \phi = (170,46 + 175,14) * 0,003062 = 1,058kN$$

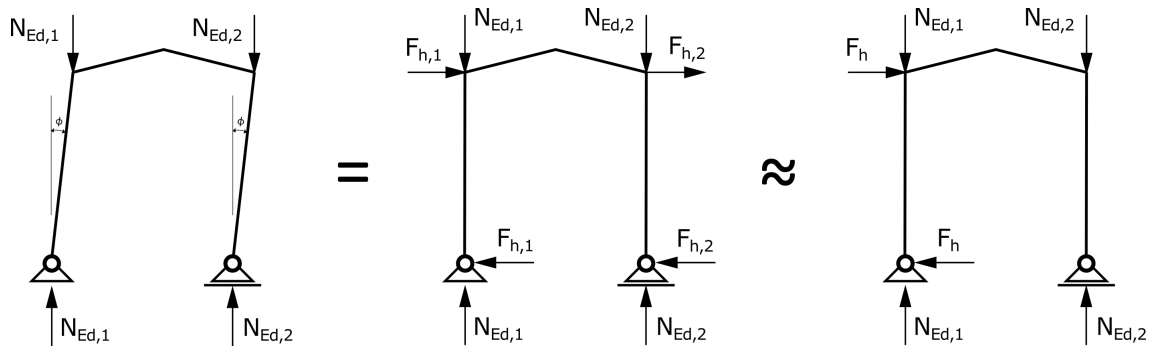


Abbildung 2.38: Horizontale Ersatzlasten F_h als Alternative zum Ansatz der Schiefstellung als Vorverformung

Schnittkräfte nach Theorie II. Ordnung (inkl. Anfangsschiefstellung ϕ)

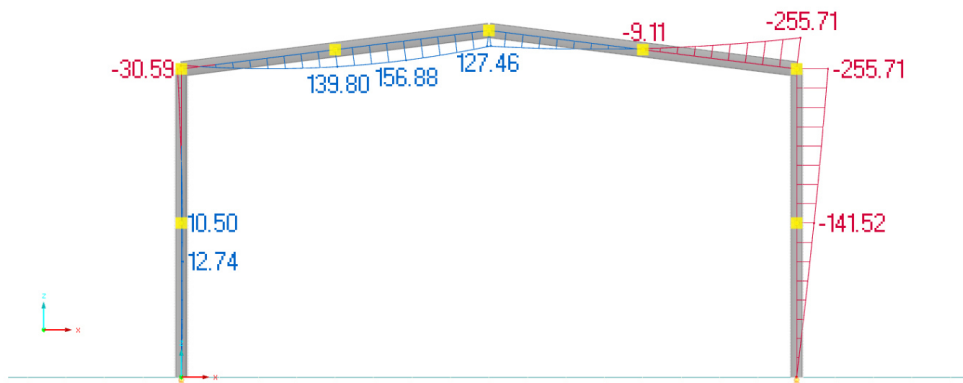


Abbildung 2.39: Bemessungsbiegemomente $M_{y,Ed}^{II. O.}$ [kNm]

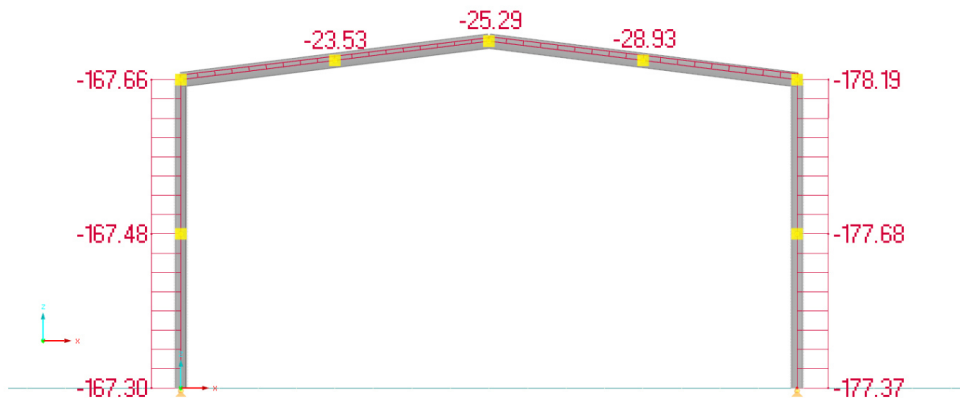


Abbildung 2.40: Bemessungsnormalkräfte $N_{Ed}^{II.O.}$ [kN]

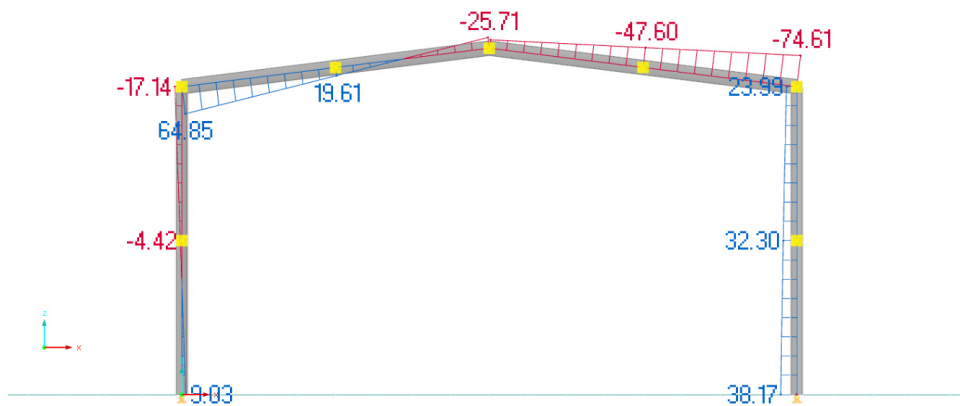


Abbildung 2.41: Bemessungsquerkräfte $V_{z,Ed}^{II.O.}$ [kN]

Die für die weiteren Nachweise maßgebenden Schnittkräfte nach Theorie II. Ordnung im bemessungsbestimmenden Querschnitt m (direkt unterhalb der rechten Rahmenecke) unter Berücksichtigung der Anfangsschiefstellung ϕ betragen:

- Biegemoment $M_{y,Ed}^{Th.II.O.} = 255,71 \text{ kNm}$
- Normalkraft $N_{Ed}^{Th.II.O.} = 178,19 \text{ kN}$

Querschnittsnachweis**EN 1993-1-1 Pkt. 8.2.5**

Der maßgebende Querschnitt ist die rechte Rahmenecke:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,Rd}} = \frac{M_{y,Ed}}{W_{pl,y} * \frac{f_y}{\gamma_{M0}}} = \frac{255,71 * 10^2}{1628 * \frac{23,5}{1,0}} = 0,668$$

(Anmerkung: Die Interaktion mit N_{Ed} darf aufgrund $N_{Ed} < 0,25 * N_{pl,Rd}$ vernachlässigt werden.)

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.2.5

Stabnachweise BK_{yy} und $BDK(BK_{zz})$ **EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.3**

• **Knicklängen $L_{k,y}$ und $L_{k,z}$**

$$L_{k,y} = L = 800cm$$

$$L_{k,z} = L/2 = 400cm$$

• **Schlankheitsgrade $\bar{\lambda}_y$ und $\bar{\lambda}_z$ für das Biegeknicken**

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.1.2

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{N_{pl}}{N_{cr,y}}} = \frac{L_{cr,y}}{i_y * \lambda_1} = \frac{800}{13,6 * 93,9} = 0,626$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{N_{pl}}{N_{cr,z}}} = \frac{L_{cr,z}}{i_z * \lambda_1} = \frac{400}{7,49 * 93,9} = 0,569$$

— mit:

$$\lambda_1 = \pi * \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi * \sqrt{\frac{21000}{23,5}} = 93,9$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.1.3

• Schlankheitsgrad $\bar{\lambda}_{LT}$ für das Biegedrillknicken

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.2.2

$$\bar{\lambda}_{LT} = \bar{\lambda}_z * k_p * k_c \quad (2.25)$$

$$k_p = \frac{0,9}{\left[1 + \frac{1}{20} * \left(\frac{\bar{\lambda}_z * \lambda_1}{h/t_f}\right)^2\right]^{0,25}} = \frac{0,9}{\left[1 + \frac{1}{20} * \left(\frac{0,569 * 93,9}{310/15,5}\right)^2\right]^{0,25}} = 0,834$$

Anmerkung: Der Faktor 0,9 berücksichtigt die erhöhte Torsionssteifigkeit von Walzprofilen.

Der für den Biegedrillknicknachweis maßgebende Stabteil ist in Abbildung 2.37 eingetragen. Der Momentenverlauf wird idealisiert linear über den betreffenden Stababschnitt angenommen.

$$\psi = \frac{141,52}{255,71} = 0,553$$

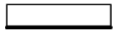

Load case	Factor f_M	Factor k_c
$M = \text{uniform}$ 	1,00	1,00
M  ψM $-1 \leq \psi \leq +1$	$1,25 - 0,1\psi - 0,15\psi^2$	$\frac{1}{1,33 - 0,33\psi}$

Abbildung 2.42: Ermittlung der Faktoren f_M und k_c (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.6)

$$k_c = \frac{1}{1,33 - 0,33 * \psi} = \frac{1}{1,33 - 0,33 * 0,553} = 0,872$$

Somit ergibt sich die bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}_{LT}$ für das Biegedrillknicken wie folgt:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \bar{\lambda}_z * k_p * k_c = 0,569 * 0,834 * 0,872 = 0,414$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.2.3

• **Abminderungsfaktoren χ_y und χ_z für das Biegeknicken** EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.1.3

$$\phi = 0,5 * [1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \quad (2.26)$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad (2.27)$$

Einsetzen der bezogenen Schlankheiten und der Imperfektionsfaktoren in die Gleichungen (2.26) und (2.27) liefert die Werte für ϕ_i und die Knickabminderungsfaktoren χ_i :

$$\phi_y = 0,5 * [1 + 0,34 * (0,626 - 0,2) + 0,626^2] = 0,768$$

$$\chi_y = \frac{1}{0,768 + \sqrt{0,768^2 - 0,626^2}} = 0,824$$

$$\phi_z = 0,5 * [1 + 0,49 * (0,569 - 0,2) + 0,569^2] = 0,752$$

$$\chi_z = \frac{1}{0,752 + \sqrt{0,752^2 - 0,569^2}} = 0,804$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.1.2

• **Momentenfaktor f_M für das Biegedrillknicken** EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.2.3

Die Ermittlung des Faktors f_M erfolgt ebenfalls entsprechend der Formeln aus Abbildung 2.42, mit dem für die vorliegende Biegemomentenverteilung zutreffenden Verhältnis ψ der Randmomente für den maßgebenden Stababschnitt:

$$f_M = 1,25 - 0,10 * \psi - 0,15 * \psi^2 \quad (2.28)$$

$$f_M = 1,25 - 0,10 * 0,553 - 0,15 * 0,553^2 = 1,149$$

• **Abminderungsfaktor χ_{LT} für das Biegedrillknicken** **EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.2.3**

$$\phi_{LT} = 0,5 * \left[1 + f_M * \left(\left(\frac{\bar{\lambda}_{LT}}{\bar{\lambda}_z} \right)^2 * \alpha_{LT} * (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right) \right] \quad (2.29)$$

$$\chi_{LT} = \frac{f_M}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - f_M * \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad (2.30)$$

Die für die Berechnung von ϕ_{LT} und χ_{LT} benötigten Variablen wurden bereits im vorigen Abschnitt berechnet und können direkt in (2.29) bzw. in (2.30) eingesetzt werden:

$$\phi_{LT} = 0,5 * \left[1 + 1,149 * \left(\left(\frac{0,414}{0,569} \right)^2 * 0,285 * (0,569 - 0,2) + 0,414^2 \right) \right] = 0,630$$

$$\chi_{LT} = \frac{1,149}{0,630 + \sqrt{0,630^2 - 1,149 * 0,414^2}} = 1,067 > \underline{1,0}$$

— nach „EC3-alt“

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.2.3

Der Abminderungsfaktor χ_{LT} war bisher definiert mit:

$$\phi_{LT} = 0,5 * [1 + \alpha_{LT} * (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2] \quad (2.31)$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad (2.32)$$

In EN 1993-1-1-„alt“: Pkt. 6.3.2.3(1) wurden folgende Werte für den Parameter β und die Plateaulänge $\bar{\lambda}_{LT,0}$ empfohlen:

$$\begin{aligned} \beta &= 0,75 \\ \bar{\lambda}_{LT,0} &= 0,4 \end{aligned}$$

Einsetzen der empfohlenen Werte in (2.31) bzw. in (2.32) ergibt:

$$\phi_{LT} = 0,5 * [1 + 0,34 * (0,414 - 0,4) + 0,75 * 0,414^2] = 0,567$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0,567 + \sqrt{0,567^2 - 0,75 * 0,414^2}} = 0,994$$

Weiters war eine entsprechende Modifikation von χ_{LT} aufgrund einer begünstigenden Momentenverteilung (erfasst durch den Faktor f) gestattet:

$$f = 1 - 0,5 * (1 - k_c) * [1 - 2 * (\bar{\lambda}_{LT} - 0,8)^2] \quad (2.33)$$

$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f} \quad (2.34)$$

$$f = 1 - 0,5 * (1 - 0,872) * [1 - 2 * (0,414 - 0,8)^2] = 0,955 \leq 1,0$$

$$\chi_{LT,mod} = \frac{0,994}{0,955} = 1,041 \geq \underline{1,0} \rightarrow \chi_{LT,mod} = 1,0$$

• **Momentenbeiwerte C_{my} und C_{mLT}**

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.3(10)

Um die Momentenbeiwerte $C_{m,i}$ bestimmen zu können, wird der zum jeweils zutreffenden Stababschnitt zugehörige Biegemomentenverlauf M_y benötigt.

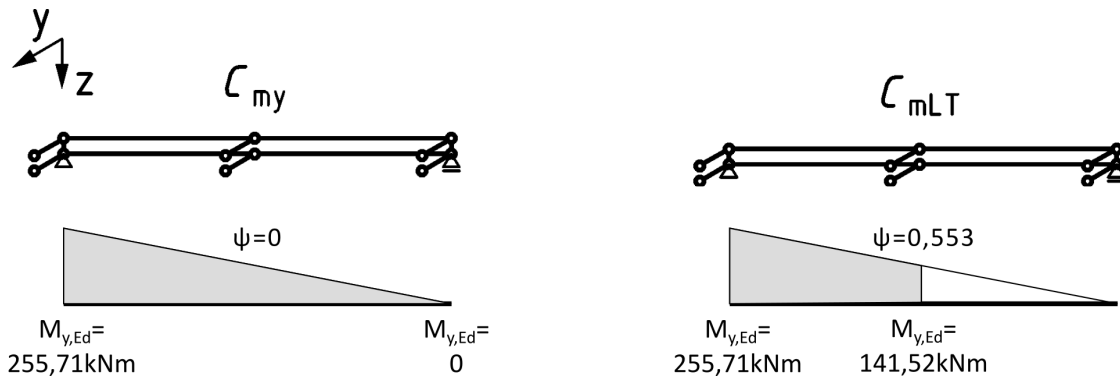


Abbildung 2.43: Relevante Stababschnitte und zugehörige Momentenverläufe zur Bestimmung der Momentenbeiwerte C_{my} und C_{mLT}

Wie aus Abbildung 2.43 ersichtlich muss zur Bestimmung von C_{my} der Momentenverlauf M_y entlang der gesamten Stützenlänge bzw. für C_{mLT} nur der Bereich zwischen der seitlichen Zwischenabstützung in halber Stützhöhe und der Rahmenecke betrachtet werden.

Moment diagram	Range	C_{my} and C_{mz} and C_{mLT}
	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,6 + 0,4\psi \geq 0,4$

Abbildung 2.44: Ermittlung der äquivalenten Momentenbeiwerte (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.9)

$$C_{my} = 0,6 + 0,4 * \psi = 0,6 + 0,4 * 0 = 0,60$$

$$C_{mLT} = 0,6 + 0,4 * \psi = 0,6 + 0,4 * 0,553 = 0,821$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Anhang B

• Interaktionsfaktoren

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.3(8)

Das vorliegende Stützenprofil ist unter der gegebenen Systemgeometrie — wie bereits in Abschnitt 2.1.1 gezeigt — als verdrehweich einzustufen.

Um die Interaktionsfaktoren berechnen zu können, müssen zunächst die Ausnutzungsgrade n_y und n_z anhand der folgenden Gleichungen bestimmt werden:

$$n_y = \frac{N_{Ed}}{\chi_y * N_{Rk} / \gamma_{M1}} \quad (2.35)$$

$$n_z = \frac{N_{Ed}}{\chi_z * N_{Rk} / \gamma_{M1}} \quad (2.36)$$

Einsetzen in (2.35) und (2.36) liefert:

$$n_y = \frac{178,19}{0,824 * 2914 / 1,0} = 0,074$$

$$n_z = \frac{178,19}{0,804 * 2914 / 1,0} = 0,076$$

Die Interaktionsfaktoren werden anhand der Tabellen in den nachfolgenden Abbildungen ermittelt, wobei hier zwischen den jeweiligen Querschnittsklassen unterschieden werden muss.

Plastic cross-sectional properties Class 1, Class 2, Class 3 (with W_{ep} according to Annex B)	Elastic cross-sectional properties Class 3 (with W_{el}), Class 4
For $\bar{\lambda}_y < 1,0$: $k_{yy} = C_{my} [1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) n_y]$	For $\bar{\lambda}_y < 1,0$: $k_{yy} = C_{my} (1 + 0,6 \bar{\lambda}_y n_y)$
For $\bar{\lambda}_y \geq 1,0$: $k_{yy} = C_{my} (1 + 0,8 n_y)$	For $\bar{\lambda}_y \geq 1,0$: $k_{yy} = C_{my} (1 + 0,6 n_y)$
$k_{yz} = 0,6 k_{zz}$, see Table 8.8	$k_{yz} = k_{zz}$, see Table 8.8
NOTE 1 See (9) for n_y .	
NOTE 2 See (10) and Table 8.9 for C_{my} .	

Abbildung 2.45: Ermittlung des Interaktionsfaktors k_{yy} (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.7)

	Type of section	Plastic cross-sectional properties Class 1, Class 2, Class 3 (with W_{ep} according to Annex B)	Elastic cross-sectional properties Class 3 (with W_{el}), Class 4
k_{zy}	Not susceptible to LT-buckling	$k_{zy} = 0,6 k_{yy}$ See Table 8.7.	$k_{zy} = 0,8 k_{yy}$ See Table 8.7.
	Susceptible to LT-buckling	For $\bar{\lambda}_z < 1,0$: $k_{zy} = 1 - \frac{0,1 \bar{\lambda}_z n_z}{C_{mLT} - 0,25}$ but $k_{zy} \leq 0,6 + \bar{\lambda}_z$ for $\bar{\lambda}_z < 0,4$ For $\bar{\lambda}_z \geq 1,0$: $k_{zy} = 1 - \frac{0,1 n_z}{C_{mLT} - 0,25}$	For $\bar{\lambda}_z < 1,0$: $k_{zy} = 1 - \frac{0,05 \bar{\lambda}_z n_z}{C_{mLT} - 0,25}$ For $\bar{\lambda}_z \geq 1,0$: $k_{zy} = 1 - \frac{0,05 n_z}{C_{mLT} - 0,25}$
k_{zz}	I-sections	For $\bar{\lambda}_z < 1,0$: $k_{zz} = C_{mz} [1 + (2 \bar{\lambda}_z - 0,6) n_z]$ For $\bar{\lambda}_z \geq 1,0$: $k_{zz} = C_{mz} (1 + 1,4 n_z)$	For $\bar{\lambda}_z < 1,0$: $k_{zz} = C_{mz} (1 + 0,6 \bar{\lambda}_z n_z)$
	Rectangular, circular or elliptical hollow sections	For $\bar{\lambda}_z < 1,0$: $k_{zz} = C_{mz} [1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) n_z]$ For $\bar{\lambda}_z \geq 1,0$: $k_{zz} = C_{mz} [1 + 0,8 n_z]$	For $\bar{\lambda}_z \geq 1,0$: $k_{zz} = C_{mz} (1 + 0,6 n_z)$

Abbildung 2.46: Ermittlung des Interaktionsfaktors k_{zy} (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.8)

Da keine Momentenbelastung um die Achse z-z am System angreift, werden lediglich die Interaktionsfaktoren k_{yy} und k_{zy} benötigt. Diese errechnen sich gemäß der Abbildungen 2.45 und 2.46 wie folgt:

Für $\bar{\lambda}_y = 0,626 < 1,0$:

$$k_{yy} = C_{my} * [(1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) * n_y)] = 0,6 * [1 + (0,626 - 0,2) * 0,074] = 0,619$$

Für verdrehweichen Querschnitt, mit $\bar{\lambda}_z = 0,569 < 1,0$:

$$k_{zy} = 1 - \frac{0,1 * \bar{\lambda}_z * n_z}{C_{mLT} - 0,25} = 1 - \frac{0,1 * 0,569 * 0,076}{0,821 - 0,25} = 0,992$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Anhang B

• Nachweisgleichungen für BK_{yy} und $BDK(BK_{zz})$ EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.3(5)

Das Nachweisformat für kombinierte Beanspruchung aus Biegung M_y und Drucknormalkraft N_{Ed} sieht nach EN 1993-1-1: Pkt. 8.3.3(5) wie folgt aus:

$$y - y : \frac{N_{Ed}}{\chi_y * \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} * \frac{M_{y,Ed}^{Th.II.O.}}{\chi_{LT} * \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0 \quad (2.37)$$

$$z - z : \frac{N_{Ed}}{\chi_z * \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} * \frac{M_{y,Ed}^{Th.II.O.}}{\chi_{LT} * \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0 \quad (2.38)$$

Durch das Einsetzen aller ermittelten Unbekannten wird nun in (2.37) der Nachweis für Ausweichen um y-y und durch (2.38) für Ausweichen um z-z geführt:

$$y - y : \frac{178,19}{0,824 * 2914} + 0,619 * \frac{255,71}{1,0 * 382,58} = 0,488 \leq 1,0 \quad [0,488]$$

$$z - z : \frac{178,19}{0,804 * 2914} + 0,992 * \frac{255,71}{1,0 * 382,58} = 0,739 \leq 1,0 \quad [0,739]$$

— mit:

$$\frac{N_{Rk}}{\gamma_{M,1}} = N_{pl,Rd} = \frac{124 * 23,5}{1,0} = 2914kN$$

$$\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M,1}} = M_{pl,y,Rd} = \frac{1628 * 23,5}{1,0} * 10^{-2} = 382,58kNm$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.3(4)

2.1.3 Nachweisverfahren M4

EN 1993-1-1 Pkt.7.2.2(7b)

Das Verfahren M4 sieht sowohl die Abbildung der globalen Systemimperfection als auch jene der lokalen Stabimperfection e_0 unmittelbar in der Systemberechnung vor. Die Imperfectionen können dabei entweder als Kombination von globaler Anfangsschiefstellung ϕ und lokaler Vorkrümmungen $e_{0,y}$ als Vorverformung am System angesetzt werden (Verfahren M4a) oder alternativ als Eigenmode-konforme Imperfection (Vorverformung affin zur 1. Eigenform des Systems; Verfahren M4b). Eine anschließende ebene Systemberechnung nach Theorie II. Ordnung deckt somit alle Stabilitätseffekte in der Ebene ab, wodurch der Stabnachweis für BK_{yy} entfällt und anstelle dessen ein Querschnittsnachweis für Interaktion von Drucknormalkraft und Biegemoment nach Theorie II. Ordnung tritt. Die Stabilität aus der Ebene wird, wie auch in den bisherigen Methoden EM und M3, durch den entsprechenden Stabnachweis $BDK(BK_{zz})$ nachgewiesen. Zusammenfassend sind somit folgende Nachweise zu führen:

- y-y: QS-Nachweis mit N_{Ed} und $M_{y,Ed}^{Th.II.O.}$
- z-z: Stabnachweis $BDK(BK_{zz})$ mit $M_{y,Ed}^{Th.II.O.}$

2.1.3.1 Nachweisverfahren M4a

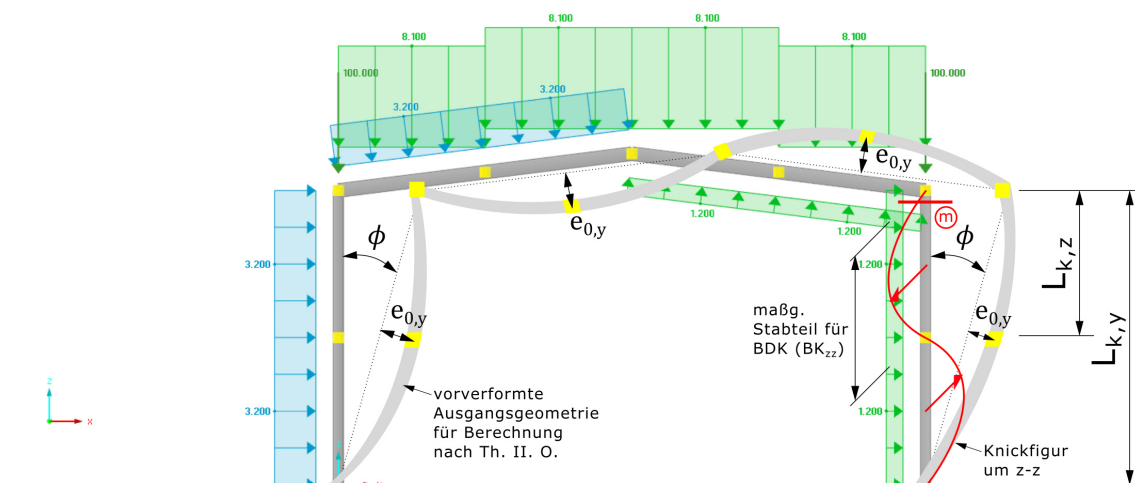


Abbildung 2.47: Ansatz der Imperfektionen ϕ und $e_{0,y}$, sowie maßgebender Stababschnitt für Stabnachweis $BDK(BK_{zz})$

Die Amplitudenwerte der globalen Anfangsschiefstellung ϕ und lokalen Vorkrümmung $e_{0,y}$ betragen:

$$\phi = 0,003062$$

$$[\phi = 0,003062]$$

$$\text{Stütze: } e_{0,y} = 36,3 \text{ mm}$$

$$[e_{0,y} = 40,0 \text{ mm}]$$

$$\text{Träger: } e_{0,y} = 22,6 \text{ mm}$$

$$[e_{0,y} = 32,2 \text{ mm}]$$

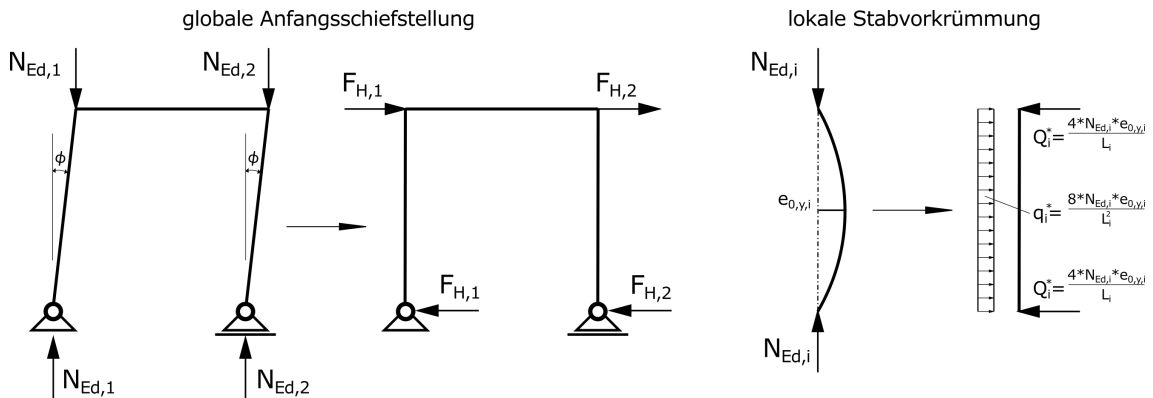


Abbildung 2.48: Äquivalente Ersatzlasten zur Erfassung der Anfangsschiefstellung ϕ bzw. Vorkrümmungen $e_{0,y}$

Die Imperfektionen können entweder direkt als Vorverformung oder alternativ auch mittels äquivalenter Ersatzlasten (siehe Abbildung 2.48) am System anbringen. Die äquivalenten Ersatzlasten ergeben sich gemäß der Abbildung 2.48 wie folgt:

- Äquivalente Horizontallasten zur Erfassung der Anfangsschiefstellung:
 - $F_{H,1} = N_{Ed,1} * \phi = 170,46 * 0,003062 = 0,52 \text{ kN}$
 - $F_{H,2} = N_{Ed,2} * \phi = 175,14 * 0,003062 = 0,54 \text{ kN}$
- Äquivalente Ersatzlasten zur Erfassung der Vorkrümmungen:

Stab i	$e_{0,y,i}$ [mm]	L_i [mm]	EC3-neu			EC3-alt		
			$N_{Ed,i}$ [kN]	q_i^* [kN/m]	Q_i^* [kN]	q_i^* [kN/m]	Q_i^* [kN]	
1	36,3	8000	170,5	0,774	3,095	0,853	3,410	
4			175,1	0,795	3,178	0,876	3,502	
2	22,6	8062	28,2	0,078	0,316	0,112	0,454	
3			33,2	0,092	0,372	0,132	0,535	

Abbildung 2.49: Äquivalente Ersatzlasten zur Erfassung der Vorkrümmungen

Für die Schnittkraftberechnung werden die Imperfektionen in Form von Vorverformungen (und nicht mit äquivalenten Ersatzlasten) am System angesetzt.

Schnittkräfte nach Theorie II. Ordnung (inkl. Anfangsschiefstellung ϕ und Vorkrümmung $e_{0,y,i}$)

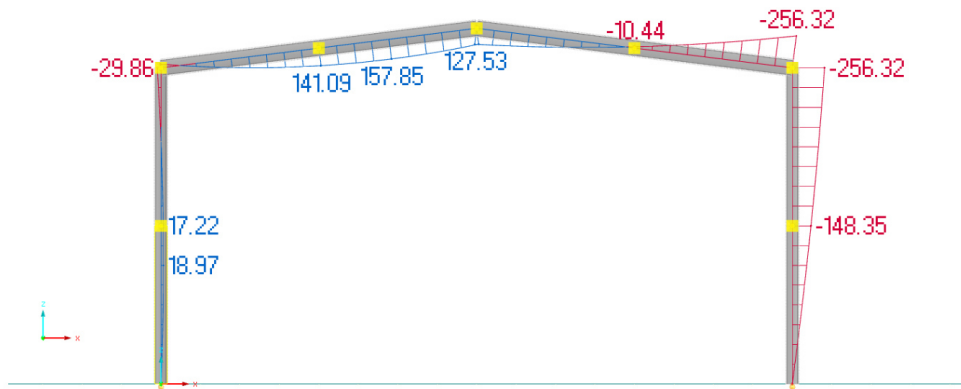


Abbildung 2.50: Bemessungsbiegemomente $M_{y,Ed}^{II. O.}$ [kNm]

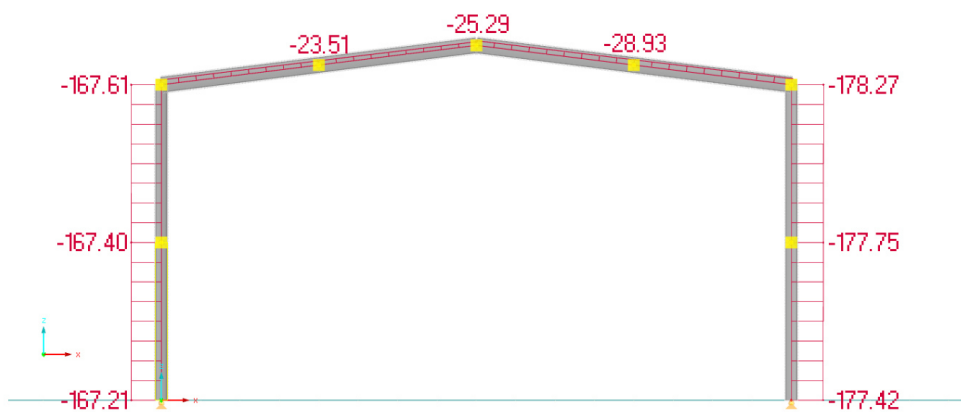


Abbildung 2.51: Bemessungsnormalkräfte $N_{Ed}^{II. O.}$ [kN]

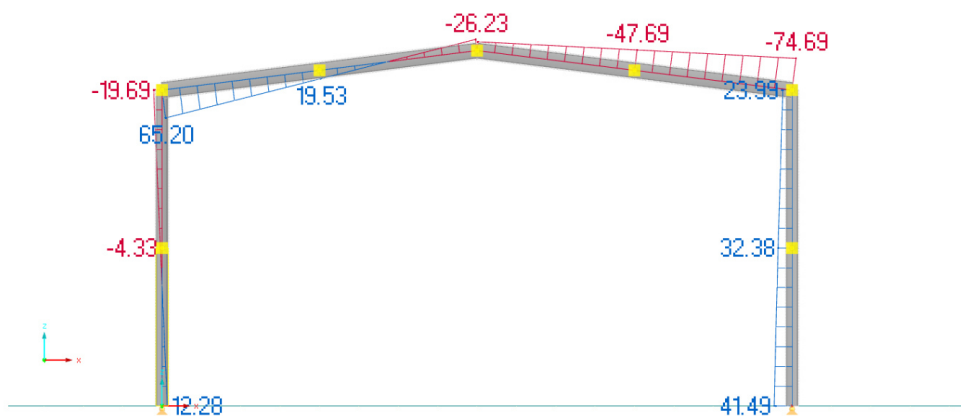


Abbildung 2.52: Bemessungsquerkräfte $V_{z,Ed}^{II. O.}$ [kN]

Die für den Querschnittsnachweis bzw. in weiterer Folge auch für den Stabnachweis maßgebenden Schnittkräfte nach Theorie II. Ordnung in Querschnitt m (direkt unterhalb der rechten Rahmenecke) betragen:

- Biegemoment $M_{y,Ed}^{Th.II.O.} = 256,32 \text{ kNm}$ [256,38 kNm]
- Normalkraft $N_{Ed}^{Th.II.O.} = 178,27 \text{ kN}$ [178,28 kN]

Querschnittsnachweis (ersetzt BK_{yy})

EN 1993-1-1 Pkt. 8.2.5

Der maßgebende Querschnitt ist die rechte Rahmenecke:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,Rd}} = \frac{M_{y,Ed}}{W_{pl,y} * \frac{f_y}{\gamma_{M0}}} = \frac{256,32 * 10^2}{1628 * \frac{23,5}{1,0}} = 0,670 \quad [0,670]$$

(Anmerkung: Die Interaktion mit N_{Ed} darf aufgrund $N_{Ed} < 0,25 * N_{pl,Rd}$ vernachlässigt werden.)

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.2.5

Stabnachweis $BDK(BK_{zz})$

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.3

- Knicklänge $L_{k,z}$

$$L_{k,z} = L/2 = 400 \text{ cm}$$

- Schlankheitsgrad $\bar{\lambda}_z$

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.1.2

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{N_{pl}}{N_{cr,z}}} = \frac{L_{cr,z}}{i_z * \lambda_1} = \frac{400}{7,49 * 93,9} = 0,569$$

— mit:

$$\lambda_1 = \pi * \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi * \sqrt{\frac{21000}{23,5}} = 93,9$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.1.3

• Schlankheitsgrad $\bar{\lambda}_{LT}$ für das Biegedrillknicken

B 1993-1-1 Pkt. 8.3.2.2

$$\bar{\lambda}_{LT} = \bar{\lambda}_z * k_p * k_c \quad (2.39)$$

$$k_p = \frac{0,9}{\left[1 + \frac{1}{20} * \left(\frac{\bar{\lambda}_z * \lambda_1}{h/t_f}\right)^2\right]^{0,25}} = \frac{0,9}{\left[1 + \frac{1}{20} * \left(\frac{0,569 * 93,9}{310/15,5}\right)^2\right]^{0,25}} = 0,834$$

Der für den Biegedrillknicknachweis maßgebende Stabteil ist in Abbildung 2.47 eingetragen. Der Momentenverlauf wird idealisiert linear über den betreffenden Stababschnitt angenommen.

$$\psi = \frac{148,35}{256,32} = 0,579$$

$$\left[\psi = \frac{149,05}{256,38} = 0,581 \right]$$

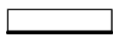

Load case	Factor f_M	Factor k_c
$M = \text{uniform}$ 	1,00	1,00
M  ψM $-1 \leq \psi \leq +1$	$1,25 - 0,1\psi - 0,15\psi^2$	$\frac{1}{1,33 - 0,33\psi}$

Abbildung 2.53: Ermittlung der Faktoren f_M und k_c (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.6)

$$k_c = \frac{1}{1,33 - 0,33 * \psi} = \frac{1}{1,33 - 0,33 * 0,579} = 0,878$$

$$[k_c = 0,879]$$

Somit ergibt sich die bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}_{LT}$ für das Biegedrillknicken wie folgt:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \bar{\lambda}_z * k_p * k_c = 0,569 * 0,834 * 0,878 = 0,417$$

$$[\bar{\lambda}_{LT} = 0,417]$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.2.3

• **Abminderungsfaktor χ_z für das Biegeknicken**

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.1.3

$$\phi = 0,5 * [1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \quad (2.40)$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad (2.41)$$

Einsetzen der bezogenen Schlankheit und des Imperfektionsfaktors in die Gleichungen (2.40) und (2.41) liefert die Werte für ϕ_z und den Knickabminderungsfaktor χ_z :

$$\phi_z = 0,5 * [1 + 0,49 * (0,569 - 0,2) + 0,569^2] = 0,752$$

$$\chi_z = \frac{1}{0,752 + \sqrt{0,752^2 - 0,569^2}} = 0,804$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.1.2

• **Momentenfaktor f_M für das Biegedrillknicken**

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.2.3

Die Ermittlung des Faktors f_M erfolgt ebenfalls entsprechend der Formeln aus Abbildung 2.53, mit dem für die vorliegende Biegemomentenverteilung zutreffenden Verhältnis ψ der Randmomente für den maßgebenden Stababschnitt:

$$f_M = 1,25 - 0,10 * \psi - 0,15 * \psi^2 \quad (2.42)$$

$$f_M = 1,25 - 0,10 * 0,579 - 0,15 * 0,579^2 = 1,142$$

• **Abminderungsfaktor χ_{LT} für das Biegedrillknicken** **EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.2.3**

$$\phi_{LT} = 0,5 * \left[1 + f_M * \left(\left(\frac{\bar{\lambda}_{LT}}{\bar{\lambda}_z} \right)^2 * \alpha_{LT} * (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right) \right] \quad (2.43)$$

$$\chi_{LT} = \frac{f_M}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - f_M * \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad (2.44)$$

Die für die Berechnung von ϕ_{LT} und χ_{LT} benötigten Variablen wurden bereits im vorigen Abschnitt berechnet und können direkt in (2.43) bzw. in (2.44) eingesetzt werden:

$$\phi_{LT} = 0,5 * \left[1 + 1,142 * \left(\left(\frac{0,417}{0,569} \right)^2 * 0,285 * (0,569 - 0,2) + 0,417^2 \right) \right] = 0,632$$

$$\chi_{LT} = \frac{1,142}{0,632 + \sqrt{0,632^2 - 1,142 * 0,417^2}} = 1,057 > \underline{1,0}$$

— nach „EC3-alt“

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.2.3

Der Abminderungsfaktor χ_{LT} war bisher definiert mit:

$$\phi_{LT} = 0,5 * [1 + \alpha_{LT} * (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2] \quad (2.45)$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad (2.46)$$

In EN 1993-1-1-„alt“: Pkt. 6.3.2.3(1) wurden folgende Werte für den Parameter β und die Plateaulänge $\bar{\lambda}_{LT,0}$ empfohlen:

$$\begin{aligned} \beta &= 0,75 \\ \bar{\lambda}_{LT,0} &= 0,4 \end{aligned}$$

Einsetzen der empfohlenen Werte in (2.45) bzw. in (2.46) ergibt:

$$\phi_{LT} = 0,5 * [1 + 0,34 * (0,417 - 0,4) + 0,75 * 0,417^2] = 0,568$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0,568 + \sqrt{0,568^2 - 0,75 * 0,417^2}} = 0,994$$

Weiters war eine entsprechende Modifikation von χ_{LT} aufgrund einer begünstigenden Momentenverteilung (erfasst durch den Faktor f) gestattet:

$$f = 1 - 0,5 * (1 - k_c) * [1 - 2 * (\bar{\lambda}_{LT} - 0,8)^2] \quad (2.47)$$

$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f} \quad (2.48)$$

$$f = 1 - 0,5 * (1 - 0,879) * [1 - 2 * (0,417 - 0,8)^2] = 0,957 \leq 1,0$$

$$\chi_{LT,mod} = \frac{0,994}{0,957} = 1,039 \geq \underline{1,0}$$

• **Momentenbeiwert C_{mLT}**

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.3(10)

Um den Momentenbeiwert $C_{m,i}$ bestimmen zu können, wird der zum jeweils zutreffenden Stababschnitt zugehörige Biegemomentenverlauf M_y benötigt.

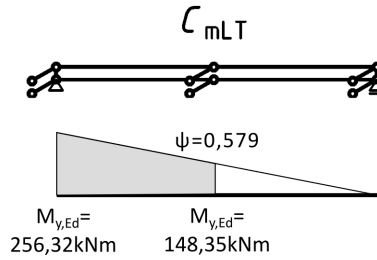


Abbildung 2.54: *Relevanter Stababschnitt und zugehöriger Momentenverlauf zur Bestimmung des Momentenbeiwerts C_{mLT}*

Wie aus Abbildung 2.54 ersichtlich muss zur Bestimmung von C_{mLT} der Bereich zwischen der seitlichen Zwischenabstützung in halber Stützhöhe und der Rahmenecke betrachtet werden.

Moment diagram	Range	C_{my} and C_{mz} and C_{mLT}
	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,6 + 0,4\psi \geq 0,4$

Abbildung 2.55: *Ermittlung der äquivalenten Momentenbeiwerte (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.9)*

$$C_{mLT} = 0,6 + 0,4 * \psi = 0,6 + 0,4 * 0,579 = 0,832$$

$$[C_{mLT} = 0,833]$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Anhang B

• **Interaktionsfaktoren**

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.3(8)

Das vorliegende Stützenprofil ist unter der gegebenen Systemgeometrie — wie bereits in Abschnitt 2.1.1 gezeigt — als verdrehweich einzustufen.

Um die Interaktionsfaktoren berechnen zu können, muss zunächst der Ausnutzungsgrad n_z anhand der folgenden Gleichung bestimmt werden:

$$n_z = \frac{N_{Ed}}{\chi_z * N_{Rk} / \gamma_{M1}} \quad (2.49)$$

Einsetzen in (2.49) liefert:

$$n_z = \frac{178,27}{0,804 * 2914 / 1,0} = 0,076 \quad [n_z = 0,076]$$

Der für den Stabnachweis $BDK(BK_{zz})$ unter $N + M_y$ benötigte Interaktionsfaktor k_{zy} wird anhand der Tabelle in der nachfolgenden Abbildung ermittelt, wobei hier zwischen den jeweiligen Querschnittsklassen unterschieden werden muss.

	Type of section	Plastic cross-sectional properties Class 1, Class 2, Class 3 (with W_{ep} according to Annex B)	Elastic cross-sectional properties Class 3 (with W_{el}), Class 4
k_{zy}	Not susceptible to LT-buckling	$k_{zy} = 0,6 k_{yy}$ See Table 8.7.	$k_{zy} = 0,8 k_{yy}$ See Table 8.7.
	Susceptible to LT-buckling	For $\bar{\lambda}_z < 1,0$: $k_{zy} = 1 - \frac{0,1 \bar{\lambda}_z n_z}{C_{mLT} - 0,25}$ but $k_{zy} \leq 0,6 + \bar{\lambda}_z$ for $\bar{\lambda}_z < 0,4$ For $\bar{\lambda}_z \geq 1,0$: $k_{zy} = 1 - \frac{0,1 n_z}{C_{mLT} - 0,25}$	For $\bar{\lambda}_z < 1,0$: $k_{zy} = 1 - \frac{0,05 \bar{\lambda}_z n_z}{C_{mLT} - 0,25}$ For $\bar{\lambda}_z \geq 1,0$: $k_{zy} = 1 - \frac{0,05 n_z}{C_{mLT} - 0,25}$
k_{zz}	I-sections	For $\bar{\lambda}_z < 1,0$: $k_{zz} = C_{mz} [1 + (2 \bar{\lambda}_z - 0,6) n_z]$ For $\bar{\lambda}_z \geq 1,0$: $k_{zz} = C_{mz} (1 + 1,4 n_z)$	For $\bar{\lambda}_z < 1,0$: $k_{zz} = C_{mz} (1 + 0,6 \bar{\lambda}_z n_z)$
	Rectangular, circular or elliptical hollow sections	For $\bar{\lambda}_z < 1,0$: $k_{zz} = C_{mz} [1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) n_z]$ For $\bar{\lambda}_z \geq 1,0$: $k_{zz} = C_{mz} [1 + 0,8 n_z]$	For $\bar{\lambda}_z \geq 1,0$: $k_{zz} = C_{mz} (1 + 0,6 n_z)$

Abbildung 2.56: Ermittlung des Interaktionsfaktors k_{zy} (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.8)

Da keine Momentenbelastung um die Achse z-z am System angreift und wie eingangs angeführt gemäß EN 1993-1-1: Pkt. 7.2.2(7b) der Stabilitätsnachweis in der Ebene entfallen darf, wird lediglich der Interaktionsfaktor k_{zy} benötigt. Dieser errechnet sich gemäß Abbildung 2.56 wie folgt:

Für verdrehweichen Querschnitt, mit $\bar{\lambda}_z = 0,569 < 1,0$:

$$k_{zy} = 1 - \frac{0,1 * \bar{\lambda}_z * n_z}{C_{mLT} - 0,25} = 1 - \frac{0,1 * 0,569 * 0,076}{0,832 - 0,25} = 0,993 \quad [k_{zy} = 0,993]$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Anhang B

• Nachweisgleichung für $BDK(BK_{zz})$

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.3(5)

Wie bereits in der Einleitung dieses Kapitels beschrieben wurde, darf der Nachweis für Ausweichen um die y-Achse beim Nachweisverfahren M4 entfallen. Das Nachweisformat für kombinierte Beanspruchung aus Biegung M_y und Drucknormalkraft N_{Ed} sieht nach EN 1993-1-1: Pkt. 8.3.3(5) wie folgt aus:

$$z - z : \frac{N_{Ed}}{\chi_z * \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} * \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} * \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0 \quad (2.50)$$

Durch das Einsetzen aller ermittelten Unbekannten wird nun in (2.50) der Nachweis für Ausweichen um z-z geführt:

$$z - z : \frac{177,96}{0,804 * 2914} + 0,993 * \frac{253,81}{1,0 * 382,58} = 0,735 \leq 1,0 \quad [0,742]$$

— mit:

$$\frac{N_{Rk}}{\gamma_{M,1}} = N_{pl,Rd} = \frac{124 * 23,5}{1,0} = 2914 kN$$

$$\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M,1}} = M_{pl,y,Rd} = \frac{1628 * 23,5}{1,0} * 10^{-2} = 382,58 kNm$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.3(4)

2.1.3.2 Nachweisverfahren M4b

Beim Nachweisverfahren M4b werden die globale Anfangsschiefstellung und die lokale Vorkrümmung durch die Eigenmode-konforme Imperfektion ersetzt. Am Anfang dieses Kapitels wurde der Wert $e_{0,m}$ bereits mit $e_{0,m} = 64,86mm$ ermittelt. Um nun den Amplitudenwert $\eta_{init,m}$ der Eigenmode-konformen Imperfektion gemäß Gleichung (2.51) ermitteln zu können, muss der Absolutwert des Biegemoments im kritischen Querschnitt m $EI_m * |\eta''_{cr}|$ bestimmt werden.

$$\eta_{init}(x) = e_{0,m} * \underbrace{\frac{N_{cr,m}}{EI_y * |\eta''_{cr}|}}_{\eta_{init,m}} * \eta_{cr}(x) \tag{2.51}$$

Durch Multiplikation der auf $|u| = 1$ skalierten 1. Eigenform mit dem errechneten Amplitudenwert $\eta_{init,m}$ ergibt sich die als Vorverformung am System aufzuprägende Imperfektionsfigur $\eta_{cr}(x)$. Die exakte Lösung für $EI_y * |\eta''_{cr}|$ kann etwa mit dem FE-Programm ABAQUS ermittelt werden. Damit lassen sich die Krümmungen η''_{cr} bzw. auch die damit verbundenen Biegemomente $M_y^* = EI_y * |\eta''_{cr}|$ unmittelbar als Ergebnis der linearen Stabilitätsanalyse (LBA) an beliebigen Stabpositionen abgreifen. Wie aus Abbildung 2.57 zu erkennen ist, beträgt das gesuchte Moment $M_{y,m}^*$ im Querschnitt m unmittelbar unter der Rahmenecke $M_y^* = EI_y * |\eta''_{cr}| = 1,046 * 10^6 Nm$.

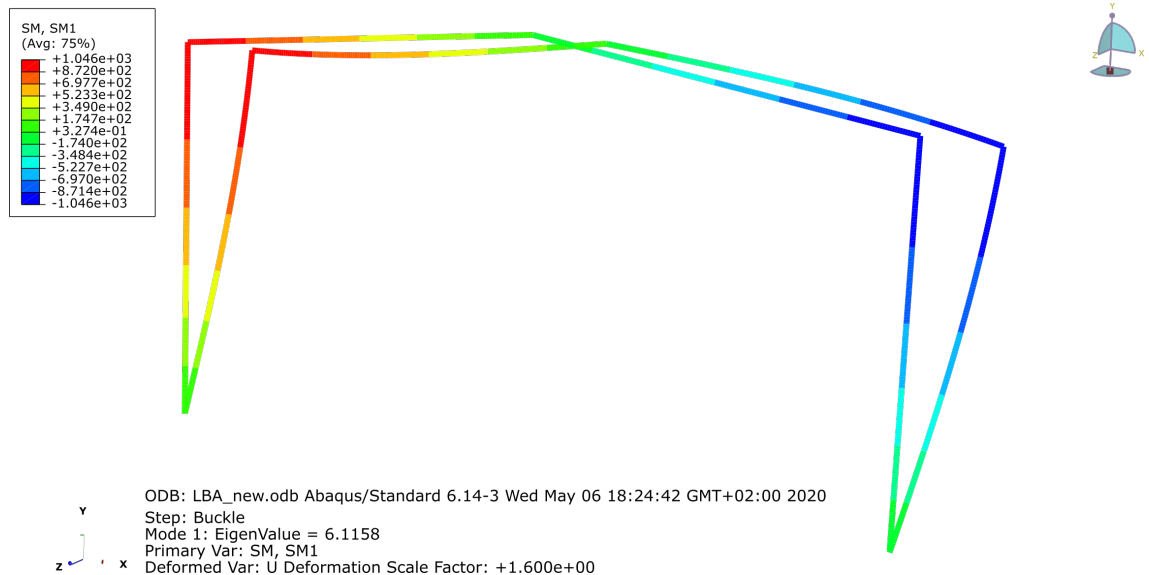


Abbildung 2.57: Exakte Ermittlung von $EI_y * |\eta''_{cr}|$ in ABAQUS

Da ABAQUS vorwiegend im Forschungs- und Wissenschaftsbereich verwendet wird, werden im Anschluss baupraktische Näherungslösungen präsentiert.

• **Bestimmung von $\eta''_{cr}(x)$ über Verformungslastfall affin zur Eigenform**

Eine Möglichkeit besteht darin, durch Aufbringen einer Knotenverformung am Ausgangssystem eine der Eigenform ähnliche Verformungsfigur und damit auch Biegemomentenverteilung zu erhalten. Dies konnte in diesem Fall durch Aufbringen einer horizontalen Knotenverformung von $\Delta = 1\text{mm}$ in Querschnitt m errechnet werden. Dieser Verformungslastfall lässt sich auch in einfach aufgebauten Stabwerksprogrammen realisieren. Das Biegemoment $M_{y,m}^*$ entspricht näherungsweise dem gesuchten Wert $M_y^* = EI_y * |\eta''_{cr}|$. Die Abweichung zur exakten Lösung liegt darin, dass die auftretende Verschiebefigur nicht exakt der 1. Eigenform entspricht. Für den Querschnitt m ergibt sich $EI_y * |\eta''_{cr}| = 1,17\text{kNm} = 1,165 * 10^6\text{Nm}$

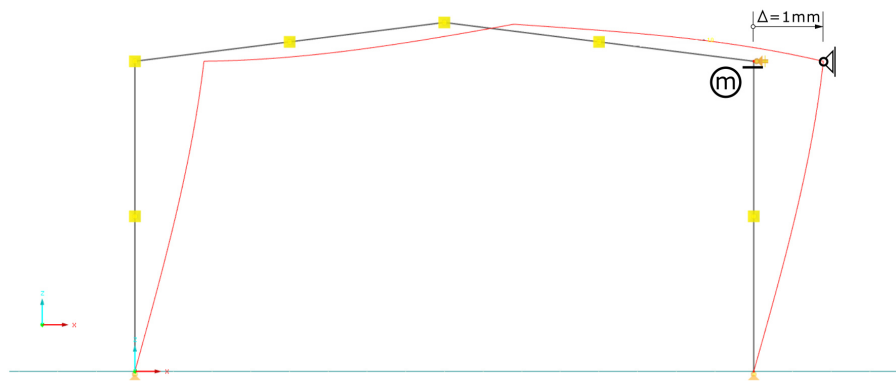


Abbildung 2.58: Statisches System und Lastfall Knotenverschiebung $\Delta = 1\text{mm}$

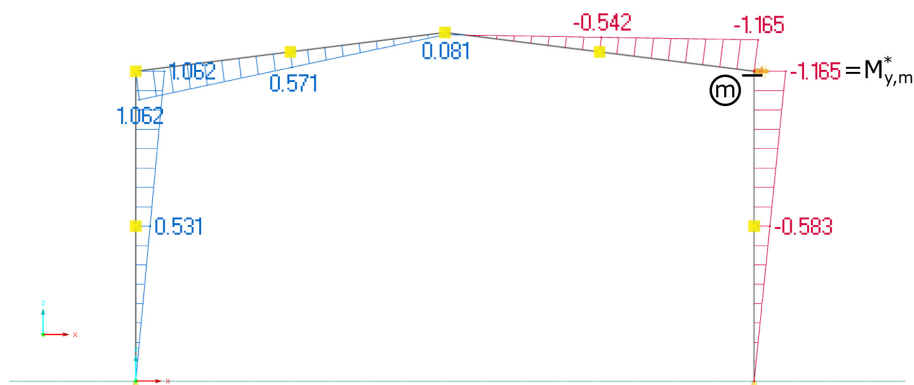


Abbildung 2.59: Schnittkräfte M_y zufolge Knotenverschiebung $\Delta = 1\text{mm}$

• **Bestimmung von $EI_m * |\eta''_{cr,m}|$ über den Ausdruck $|M''_{\eta,cr,m}| * (\alpha_{cr} - 1)$**

Ein weiterer Hinweis zur Berechnung von M_y^* findet sich in EN 1993-1-1: Pkt. 7.3.6 (Anmerkung 3). Demnach lässt sich $EI_m * |\eta''_{cr,m}|$ durch den Ausdruck $|M''_{\eta,cr,m}| * (\alpha_{cr} - 1)$ ersetzen. $|M''_{\eta,cr,m}|$ ist der Absolutbetrag des Biegemoments im Querschnitt m , der sich aus einer Berechnung nach Theorie II. Ordnung am entsprechend der Eigenform $\eta_{cr}(x)$ (ohne Skalierung mit η_{init}) vorverformten System ergibt. Es werden die Systemnormalkräfte der Stützen nach Theorie I. Ordnung als Belastung auf das vorverformte System aufgebracht. Während sich bei Einzelstäben — wie in DERLER [2020] gezeigt — $M_{y,m}^*$ exakt bestimmen lässt, handelt es sich bei Rahmentragwerken um eine Näherungslösung für $M_{y,m}^*$.

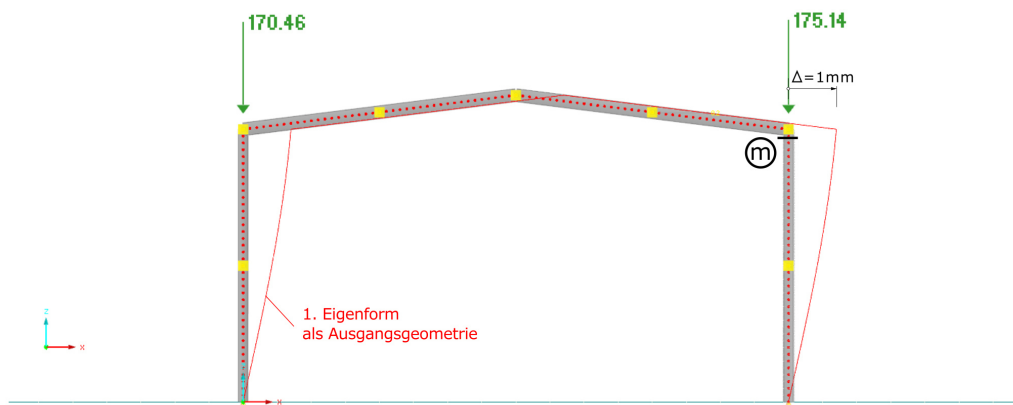


Abbildung 2.60: Statisches System, Lasten und Vorverformung

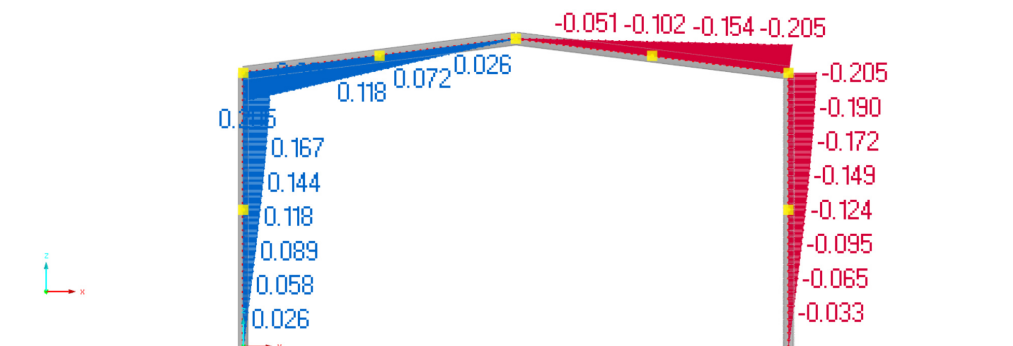


Abbildung 2.61: Schnittkräfte $M_{y,Ed}$ zufolge Systemauslenkung

$$EI_y * |\eta''_{cr}| = M''_{\eta,cr,m} * (\alpha_{cr} - 1) = 0,205 * (6,09 - 1) = 1,043 \text{ kNm} = 1,043 * 10^6 \text{ Nmm}$$

• **Bestimmung von $\eta_{cr}''(x)$ aus der 2. Ableitung von $\eta_{cr}(x)$**

Da die Biegelinie der Eigenform aufgrund der numerischen Stabilitätsanalyse nur in Form von diskreten Werten η_{cr} an den Stützstellen x_i (diese entsprechen den Stabzwischenpunkten) und nicht als Funktion $\eta_{cr}(x)$ vorliegt, ist lediglich eine Approximation der Ableitungen η_{cr}' und η_{cr}'' durch den Differenzenquotient möglich. Es werden Rückwärtsdifferenzen verwendet, sodass gilt:

$$\eta_{cr}'(x_i) = \frac{d\eta_{cr}(x_i)}{dx} \approx \frac{\eta_{cr}(x_i) - \eta_{cr}(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}} \quad \dots \text{Neigung der Biegelinie } \eta_{cr}$$

$$\eta_{cr}''(x_i) = \frac{d\eta_{cr}'(x_i)}{dx} \approx \frac{\eta_{cr}'(x_i) - \eta_{cr}'(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}} \quad \dots \text{Krümmung der Biegelinie } \eta_{cr}$$

Die eben angeführten Approximationen der Ableitungen wurden mithilfe des Tabellenkalkulationsprogramms EXCEL ausgewertet, wodurch der Verlauf der Krümmung resultiert.

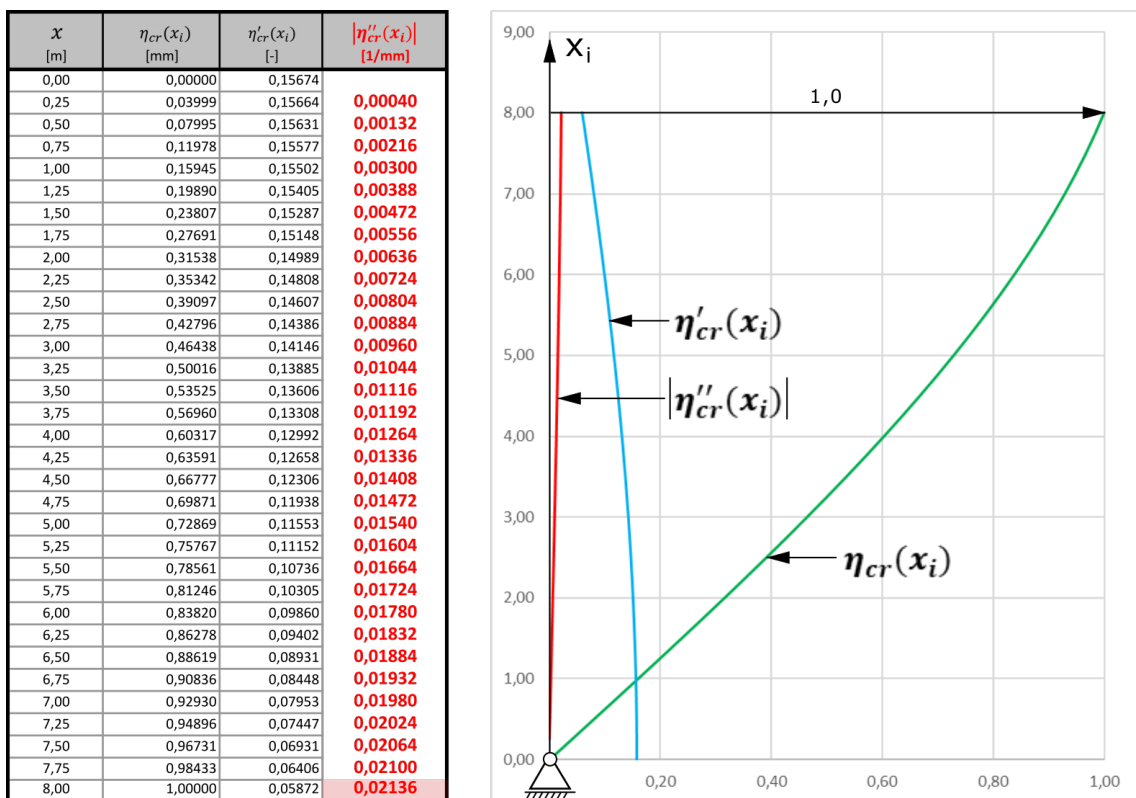


Abbildung 2.62: Auswertung von $\eta_{cr}(x)$, $\eta_{cr}'(x)$ und $|\eta_{cr}''(x)|$ an den Stützstellen

Im kritischen Querschnitt m (Rahmeneck bei $x_i = 8m$) ergibt sich eine Krümmung von $|\eta''_{cr}(x_i = 8m)| = |\eta''_{cr,m}| = 0,02136 * 10^3 \frac{1}{m}$. Dies ergibt ein Biegemoment $M_{y,m}^*$ von:

$$\begin{aligned} M_{y,m}^* &= EI_y * |\eta''_{cr,m}| = 21000 * 10^4 \frac{kN}{m^2} * 22930 * 10^{-8} m^4 * 0,02136 * 10^{-3} \frac{1}{m} = 1,029 kNm \\ &= 1,029 * 10^6 Nmm \end{aligned}$$

Tabelle 2.5: Gegenüberstellung der Resultate für das Biegemoment $M_{y,m}^* = EI_y * |\eta''_{cr}|$

exakt	zuf.	zuf.	zuf.
lt. ABAQUS	2. Ableitung von η''_{cr}	$ M''_{\eta,cr,m} * (\alpha_{cr} - 1)$	Knotenverschiebung
1,046 kNm	1,029 kNm	1,043 kNm	1,165 kNm

Da nun das Biegemoment $EI_y * |\eta''_{cr}|$ bekannt ist (*Anm.: es wird konservativ mit $EI_y * |\eta''_{cr}| = 1,029 kNm$ weitergerechnet*), kann η_{init} anhand von (2.51) bestimmt werden:

$$\eta_{init} = 64,86 [mm] * \frac{175,14 * 6,09 * 10^3 [N]}{1,029 * 10^6 [Nmm]} * 1 [mm] = 67,23 mm$$

Mit dem Amplitudenwert η_{init} ist nun die 1. Eigenform zu skalieren und in weiterer Folge als Vorverformung am System aufzubringen. Die Belastung wird am imperfekten System aufgebracht und eine Berechnung nach Theorie II. Ordnung durchgeführt.

Schnittkräfte nach Theorie II. Ordnung (inkl. Eigenmode-konforme Imperfektion $\eta_{init}(x)$)

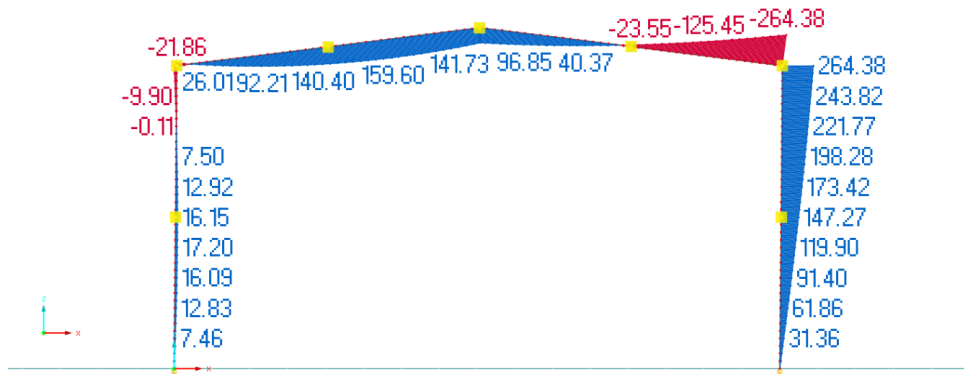


Abbildung 2.63: Bemessungsbiegemomente $M_{y,Ed}^{II.O.}$ [kNm]

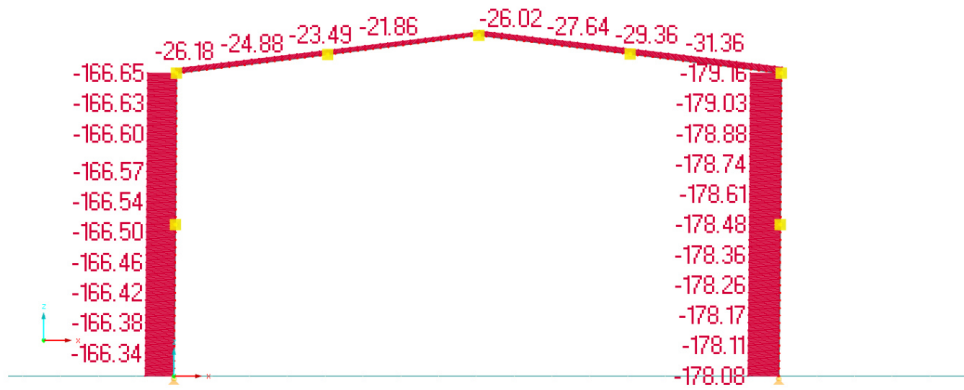


Abbildung 2.64: Bemessungsnormalkräfte $N_{Ed}^{II.O.}$ [kN]

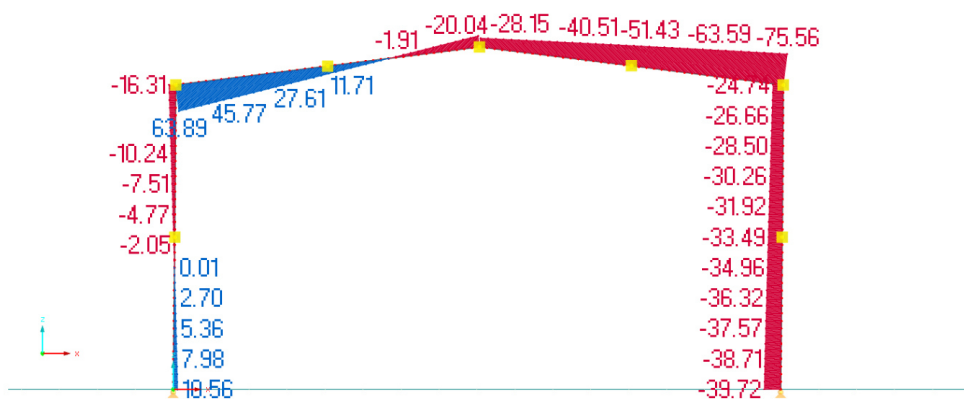


Abbildung 2.65: Bemessungsquerkräfte $V_{z,Ed}^{II.O.}$ [kN]

Die für die Nachweise maßgebenden Schnittkräfte nach Theorie II. Ordnung in Querschnitt m (direkt unter der rechten Rahmenecke) betragen:

- Biegemoment $M_{y,Ed}^{Th.II.O.} = 264,38kNm$
- Normalkraft $N_{Ed}^{Th.II.O.} = 179,16kN$

Querschnittsnachweis	EN 1993-1-1 Pkt. 8.2.5
-----------------------------	-------------------------------

Der maßgebende Querschnitt ist die rechte Rahmenecke:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,Rd}} = \frac{M_{y,Ed}}{W_{pl,y} * \frac{f_y}{\gamma_{M0}}} = \frac{264,38 * 10^2}{1628 * \frac{23,5}{1,0}} = 0,691$$

*(Anmerkung: Die Interaktion mit N_{Ed} darf aufgrund $N_{Ed} < 0,25 * N_{pl,Rd}$ vernachlässigt werden.)*

In „EC3-alt“ ident, gemäß:	EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.2.5
----------------------------	------------------------------

Stabnachweis $BDK(BK_{zz})$	EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.3
---	-------------------------------

Die Verfahren M4a und M4b unterscheiden sich lediglich in der Form der angesetzten Imperfektionen, wodurch die Bemessungsschnittgrößen geringfügig voneinander abweichen. Die grundsätzliche Berechnung des Biegeknick- und Biegedrillknickabminderungsfaktors sowie des Interaktionsfaktors ist bei beiden Verfahren ident (nur $\psi = 0,557$ bei M4b statt $\psi = 0,579$ bei M4a). Aus diesem Grund werden an dieser Stelle lediglich die entsprechenden Ergebnisse dieser Faktoren zusammengefasst. Für die detaillierte Ermittlung der jeweiligen Werte sei auf das Verfahren M4a verwiesen.

- **Knicklänge $L_{k,z}$**

$$L_{k,z} = 400cm$$

- **Schlankheitsgrad $\bar{\lambda}_z$**

$$\bar{\lambda}_z = 0,569$$

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.1.2

- **Schlankheitsgrad $\bar{\lambda}_{LT}$ für das Biegedrillknicken** **B 1993-1-1 Pkt. 8.3.2.2**
 $k_p = 0,834$
 $\psi = \frac{147,27}{264,38} = 0,557$
 $k_c = 0,872$
 $\bar{\lambda}_{LT} = 0,414$
- **Abminderungsfaktor χ_z für das Biegeknicken** **EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.1.3**
 $\phi_z = 0,752$
 $\chi_z = 0,804$
- **Momentenfaktor f_M für das Biegedrillknicken** **EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.2.3**
 $f_M = 1,148$
- **Abminderungsfaktor χ_{LT} für das Biegedrillknicken** **EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.2.3**
 $\phi_{LT} = 0,630$
 $\chi_{LT} = 1,066 > \underline{1,0}$
- **Momentenbeiwert C_{mLT}** **EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.3(10)**
 $C_{mLT} = 0,823$
- **Interaktionsfaktor k_{zy}** **EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.3(8)**
 $k_{zy} = 0,992$
- **Nachweisgleichung für $BDK(BK_{zz})$** **EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.3(5)**

$$z - z : \frac{N_{Ed}}{\chi_z * \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} * \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} * \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0 \quad (2.52)$$

Durch das Einsetzen aller ermittelten Unbekannten wird nun in (2.52) der Nachweis für Ausweichen um z-z geführt:

$$z - z : \frac{179,16}{0,804 * 2914} + 0,992 * \frac{264,38}{1,0 * 382,58} = 0,762 \leq 1,0 \quad [0,762]$$

2.1.4 Nachweisverfahren M5

EN 1993-1-1 Pkt.7.2.2(8)

Im Verfahren M5 ist eine vollständige Berücksichtigung aller Imperfektionen in und aus der Rahmenebene mit einer anschließenden räumlichen Systemberechnung nach Theorie II. Ordnung vorgesehen. Voraussetzung dafür ist die korrekte Modellierung der Abstützungen aus der Ebene sowie der Wölbrandbedingungen. Das Materialverhalten wird hier elastisch - ideal-plastisch abgebildet, sodass man zusammenfassend von einer GMNIA-Analyse (geometrisch und materiell nicht-lineare Analyse mit Imperfektionen) spricht. Da sämtliche Imperfektionen und sonstige Nicht-Linearitäten somit bereits in der Schnittkraftermittlung berücksichtigt sind, muss lediglich ein Querschnittsnachweis geführt werden. Eine zutreffende Lösung kann durch eine GMNIA-Analyse in ABAQUS ermittelt werden. Aufgrund der in ABAQUS zusätzlich berücksichtigbaren Querschnittsverwölbung („7. Stabfreiheitsgrad“) in der Traglastrechnung sind hier sämtliche Effekte, auch jene aus Wölbkrafttorsion, mit abgedeckt. Für diese praxisnahe Ausarbeitung wurde zusätzlich eine Näherungslösung (aufgrund der hier nicht erfassbaren Querschnittsverwölbung bzw. den daraus entstehenden Zusatzeffekten) mit der von Anwendern häufiger verwendeten Software RFEM bestimmt.

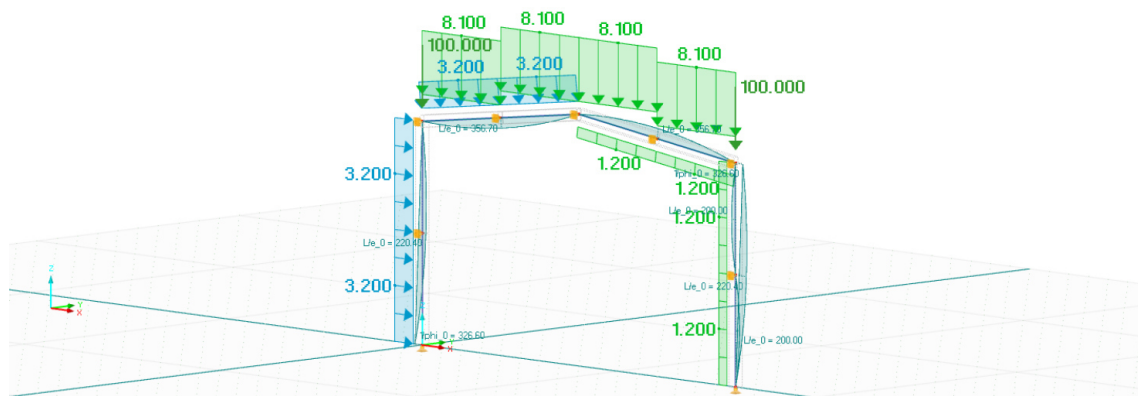


Abbildung 2.66: Belastung und Imperfektionen (Schiefstellung ϕ und Vorkrümmungen $e_{0,y}$ bzw. $e_{0,LT}$)

Tabelle 2.6 gibt einen Überblick über die am System angebrachten Imperfektionen mit den zugehörigen Amplitudenwerten:

Tabelle 2.6: Imperfektionen

Stab	$1/\phi$	$L/e_{0,y}$	$L/e_{0,LT}$
1	326,6	220,4	± 200
2	0	356,7	± 150
3	0	-356,7	± 150
4	326,6	-220,4	± 200

Das Prinzip der Traglastrechnung (hier: GMNIA-Analyse) besteht darin, den maximalen Laststeigerungsfaktor ausgehend vom Bemessungslastniveau zu bestimmen, bei dem die Tragfähigkeit des Systems durch Eintreten eines plastischen Grenzzustandes erreicht ist. Liegt der Laststeigerungsfaktor höher als 1,0, so gilt das System als tragsicher. Lt. ABAQUS-Berechnung ergibt sich der max. Laststeigerungsfaktor mit 1,16.

Als Vergleich wurde eine derartige Traglastrechnung auch in RFEM durchgeführt. Wie bereits hingewiesen, erlaubt dieses Softwarepaket keine Erfassung der Wölbkrafttorsion in der Traglastrechnung. Alle übrigen Effekte (nichtlineare Geometrie, nichtlineares Material, räumliche Imperfektionen) können hingegen zutreffend erfasst werden. Es wurde ein isotrop plastisches Materialverhalten mit bilinearem Werkstoffgesetz (inkl. vernachlässigbar geringem Verfestigungsmodul ($E_p = 0,01kN/cm^2$) aus numerischen Gründen) angesetzt. Als globale Berechnungsparameter wurde die maximale Anzahl der Iterationen auf 100 und die maximale Anzahl an steigenden Laststufen auf 1000 gesetzt. Die Genauigkeit der Konvergenzschranke wurde mit 0,1 festgesetzt. Es wurden die Anzahl an finiten Elementen je Stabteil auf 20 festgesetzt. Ein feineres FE-Netz wäre hinsichtlich dem Verhältnis von Rechenleistung zu Nutzen eines noch genaueren Rechenergebnisses nicht sinnvoll.

Die Last wird nun stufenweise gesteigert um in einem iterativen Prozess das System zum Versagen zu bringen. Im ersten Durchlauf wurde der Anfangslastfaktor k_0 auf 1,0 gesetzt und die Lastfaktorsteigerung Δ_k auf 0,05, um die Größenordnung festzustellen. In weiteren Schritten wurde sich immer näher an die maximale Traglast herangetastet. Der letzte Durchlauf wurde mit $k_0 = 1,150$ und $\Delta_k = 0,001$ gestartet, wodurch der maximale Laststeigerungsfaktor in der Höhe von 1,212 bestimmt werden konnte.

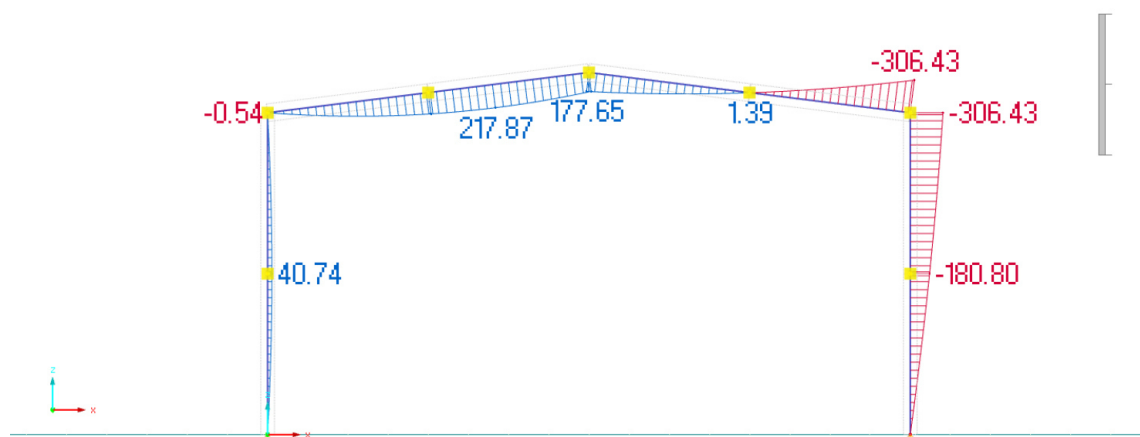


Abbildung 2.67: Biegemomentenverlauf M_y eine Laststufe vor dem Versagen ($k = 1,211$)

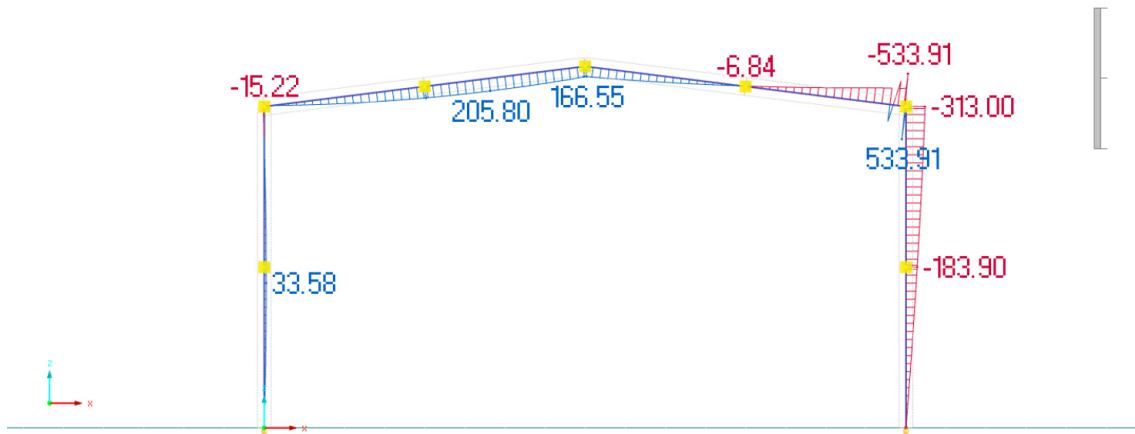


Abbildung 2.68: Biegemomentenverlauf M_y bei Erreichen des max. Laststeigerungsfaktors (Traglastzustand; $k_{ult} = 1,212$)

Abbildung 2.69 zeigt den Normalspannungsverlauf σ_x bei maximalem Lastniveau. Wie sich in Abbildung 2.69 deutlich erkennen lässt, plastiziert das Material am rechten Rahmeneck.

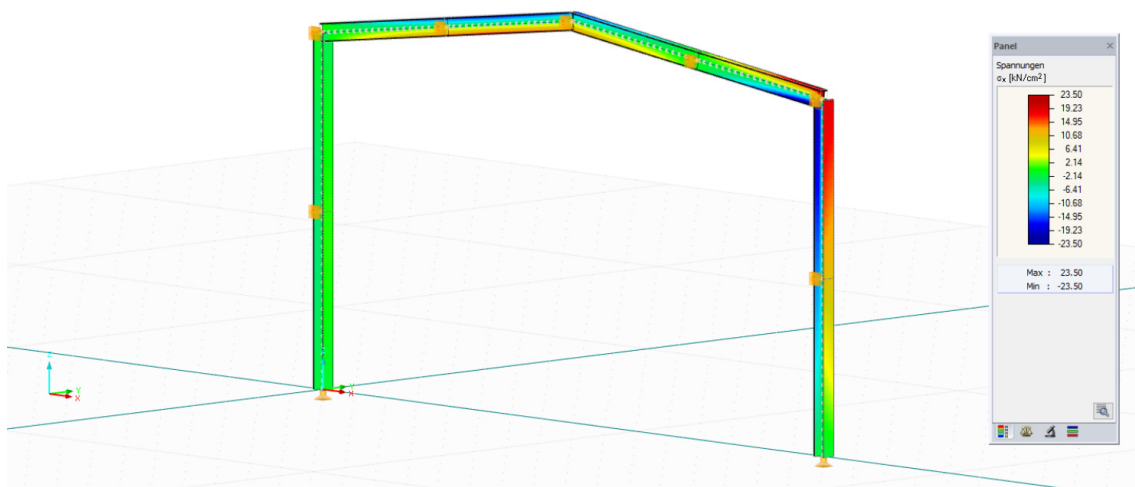


Abbildung 2.69: Normalspannungsverlauf σ_x bei maximalem Lastniveau ($k_{ult} = 1,212$)

Querschnittsnachweis

Nachweis: $\frac{1}{k_{ult}} = \frac{1}{1,212} = 0,825 < 1,0 \quad \checkmark$

Ergebnisvergleich ABAQUS - RFEM

Die Abweichungen im Ergebnis für den max. Laststeigerungsfaktor k_{ult} liegen wie bereits erwähnt darin, dass RFEM die Traglastrechnung lediglich mit 6 Freiheitsgraden (Verdrehung und Verschiebung in je 3 Dimensionen) durchführt und den 7. Freiheitsgrad (Verwölbung) bei der Traglastrechnung nicht berücksichtigen kann. Dies hat als Konsequenz, dass die Traglast geringfügig überschätzt wird, da die durch Verwölbungsbehinderung hervorgerufenen zusätzlichen Normalspannungen vernachlässigt werden.

Eine weitere Erklärung für die Ergebnisabweichung liegt in der Annahme der Imperfektionen. Im Gegensatz zur Lösung aus ABAQUS, in der die Imperfektionen in der Ebene durch den Eigenmode-konformen Ansatz abgebildet werden, sind die Imperfektionen in RFEM auch in der Ebene als Kombination von Schiefstellung ϕ und Vorkrümmung $e_{0,y}$ berücksichtigt worden.

Als letzten Punkt sei erwähnt, dass RFEM im Gegensatz zu ABAQUS auf einen vordefinierten Profilkatalog zurückgreift, der die Querschnittskennwerte inklusive Ausrundungsradien beinhaltet. In ABAQUS werden Profile als Schalenmodell modelliert, wodurch sich die Ausrundungsradien nur mit sehr großem Aufwand berücksichtigen lassen und daher für diese Berechnung vernachlässigt wurden.

Die Abweichung für k_{ult} beträgt:

$$\frac{k_{ult,RFEM} - k_{ult,ABAQUS}}{k_{ult,ABAQUS}} = \frac{1,212 - 1,160}{1,160} \approx 4,5\%$$

2.1.5 Gegenüberstellung der Ergebnisse

Abschließend werden in Abbildung 2.70 die Ausnutzungsgrade im maßgebenden Nachweis (i.d.R. Biegedrillknicknachweis der Stütze) der jeweiligen Berechnungsmethoden gegenübergestellt.

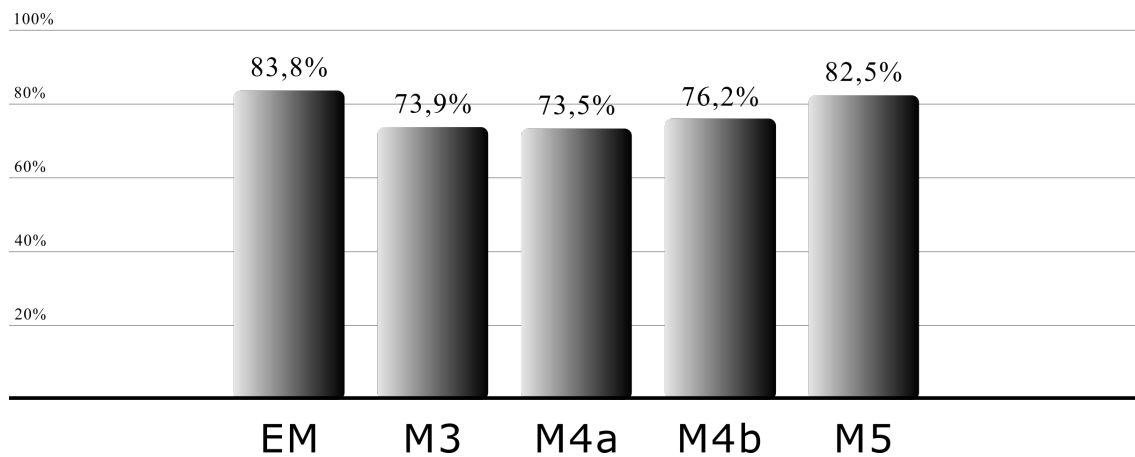


Abbildung 2.70: Gegenüberstellung der Ausnutzungsgrade der jeweiligen Berechnungsmethoden

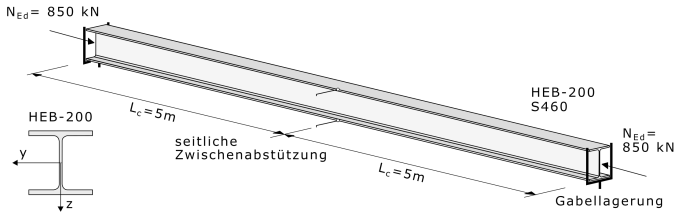
3 Stabstabilität

Zum Thema Stabstabilität haben sich in der Neuauflage von EN 1993-1-1 Änderungen in folgenden Bereichen ergeben:

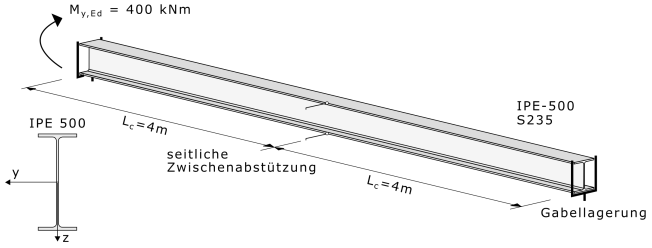
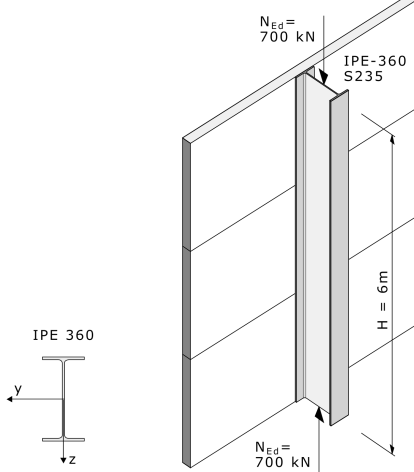
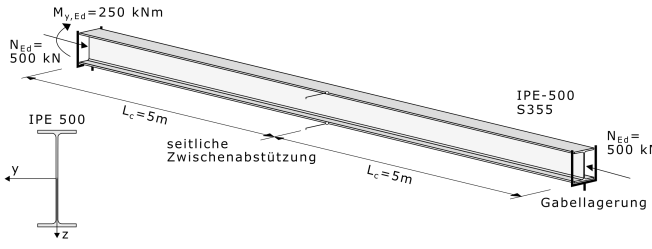
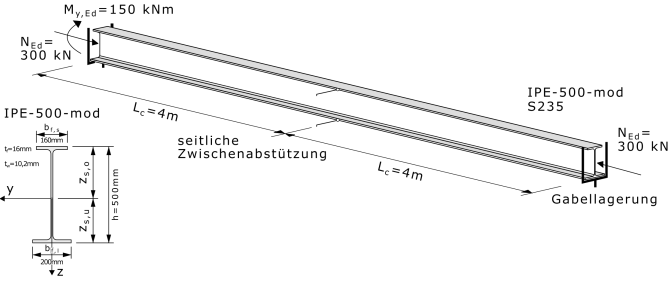
- 3.1 Biegeknicken unter zentrischer Drucknormalkraft
- 3.2 Biegedrillknicken unter alleinigem Biegemoment
- 3.3 Drill- bzw. Biegedrillknicken unter zentrischer Drucknormalkraft
- 3.4 Stabilität doppelsymmetrischer Querschnitte unter Druck und Biegung
- 3.5 Stabilität monosymmetrischer Querschnitte unter Druck und Biegung

Dazu wurden folgende Berechnungsbeispiele ausgearbeitet:

Tabelle 3.1: Beispielübersicht

Bsp. Nr.	Thema	Angabe
3.1.1	Biegeknicken unter zentrischer Drucknormalkraft	 <p>The diagram shows a beam of length $L_c = 5\text{m}$ supported at both ends by pin supports (Gabellagerung). A central axial load $N_{Ed} = 850\text{ kN}$ is applied. A lateral intermediate support (seitliche Zwischenabstützung) is located at the midpoint. The beam is identified as HEB-200 S460. A cross-section diagram shows the y-z coordinate system.</p>

— Fortsetzung auf der nächsten Seite —

Bsp. Nr.	Thema	Angabe
3.2.1	Biegedrillknicken unter alleinigem Biegemoment	
3.3.1	Drill- bzw. Biegedrillknicken unter zentrischer Drucknormalkraft	
3.4.1	Biegedrillknicken doppelsymmetrischer Querschnitte unter Biegemoment und Drucknormalkraft	
3.5.1	Biegedrillknicken monosymmetrischer Querschnitte unter Biegemoment und Drucknormalkraft	

3.1 Biegeknicken unter zentrischer Drucknormalkraft

Die Änderungen in diesem Kapitel beschränken sich auf die Knicklinienzuordnung. Walzprofile aus Stahlgüten S460 oder höher werden nun für Biegeknicken um die schwache Achse (z-z) einer neuen Knickspannungskurve zugeordnet. Des Weiteren werden geschweißte Winkelprofile in die Tabelle für die Zuordnung der jeweiligen Knickspannungslinie neu aufgenommen.

Die eben beschriebenen Änderungen sind in Abbildung 3.1 hervorgehoben:

Auswahl der Knicklinie eines Querschnittes [gem. EN 1993-1-1: Tabelle 8.3]		„EC3-alt“			
Cross-section	Limits	Buckling about axis	Buckling curve		
			S235 S275 S355 S420	S460 Up to S700 inclusive	
Rolled sections 	$h/b \leq 1,2$	y-y z-z	$t_f \leq 40$ mm	a b	
			$t_f > 40$ mm	b c	
	$h/b > 1,2$	y-y z-z	$t_f \leq 100$ mm	b c	
			$t_f > 100$ mm	d c	
Welded I-sections 	$t_f \leq 40$ mm	y-y z-z	b c		
	$t_f > 40$ mm	y-y z-z	c d		
Hollow sections 	hot finished	any	a	a ₀	
	cold formed	any	c	c	
Welded box sections 	generally (except as below)	any	b	b	
	thick welds: $a > 0,5t_f$ and $b/t_f < 30$, and $h/t_w < 30$	any	c	c	
U-, T- and solid sections 	any	any	c	c	
L-sections 	Rolled sections	any	b	a	
	Welded sections $t_f \leq 40$ mm	any	c	c	

Querschnitt	Begrenzungen	Ausweichen rechtwinklig zur Achse	Knicklinie S 235 S 275 S 355 S 420	Knicklinie S 460
gewalzte I-Querschnitte 	$h/b > 1,2$	j-y' z-z'	$t_f \leq 40$ mm	a
			$40 \text{ mm} < t_f \leq 100$	b
	$h/b \leq 1,2$	j-y' z-z'	$t_f \leq 100$ mm	c
			$t_f > 100$ mm	d
Geschweißte I-Querschnitte 	$t_f \leq 40$ mm	j-y' z-z'	b	
	$t_f > 40$ mm	j-y' z-z'	c	
Hohlquerschnitte (E)	warmgefertigte	jede	a	
	kaltgefertigte	jede	c	
Geschweißte Kastenquerschnitte 	allgemein (außer den Fällen der nächsten Zeile)	jede	b	
	dicke Schweißnähte: $a > 0,5t_f$ $h/t_f < 30$ $h/t_w < 30$	jede	c	
U-, T- und Vollquerschnitte 	jede	jede	c	
L-Querschnitte 	jede	jede	b	

■ geänderte bzw. neue Festlegung

Abbildung 3.1: Zusammenfassung der Änderungen bei der Knicklinienauswahl

3.1.1 Beispiel: Biegeknicke unter zentrischer Drucknormalkraft N_{Ed}

Gegeben sei der in Abbildung 3.2 dargestellte zentrisch belastete Druckstab, bestehend aus einem HEB-200-Profil der Stahlgüte S460 mit einer Spannweite von 10m. An den Enden ist das Profil jeweils durch Gabellagerungen gehalten und in Feldmitte zusätzlich durch eine seitliche Zwischenabstützung gegen Ausweichen um z-z gehindert. Als Beanspruchung erfährt das System eine konstante Drucknormalkraft von $N_{Ed} = 850\text{kN}$.

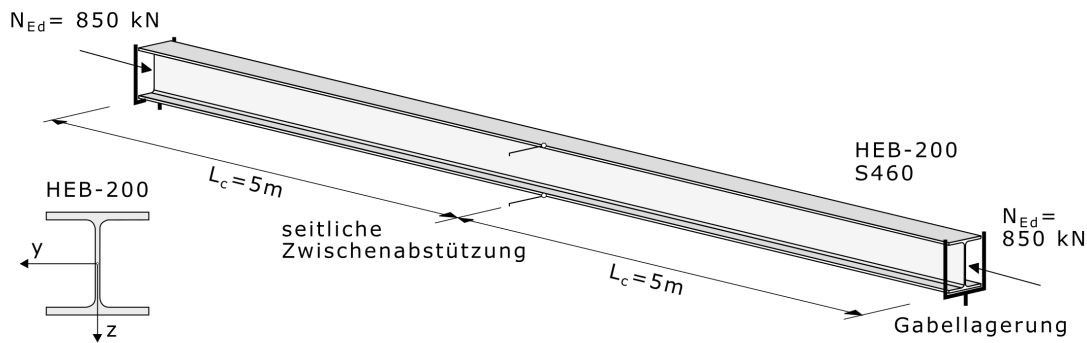


Abbildung 3.2: Statisches System, Belastung und Querschnitt

Tabelle 3.2 zeigt die zutreffenden Material- und Querschnittskennwerte des vorliegenden HEB-200-Profiles:

Tabelle 3.2: Material- und Querschnittskennwerte HEB-200

$$\begin{array}{llll}
 f_y = 46,0\text{kN/cm}^2 & A = 78,1\text{cm}^2 & \gamma_{M,0} = \gamma_{M,1} = 1,0 & r = 1,8\text{cm} \\
 h = 20,0\text{cm} & b = 20,0\text{cm} & t_f = 1,5\text{cm} & t_w = 0,9\text{cm} \\
 i_y = 8,54\text{cm} & i_z = 5,04\text{cm} & &
 \end{array}$$

Querschnittsklassifizierung**EN 1993-1-1 Pkt. 7.5**

Tabelle 3.3 zeigt die für den HEB-200 zutreffenden Werte für c und t des Steg- bzw. Flanschblechs. Der Wert c steht hierbei für die ungestützte Länge des gedrückten Blechs, t ist die zugehörige Blechdicke.

Tabelle 3.3: HEB-200: Werte für c und t bzw. c/t

HEB-200	c [mm]	t [mm]	c/t [-]
Steg	134,0	9,0	14,89
Flansch	77,5	15,0	5,17

Hinweis: Geänderte Klassifizierungsgrenzwerte für beidseitig gestützte Querschnittsteile.

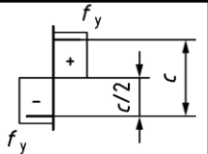
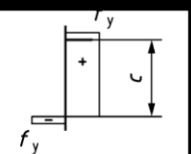
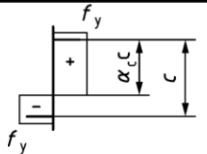
Stress distribution in parts (compression positive)			
Class 1	$c/t \leq 72 \varepsilon$	$c/t \leq 28 \varepsilon$	when $\alpha_c > 0,5$: $c/t \leq \frac{126 \varepsilon}{5,5 \alpha_c - 1}$ when $\alpha_c \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{36 \varepsilon}{\alpha_c}$
Class 2	$c/t \leq 83 \varepsilon$	$c/t \leq 34 \varepsilon$	when $\alpha_c > 0,5$: $c/t \leq \frac{188 \varepsilon}{6,53 \alpha_c - 1}$ when $\alpha_c \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5 \varepsilon}{\alpha_c}$

Abbildung 3.3: Klassifizierungsgrenzwerte Stegblech (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 7.3)

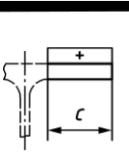
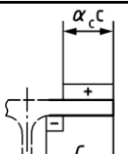
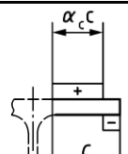
Stress distribution in parts (compression positive)			
Class 1	$c/t \leq 9 \varepsilon$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha_c}$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha_c \sqrt{\alpha_c}}$
Class 2	$c/t \leq 10 \varepsilon$	$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha_c}$	$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha_c \sqrt{\alpha_c}}$

Abbildung 3.4: Klassifizierungsgrenzwerte Flanschblech (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 7.3)

Mit dem Materialparameter $\epsilon = \sqrt{\frac{235}{460}} = 0,715$ für S460 ergibt sich die Querschnittsteilung wie folgt:

Steg:

$$\frac{c}{t} = 14,89 \leq 28 * \epsilon = 28 * 0,715 = 20,02 \rightarrow QK1$$

Flansch:

$$\frac{c}{t} = 5,17 \leq 9 * \epsilon = 9 * 0,715 = 6,44 \rightarrow QK1$$

Die Querschnittsklasse des Gesamtquerschnitts ergibt sich aus der höchsten Querschnittsklasse der einzelnen Blechteile (hier: Steg- bzw. Gurtblech). Da sowohl Steg- als auch Flanschblech in Querschnittsklasse 1 fallen, ist der vorhandene HEB-200-Querschnitt für reine Druckbeanspruchung QKL1 zuzuordnen. Somit können plastische Widerstandsgrößen verwendet werden.

— nach „EC3-alt“

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 5.5

Spannungsverteilung über Querschnittsteile (Druck positiv)			
1	$clt \leq 72\epsilon$	$clt \leq 33\epsilon$	für $\alpha > 0,5$: $clt \leq \frac{396\epsilon}{13\alpha-1}$ für $\alpha \leq 0,5$: $clt \leq \frac{36\epsilon}{\alpha}$
2	$clt \leq 83\epsilon$	$clt \leq 38\epsilon$	für $\alpha > 0,5$: $clt \leq \frac{456\epsilon}{13\alpha-1}$ für $\alpha \leq 0,5$: $clt \leq \frac{41,5\epsilon}{\alpha}$

Abbildung 3.5: Klassifizierungsgrenzwerte des Stegblechs (Auszug aus EN 1993-1-1-„alt“: Tab. 5.2)

Steg:

$$\frac{c}{t} = 14,89 \leq 33 * \epsilon = 33 * 0,715 = 23,60 \rightarrow QK1$$

Flansch:

$$\frac{c}{t} = 5,17 \leq 9 * \epsilon = 9 * 0,715 = 6,44 \rightarrow QK1$$

→ Gesamtquerschnitt: Klasse 1

Querschnittsnachweis**EN 1993-1-1 Pkt. 8.2.4**

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = \frac{N_{Ed}}{A * \frac{f_y}{\gamma_{M0}}} = \frac{850}{78,1 * \frac{46,0}{1,0}} = 0,237 \leq 1,0$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.2.4

Biegeknicknachweis**EN 1993-1-1 Pkt. 8.3**

Aufgrund der Lagerungsverhältnisse und Querschnittsgeometrie, sowie der reinen zentrischen Druckbeanspruchung, kann davon ausgegangen werden, dass ein Biegeknickversagen in Form von seitlichem Ausweichen des Druckstabes in Richtung der schwachen Querschnittsachse z-z zwischen den seitlichen Abstützungen über eine Länge von 5m bzw. in Richtung der starken Querschnittsachse y-y zwischen den Auflagern über eine Länge von 10m die nachzuweisenden Versagensformen darstellen. (siehe Abbildung 3.6)

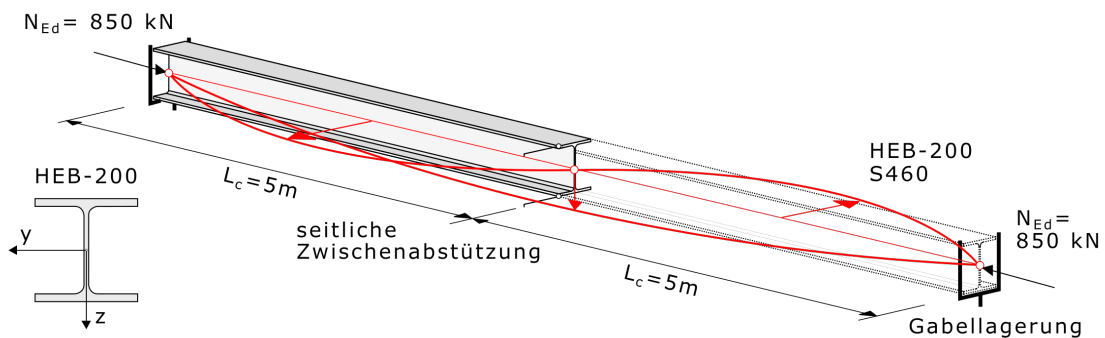


Abbildung 3.6: Mögliche Versagensformen des Biegeknickens in Richtung der Achsen y-y und z-z

Da die Biegelinie der Knick eigenform (in Abbildung 3.6 rot eingezeichnet) Wendepunkte in den Punkten der seitlichen Stützungen bzw. in den Gabellagerungen hat, beträgt der β -Faktor gleich 1,0 (Euler-Fall 2).

$$L_{cr,y} = L_{c,y} * \beta = 1000\text{cm}$$

$$L_{cr,z} = L_{c,z} * \beta = 500\text{cm}$$

• Schlankheitsgrade $\bar{\lambda}_y$ und $\bar{\lambda}_z$ für das Biegeknicken

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.1.2

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{N_{pl}}{N_{cr,y}}} = \frac{L_{cr,y}}{i_y * \lambda_1} = \frac{1000}{8,54 * 67,1} = 1,745$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{N_{pl}}{N_{cr,z}}} = \frac{L_{cr,z}}{i_z * \lambda_1} = \frac{500}{5,04 * 67,1} = 1,478$$

— mit:

$$\lambda_1 = \pi * \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi * \sqrt{\frac{21000}{46,0}} = 67,1$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.1.3

• Imperfektionsfaktoren α_y und α_z für das Biegeknicken

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.1.3

Bei der Ermittlung der Imperfektionsfaktoren α für das Biegeknicken wird zunächst unterschieden, ob das Querschnittsverhältnis h / b größer oder kleiner als 1,2 ist, bzw. ob die Blechdicke des Flansches t_f über oder unter dem jeweiligen Grenzwert liegt und zuletzt welche Stahlgüte das Profil aufweist.

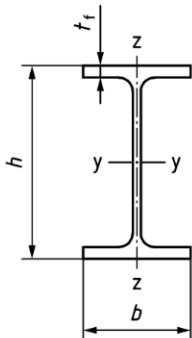
Cross-section	Limits	Buckling about axis	Buckling curve		
			S235 S275 S355 S420	S460 Up to S700 inclusive	
	$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40$ mm	y-y z-z	a b	a ₀ a
		$t_f > 40$ mm	y-y z-z	b c	a b
	$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100$ mm	y-y z-z	b c	a b
		$t_f > 100$ mm	y-y z-z	d d	c c

Abbildung 3.7: Ermittlung der Knickspannungslinie (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.3)

Buckling curve	a_0	a	b	c	d
Imperfection factor α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Abbildung 3.8: Zugehörige Werte der Imperfektionsfaktoren (EN 1993-1-1: Tab. 8.2)

Aus $h/b = 200/200 = 1,0 < 1,2$ und $t_f = 15\text{mm} < 100\text{mm}$ folgt:

Ausweichen um y-y: $a \rightarrow \alpha_y = 0,21$

Ausweichen um z-z: $b \rightarrow \alpha_z = 0,34$

— nach „EC3-alt“

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.1.2

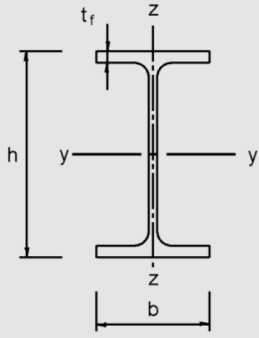
Querschnitt	Begrenzungen	Ausweichen rechtwinklig zur Achse	Knicklinie	
			S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
gewalzte I-Querschnitte 	$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40\text{ mm}$	y-y	a
			z-z	b
	$h/b \leq 1,2$	$40\text{ mm} < t_f \leq 100$	y-y	b
			z-z	c
$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100\text{ mm}$	y-y	b	
		z-z	c	
$h/b \leq 1,2$	$t_f > 100\text{ mm}$	y-y	d	
		z-z	d	

Abbildung 3.9: Ermittlung der Knickspannungslinie (Auszug aus EN 1993-1-1-„alt“: Tab. 6.2)

Knicklinie	a_0	a	b	c	d
Imperfektionsbeiwert α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Abbildung 3.10: Zugehörige Werte der Imperfektionsfaktoren (EN 1993-1-1-„alt“: Tab. 6.1)

Aus $h/b = 200/200 = 1,0 < 1,2$ und $t_f = 15\text{mm} < 100\text{mm}$ folgt:

Ausweichen um y-y: $a \rightarrow \alpha_y = 0,21$

Ausweichen um z-z: $a \rightarrow \alpha_z = 0,21$

• **Abminderungsfaktoren χ_y und χ_z für das Biegeknicken** EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.1.3

$$\phi = 0,5 * [1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \quad (3.1)$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad (3.2)$$

Einsetzen der bezogenen Schlankheiten und der Imperfektionsfaktoren in die Gleichungen (3.1) und (3.2) liefert die Werte für ϕ_i und die Knickabminderungsfaktoren χ_i :

$$\phi_y = 0,5 * [1 + 0,21 * (1,745 - 0,2) + 1,745^2] = 2,185$$

$$\chi_y = \frac{1}{2,185 + \sqrt{2,185^2 - 1,745^2}} = 0,286$$

$$\phi_z = 0,5 * [1 + 0,34 * (1,478 - 0,2) + 1,478^2] = 1,810 \quad [1,727]$$

$$\chi_z = \frac{1}{1,810 + \sqrt{1,810^2 - 1,478^2}} = 0,350 \quad [0,382]$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.1.2

• **Nachweis für Biegeknicken unter N_{Ed}**

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.1.1

$$y - y : \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{N_{Ed}}{\chi_y * A * \frac{f_y}{\gamma_{M1}}} = \frac{850}{0,286 * 78,1 * \frac{46,0}{1,0}} = 0,828 \leq 1,0 \quad [0,828]$$

$$z - z : \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{N_{Ed}}{\chi_z * A * \frac{f_y}{\gamma_{M1}}} = \frac{850}{0,350 * 78,1 * \frac{46,0}{1,0}} = 0,675 \leq 1,0 \quad [0,620]$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.1.1

3.2 Biegedrillknicken unter alleinigem Biegemoment

In diesem Kapitel fanden Änderungen bezüglich des Abminderungsfaktors χ_{LT} statt. Es wurde eine neue Regelung zur Berechnung des Abminderungsfaktors χ_{LT} für gewalzte oder gleichartig geschweißte doppelsymmetrische I- oder H-Profile festgelegt. Die Regelung fand sich bis zum Erscheinen der Neuauflage in EN 1993-1-1: Pkt. 6.3.2.2 und wird in der Neuauflage in EN 1993-1-1: Pkt. 8.3.2.3 geregelt.

Grundsätzlich wurde bis jetzt und wird auch weiterhin zwischen zwei Fällen bei der Ermittlung des Knickabminderungsfaktors χ_{LT} unterschieden. Der „Allgemeine Fall“ (GC ... General Case) beschreibt hohe Träger mit schmalen Gurten, wobei von einer Analogie zwischen Biegedrillknicken und seitlichem Ausweichen des gedrückten Gurtes aufgrund der geringen Torsionssteifigkeit ausgegangen wird. Der „Spezielle Fall“ (SC ... Special Case) erfasst die höhere Torsionssteifigkeit von Walzprofilen und gleichartig geschweißten Querschnitten (gedrungene Querschnitte) und resultiert daher in höher liegenden Knickspannungskurven. Zusätzlich zu den beiden eben beschriebenen Fällen war in ÖNORM EN 1993-1-1: Pkt. 6.3.2.4 ein vereinfachtes Verfahren für den Hochbau zulässig, bei dem der Nachweis zunächst über die Einhaltung eines Mindestabstandes der seitlichen Halterungen L_c geführt wurde, bzw. bei Nichteinhaltung dessen ein Knicknachweis des gedrückten Gurtes inkl. 1/3 der gedrückten Stegfläche.

Die Neuauflage der EN 1993-1-1 sieht diese Fallunterscheidung bei der Ermittlung des Knickabminderungsfaktors χ_{LT} ebenfalls vor. Bezüglich dem „Allgemeinen Fall“, der nun in EN 1993-1-1: Pkt. 8.3.2.3 geregelt wird, finden keine Änderungen statt. Die Knickabminderungsfaktoren χ_{LT} entsprechen weiterhin jenen des Stabknickens.

Der „Spezielle Fall“ wurde auf Grundlage der Erkenntnisse und Ergebnisse der Dissertation von TARAS [2012] gänzlich überarbeitet. Es wird an dieser Stelle nicht auf die Herleitung eingegangen, sondern auf die praktische Anwendung. Zusammenfassend sei nur erwähnt, dass die Neuformulierung aufgrund der bisher mechanisch nicht-konsistenten Formulierung der Biegedrillknickkurven sowie nicht zutreffende Annahmen bei der Kalibrierung der Kurven (vor allem Grenzwerte bzgl. der h/b-Verhältnisse, Länge des plastischen Plateaus) als notwendig befunden wurde. Da sich ein veränderlicher Momentenverlauf günstig auf den Abminderungsfaktor χ_{LT} auswirkt, wird dies auch in der Neuauflage der EN 1993-1-1 durch den Faktor $\chi_{LT,mod}$ erfasst. Im Gegensatz zur bisher gültigen Fassung des EC3 wird der veränderliche Momentenverlauf durch einen Faktor f_M bereits bei der Ermittlung des Imperfektionsfaktors ϕ_{LT} berücksichtigt. Der Faktor f_M erfasst sowohl die Abweichung zwischen Versagenspunkt und Momentenmaximum als auch die Ausdehnung der plastischen Zone. Die kalibrierten Werte für f_M können in der Neufassung von EN 1993-1-1 aus Tabelle 8.6 abgelesen werden. In der Neuauflage fließt in die Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_{LT} nicht nur die Biegedrillknickschlankheit, sondern auch die Biegeknickschlankheit um die schwache Achse ein. Aus diesem Grund können die BDK-Kurven nicht mehr profilunabhängig in gewohnter zweidimensionaler Darstellungen geplottet werden, sondern lassen sich im Allgemeinen nur dreidimensional darstellen. Dazu werden auf den horizontalen Achsen die Biegedrillknickschlankheit $\bar{\lambda}_{LT}$ und die Biegeknickschlankheit $\bar{\lambda}_z$ aufgetragen, um in Abhängigkeit derer der Abminderungsfaktor χ_{LT} auf der vertikalen Achse abgelesen werden kann. Aus den Ein-

gangparametern (siehe Abbildung 3.12) lässt sich erkennen, dass der Abminderungsfaktor χ_{LT} schlussendlich aus einem querschnitts- und materialabhängigen Zusammenhang ermittelt werden muss, der zusätzlich durch den Momentenverlauf beeinflusst wird. Nachfolgend werden in der Abbildung 3.11 die Änderungen für den allgemeinen Fall und in Abbildung 3.12 die Änderungen für Walzprofile und gleichartige geschweißte Profile zusammengefasst.

Zusammenfassung der aktuell gültigen Regelungen aus „EC3-neu“

[gem. EN 1993-1-1: 8.3.2]

$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0$

mit:

- M_{Ed} ... Bemessungswert des einwirkenden Biegemomentes
- $M_{b,Rd}$... Bemessungswert der Biegedrillknicktragfähigkeit $M_{b,Rd} = \chi_{LT} \frac{M_{Rk}}{\gamma_{M1}}$

a) Knicklinien χ_{LT} für das Biegedrillknicken – Allgemeiner Fall [gem. EN 1993-1-1: 8.3.2.3(2)]

Abminderungsfaktor: $\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1,0$

mit:

- $\bar{\lambda}_{LT}$... Schlankheitsgrad für Biegedrillknicken $\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{M_{Rk}}{M_{cr}^*}}$
- $\phi_{LT} = 0,5 [1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2]$
- α_{LT} ... Imperfektionsfaktor

Buckling curve	α_0	a	b	c	d
Imperfection factor α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

* Ermittlung des **idealen Biegedrillknickmomentes M_{cr}** :
(nicht in EN-1993-1-1 geregelt – numerische Ermittlung oder Formeln aus Literatur)

- z.B. gilt für **doppelt symmetrische Querschnitte** (Querbelastung im Schubmittelpunkt, beidseitige Endgabelagerung):

$$M_{cr} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 EI_z}{L^2} \sqrt{\left[\frac{I_w}{I_z} + \frac{L^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} \right]}$$

I_t ... Torsionsträgheitsmoment [cm⁴]
 I_w ... Wölbwiderstand [cm⁶]

C_1 ... Beiwert zur Erfassung des Momentenverlaufes

Moment diagram	C_1 [-]	k_c [-]
	1.00	1.00
	1.132	0.94
	1.285	0.88
	1.365	0.86
	1.565	0.80
M	$\Psi = -0.5; C_1 = 1.323$ $\Psi = -0.0; C_1 = 1.879$ $\Psi = -0.5; C_1 = 2.704$ $\Psi = -1.0; C_1 = 2.752$	0.87 0.73 0.61 0.60

$C_1 = \frac{1}{\sqrt{k_c}}$

Cross-section	Limits	Buckling curve
Welded I-sections*	$h/b_{min} \leq 2,0$	c
	$h/b_{min} > 2,0$	d
Rolled I-sections*	$h/b_{min} \leq 2,0$	a
	$h/b_{min} > 2,0$	b
Other sections (e.g. C, U-, T-sections)	—	d

* This may also be applied to doubly symmetric sections, where $b_{min} = b$.
NOTE: The selection of the buckling curve is based on the minimum flange width b_{min} , irrespective of this being the tension or compression flange.

Abbildung 3.11: Zusammenfassung der Regelungen bezüglich der Biegedrillknickkurven für den allgemeinen Fall (GC ... general case)

Zusammenfassung der aktuell gültigen Regelungen aus „EC3-neu“

[gem. EN 1993-1-1: 8.3.2]

b) Knicklinien χ_{LT} für das Biegedrillknicken – Walzprofile und gleichartige geschweißte Profile

[gem. EN 1993-1-1: 8.3.2.3(3)]

Abminderungsfaktor:

$$\chi_{LT} = \frac{f_m}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - f_m \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1,0$$

- $\bar{\lambda}_{LT}$... Schlankheitsgrad für Biegedrillknicken $\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{M_{Rk}}{M_{cr}}}$
- $\bar{\lambda}_z$... Schlankheitsgrad für Biegeknicken um z-z $\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{N_{Rk}}{N_{cr,z}}}$
- $\phi_{LT} = 0,5 \left[1 + f_m \left(\frac{\bar{\lambda}_{LT}^2}{\bar{\lambda}_z^2} \cdot \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right) \right]$
- α_{LT} ... Imperfektionsfaktor

Cross-section		Limits	α_{LT}
Rolled I-sections		$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$ $0,12 \sqrt{\frac{W_{el,y}}{W_{el,z}}}$ but: $\alpha_{LT} \leq 0,34$
		$t_f > 40 \text{ mm}$	$0,16 \sqrt{\frac{W_{el,y}}{W_{el,z}}}$ but: $\alpha_{LT} \leq 0,49$
		$h/b \leq 1,2$	$0,16 \sqrt{\frac{W_{el,y}}{W_{el,z}}}$ but: $\alpha_{LT} \leq 0,49$
Welded I-sections		$t_f \leq 40 \text{ mm}$	$0,21 \sqrt{\frac{W_{el,y}}{W_{el,z}}}$ but: $\alpha_{LT} \leq 0,64$
		$t_f > 40 \text{ mm}$	$0,25 \sqrt{\frac{W_{el,y}}{W_{el,z}}}$ but: $\alpha_{LT} \leq 0,76$

- f_M ... Faktor zur Erfassung eines veränderlichen Momentenverlaufs (kann konservativ mit 1,0 angesetzt werden)

Load case	Factor f_M	Factor k_c
	1,00	1,00
	$1,25 - 0,1 \psi - 0,15 \psi^2$	$\frac{1}{1,33 - 0,33 \psi}$
	1,05	0,94
	For $0 \leq \frac{M_0}{M_h} < 2,0$: $1,0 + 1,35 \frac{M_0}{M_h} - 0,33 \left(\frac{M_0}{M_h} \right)^3$ For $\frac{M_0}{M_h} \geq 2: 1,05$	$\frac{M_0}{M_h} < 1,0$: 1,00 $\frac{M_0}{M_h} \geq 1,0$: 0,90
	For $0 \leq \frac{M_0}{M_h} < 1,47$: $1,25 + 0,5 \left(\frac{M_0}{M_h} \right)^2 - 0,275 \left(\frac{M_0}{M_h} \right)^4$ For $\frac{M_0}{M_h} \geq 1,47: 1,05$	$\frac{M_0}{M_h} < 0,5$: 0,75 $\frac{M_0}{M_h} \geq 0,5$: 0,91
	1,10	0,86
	For $0 \leq \frac{M_0}{M_h} < 2,0$: $1,0 + 1,25 \frac{M_0}{M_h} - 0,30 \left(\frac{M_0}{M_h} \right)^3$ For $\frac{M_0}{M_h} \geq 2,0$: 1,10	$\frac{M_0}{M_h} < 1,0$: 1,00 $\frac{M_0}{M_h} \geq 1,0$: 0,77
	For $0 \leq \frac{M_0}{M_h} < 1,5$: $1,25 + 0,325 \left(\frac{M_0}{M_h} \right)^2 - 0,175 \left(\frac{M_0}{M_h} \right)^4$ For $\frac{M_0}{M_h} \geq 1,50: 1,10$	$\frac{M_0}{M_h} < 0,5$: 0,75 $\frac{M_0}{M_h} \geq 0,5$: 0,82

- Faktor k_c für die Ermittlung von M_{cr} aus $C_1 = \frac{1}{\sqrt{k_c}}$

Abbildung 3.12: Zusammenfassung der in „EC3-neu“ neu verankerten Biegedrillknickkurven für Walzprofile bzw. gleichartige geschweißte Profile

3.2.1 Beispiel: Biegedrillknicken unter alleinigem Biegemoment $M_{y,Ed}$

Gegeben sei der in Abbildung 3.13 dargestellte Biegeträger, bestehend aus einem IPE-500-Profil der Stahlgüte S235 mit einer Spannweite von 8m. An den Enden ist das Profil jeweils durch Gabellagerungen gehalten und in Feldmitte zusätzlich durch eine seitliche Zwischenabstützung sowohl gegen Ausweichen um z-z, als auch gegen Verdrehung um x-x gehindert. Als Beanspruchung erfährt das System ein auflagerseitig angreifendes Einzelmoment von $M_{y,Ed} = 400 \text{ kNm}$.

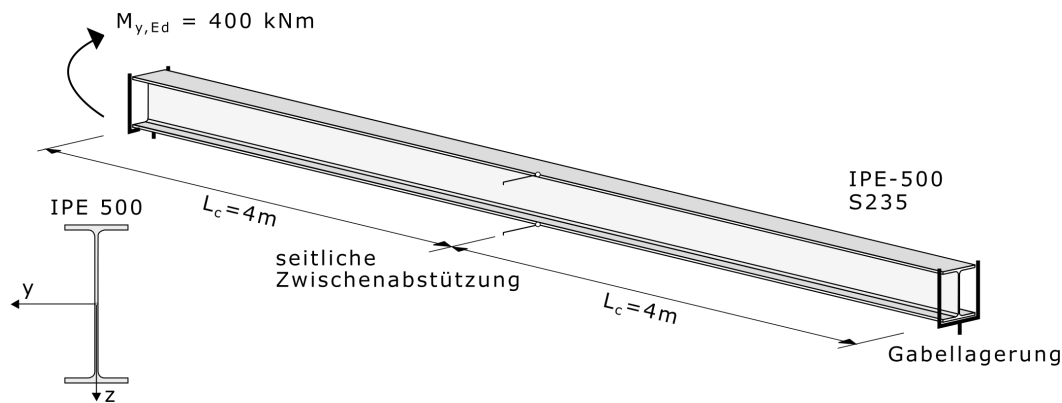


Abbildung 3.13: Statisches System, Belastung und Querschnitt

Tabelle 3.4 zeigt die zutreffenden Material- und Querschnittskennwerte des vorliegenden IPE-500-Profiles:

Tabelle 3.4: Material- und Querschnittskennwerte IPE-500

$f_y = 23,5 \text{ kN/cm}^2$	$A = 116 \text{ cm}^2$	$\gamma_{M,0} = \gamma_{M,1} = 1,0$	$r = 2,1 \text{ cm}$
$h = 50 \text{ cm}$	$b = 20 \text{ cm}$	$t_f = 1,6 \text{ cm}$	$t_w = 1,02 \text{ cm}$
$I_y = 48200 \text{ cm}^4$	$I_z = 2140 \text{ cm}^4$	$i_y = 20,4 \text{ cm}$	$i_z = 4,31 \text{ cm}$
$W_{el,y} = 1930 \text{ cm}^3$	$W_{el,z} = 214 \text{ cm}^3$	$W_{pl,y} = 2194 \text{ cm}^3$	
$G = 81000 \text{ N/mm}^2$	$I_T = 89,3 \text{ cm}^4$	$I_\omega = 1249 * 10^3 \text{ cm}^6$	

Querschnittsklassifizierung

EN 1993-1-1 Pkt. 7.5

Tabelle 3.5 zeigt die für den IPE-500 zutreffenden Werte für c und t des Steg- bzw. Flanschblechs. Der Wert c steht hierbei für die ungestützte Länge des gedrückten Blechs, t ist die zugehörige Blechdicke.

Tabelle 3.5: IPE-500: Werte für c und t bzw. c/t

IPE-500	c [mm]	t [mm]	c/t [-]
Steg	426	10,2	41,76
Flansch	73,9	16	4,62

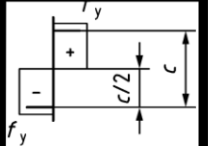
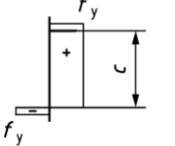
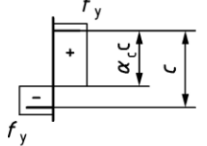
Stress distribution in parts (compression positive)			
	Class 1	$c/t \leq 72 \varepsilon$	$c/t \leq 28 \varepsilon$
Class 2	$c/t \leq 83 \varepsilon$	$c/t \leq 34 \varepsilon$	when $\alpha_c > 0,5$: $c/t \leq \frac{188 \varepsilon}{6,53 \alpha_c - 1}$ when $\alpha_c \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5 \varepsilon}{\alpha_c}$

Abbildung 3.14: Klassifizierungsgrenzwerte Stegblech (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 7.3)

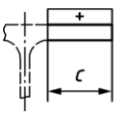
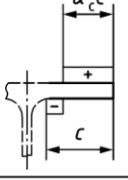
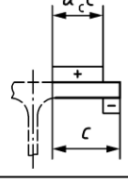
Stress distribution in parts (compression positive)			
	Class 1	$c/t \leq 9 \varepsilon$	$c/t \leq \frac{9 \varepsilon}{\alpha_c}$
Class 2	$c/t \leq 10 \varepsilon$	$c/t \leq \frac{10 \varepsilon}{\alpha_c}$	$c/t \leq \frac{10 \varepsilon}{\alpha_c \sqrt{\alpha_c}}$

Abbildung 3.15: Klassifizierungsgrenzwerte Flanschblech (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 7.3)

Mit dem Materialparameter $\epsilon = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1,0$ für S235 ergibt sich die Querschnittseinteilung wie folgt:

Steg:

$$\frac{c}{t} = 41,76 \leq 72 * \epsilon = 72 * 1,0 = 72 \rightarrow QK1$$

Flansch:

$$\frac{c}{t} = 4,62 \leq 9 * \epsilon = 9 * 1,0 = 9 \rightarrow QK1$$

Die Querschnittsklasse des Gesamtquerschnitts ergibt sich aus der höchsten Querschnittsklasse der einzelnen Blechteile (hier: Steg- bzw. Gurtblech). Da sowohl Steg- als auch Gurtblech in Querschnittsklasse 1 fallen, ist der vorhandene IPE-500-Querschnitt für reine Biegung QKL1 zuzuordnen. Somit können plastische Widerstandsgrößen verwendet werden.

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 5.5

Querschnittsnachweis

EN 1993-1-1 Pkt. 8.2.5

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} = \frac{M_{y,Ed}}{W_{pl,y} * \frac{f_y}{\gamma_{M0}}} = \frac{400 * 10^2}{2194 * \frac{23,5}{1,0}} = 0,776 \leq 1,0$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.2.5

Biegedrillknicknachweis

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3

Aufgrund der Lagerungsverhältnisse und Querschnittsgeometrie, sowie der reinen Biegemomentenbeanspruchung, kann davon ausgegangen werden, dass ein Biegedrillknickversagen in Form von seitlichem Ausweichen des Druckgurtes in Richtung der schwachen Querschnittsachse z-z zwischen den seitlichen Abstützungen über eine Länge von 4m die nachzuweisende Versagensform darstellt. (siehe Abbildung 3.16)

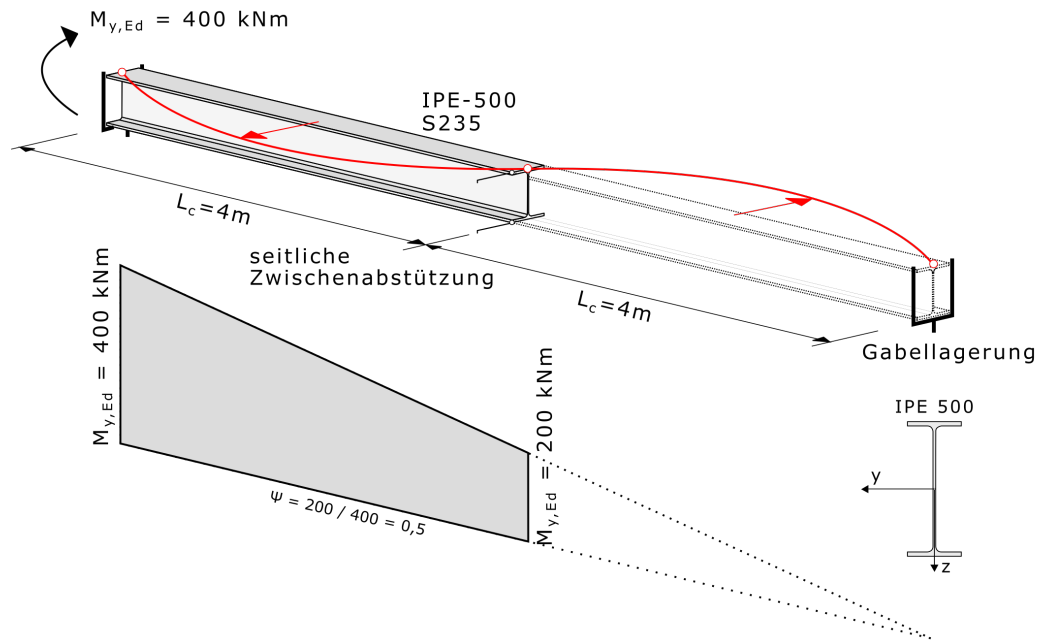


Abbildung 3.16: Momentenverteilung und mögliche Versagensform

Der für den BDK-Nachweis maßgebende Stababschnitt ist in Abbildung 3.16 grau hinterlegt. Da die jeweiligen Abstände zwischen den seitlichen Halterungen gleich groß sind, ergibt sich der maßgebende Abschnitt somit rein aufgrund der Größe der Biegemomentenbeanspruchung. Da die Biegelinie der Knickeigenform (in Abbildung 3.16 rot eingezeichnet) Wendepunkte in den Punkten der seitlichen Stützungen hat, beträgt der β -Faktor gleich 1,0 (Euler-Fall 2).

$$L_{cr,z} = L_{cr,LT} = L_{c,z} * \beta = 400\text{cm}$$

• Schlankheitsgrad $\bar{\lambda}_{LT}$ für das Biegedrillknicken

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.2.2

Der Schlankheitsgrad für das Biegedrillknicken $\bar{\lambda}_{LT}$ kann anhand der folgenden 2 Vorgehensweisen ermittelt werden:

a) Direkte Bestimmung mittels M_{cr}

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{M_{pl,y,Rk}}{M_{cr}}} \quad (3.3)$$

b) Näherung auf Basis von $\bar{\lambda}_z$ unter Verwendung der Faktoren k_p und k_c

$$\bar{\lambda}_{LT} = \bar{\lambda}_z * k_p * k_c \quad (3.4)$$

zu Punkt a)

$$M_{pl,y,Rk} = W_{pl,y} * f_y = 2194 * 23,5 = 51559 kNcm$$

Anmerkung: M_{cr} bezeichnet das ideale Verzweigungsmoment für Biegedrillknicken und wurde hier zum Vergleich numerisch mithilfe des Programmes *LTBeam* ermittelt ($M_{cr} = 106480 kNcm$). Die analytische Lösung ist in ÖNORM B 1993-1-1: Pkt. 8.7.2.a (1) geregelt und sieht für den Fall eines doppelt-symmetrischen Querschnitts mit idealer Gabellaagerung und Endmomentenbelastung (bzw. Querlasten, die im Schubmittelpunkt angreifen) wie folgt aus:

$$\begin{aligned} M_{cr} &= C_1 * \frac{\pi^2 * EI_z}{L^2} * \sqrt{\frac{I_\omega}{I_z} + \frac{L^2 * GI_T}{\pi^2 * EI_z}} = \\ &= 1,320 * \frac{\pi^2 * 21000 * 2140}{400^2} * \sqrt{\frac{1249 * 10^3}{2140} + \frac{400^2 * 8100 * 89,3}{\pi^2 * 21000 * 2140}} = 106342 kNcm \end{aligned}$$

— mit:

C_1 . . . Beiwert zur Berücksichtigung der Momentenverteilung

$$C_1(\psi = 0,5) = 1,320$$

(aus ÖNORM B 1993-1-1: Tab. 3)

Einsetzen der analytischen Lösung von M_{cr} in (3.3) liefert folgendes Ergebnis:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{M_{pl,y,Rk}}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{51559}{106342}} = 0,696$$

zu Punkt b)

$$\lambda_1 = \pi * \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi * \sqrt{\frac{21000}{23,5}} = 93,9$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{N_{pl}}{N_{cr,z}}} = \frac{L_{cr,z}}{\lambda_1 * i_z} = \frac{400}{93,9 * 4,31} = 0,988$$

$$k_p = \frac{0,9}{\left[1 + \frac{1}{20} * \left(\frac{\bar{\lambda}_z * \lambda_1}{h/t_f}\right)^2\right]^{0,25}} = \frac{0,9}{\left[1 + \frac{1}{20} * \left(\frac{0,988 * 93,9}{50/1,6}\right)^2\right]^{0,25}} = 0,821$$

Anmerkung: Der Faktor 0,9 berücksichtigt die erhöhte Torsionssteifigkeit von Walzprofilen.

$$k_c = \frac{1}{1,33 - 0,33 * \psi} = \frac{1}{1,33 - 0,33 * 0,5} = 0,858$$



Load case	Factor f_M	Factor k_c
$M = \text{uniform}$ 	1,00	1,00
M  ψM $-1 \leq \psi \leq +1$	$1,25 - 0,1 \psi - 0,15 \psi^2$	$\frac{1}{1,33 - 0,33 \psi}$

Abbildung 3.17: Ermittlung der Faktoren f_M und k_c (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.6)

Somit ergibt sich die bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}_{LT}$ für das Biegedrillknicken wie folgt:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \bar{\lambda}_z * k_p * k_c = 0,988 * 0,821 * 0,858 = 0,696$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.2.3

• Imperfektionsfaktor α_{LT} für das Biegedrillknicken EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.2.3

Bei der Ermittlung des Imperfektionsfaktors α_{LT} für das Biegedrillknicken wird zunächst unterschieden, ob das Querschnittsverhältnis h/b größer oder kleiner als 1,2 ist, bzw. ob die Blechdicke des Flansches t_f über oder unter 40mm liegt.

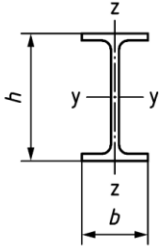
Cross-section		Limits	α_{LT}
Rolled I-sections		$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$ $0,12 \sqrt{\frac{W_{el,y}}{W_{el,z}}}$ but: $\alpha_{LT} \leq 0,34$
			$t_f > 40 \text{ mm}$ $0,16 \sqrt{\frac{W_{el,y}}{W_{el,z}}}$ but: $\alpha_{LT} \leq 0,49$
		$h/b \leq 1,2$	—

Abbildung 3.18: Ermittlung des Imperfektionsfaktors α_{LT} (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.5)

Aus $h/b = 500 / 200 = 2,5 > 1,2$ und $t_f = 16\text{mm} < 40\text{mm}$ folgt:

$$\alpha_{LT} = 0,12 * \sqrt{\frac{W_{el,y}}{W_{el,z}}} \leq 0,34 \quad (3.5)$$

Der Wert für α_{LT} folgt durch Einsetzen von $W_{el,y}$ und $W_{el,z}$ in (3.5) mit:

$$\alpha_{LT} = 0,12 * \sqrt{\frac{W_{el,y}}{W_{el,z}}} = 0,12 * \sqrt{\frac{1930}{214}} = 0,36 > \underline{0,34} \rightarrow \alpha_{LT} = 0,34$$

— nach „EC3-alt“

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.2.3

Bei der Ermittlung des Imperfektionsfaktors α_{LT} für das Biegedrillknicken wurde bisher unterschieden, ob das verwendete Profil gewalzt oder geschweißt ist und ob das Querschnittsverhältnis h/b größer oder kleiner als 2,0 ist.

Querschnitt	Grenzen	Biegedrillknicklinien
gewalztes I-Profil	$h/b \leq 2$	b
	$h/b > 2$	c
geschweißtes I-Profil	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d

Abbildung 3.19: Zuordnung der Knickspannungslinie (EN 1993-1-1-„alt“: Tab. 6.5)

Knicklinie	a	b	c	d
Imperfektionsbeiwert α_{LT}	0,21	0,34	0,49	0,76

Abbildung 3.20: Imperfektionsbeiwert α_{LT} (EN 1993-1-1-„alt“: Tab. 6.3)

Aus $h/b = 500 / 200 = 2,5 > 2,0$ folgt, dass für den Biegedrillknicknachweis die Knickspannungslinie c zu verwenden ist.

Ausweichen in Form von BDK: $c \rightarrow \alpha_{LT} = 0,49$

• Momentenfaktor f_M für das Biegedrillknicken

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.2.3

Die Ermittlung des Faktors f_M erfolgt ebenfalls entsprechend der Formeln aus Abbildung 3.17, mit dem für die vorliegende Biegemomentenverteilung zutreffenden Verhältnis der Randmomente ψ :

$$f_M = 1,25 - 0,10 * \psi - 0,15 * \psi^2 = 1,25 - 0,10 * 0,50 - 0,15 * 0,50^2 = 1,160$$

— mit:

$$\psi = 0,50$$

• **Abminderungsfaktor χ_{LT} für das Biegedrillknicken** **EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.2.3**

Bei der Ermittlung des Faktors ϕ_{LT} haben sich grundlegende Änderungen gegenüber „EC3-alt“ ergeben. Die Regelungen befinden sich in EN 1993-1-1: Pkt. 8.3.2.3. Die überarbeitete Formel in „EC3-neu“ berücksichtigt, wie in der Einleitung bereits beschrieben, den veränderlichen Momentenverlauf in Form von f_M , sowie den mechanisch wesentlichen Faktor $\bar{\lambda}_{LT}/\bar{\lambda}_z$.

$$\phi_{LT} = 0,5 * \left[1 + f_M * \left(\left(\frac{\bar{\lambda}_{LT}}{\bar{\lambda}_z} \right)^2 * \alpha_{LT} * (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right) \right] \quad (3.6)$$

$$\chi_{LT} = \frac{f_M}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - f_M * \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad (3.7)$$

Die für die Berechnung von ϕ_{LT} und χ_{LT} benötigten Variablen wurden bereits berechnet und können direkt in (3.6) bzw. in (3.7) eingesetzt werden:

$$\phi_{LT} = 0,5 * \left[1 + 1,160 * \left(\left(\frac{0,696}{0,988} \right)^2 * 0,34 * (0,988 - 0,2) + 0,696^2 \right) \right] = 0,858$$

$$\chi_{LT} = \frac{1,160}{0,858 + \sqrt{0,858^2 - 1,160 * 0,696^2}} = 0,910$$

— nach „EC3-alt“

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.2.3

$$\phi_{LT} = 0,5 * [1 + \alpha_{LT} * (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2] \quad (3.8)$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad (3.9)$$

In EN 1993-1-1: Pkt. 6.3.2.3(1) wurden folgende Werte für den Parameter β und die Plateaulänge $\bar{\lambda}_{LT,0}$ empfohlen:

$$\begin{aligned} \beta &= 0,75 \\ \bar{\lambda}_{LT,0} &= 0,4 \end{aligned}$$

Einsetzen der empfohlenen Werte in (3.8) bzw. in (3.9) ergibt:

$$\phi_{LT} = 0,5 * [1 + 0,49 * (0,696 - 0,4) + 0,75 * 0,696^2] = 0,754$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0,754 + \sqrt{0,754^2 - 0,75 * 0,696^2}} = 0,829$$

Weiters war eine entsprechende Modifikation von χ_{LT} aufgrund einer begünstigenden Momentenverteilung (erfasst durch den Faktor f) gestattet:

$$f = 1 - 0,5 * (1 - k_c) * [1 - 2 * (\bar{\lambda}_{LT} - 0,8)^2] \quad (3.10)$$

$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f} \quad (3.11)$$

$$f = 1 - 0,5 * (1 - 0,858) * [1 - 2 * (0,696 - 0,8)^2] = 0,929 \leq 1,0$$

$$\chi_{LT,mod} = \frac{0,829}{0,929} = 0,892 \leq 1,0$$

• Nachweis für Biegedrillknicken unter $M_{y,Ed}$

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.2.1

$$\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} * M_{pl,y,Rd}} = \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} * W_{pl,y} * \frac{f_y}{\gamma_{M1}}} = \frac{400 * 10^2}{0,910 * 2194 * \frac{23,5}{1,0}} = 0,853 \leq 1,0 \quad [0,870]$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.2.1

3.3 Drill- bzw. Biegedrillknicken unter zentrischer Drucknormalkraft

In diesem Kapitel fanden Änderungen bezüglich des Abminderungsfaktors χ_{LT} statt. Es wurde eine neue Regelung zur Berechnung des Abminderungsfaktors für gewalzte oder gleichartig geschweißte doppelsymmetrische I- oder H-Profile mit gebundener Drehachse festgelegt. Die Regelung fand sich bis zum Erscheinen der Neuauflage in EN 1993-1-1: Pkt. 6.3.1.4 und wird in der Neuauflage in EN 1993-1-1: Pkt. 8.3.1.4 geregelt.

Vor allem bei dünnwandigen, offenen Querschnitten, die grundsätzlich einen geringen Wölb- und Torsionswiderstand aufweisen, kann das Versagen durch reine zentrische Drucknormalkraft maßgebend sein. Wenn keine seitlichen Halterungen vorhanden sind, kann das Drill- bzw. Biegedrillknicken weitgehend ausgeschlossen werden, da das Biegeknicken um die schwache Achse maßgebend sein wird. Wenn jedoch seitliche, verdrehweiche Halterungen vorhanden sind (man spricht von einer gebundenen Drehachse), so kann diese Versagensform durchaus auftreten. Reines Drillknicken tritt auf, wenn die Halterung im Schubmittelpunkt des doppelsymmetrischen Profils angreift aber auch bei punktsymmetrischen Profilen (z.B. Kreuzprofil). Wenn die Halterung außerhalb des Schubmittelpunktes angreift, zum Beispiel bei einer seitlichen Beplankung einer Stütze, aber auch bei einfach-symmetrischen Profilen (z.B. Winkel- oder T-Profile, I-Profile mit unterschiedlichen Flanschen) kann es unter Umständen zu Biegedrillknicken kommen. In der bis zur Neuauflage gültigen Fassung der EN 1993-1-1 wurde davon ausgegangen, dass sich das Drill- und Biegedrillknicken ähnlich verhält wie Biegeknicken um die schwache Achse. Da hier jedoch die Torsionssteifigkeit vernachlässigt wird, wurden in der Neuauflage eigene χ_{TF} -Kurven (TF ... torsional-flexural), die gleich wie die neuen BDK-Kurven für M_y auf der Dissertation von TARAS [2012] beruhen, in die Neuauflage aufgenommen. TARAS [2012] hat in seiner Dissertation auch den Kalibrierungsfaktor α_{LT} erarbeitet, welcher trotz der sehr guten Annäherung an die numerischen Resultate nur in einer modifizierten Form in die Neufassung aufgenommen wurde, um eine bessere Anwendungsfreundlichkeit zu erwirken. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass nun für beliebig-symmetrische Querschnittsformen (Kreuz-, T-, L- oder einfach-symmetrischen I- oder H-Profilen und Profilen ohne Symmetrieachse) weiterhin für den Biegedrillknickabminderungsfaktor χ_{TF} und den Drillknickabminderungsfaktor χ_T die Werte für den Fall des Biegeknickens χ_z verwendet werden, jedoch mit den jeweiligen Schlankheiten $\bar{\lambda}_{TF}$ und $\bar{\lambda}_T$. Es ist jedoch darauf zu achten, dass für hochfeste Stähle (> S460) eine neue Zuordnung zu den Knickspannungslinien eingeführt wurde. Für doppelt-symmetrische I- und H-Profile wurde ein gänzlich neuer Ansatz eingeführt, der das tatsächliche Tragvermögen durch die Berücksichtigung der Torsionssteifigkeit möglichst exakt abbildet. In diesen neuen Ansatz fließt auch der für die Versagensform wesentliche Abstand der Drehachse zum Schubmittelpunkt ein. Die eben beschriebenen Änderungen werden in den nachfolgenden Abbildungen 3.21 und 3.22 dargestellt.

Zusammenfassung der aktuell gültigen Regelungen aus „EC3-1-1-neu“

[gem. EN 1993-1-1: 8.3.1.4]

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0$$

mit:

- N_{Ed} ... Bemessungswert der einwirkenden Druckkraft
- $N_{b,Rd}$... Bemessungswert der Drill- bzw. Biegedrillknicktragfähigkeit

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi_{TF} \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}$$

a) Knicklinien χ_{TF} für Drill bzw. Biegedrillknicken – Allgemeiner Fall [gem. EN 1993-1-1: 8.3.1.4(2)]

- gültig für beliebige symmetrische oder asymmetrische Profile

- Ermittlung von χ_{TF} ident zur Biegeknickkurve χ_z :

$$\chi_{TF} = \frac{1}{\phi_{TF} + \sqrt{\phi_{TF}^2 - \bar{\lambda}_{TF}^2}} \leq 1,0$$

mit:

- $\bar{\lambda}_{TF}$... Schlankheitsgrad für Biegedrillknicken $\bar{\lambda}_{TF} = \sqrt{\frac{N_{Rk}}{N_{TF}}}$
- $\phi_{TF} = 0,5 [1 + \alpha_z (\bar{\lambda}_{TF} - 0,2) + \bar{\lambda}_{TF}^2]$
- α_z ... Imperfektionsfaktor für Biegeknicken um z-z

Buckling curve	a ₀	a	b	c	d
Imperfection factor α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Cross section	Limits	Buckling curve			
		about axis	S235	S460	other
Rolled sections	I, H, L	t ₁ ≤ 40 mm	a	a	a
		t ₁ > 40 mm	a	b	a
	N, B > L, Z	t ₁ ≤ 100 mm	a	b	a
		t ₁ > 100 mm	a	c	a
Welded sections	I, H, L	t ₁ ≤ 40 mm	a	b	a
		t ₁ > 40 mm	a	c	a
	N, B > L, Z	hot finished	any	a	a
		cold formed	any	c	c
Welded box sections	generally (except as below)	any	b	b	
	thick welds: a > 0,2t ₁ and b/t ₁ < 30, and b/t ₂ < 30	any	c	c	
S, T, and flat sections	I, H, L	any	c	c	
	channel	any	c	c	
L-sections	Rolled sections	any	b	a	
	Welded sections t ₁ ≤ 40 mm	any	c	c	

Abbildung 3.21: Zusammenfassung der Änderungen der Knicklinien für den allgemeinen Fall

Zusammenfassung der aktuell gültigen Regelungen aus „EC3-1-1-neu“

b) Knicklinien χ_{TF} für Drill bzw. Biegedrillknicken – „I-Profile“ [gem. EN 1993-1-1: 8.3.1.4(3)]

- gültig für doppelsymmetrische I-Profile mit kontinuierlicher oder diskreter seitlicher Stützung

- Ermittlung von χ_{TF} :

$$\chi_{TF} = \frac{1}{\phi_{TF} + \sqrt{\phi_{TF}^2 - \bar{\lambda}_{TF}^2}} \leq 1,0$$

mit:

- $\bar{\lambda}_{TF}$... Schlankheitsgrad für Drill- bzw. BDK $\bar{\lambda}_{TF} = \sqrt{\frac{N_{Rk}}{N_{TF}}}$
- $\phi_{TF} = 0,5 \left[1 + \frac{\bar{\lambda}_{LT}^2}{\bar{\lambda}_z^2} \cdot \alpha_{TF} \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_{TF}^2 \right]$
- $\bar{\lambda}_z$... Schlankheitsgrad für Biegeknicken z-z $\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{N_{Rk}}{N_{cr,z}}}$
- α_{TF} ... Imperfektionsfaktor für Drill- bzw. BDK

$$\alpha_{TF} = \alpha_z \sqrt{\frac{A \cdot f_y \cdot (i_p^2 + d_z^2)}{6,25 \cdot G I_T}}$$

α_z ... Imperfektionsfaktor für Biegeknicken um z-z

		S235, S275, S355, S420	S460 bis S700
h/b > 1,2	t ₁ ≤ 40mm	0,34 (KLb)	0,13 (KL _{a0})
	t ₁ > 40mm	0,49 (KLc)	0,21 (KL _a)
h/b ≤ 1,2	t ₁ ≤ 100mm	0,49 (KLc)	0,21 (KL _a)
	t ₁ > 100mm	0,76 (KLd)	0,49 (KLc)

i_p ... polarer Trägheitsradius

d_z ... Abstand der seitlichen Abstützungen vom Schubmittelpunkt

Abbildung 3.22: Zusammenfassung der Änderungen der Knicklinien für doppelsymmetrische I-Profile

3.3.1 Beispiel: Drill- bzw. Biegedrillknicken unter zentrischer Drucknormalkraft N_{Ed}

Gegeben sei die in Abbildung 3.23 dargestellte Stütze, bestehend aus einem IPE-360-Profil der Stahlgüte S235 mit einer Höhe von 6m. An den Enden ist das Profil gelenkig und verdrehsteif gehalten und an einem Flansch kontinuierlich durch ausreichend schubsteife Paneele gegen Ausweichen in y-Richtung gehindert. Somit liegt eine gebundene Drehachse außerhalb des Profilschwerpunktes in Höhe des Profilflansches vor. Als Beanspruchung erfährt das System eine Drucknormalkraft von $N_{Ed} = 700kN$.

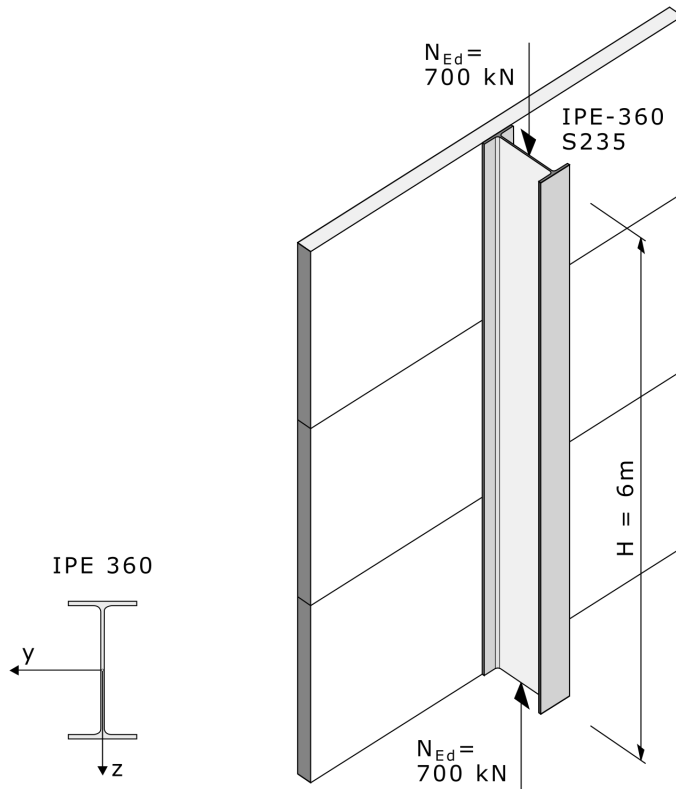


Abbildung 3.23: Statisches System und Belastung

Tabelle 3.6 zeigt die zutreffenden Material- und Querschnittskennwerte des vorliegenden IPE-360-Profiles:

Tabelle 3.6: Material- und Querschnittskennwerte IPE-360

$f_y = 23,5\text{ kN/cm}^2$	$A = 72,7\text{ cm}^2$	$\gamma_{M,0} = \gamma_{M,1} = 1,0$	$r = 1,8\text{ cm}$
$h = 36\text{ cm}$	$b = 17\text{ cm}$	$t_f = 1,27\text{ cm}$	$t_w = 0,80\text{ cm}$
$I_y = 16270\text{ cm}^4$	$I_z = 1040\text{ cm}^4$	$i_y = 15,0\text{ cm}$	$i_z = 3,79\text{ cm}$
$G = 8070\text{ kN/cm}^2$	$I_T = 37,3\text{ cm}^4$	$I_w = 31,36 * 10^4\text{ cm}^6$	

Querschnittsklassifizierung**EN 1993-1-1 Pkt. 7.5**

Tabelle 3.7 zeigt die für den IPE-360 zutreffenden Werte für c und t des Steg- bzw. Flanschblechs. Der Wert c steht hierbei für die ungestützte Länge des gedrückten Blechs, t ist die zugehörige Blechdicke.

Tabelle 3.7: IPE-360: Werte für c und t bzw. c/t

IPE-360	c [mm]	t [mm]	c/t [-]
Steg	299,0	8,0	37,38
Flansch	63,0	12,7	4,96

Hinweis: Geänderte Klassifizierungsgrenzwerte für beidseitig gestützte Querschnittsteile.

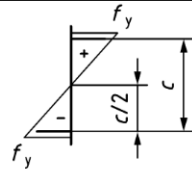
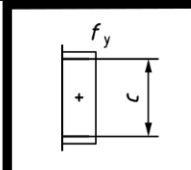
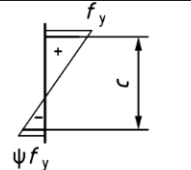
Stress distribution in parts (compression positive)			
Class 3	$c/t \leq 121 \varepsilon$	$c/t \leq 38 \varepsilon$	$\text{when } \psi > -1: c/t \leq \frac{38 \varepsilon}{0,608 + 0,343 \psi + 0,049 \psi^2}$ $\text{when } \psi \leq -1^a: \frac{c}{t} \leq 60,5 \varepsilon (1 - \psi)$

Abbildung 3.24: Klassifizierungsgrenzwerte Stegblech (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 7.3)

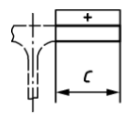
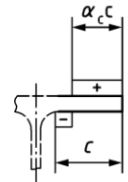
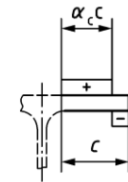
Stress distribution in parts (compression positive)			
Class 1	$c/t \leq 9 \varepsilon$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha_c}$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha_c \sqrt{\alpha_c}}$
Class 2	$c/t \leq 10 \varepsilon$	$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha_c}$	$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha_c \sqrt{\alpha_c}}$

Abbildung 3.25: Klassifizierungsgrenzwerte Flanschblech (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 7.3)

Mit dem Materialparameter $\epsilon = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1,0$ für S235 ergibt sich die Querschnittseinteilung wie folgt:

Steg:

$$\frac{c}{t} = 37,38 \leq 38 * \epsilon = 38 * 1,0 = 38 \rightarrow QK3$$

Flansch:

$$\frac{c}{t} = 4,96 \leq 9 * \epsilon = 9 * 1,0 = 9 \rightarrow QK1$$

Die Querschnittsklasse des Gesamtquerschnitts ergibt sich aus der höchsten Querschnittsklasse der einzelnen Blechteile (hier: Steg- bzw. Gurtblech). Da das Stegblech in Querschnittsklasse 3 und das Gurtblech in Querschnittsklasse 1 fällt, ist der vorhandene IPE-360-Querschnitt für reine Druckbeanspruchung QKL3 zuzuordnen. Somit müssen elastische Widerstandsgrößen verwendet werden.

— nach „EC3-alt“

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 5.5

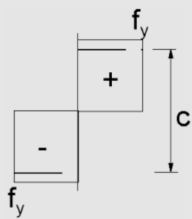
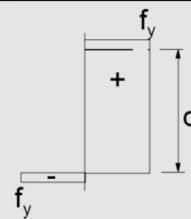
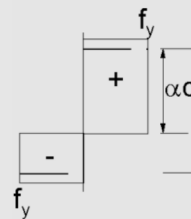
Spannungsverteilung über Querschnittsteile (Druck positiv)			
1	$clt \leq 72\epsilon$	$clt \leq 33\epsilon$	für $\alpha > 0,5$: $clt \leq \frac{396\epsilon}{13\alpha - 1}$ für $\alpha \leq 0,5$: $clt \leq \frac{36\epsilon}{\alpha}$
2	$clt \leq 83\epsilon$	$clt \leq 38\epsilon$	für $\alpha > 0,5$: $clt \leq \frac{456\epsilon}{13\alpha - 1}$ für $\alpha \leq 0,5$: $clt \leq \frac{41,5\epsilon}{\alpha}$

Abbildung 3.26: Klassifizierungsgrenzwerte des Stegblechs (Auszug aus EN 1993-1-1-„alt“: Tab. 5.2)

Steg:

$$\frac{c}{t} = 37,38 \leq 38 * \epsilon = 38 * 1,0 = 38 \rightarrow QK2$$

Flansch:

$$\frac{c}{t} = 4,96 \leq 9 * \epsilon = 9 * 1,0 = 9 \rightarrow QK1$$

Nach „EC3-alt“ \rightarrow Gesamtquerschnitt: Klasse 2

Querschnittsnachweis**EN 1993-1-1 Pkt. 8.2.4**

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{N_{Ed}}{A * \frac{f_y}{\gamma_{M0}}} = \frac{400}{72,7 * \frac{23,5}{1,0}} = 0,234 \leq 1,0$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.2.4

Biege- bzw. Biegedrillknicknachweis**EN 1993-1-1 Pkt. 8.3**

Aufgrund der Lagerungsverhältnisse und Querschnittsgeometrie, der kontinuierlichen einseitigen Halterung sowie der reinen zentrischen Druckbeanspruchung, kann davon ausgegangen werden, dass ein Biegedrillknickversagen in Form von seitlichem Ausweichen des ungehaltenen Druckgurtes in Richtung y-y bzw. Biegeknicken um die y-y-Achse zwischen den Endauflagern über eine Länge von 6m die nachzuweisenden Versagensformen darstellen (siehe Abbildung 3.27). Die Mitwirkung der Paneele in Form einer erhöhten Biegesteifigkeit EI_y der Stütze für Biegung um y-y wird nicht miterfasst.

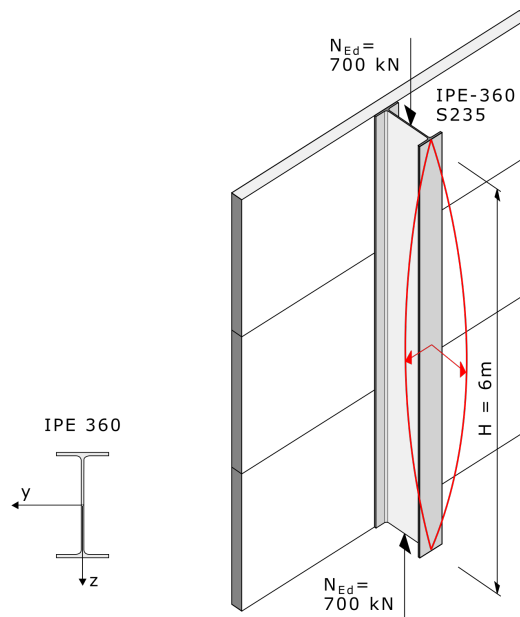


Abbildung 3.27: Mögliche Versagensformen: Biegedrillknicken um die gebundene Drehachse in Flanshhöhe bzw. Biegeknicken um die y-y-Achse

Da die Biegelinie der Knickeigenform (in Abbildung 3.27 rot eingezeichnet) Wendepunkte in den Punkten der Lagerungen hat, beträgt der β -Faktor gleich 1,0 (Euler-Fall 2).

$$L_{cr,y} = L_{cr,z} = L_c * \beta = 600 \text{ cm}$$

• Schlankheitsgrade $\bar{\lambda}_y$ und $\bar{\lambda}_z$ für das Biegeknicken

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.1.2

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{N_{Rk}}{N_{cr,y}}} = \frac{L_{cr}}{i_y * \lambda_1} = \frac{600}{15,0 * 93,9} = 0,426$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{N_{Rk}}{N_{cr,z}}} = \frac{L_{cr}}{i_z * \lambda_1} = \frac{600}{3,79 * 93,9} = 1,686$$

— mit:

$$\lambda_1 = \pi * \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi * \sqrt{\frac{21000}{23,5}} = 93,9$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.1.4

• Imperfektionsfaktoren α_y und α_z für das Biegeknicken

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.1.3

Bei der Ermittlung des Imperfektionsfaktors α für das Biegeknicken wird zunächst unterschieden, ob das Verhältnis h/b größer oder kleiner als 1,2 ist, bzw. ob die Blechdicke des Flansches t_f über oder unter dem jeweiligen Grenzwert liegt und zuletzt welche Stahlgüte das Profil aufweist. Anschließend wird der Imperfektionsfaktor α_z für Biegeknicken modifiziert, um ihn für das Biegedrillknicken (α_{TF}) verwenden zu können.

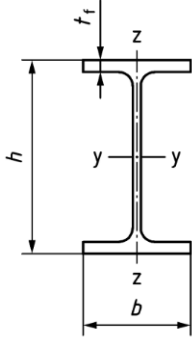
Cross-section	Limits	Buckling about axis	Buckling curve		
			S235 S275 S355 S420	S460 Up to S700 inclusive	
Rolled sections 	$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40$ mm	y-y	a	a ₀
		z-z	b	a	
	$t_f > 40$ mm	y-y	b	a	
		z-z	c	b	
$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100$ mm	y-y	b	a	
	z-z	c	b		
$t_f > 100$ mm	y-y	d	c		
	z-z	d	c		

Abbildung 3.28: Ermittlung der Knickspannungslinie (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.3)

Buckling curve	a ₀	a	b	c	d
Imperfection factor α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Abbildung 3.29: Zugehörige Werte der Imperfektionsfaktoren (EN 1993-1-1: Tab. 8.2)

Aus $h / b = 360 / 170 = 2,1 > 1,2$ und $t_f = 12,7\text{mm} < 40\text{mm}$ folgt, dass für den Biegeknicknachweis um y-y die Knickspannungslinie a und für den Biegedrillknicknachweis um z-z die Knickspannungslinie b zu verwenden ist.

Ausweichen um y-y: a $\rightarrow \alpha_y = 0,21$

Ausweichen um z-z: b $\rightarrow \alpha_z = 0,34$

Gemäß EN 1993-1-1: Pkt. 8.3.1.4(6) wird der Imperfektionsfaktor α_{TF} durch die folgende Gleichung (3.12) ermittelt:

$$\alpha_{TF} = \alpha_z * \sqrt{\frac{A * f_y * (i_p^2 + d_z^2)}{6,25 * GI_T}} \leq \alpha_z \quad (3.12)$$

— mit:

$$i_p^2 = \frac{I_y + I_z}{A} = \frac{16270 + 1040}{72,7} = 238,10\text{cm}^2$$

$$d_z = h/2 = 36,0/2 = 18\text{cm}$$

$$GI_T = 8070\text{kN/cm}^2 * 37,3\text{cm}^4 = 301011\text{kNcm}^2$$

Einsetzen dieser Faktoren in (3.12) liefert den Imperfektionsfaktor für das Biegedrillknicken α_{TF} :

$$\alpha_{TF} = 0,34 * \sqrt{\frac{72,7 * 23,5 * (238,10 + 18,0^2)}{6,25 * 301011}} = \underline{0,243} \leq \alpha_z = 0,34$$

— nach „EC3-alt“

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.1.4

Die Ermittlung der Knickspannungslinie erfolgte anhand der identen Vorgehensweise (durch EN 1993-1-1: Tab. 6.2 sowie Tab. 6.1). Die Modifikation von α_z auf α_{LT} war in „EC3-alt“ jedoch nicht vorgesehen.

• Schlankheitsgrad $\bar{\lambda}_{TF}$ für das Biegedrillknicken EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.1.2(1)

Gemäß EN 1993-1-1: Pkt. 8.3.1.2(1) wird die bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}_{TF}$ durch die folgende Gleichung (3.13) ermittelt:

$$\bar{\lambda}_{TF} = \sqrt{\frac{N_{Rk}}{N_{cr,TF}}} \quad (3.13)$$

Die kritische Druckkraft für Biegedrillknicken wird nach Gleichung (3.14) ermittelt:

$$N_{cr,TF} = N_{cr,z} * \frac{c^2 + d^2}{i_p^2 + d^2} \quad (3.14)$$

— mit:

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2}{L^2} * EI_z = \frac{\pi^2}{600^2} * 21000 * 1040 = 598,76kN$$

$$i_p = \sqrt{\frac{I_y + I_z}{A}} = \sqrt{\frac{16270 + 1040}{72,7}} = 15,43cm$$

$$c = \sqrt{\frac{I_w}{I_z} + \frac{GI_T}{N_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{31,36 * 10^4}{1040} + \frac{301011}{598,76}} = 28,36cm$$

Einsetzen dieser Faktoren in Gleichung (3.14) liefert die kritische Druckkraft für das Biegedrillknicken $N_{cr,TF}$:

$$N_{cr,TF} = 598,76 * \frac{28,36^2 + 18,0^2}{15,43^2 + 18,0^2} = 1201,91kN$$

Eingesetzt in (3.13) ergibt sich die bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}_{TF}$ zu:

$$\bar{\lambda}_{TF} = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr,TF}}} = \sqrt{\frac{72,7 * 23,5}{1201,91}} = 1,192$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.1.4

• **Abminderungsfaktor χ_{TF} für das Biegedrillknicken EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.1.4(3)**

Gemäß EN 1993-1-1: Pkt. 8.3.1.4(3) wird der Abminderungsfaktor χ_{TF} durch die folgenden Gleichungen (3.15) und (3.16) ermittelt:

$$\phi_{TF} = 0,5 * \left[1 + \left(\frac{\bar{\lambda}_{TF}}{\bar{\lambda}_z} \right)^2 * \alpha_{TF} * (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_{TF}^2 \right] \quad (3.15)$$

$$\chi_{TF} = \frac{1}{\phi_{TF} + \sqrt{\phi_{TF}^2 - \bar{\lambda}_{TF}^2}} \quad (3.16)$$

Einsetzen der ermittelten Werte in Gleichung (3.15) bzw. Gleichung (3.16) ergibt:

$$\phi_{TF} = 0,5 * \left[1 + \left(\frac{1,192}{1,686} \right)^2 * 0,243 * (1,686 - 0,2) + 1,192^2 \right] = 1,301$$

$$\chi_{TF} = \frac{1}{1,301 + \sqrt{1,301^2 - 1,192^2}} = 0,549$$

— nach „EC3-alt“

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.1.4

Gemäß EN 1993-1-1: Pkt. 6.3.2.2 wurde als Abminderungsfaktor χ_{TF} näherungsweise die χ_z -Werte für den Fall des Biegeknickens verwendet:

$$\phi_{TF} = 0,5 * [1 + \alpha * (\bar{\lambda}_{TF} - 0,2) + \bar{\lambda}_{TF}^2] \quad (3.17)$$

$$\chi_{TF} = \frac{1}{\phi_{TF} + \sqrt{\phi_{TF}^2 - \bar{\lambda}_{TF}^2}} \quad (3.18)$$

Die einzusetzenden Werte wurden bereits ermittelt. Somit ergibt sich:

$$\phi_{TF} = 0,5 * [1 + 0,34 * (1,192 - 0,2) + 1,192^2] = 1,379$$

$$\chi_{TF} = \frac{1}{1,379 + \sqrt{1,379^2 - 1,192^2}} = 0,483$$

• Abminderungsfaktor χ_y für das Biegeknicken
EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.1.3

$$\phi = 0,5 * [1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \quad (3.19)$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad (3.20)$$

$$\phi_y = 0,5 * [1 + 0,21 * (0,426 - 0,2) + 0,426^2] = 0,615$$

$$\chi_y = \frac{1}{0,615 + \sqrt{0,615^2 - 0,426^2}} = 0,946$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.1.2

• Nachweis für Biege- bzw. Biegedrillknicken unter N_{Ed}
EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.1.1

$$y - y : \frac{N_{Ed}}{\chi_y * N_{b,Rd}} = \frac{N_{Ed}}{\chi_y * A * \frac{f_y}{\gamma_{M1}}} = \frac{700}{0,946 * 72,7 * \frac{23,5}{1,0}} = 0,433 \leq 1,0 \quad [0,433]$$

$$z - z : \frac{N_{Ed}}{\chi_{TF} * N_{b,Rd}} = \frac{N_{Ed}}{\chi_{TF} * A * \frac{f_y}{\gamma_{M1}}} = \frac{700}{0,549 * 72,7 * \frac{23,5}{1,0}} = 0,746 \leq 1,0 \quad [0,848]$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.1.1

3.4 Stabilität doppelsymmetrischer Querschnitte unter Druck und Biegung

In diesem Kapitel fanden Änderungen bezüglich des Abgrenzungskriteriums statt, ab wann offene Querschnitte ohne Verdrehbehinderung für die Berechnung der Interaktionsfaktoren als verdrehsteif einzustufen sind. Die Regelung fand sich bis zum Erscheinen der Neuauflage in EN 1993-1-1: Pkt. 6.3.3 und wird in der Neuauflage in EN 1993-1-1: Pkt. 8.3.3 geregelt. Zusätzlich wurde das Alternativverfahren 2 aus dem bis zur Erscheinung der Neuauflage gültigen EN 1993-1-1: Anhang B „Berechnung der Interaktionsfaktoren“ in den Haupttext der Neuauflage von EN 1993-1-1 aufgenommen.

Es sei an dieser Stelle nochmals erwähnt, dass bei den Stabbemessungsformeln für Stäbe unter Druck und Biegung das Interaktionskonzept von der aktuell gültigen zur Neuauflage der EN 1993-1-1 keine Änderungen stattgefunden haben. Hinsichtlich Interaktionsformeln ist es entscheidend, zwischen verdrehsteifen und verdrehweichen Stäben zu unterscheiden, da die Versagensform hiervon abhängig ist. Als verdrehsteife Stäbe zählen Hohl- bzw. Kastenprofile sowie Profile mit ausreichender Halterung des Druckflansches. Eine Neuerung ergab sich in der Neuauflage in der Abgrenzung von offenen Querschnitten. Es wurde eine Grenزشlankheit eingeführt. Während bei Unterschreitung der Grenزشlankheit auch bei offenen Querschnitten von einem verdrehsteifen Stab gesprochen wird, werden offene Querschnitte mit einer Schlankheit größer als die Grenزشlankheit als verdrehweiche Stäbe eingestuft. Das Abgrenzungskriterium wird in Gleichung (3.21) dargestellt. Generell gilt, dass der Versagensmodus von verdrehsteifen Stäben das Biegeknicken ist und bei verdrehweichen Stäben das Biegedrillknicken. Die eben beschriebenen Änderungen werden in den nachfolgenden Abbildungen 3.30 und 3.31 für die Interaktion von N und M_y dargestellt. Bei zusätzlichem Vorhandensein von M_z sei verwiesen auf EN 1993-1-1: Pkt. 8.3.3(8).

$$\bar{\lambda}_{LT,lim} = \bar{\lambda}_{LT,0} * \sqrt{1 - \bar{\lambda}_z^2 * \chi_z} \quad (3.21)$$

Zusammenfassung der aktuell gültigen Regelungen aus „EC3-1-1-neu“

Stabilitätsnachweis für verdrehsteife Profile

• Nachweisformeln für **N + M_y**:

Biegeknicen um y-y:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rd}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \leq 1,0$$

Biegeknicen um z-z:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rd}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \leq 1,0$$

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

k_{yy}	plastische Querschnittswerte der Klassen 1,2 sowie 3 (W_{pl})		elastische Querschnittswerte der Klassen 3 (W_{el}) und 4	
	$\bar{\lambda}_y < 1,0$	$\bar{\lambda}_y \geq 1,0$	$C_{my} \cdot [1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \cdot n_y]$	$C_{my} \cdot (1 + 0,6 \cdot \bar{\lambda}_y \cdot n_y)$

k_{zy}	plastische Querschnittswerte der Klassen 1,2 sowie 3 (W_{pl})		elastische Querschnittswerte der Klassen 3 (W_{el}) und 4	
	$\bar{\lambda}_z < 1,0$	$\bar{\lambda}_z \geq 1,0$	$0,6 \cdot k_{yy}$	$0,8 \cdot k_{yy}$

C_{my} ... Momentenbeiwert (siehe EN 1993-1-1: 8.3.3 (10))

Folgende (konservative) Vereinfachungen gem. EN 1993-1-1: 8.3.3(13) dürfen getroffen werden:

- $k_{yy} = C_{my} \cdot (1 + 0,8 \cdot n_y)$
- $C_{my} = 1,0$

„EC3-alt“

- Nachweisformeln ident zu „EC3-1-1-alt“
- Ermittlung der Interaktionsfaktoren k_{yy}, k_{zy} ident zu „EC3-1-1-alt“
- Bei Verwendung der „anwendungsfreundlichen“ Berechnungsformeln für N+M_y aus ÖN B 1993-1-1 „alt“: Abschnitt 6.8 gelten die Zusammenhänge:

$$k_{yy} = k_y \cdot C_{my} \quad k_{zy} = \alpha \cdot k_y \cdot C_{my}$$

Abbildung 3.30: Zusammenfassung der Änderungen beim Stabilitätsnachweis für verdrehsteife Stäbe unter N und M_y

Zusammenfassung der aktuell gültigen Regelungen aus „EC3-1-1-neu“

Stabilitätsnachweis für verdrehweiche Profile

• Nachweisformeln für **N + M_y**:

Biegeknicen y-y mit BDK-Effekt:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rd}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}} \leq 1,0$$

Biegedrillknicen:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rd}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}} \leq 1,0$$

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

k_{yy}	plastische Querschnittswerte der Klassen 1,2 sowie 3 (W_{pl})		elastische Querschnittswerte der Klassen 3 (W_{el}) und 4	
	$\bar{\lambda}_y < 1,0$	$\bar{\lambda}_y \geq 1,0$	$C_{my} \cdot [1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \cdot n_y]$	$C_{my} \cdot (1 + 0,6 \cdot \bar{\lambda}_y \cdot n_y)$

k_{zy}	plastische Querschnittswerte der Klassen 1,2 sowie 3 (W_{pl})		elastische Querschnittswerte der Klassen 3 (W_{el}) und 4	
	$\bar{\lambda}_z < 1,0$	$\bar{\lambda}_z \geq 1,0$	$1 - \frac{0,1 \cdot \bar{\lambda}_z \cdot n_z}{C_{mLT} - 0,25} \leq 0,6 + \bar{\lambda}_z$	$1 - \frac{0,05 \cdot \bar{\lambda}_z \cdot n_z}{C_{mLT} - 0,25}$

C_{my}, C_{mLT} ... Momentenbeiwert (siehe EN 1993-1-1: 8.3.3 (10))

Folgende (konservative) Vereinfachungen gem. EN 1993-1-1: 8.3.3(13) dürfen getroffen werden:

- $k_{yy} = C_{my} \cdot (1 + 0,8 \cdot n_y)$
- $C_{my} = C_{mLT} = 1,0$
- $k_{zy} = 1,0$

„EC3-alt“

- Nachweisformeln ident zu „EC3-1-1-alt“
- Ermittlung der Interaktionsfaktoren $k_{yy}, k_{yz}, k_{zy}, k_{zz}$ ident zu „EC3-1-1-alt“
- Bei Verwendung der „anwendungsfreundlichen“ Berechnungsformeln für N+M_y aus ÖN B 1993-1-1 „alt“: Abschnitt 6.8 gelten die Zusammenhänge:

$$k_{yy} = k_y \cdot C_{my} \quad k_{zy} = k_{LT}$$

Abbildung 3.31: Zusammenfassung der Änderungen beim Stabilitätsnachweis für verdrehweiche Stäbe unter N und M_y

3.4.1 Beispiel: Biegedrillknicken doppelsymmetrischer Querschnitte unter Biegemoment $M_{y,Ed}$ und Drucknormalkraft N_{Ed}

Gegeben sei der in Abbildung 3.32 dargestellte Biegeträger, bestehend aus einem IPE-500-Profil der Stahlgüte S355 mit einer Spannweite von 10m. An den Enden ist das Profil jeweils durch Gabellagerungen gehalten und in Feldmitte zusätzlich durch eine seitliche Zwischenabstützung sowohl gegen Ausweichen um z-z, als auch gegen Verdrehung um x-x gehindert. Als Beanspruchung erfährt das System ein auflagerseitig angreifendes Einzelmoment von $M_{y,Ed} = 250\text{kNm}$ sowie eine konstante Drucknormalkraft $N_{Ed} = 500\text{kN}$.

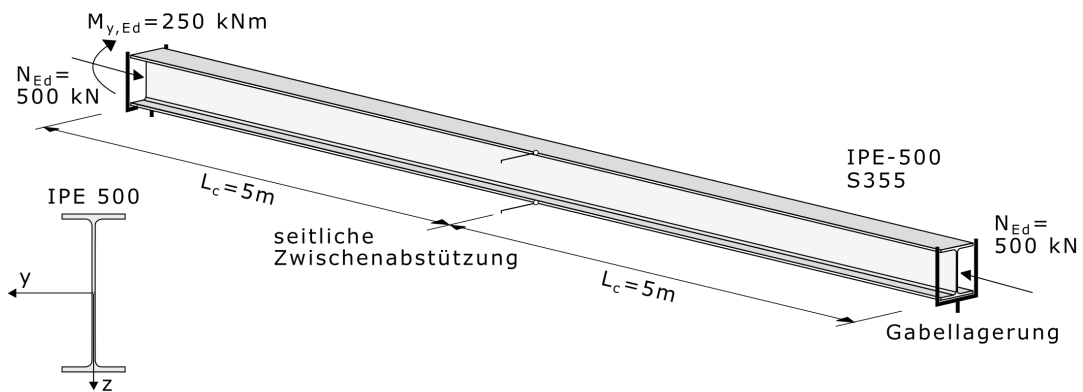


Abbildung 3.32: Statisches System, Belastung und Querschnitt

Tabelle 3.8 zeigt die zutreffenden Material- und Querschnittskennwerte des vorliegenden IPE-500-Profiles:

Tabelle 3.8: Material- und Querschnittskennwerte IPE-500

$f_y = 35,5\text{kN/cm}^2$	$A = 116\text{cm}^2$	$\gamma_{M,0} = \gamma_{M,1} = 1,0$	$r = 2,7\text{cm}$
$h = 50\text{cm}$	$b = 20\text{cm}$	$t_f = 1,6\text{cm}$	$t_w = 1,02\text{cm}$
$I_y = 48200\text{cm}^4$	$I_z = 2140\text{cm}^4$	$i_y = 20,4\text{cm}$	$i_z = 4,31\text{cm}$
$W_{el,y} = 1930\text{cm}^3$	$W_{el,z} = 214\text{cm}^3$	$W_{pl,y} = 2194\text{cm}^3$	
$G = 81000\text{N/mm}^2$	$I_T = 89,3\text{cm}^4$	$I_\omega = 1249 \cdot 10^3\text{cm}^6$	

Querschnittsklassifizierung **EN 1993-1-1 Pkt. 7.5**

Tabelle 3.9 zeigt die für den IPE-500 zutreffenden Werte für c und t des Steg- bzw. Flanschblechs. Der Wert c steht hierbei für die ungestützte Länge des gedrückten Blechs, t ist die zugehörige Blechdicke.

Tabelle 3.9: IPE-500: Werte für c und t bzw. c/t

IPE-500	c [mm]	t [mm]	c/t [-]
Steg	426	10,2	41,76
Flansch	73,9	16	4,62

Hinweis: Geänderte Klassifizierungsgrenzwerte für beidseitig gestützte Querschnittsteile.

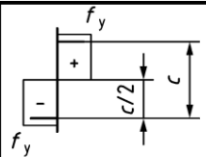
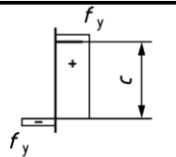
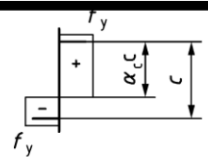
Stress distribution in parts (compression positive)			
Class 1	$c/t \leq 72 \varepsilon$	$c/t \leq 28 \varepsilon$	when $\alpha_c > 0,5$: $c/t \leq \frac{126 \varepsilon}{5,5 \alpha_c - 1}$ when $\alpha_c \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{36 \varepsilon}{\alpha_c}$
Class 2	$c/t \leq 83 \varepsilon$	$c/t \leq 34 \varepsilon$	when $\alpha_c > 0,5$: $c/t \leq \frac{188 \varepsilon}{6,53 \alpha_c - 1}$ when $\alpha_c \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5 \varepsilon}{\alpha_c}$

Abbildung 3.33: Klassifizierungsgrenzwerte Stegblech (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 7.3)

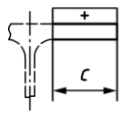
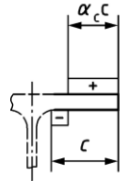
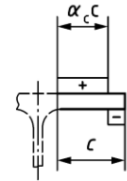
Stress distribution in parts (compression positive)			
Class 1	$c/t \leq 9 \varepsilon$	$c/t \leq \frac{9 \varepsilon}{\alpha_c}$	$c/t \leq \frac{9 \varepsilon}{\alpha_c \sqrt{\alpha_c}}$
Class 2	$c/t \leq 10 \varepsilon$	$c/t \leq \frac{10 \varepsilon}{\alpha_c}$	$c/t \leq \frac{10 \varepsilon}{\alpha_c \sqrt{\alpha_c}}$

Abbildung 3.34: Klassifizierungsgrenzwerte Flanschblech (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 7.3)

Aufgrund der asymmetrischen Spannungsverteilung muss für die Querschnittsklassifizierung zunächst die Verhältniszahl α_c bestimmt werden. Die Kennzeichnung *) in Abbildung 3.35 bedeutet, dass die Einwirkungen bis zum Erreichen der Fließgrenze gesteigert wurden.

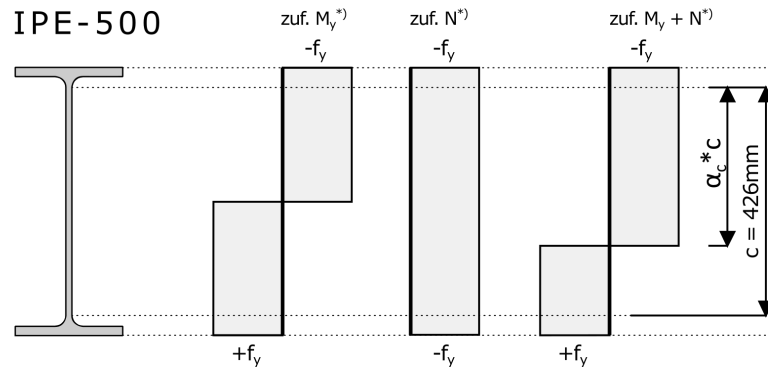


Abbildung 3.35: Spannungsverteilung

Die Verhältniszahl α_c lässt sich über die nachfolgende in EN 1993-1-1: Tab. 7.3 angeführte Formel bestimmen:

$$\alpha_c = 0,5 * \left(1 + \frac{N_{Ed}}{c * t_w * f_y}\right) = 0,5 * \left(1 + \frac{500}{42,6 * 1,02 * 35,5}\right) = 0,662 > 0,5$$

Mit dem Materialparameter $\epsilon = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,814$ für S355 ergibt sich die Querschnittseinteilung wie folgt:

Steg:

$$\frac{c}{t} = 41,76 \leq \frac{188 * \epsilon}{6,53 * \alpha_c - 1} = \frac{188 * 0,814}{6,53 * 0,662 - 1} = 46,05 \rightarrow QK2$$

Flansch:

$$\frac{c}{t} = 4,62 \leq 9 * \epsilon = 9 * 0,814 = 7,33 \rightarrow QK1$$

Die Querschnittsklasse des Gesamtquerschnitts ergibt sich aus der höchsten Querschnittsklasse der einzelnen Blechteile (hier: Steg- bzw. Gurtblech). Da das Stegblech in Querschnittsklasse 2 und das Gurtblech in Querschnittsklasse 1 fällt, ist der vorhandene IPE-500-Querschnitt für die vorliegende Belastung (Druck und Biegung) QKL2 zuzuordnen. Somit können plastische Widerstandsgrößen verwendet werden.

— nach „EC3-alt“

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 5.5

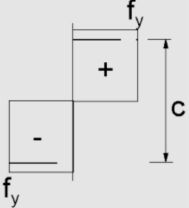
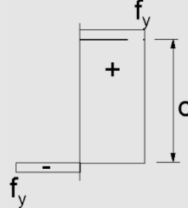
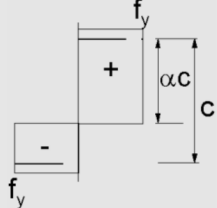
Spannungsverteilung über Querschnittsteile (Druck positiv)			
1	$clt \leq 72\epsilon$	$clt \leq 33\epsilon$	für $\alpha > 0,5$: $clt \leq \frac{396\epsilon}{13\alpha - 1}$ für $\alpha \leq 0,5$: $clt \leq \frac{36\epsilon}{\alpha}$
2	$clt \leq 83\epsilon$	$clt \leq 38\epsilon$	für $\alpha > 0,5$: $clt \leq \frac{456\epsilon}{13\alpha - 1}$ für $\alpha \leq 0,5$: $clt \leq \frac{41,5\epsilon}{\alpha}$

Abbildung 3.36: Klassifizierungsgrenzwerte des Stegblechs (Auszug aus EN 1993-1-1-„alt“: Tab. 5.2)

Steg:

$$\frac{c}{t} = 41,76 \leq \frac{456 * \epsilon}{13 * \alpha - 1} = \frac{456 * 0,814}{13 * 0,662 - 1} = 48,80 \rightarrow QK2$$

Flansch:

$$\frac{c}{t} = 4,62 \leq 9 * \epsilon = 9 * 0,814 = 7,33 \rightarrow QK1$$

→ Gesamtquerschnitt: Klasse 2

Querschnittsnachweis**EN 1993-1-1 Pkt. 8.2.9.1**

Bei kombinierter Beanspruchung von N und M_y darf gemäß EN 1993-1-1: Pkt. 8.2.9.1(4) der Normalkraftanteil vernachlässigt werden, sofern gilt:

- $N_{Ed} = 500kN \leq 0,25 * N_{pl,Rd} = 0,25 * 116 * \frac{35,5}{1,0} = 1029,5kN \checkmark$
- $N_{Ed} = 500kN \leq \frac{0,5 * h_w * t_w * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,5 * 42,6 * 1,02 * 35,5}{1,0} = 771,3kN \checkmark$

Da beide Kriterien erfüllt sind, dürfte der Normalkraftanteil vernachlässigt werden. Zur Veranschaulichung wird dennoch die Methode in EN 1993-1-1: Pkt. 8.2.9.1(5) durchgeführt:

$$M_{N,y,Rd} \leq M_{pl,y,Rd} = 2194 * \frac{35,5}{1,0} = 77887,0kNcm$$

$$M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} * \frac{1-n}{1-0,5*a} = 77887,0 * \frac{1-0,121}{1-0,5*0,448}$$

$$M_{N,y,Rd} = 88185,0kNcm > \underline{M_{pl,y,Rd} = 77887,0kNcm}$$

— mit:

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = \frac{500}{116 * \frac{35,5}{1,0}} = 0,121$$

$$a = \frac{A - 2 * b * t_f}{A} = \frac{116 - 2 * 20,0 * 1,02}{116} = 0,448 < 0,5$$

Nachweis:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{N,y,Rd}} = \frac{250 * 10^2}{77887,0} = 0,321 \leq 1,0$$

In „EC3-alt“ gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.2.9.1

Biegedrillknicknachweis

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.3

Aufgrund der Lagerungsverhältnisse und Querschnittsgeometrie, sowie der Kombination aus Drucknormalkraft- und Biegemomentenbeanspruchung, kann davon ausgegangen werden, dass ein Biegedrillknickversagen in Form von seitlichem Ausweichen des Druckstabes in Richtung der schwachen Querschnittsachse z-z zwischen den seitlichen Abstützungen über eine Länge von 5m bzw. in Richtung der starken Querschnittsachse y-y zwischen den Auflagern über eine Länge von 10m die nachzuweisenden Versagensformen darstellen. (siehe Abbildung 3.37)

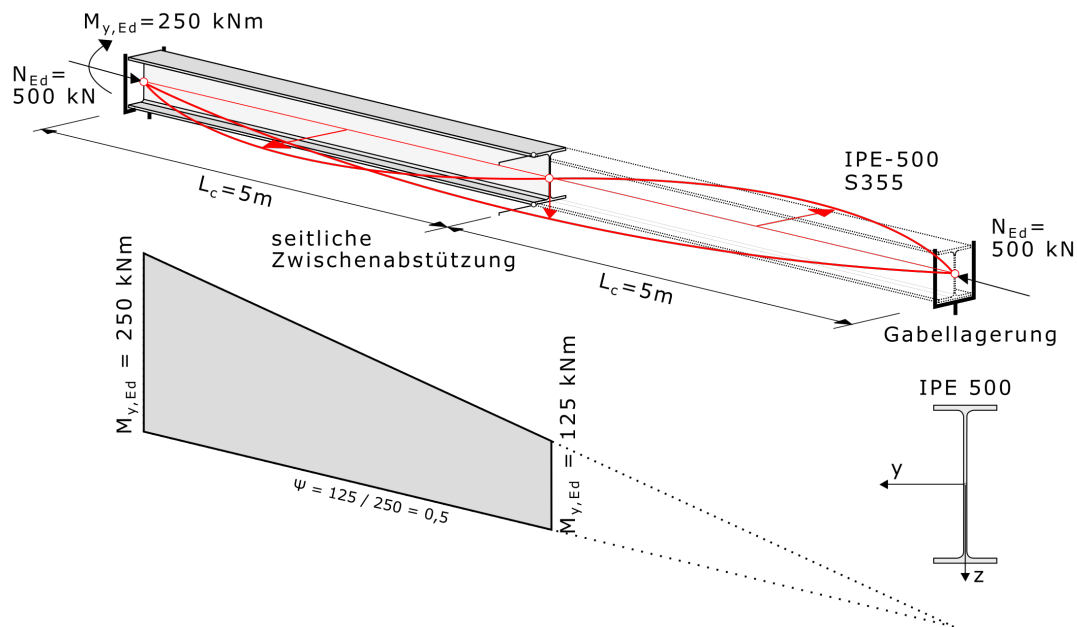


Abbildung 3.37: Momentenverteilung und mögliche Versagensformen

Der für den BDK-Nachweis maßgebende Stababschnitt ist in Abbildung 3.37 grau hinterlegt. Da die jeweiligen Abstände zwischen den seitlichen Halterungen gleich groß sind, ergibt sich der maßgebende Abschnitt somit rein aufgrund der Größe der Biegemomentenbeanspruchung. Da die Biegelinie der Knickeigenform (in Abbildung 3.37 rot eingezeichnet) Wendepunkte in den Punkten der seitlichen Stützungen hat, beträgt der β -Faktor gleich 1,0 (Euler-Fall 2).

$$L_{cr,y} = L_{c,y} * \beta = 1000cm$$

$$L_{cr,z} = L_{cr,LT} = L_{c,z} * \beta = 500cm$$

• Schlankheitsgrade $\bar{\lambda}_y$ und $\bar{\lambda}_z$ für das Biegeknicken

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.1.2

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{N_{pl}}{N_{cr,y}}} = \frac{L_{cr,y}}{i_y * \lambda_1} = \frac{1000}{20,4 * 76,4} = 0,642$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{N_{pl}}{N_{cr,z}}} = \frac{L_{cr,z}}{i_z * \lambda_1} = \frac{500}{4,31 * 76,4} = 1,518$$

— mit:

$$\lambda_1 = \pi * \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi * \sqrt{\frac{21000}{35,5}} = 76,4$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.1.3

• Imperfektionsfaktoren α_y und α_z für das Biegeknicken

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.1.3

Bei der Ermittlung der Imperfektionsfaktoren α für das Biegeknicken wird zunächst unterschieden, ob das Querschnittsverhältnis h/b größer oder kleiner als 1,2 ist, bzw. ob die Blechdicke des Flansches t_f über oder unter dem jeweiligen Grenzwert liegt und zuletzt welche Stahlgüte das Profil aufweist.

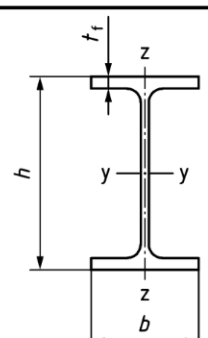
Cross-section	Limits	Buckling about axis	Buckling curve		
			S235 S275 S355 S420	S460 Up to S700 inclusive	
Rolled sections 	$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40$ mm	y-y z-z	a b	a ₀ a
		$t_f > 40$ mm	y-y z-z	b c	a b
	$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100$ mm	y-y z-z	b c	a b
		$t_f > 100$ mm	y-y z-z	d d	c c

Abbildung 3.38: Ermittlung der Knickspannungslinie (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.3)

Buckling curve	a ₀	a	b	c	d
Imperfection factor α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Abbildung 3.39: Zugehörige Werte der Imperfektionsfaktoren (EN 1993-1-1: Tab. 8.2)

Aus $h/b = 500/200 = 2,5 > 1,2$ und $t_f = 16\text{mm} < 40\text{mm}$ folgt:

Ausweichen um y-y: $a \rightarrow \alpha_y = 0,21$

Ausweichen um z-z: $b \rightarrow \alpha_z = 0,34$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.1.2

• **Abminderungsfaktoren χ_y und χ_z für das Biegeknicken EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.1.3**

$$\phi = 0,5 * [1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \quad (3.22)$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad (3.23)$$

Einsetzen der bezogenen Schlankheiten und der Imperfektionsfaktoren in die Gleichungen (3.22) und (3.23) liefert die Werte für ϕ_i und die Knickabminderungsfaktoren χ_i :

$$\phi_y = 0,5 * [1 + 0,21 * (0,642 - 0,2) + 0,642^2] = 0,752$$

$$\chi_y = \frac{1}{0,752 + \sqrt{0,752^2 - 0,642^2}} = 0,874$$

$$\phi_z = 0,5 * [1 + 0,34 * (1,518 - 0,2) + 1,518^2] = 1,877$$

$$\chi_z = \frac{1}{1,877 + \sqrt{1,877^2 - 1,518^2}} = 0,336$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.1.2

• Schlankheitsgrad $\bar{\lambda}_{LT}$ für das Biegedrillknicken

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.2.2

Der Schlankheitsgrad für das Biegedrillknicken $\bar{\lambda}_{LT}$ kann anhand der folgenden 2 Vorgehensweisen ermittelt werden:

a) Direkte Bestimmung mittels M_{cr}

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{M_{pl,y,Rk}}{M_{cr}}} \quad (3.24)$$

b) Näherung auf Basis von $\bar{\lambda}_z$ unter Verwendung der Faktoren k_p und k_c

$$\bar{\lambda}_{LT} = \bar{\lambda}_z * k_p * k_c \quad (3.25)$$

zu Punkt a)

$$M_{pl,y,Rk} = W_{pl,y} * f_y = 2194 * 35,5 = 77887 \text{ kNcm}$$

Anmerkung: M_{cr} bezeichnet das ideale Verzweigungsmoment für Biegedrillknicken und wurde hier zum Vergleich numerisch mithilfe des Programmes LTBeam ermittelt ($M_{cr} = 73769 \text{ kNcm}$). Die analytische Lösung ist in ÖNORM B 1993-1-1: Pkt. 8.7.2.a (1) geregelt und sieht für den Fall eines doppelt-symmetrischen Querschnitts mit idealer Gabel Lagerung und Endmomentenbelastung (bzw. Querlasten, die im Schubmittelpunkt angreifen) wie folgt aus:

$$\begin{aligned} M_{cr} &= C_1 * \frac{\pi^2 * EI_z}{L^2} * \sqrt{\frac{I_\omega}{I_z} + \frac{L^2 * GI_T}{\pi^2 * EI_z}} = \\ &= 1,320 * \frac{\pi^2 * 21000 * 2140}{500^2} * \sqrt{\frac{1249 * 10^3}{2140} + \frac{500^2 * 8100 * 89,3}{\pi^2 * 21000 * 2140}} = 73736 \text{ kNcm} \end{aligned}$$

— mit:

C_1 ... Beiwert zur Berücksichtigung der Momentenverteilung

$$C_1(\psi = 0,5) = 1,320$$

(aus ÖNORM B 1993-1-1: Tab. 3)

Einsetzen der analytischen Lösung für M_{cr} in (3.24) liefert folgendes Ergebnis:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{M_{pl,y,Rk}}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{77887}{73736}} = 1,028$$

zu Punkt b)

$$\lambda_1 = \pi * \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi * \sqrt{\frac{21000}{35,5}} = 76,4$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{N_{pl}}{N_{cr,z}}} = \frac{L_{cr,z}}{\lambda_1 * i_z} = \frac{500}{76,4 * 4,31} = 1,518$$

$$k_p = \frac{0,9}{\left[1 + \frac{1}{20} * \left(\frac{\bar{\lambda}_z * \lambda_1}{h/t_f}\right)^2\right]^{0,25}} = \frac{0,9}{\left[1 + \frac{1}{20} * \left(\frac{1,518 * 76,4}{50/1,6}\right)^2\right]^{0,25}} = 0,789$$

Anmerkung: Der Faktor 0,9 berücksichtigt die erhöhte Torsionssteifigkeit von Walzprofilen.

$$k_c = \frac{1}{1,33 - 0,33 * \psi} = \frac{1}{1,33 - 0,33 * 0,5} = 0,858$$


Load case	Factor f_M	Factor k_c
$M = \text{uniform}$ 	1,00	1,00
$M \begin{matrix} \nearrow \\ \searrow \end{matrix} \psi M$ $-1 \leq \psi \leq +1$	$1,25 - 0,1 \psi - 0,15 \psi^2$	$\frac{1}{1,33 - 0,33 \psi}$

Abbildung 3.40: Ermittlung der Faktoren f_M und k_c (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.6)

Somit ergibt sich die bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}_{LT}$ für das Biegedrillknicken wie folgt:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \bar{\lambda}_z * k_p * k_c = 1,518 * 0,789 * 0,858 = 1,029$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.2.3

• Imperfektionsfaktor α_{LT} für das Biegedrillknicken

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.2.3

Bei der Ermittlung des Imperfektionsfaktors α_{LT} für das Biegedrillknicken wird zunächst unterschieden, ob das Querschnittsverhältnis h/b größer oder kleiner als 1,2 ist, bzw. ob die Blechdicke des Flansches t_f über oder unter 40mm liegt.

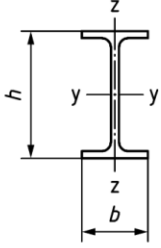
Cross-section		Limits		α_{LT}
Rolled I-sections		$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	$0,12 \sqrt{\frac{W_{el,y}}{W_{el,z}}}$ but: $\alpha_{LT} \leq 0,34$
			$t_f > 40 \text{ mm}$	$0,16 \sqrt{\frac{W_{el,y}}{W_{el,z}}}$ but: $\alpha_{LT} \leq 0,49$
		$h/b \leq 1,2$	—	$0,16 \sqrt{\frac{W_{el,y}}{W_{el,z}}}$ but: $\alpha_{LT} \leq 0,49$

Abbildung 3.41: Ermittlung des Imperfektionsfaktors α_{LT} (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.5)

Aus $h/b = 500/200 = 2,5 > 1,2$ und $t_f = 16\text{mm} < 40\text{mm}$ folgt:

$$\alpha_{LT} = 0,12 * \sqrt{\frac{W_{el,y}}{W_{el,z}}} \quad (3.26)$$

Der Wert für α_{LT} folgt durch Einsetzen von $W_{el,y}$ und $W_{el,z}$ in (3.26) mit:

$$\alpha_{LT} = 0,12 * \sqrt{\frac{W_{el,y}}{W_{el,z}}} = 0,12 * \sqrt{\frac{1930}{214}} = 0,36 > \underline{0,34} \rightarrow \alpha_{LT} = 0,34$$

— nach „EC3-alt“

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.2.3

Bei der Ermittlung des Imperfektionsfaktors α_{LT} für das Biegedrillknicken wurde unterschieden, ob das verwendete Profil gewalzt oder geschweißt ist und ob das Querschnittsverhältnis h / b größer oder kleiner als 2,0 ist.

Querschnitt	Grenzen	Biegedrillknicklinien
gewalztes I-Profil	$h/b \leq 2$	b
	$h/b > 2$	c
geschweißtes I-Profil	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d

Abbildung 3.42: Zuordnung der Knickspannungslinie (EN 1993-1-1-„alt“: Tab. 6.5)

Knicklinie	a	b	c	d
Imperfektionsbeiwert α_{LT}	0,21	0,34	0,49	0,76

Abbildung 3.43: Imperfektionsbeiwert α_{LT} (EN 1993-1-1-„alt“: Tab. 6.3)

Aus $h / b = 500 / 200 = 2,5 > 2,0$ folgt, dass für den Biegedrillknicknachweis die Knickspannungslinie c zu verwenden ist.

Ausweichen in Form von BDK: $c \rightarrow \alpha_{LT} = 0,49$

• **Momentenfaktor f_M für das Biegedrillknicken**

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.2.3

Die Ermittlung des Faktors f_M erfolgt ebenfalls entsprechend der Formeln aus Abbildung 3.40, mit dem für die vorliegende Biegemomentenverteilung zutreffenden Verhältnis der Randmomente ψ :

$$f_M = 1,25 - 0,10 * \psi - 0,15 * \psi^2 = 1,25 - 0,10 * 0,50 - 0,15 * 0,50^2 = 1,160$$

— mit:

$$\psi = 0,50$$

• **Abminderungsfaktor χ_{LT} für das Biegedrillknicken** **EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.2.3**

Bei der Ermittlung des Faktors ϕ_{LT} haben sich grundlegende Änderungen gegenüber „EC3-alt“ ergeben. Die Regelungen befinden sich in EN 1993-1-1: Pkt. 8.3.2.3. Die überarbeitete Formel in „EC3-neu“ berücksichtigt, wie in der Einleitung bereits beschrieben, den veränderlichen Momentenverlauf in Form von f_M , sowie den mechanisch wesentlichen Faktor $\bar{\lambda}_{LT}/\bar{\lambda}_z$.

$$\phi_{LT} = 0,5 * \left[1 + f_M * \left(\left(\frac{\bar{\lambda}_{LT}}{\bar{\lambda}_z} \right)^2 * \alpha_{LT} * (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right) \right] \quad (3.27)$$

$$\chi_{LT} = \frac{f_M}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - f_M * \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad (3.28)$$

Die für die Berechnung von ϕ_{LT} und χ_{LT} benötigten Variablen wurden bereits im vorigen Abschnitt berechnet und können direkt in (3.27) bzw. in (3.28) eingesetzt werden:

$$\phi_{LT} = 0,5 * \left[1 + 1,160 * \left(\left(\frac{1,029}{1,518} \right)^2 * 0,34 * (1,518 - 0,2) + 1,029^2 \right) \right] = 1,234$$

$$\chi_{LT} = \frac{1,160}{1,234 + \sqrt{1,234^2 - 1,160 * 1,029^2}} = 0,653$$

— nach „EC3-alt“

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.2.3

Der Abminderungsfaktor χ_{LT} war bisher definiert mit:

$$\phi_{LT} = 0,5 * [1 + \alpha_{LT} * (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2] \quad (3.29)$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad (3.30)$$

In EN 1993-1-1-„alt“: Pkt. 6.3.2.3(1) wurden folgende Werte für den Parameter β und die Plateaulänge $\bar{\lambda}_{LT,0}$ empfohlen:

$$\begin{aligned} \beta &= 0,75 \\ \bar{\lambda}_{LT,0} &= 0,4 \end{aligned}$$

Einsetzen der empfohlenen Werte in (3.29) bzw. in (3.30) ergibt:

$$\phi_{LT} = 0,5 * [1 + 0,49 * (1,029 - 0,4) + 0,75 * 1,029^2] = 1,051$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{1,051 + \sqrt{1,051^2 - 0,75 * 1,029^2}} = 0,622$$

Weiters war eine entsprechende Modifikation von χ_{LT} aufgrund einer begünstigenden Momentenverteilung (erfasst durch den Faktor f) gestattet:

$$f = 1 - 0,5 * (1 - k_c) * [1 - 2 * (\bar{\lambda}_{LT} - 0,8)^2] \quad (3.31)$$

$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f} \quad (3.32)$$

$$f = 1 - 0,5 * (1 - 0,858) * [1 - 2 * (1,029 - 0,8)^2] = 0,936 \leq 1,0$$

$$\chi_{LT,mod} = \frac{0,622}{0,936} = 0,665 \leq 1,0$$

• **Momentenbeiwerte C_{my} und C_{mLT}**

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.3(10)

Um die Momentenbeiwerte $C_{m,i}$ bestimmen zu können, wird der zum jeweils zutreffenden Stababschnitt zugehörige Biegemomentenverlauf M_y benötigt.

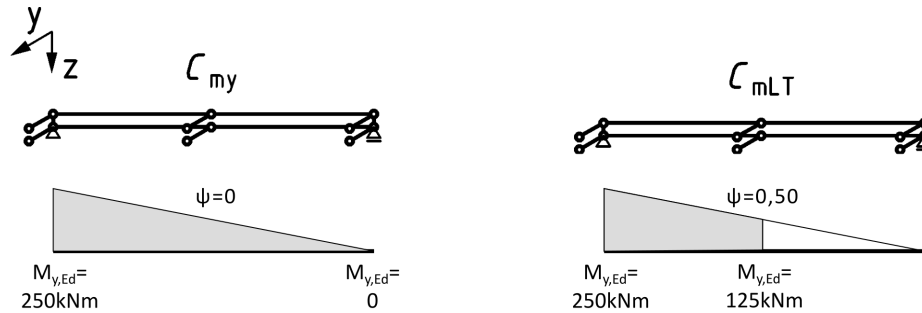


Abbildung 3.44: Relevante Stababschnitte und zugehörige Momentenverläufe zur Bestimmung der Momentenbeiwerte C_{my} und C_{mLT}

Wie aus Abbildung 3.44 ersichtlich muss zur Bestimmung von C_{my} die Gesamtlänge und für C_{mLT} der Bereich zwischen den Zwischenabstützungen mit der größeren Momentenbeanspruchung betrachtet werden.

Moment diagram	Range	C_{my} and C_{mz} and C_{mLT}
	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,6 + 0,4\psi \geq 0,4$

Abbildung 3.45: Ermittlung der äquivalenten Momentenbeiwerte (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.9)

$$C_{my} = 0,6 + 0,4 * \psi = 0,6 + 0,4 * 0 = 0,60 \quad \text{--- mit: } \psi = \frac{0}{250} = 0$$

$$C_{mLT} = 0,6 + 0,4 * \psi = 0,6 + 0,4 * 0,50 = 0,80 \quad \text{--- mit: } \psi = \frac{125}{250} = 0,50$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Anhang B

• Interaktionsfaktoren

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.3(8)

Zunächst ist durch das Abgrenzungskriterium (3.33) zu überprüfen, ob es sich beim vorliegenden offenen Querschnitt um ein verdrehweiches oder verdrehsteifes Profil handelt. Die Grenزشlankheit $\bar{\lambda}_{LT,lim}$ für verdrehsteife Profile ist gegeben durch:

$$\bar{\lambda}_{LT,lim} = \bar{\lambda}_{LT,0} * \sqrt{1 - \bar{\lambda}_z^2 * \chi_z} \quad (3.33)$$

Der Vergleich der Schlankheit für das Biegedrillknicken mit dem Abgrenzungskriterium nach (3.33) liefert:

$$\bar{\lambda}_{LT} = 1,029 > \bar{\lambda}_{LT,lim} = 0,4 * \sqrt{1 - 1,518^2 * 0,336} = 0,19$$

— mit:

$$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4$$

Damit ist das Profil unter der vorliegenden Belastung und Lagerung als verdrehweich einzustufen.

Um die Interaktionsfaktoren berechnen zu können, müssen zunächst die Ausnutzungsgrade n_y und n_z anhand der folgenden Gleichungen bestimmt werden:

$$n_y = \frac{N_{Ed}}{\chi_y * N_{Rk} / \gamma_{M1}} \quad (3.34)$$

$$n_z = \frac{N_{Ed}}{\chi_z * N_{Rk} / \gamma_{M1}} \quad (3.35)$$

Einsetzen in (3.34) und (3.35) liefert:

$$n_y = \frac{500}{0,874 * 4118 / 1,0} = 0,139$$

$$n_z = \frac{500}{0,336 * 4118 / 1,0} = 0,361$$

Die Interaktionsfaktoren werden anhand der Tabellen in den nachfolgenden Abbildungen ermittelt, wobei hier zwischen den jeweiligen Querschnittsklassen unterschieden werden muss.

Plastic cross-sectional properties Class 1, Class 2, Class 3 (with W_{ep} according to Annex B)	Elastic cross-sectional properties Class 3(with W_{el}), Class 4
For $\bar{\lambda}_y < 1,0$: $k_{yy} = C_{my}[1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) n_y]$	For $\bar{\lambda}_y < 1,0$: $k_{yy} = C_{my}(1 + 0,6 \bar{\lambda}_y n_y)$
For $\bar{\lambda}_y \geq 1,0$: $k_{yy} = C_{my}(1 + 0,8 n_y)$	For $\bar{\lambda}_y \geq 1,0$: $k_{yy} = C_{my}(1 + 0,6 n_y)$
$k_{yz} = 0,6 k_{zz}$, see Table 8.8	$k_{yz} = k_{zz}$, see Table 8.8
NOTE 1 See (9) for n_y .	
NOTE 2 See (10) and Table 8.9 for C_{my} .	

Abbildung 3.46: Ermittlung des Interaktionsfaktors k_{yy} (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.7)

Type of section	Plastic cross-sectional properties Class 1, Class 2, Class 3 (with W_{ep} according to Annex B)	Elastic cross-sectional properties Class 3(with W_{el}), Class 4
k_{zy}	Not susceptible to LT-buckling	$k_{zy} = 0,6 k_{yy}$ See Table 8.7.
	Susceptible to LT-buckling	For $\bar{\lambda}_z < 1,0$: $k_{zy} = 1 - \frac{0,1 \bar{\lambda}_z n_z}{C_{mLT} - 0,25}$ but $k_{zy} \leq 0,6 + \bar{\lambda}_z$ for $\bar{\lambda}_z < 0,4$
		For $\bar{\lambda}_z \geq 1,0$: $k_{zy} = 1 - \frac{0,1 n_z}{C_{mLT} - 0,25}$
k_{zz}	I-sections	For $\bar{\lambda}_z < 1,0$: $k_{zz} = C_{mz}[1 + (2 \bar{\lambda}_z - 0,6) n_z]$ For $\bar{\lambda}_z \geq 1,0$: $k_{zz} = C_{mz}(1 + 1,4 n_z)$
	Rectangular, circular or elliptical hollow sections	For $\bar{\lambda}_z < 1,0$: $k_{zz} = C_{mz}[1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) n_z]$ For $\bar{\lambda}_z \geq 1,0$: $k_{zz} = C_{mz}[1 + 0,8 n_z]$

Abbildung 3.47: Ermittlung des Interaktionsfaktors k_{zy} (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.8)

Da keine Momentenbelastung um die Achse z-z am System angreift, werden lediglich die Interaktionsfaktoren k_{yy} und k_{zy} benötigt. Diese errechnen sich gemäß der Abbildungen 3.46 und 3.47 wie folgt:

Für $\bar{\lambda}_y = 0,642 < 1,0$:

$$k_{yy} = C_{my} * [1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) * n_y] = 0,60 * [1 + (0,642 - 0,2) * 0,139] = 0,637$$

Für verdrehweichen Querschnitt, mit $\bar{\lambda}_z = 1,518 > 1,0$:

$$k_{zy} = 1 - \frac{0,1 * n_z}{C_{mLT} - 0,25} = 1 - \frac{0,1 * 0,361}{0,80 - 0,25} = 0,934$$

— nach „EC3-alt“

EN 1993-1-1-„alt“ Anhang B

Bei der Ermittlung der Interaktionsfaktoren gibt es keine Veränderungen zwischen „EC3-alt“ und „EC3-neu“. Das Alternativverfahren 2 aus EN 1993-1-1-„alt“: Anhang B wurde in den Haupttext aufgenommen und befindet sich in der Neuauflage in EN 1993-1-1: Pkt. 8.3.3(8).

• **Nachweis für Biegedrillknicken unter N_{Ed} und $M_{y,Ed}$ EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.3(5)**

Das Nachweisformat für den Stabilitätsnachweis unter Biegung $M_{y,Ed}$ mit Normalkraftbeanspruchung ist in EN 1993-1-1: Pkt. 8.3.3(5) durch die folgenden Gleichungen (3.36) und (3.37) getrennt für die beiden Ausweichrichtungen gegeben:

$$y - y : \frac{N_{Ed}}{\chi_y * \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} * \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} * \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0 \quad (3.36)$$

$$z - z : \frac{N_{Ed}}{\chi_z * \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} * \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} * \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0 \quad (3.37)$$

— mit: $\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}} = M_{pl,y,Rd}$

Zusatzmomente $\Delta M_{y,Ed}$ aus der Schwerpunktverschiebung zwischen Bruttoquerschnitt und effektivem Querschnitt ergeben sich nur bei Querschnitten der Klasse 4. Durch das Einsetzen aller ermittelten Unbekannten wird nun in (3.36) der Nachweis für Ausweichen um y-y und durch (3.37) für Ausweichen um z-z geführt:

$$y - y : \frac{500}{0,874 * 4118} + 0,637 * \frac{250}{0,653 * 778,87} = 0,452 \leq 1,0 \quad [0,446]$$

$$z - z : \frac{500}{0,336 * 4118} + 0,934 * \frac{250}{0,653 * 778,87} = 0,820 \leq 1,0 \quad [0,812]$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.3(4)

3.5 Stabilität monosymmetrischer Querschnitte unter Druck und Biegung

Gleich wie bei den doppelsymmetrischen Querschnitten wurden auch die für monosymmetrische Querschnitte bisher in ÖNORM B 1993-1-1: Anhang B enthaltenen Regelungen in das Hauptdokument aufgenommen, jedoch mit geringfügigen Modifikationen. Die Regelungen zur Bemessung von monosymmetrischen Querschnitten befinden sich nun in EN 1993-1-1-„neu“: Anhang C.

Monosymmetrische Querschnitte unterscheiden sich von doppelsymmetrischen Querschnitten sehr stark in der Versagensform. Vor allem betrifft das das Biegeknicken um die starke Achse sowie das Biegedrillknicken. Trotz der Unterschiede bilden die Bemessungsformeln für doppelsymmetrische Querschnitte die Basis für die Bemessung der monosymmetrischen Querschnitte, wobei gemäß DERLER [2020] folgende Modifikationen getroffen werden:

- a) Es ist der Abminderungsfaktor χ_{LT} für die jeweilige richtige Biegerichtung zu bestimmen. Hierfür muss die Einbausituation und die Wirkungsrichtung des Biegemoments berücksichtigt werden, um das ideale Biegedrillknickmoment M_{cr} und den zugehörigen Schlankheitsgrad $\bar{\lambda}_{LT}$ zu ermitteln. Per Definition ist jene Biegemomentenrichtung positiv, die eine Druckspannung im kleinen Gurt verursacht. Bei Querschnitten der Klasse 3 bzw. 4 ist zudem für die Berechnung der elastischen Querschnittstragfähigkeit $M_{y,el}$ das zum gedrückten Gurt zugehörige Widerstandsmoment ($W_{y,s}$ bei $+M$ bzw. $W_{y,l}$ bei $-M$; s . . . small flange, l . . . large flange) zu verwenden. Bei sich ändernder Biegebeanspruchungsrichtung entlang der Stabachse sind 2 Nachweissätze für die jeweiligen Werte für χ_{LT} mit dem zugehörigen betragsmäßig größten $M_{y,Ed}$ zu führen. Das Vorgehen entspricht hier stets dem Allgemeinen Fall (GC).
- b) Um das Tragverhalten von monosymmetrischen Querschnitten möglichst exakt erfassen zu können, gelten eigene Interaktionsfaktoren k_{yy} aus EN 1993-1-1: Tab. C.1 anstelle der vorgeschlagenen Werte für doppel-symmetrische Querschnitte. Diese Werte gelten sowohl für verdrehweiche als auch für verdrehsteife Querschnitte.
- c) Beim BDk-Nachweis von Stäben mit Druck und positivem Moment (Druck im kleineren Gurt) ist der Abminderungsfaktor χ_{LT} unter reiner Normalkraft anstelle des Knickabminderungsfaktors χ_z zu verwenden. Dies gilt jedoch nicht bei einem negativen Moment! In diesem Fall ist ergänzend zur Stabbemessungsformel für das Ausweichen um z-z ein BDk-Nachweis unter alleinigem Ansatz der Drucknormalkraft zu erbringen.

Die eben beschriebenen Änderungen werden in der nachfolgenden Abbildung 3.48 dargestellt.

Zusammenfassung der aktuell gültigen Regelungen aus „EC3-1-1-neu“

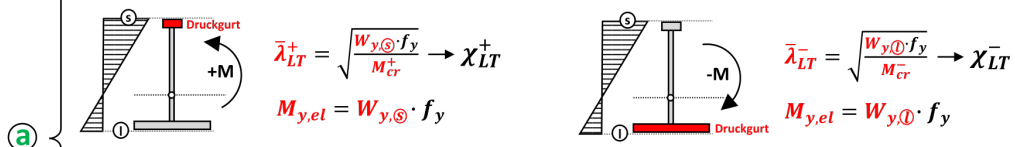
- Es gelten die Stabbemessungsformeln aus EN 1993-1-1: 8.3.3 - Formeln (8.87) und (8.88)

Ausweichrichtung y-y:
$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}} \leq 1,0 \quad \text{Formel (8.87)}$$

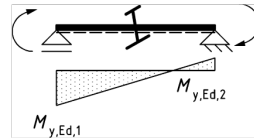
Ausweichrichtung z-z:
$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}} \leq 1,0 \quad \text{Formel (8.88)}$$

mit folgenden **Modifikationen:**

- χ_{LT} ist für die „richtige“ Biegerichtung zu bestimmen (χ_{LT}^+ für +M oder χ_{LT}^- für -M)
- für elastische Querschnitte ist $M_{y,Rk} = M_{y,el}$ für den maßgebenden Gurt (Druckgurt) zu bestimmen



- bei wechselndem Vorzeichen des Biegemomentes entlang des Stabes sind **zwei getrennte Nachweise** mit einerseits χ_{LT}^+ bzw. andererseits χ_{LT}^- zu führen



- χ_{LT} ist nach dem „Allgemeinen Fall“ („GC“) zu ermitteln

- Es sind **modifizierte**, an das für monosymmetrische Querschnitte charakteristische Tragverhalten angepasste **Interaktionsfaktoren k_{yy}** zu verwenden:

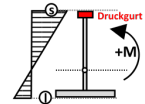
b

	plastische Querschnittswerte der Klassen 1,2 sowie 3 ($W_{pl,y}$)	elastische Querschnittswerte der Klassen 3 ($W_{el,y}$) und 4		plastische Querschnittswerte der Klassen 1,2 sowie 3 ($W_{pl,y}$)	elastische Querschnittswerte der Klassen 3 ($W_{el,y}$) und 4
$\bar{\lambda}_y < 1,0$	$C_{my} \cdot [1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \cdot \eta_y]$	$C_{my} \cdot (1 + 0,6 \cdot \bar{\lambda}_y \cdot \eta_y)$	→	$C_{my} \cdot [1 + 2(\bar{\lambda}_y - 0,2) \cdot \eta_y]$	$C_{my} \cdot (1 + \bar{\lambda}_y \cdot \eta_y)$
$\bar{\lambda}_y \geq 1,0$	$C_{my} \cdot (1 + 0,8 \cdot \eta_y)$	$C_{my} \cdot (1 + 0,6 \cdot \eta_y)$		$C_{my} \cdot (1 + 1,6 \cdot \eta_y)$	$C_{my} \cdot (1 + \eta_y)$

- Werte gelten für verdrehsteife und verdrehweiche Stäbe

- Bei **verdrehweichen Stäben** mit Druck im kleineren Flansch (+M) ist der Faktor χ_z durch χ_{TF} in Formel (8.88) zu ersetzen:

$$\chi_{TF} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}} \leq 1,0$$



- Bei **verdrehweichen Stäben** mit Druck im größeren Flansch (-M) ist **ergänzend** zu Formel (8.88) ein BDK-Nachweis mit χ_{TF} unter N-alleine zu erbringen:

+ zusätzlich:
$$\frac{N_{Ed}}{\chi_{TF} \cdot N_{Rk}} \leq 1,0$$

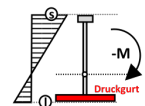


Abbildung 3.48: Zusammenfassung der Änderungen bei der Stabmessung von monosymmetrischen Querschnitten

3.5.1 Beispiel: Biegedrillknicken monosymmetrischer Querschnitte unter Biegemoment $M_{y,Ed}$ und Drucknormalkraft N_{Ed}

Gegeben sei der in Abbildung 3.49 dargestellte Biegeträger, bestehend aus einem monosymmetrischen, modifizierten IPE-500-Profil der Stahlgüte S235 mit einer Spannweite von 8m. An den Enden ist das Profil jeweils durch Gabellagerungen gehalten und in Feldmitte zusätzlich durch eine seitliche Zwischenabstützung sowohl gegen Ausweichen um z-z, als auch gegen Verdrehung um x-x gehindert. Als Beanspruchung erfährt das System ein auflagerseitig angreifendes Einzelmoment von $M_{y,Ed} = 150kNm$ sowie eine konstante Drucknormalkraft von $N_{Ed} = 300kN$.

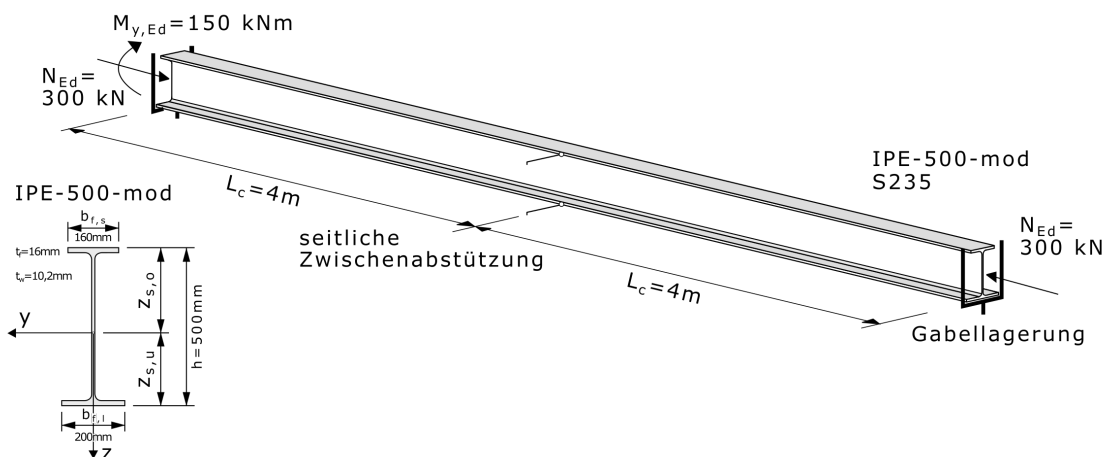


Abbildung 3.49: Statisches System, Belastung und Querschnitt

Tabelle 3.10 zeigt die zutreffenden Material- und Querschnittskennwerte des vorliegenden modifizierten IPE-500-Profiles:

Tabelle 3.10: Material- und Querschnittskennwerte IPE-500-mod

$f_y = 23,5kN/cm^2$	$A = 109,6cm^2$	$\gamma_{M,0} = \gamma_{M,1} = 1,0$	$r = 2,1cm$
$h = 500mm$	$b_l = 200mm$	$b_s = 160mm$	$t_w = 10,2mm$
$t_{f,l} = 16mm$	$t_{f,s} = 16mm$	$i_y = 20,09cm$	$i_z = 3,85cm$
$I_y = 44229,25cm^4$	$I_z = 1621,15cm^4$	$z_{s,0} = 26,42cm$	$z_{s,u} = 23,58cm$

Anmerkung: Die Ermittlung des Schwerpunktes und der Flächenträgheitsmomente erfolgte mit AUTOCAD 2019 unter Erfassung der Ausrundungsradien. Lediglich die bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}_{TF}$ wurde ohne Berücksichtigung der Ausrundungsradien bestimmt mit:

$$i_y^* = 20,02cm \quad i_z^* = 3,92cm \quad z_{s,0}^* = 26,47cm$$

Querschnittsklassifizierung

EN 1993-1-1 Pkt. 7.5

Tabelle 3.11 zeigt die für das modifizierte IPE-500-Profil zutreffenden Werte für c und t des Steg- bzw. Flanschblechs. Der Wert c steht hierbei für die ungestützte Länge des gedrückten Blechs, t ist die zugehörige Blechdicke.

Tabelle 3.11: modifiziertes IPE-500-Profil: Werte für c und t bzw. c/t

IPE-500-mod	c [mm]	t [mm]	c/t [-]
Steg	426	10,2	41,76
Druckflansch	53,9	16	3,37

Hinweis: Geänderte Klassifizierungsgrenzwerte für beidseitig gestützte Querschnittsteile.

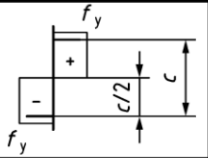
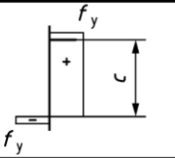
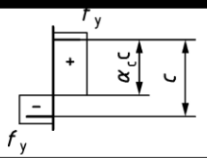
Stress distribution in parts (compression positive)			
Class 1	$c/t \leq 72 \varepsilon$	$c/t \leq 28 \varepsilon$	when $\alpha_c > 0,5$: $c/t \leq \frac{126 \varepsilon}{5,5 \alpha_c - 1}$ when $\alpha_c \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{36 \varepsilon}{\alpha_c}$
Class 2	$c/t \leq 83 \varepsilon$	$c/t \leq 34 \varepsilon$	when $\alpha_c > 0,5$: $c/t \leq \frac{188 \varepsilon}{6,53 \alpha_c - 1}$ when $\alpha_c \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5 \varepsilon}{\alpha_c}$

Abbildung 3.50: Klassifizierungsgrenzwerte Stegblech (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 7.3)

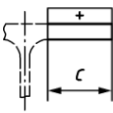
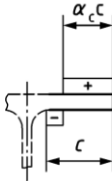
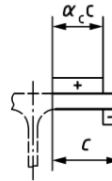
Stress distribution in parts (compression positive)			
Class 1	$c/t \leq 9 \varepsilon$	$c/t \leq \frac{9 \varepsilon}{\alpha_c}$	$c/t \leq \frac{9 \varepsilon}{\alpha_c \sqrt{\alpha_c}}$
Class 2	$c/t \leq 10 \varepsilon$	$c/t \leq \frac{10 \varepsilon}{\alpha_c}$	$c/t \leq \frac{10 \varepsilon}{\alpha_c \sqrt{\alpha_c}}$

Abbildung 3.51: Klassifizierungsgrenzwerte Flanschblech (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 7.3)

Zunächst ist die Lage der plastischen Nulllinie, sowie in weiterer Folge das plastische Widerstandsmoment W_{pl} zu bestimmen. Die plastische Nulllinie (PNL) wird über das horizontale Kräftegleichgewicht $F_c = F_t$ und somit über die notwendige Gleichheit von druck- und zugbeanspruchter Profilfläche bestimmt. Abbildung 3.52 stellt die Geometrie- verhältnisse mit den eingetragenen Teilflächeninhalten und den zugehörigen Nulllinien- abständen dar.

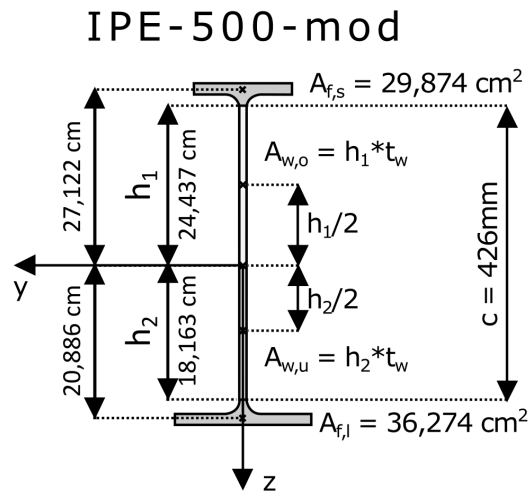


Abbildung 3.52: Geometrie des Profils und Lage der PNL

— Lage der PNL

$$\begin{aligned}
 A_{f,s} + A_{w,o} &\stackrel{!}{=} A_{f,l} + A_{w,u} \\
 29,874 + 1,02 * h_1 &\stackrel{!}{=} 36,274 + (42,6 - h_1) * 1,02 \\
 \rightarrow h_1 &= 24,437 \text{ cm} \\
 \rightarrow h_2 &= 42,6 - 24,437 = 18,163 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

Das plastische Widerstandsmoment ergibt sich aus der Summe der statischen Momente S_y , jeweils bezogen auf die Höhe der plastischen Nulllinie.

— plastische Widerstandsmoment $W_{pl,y}$

$$W_{pl,y} = S_{y,o} + S_{y,u} = 1114,80 + 925,86 = 2040,66 \text{ cm}^3$$

— mit:

$$\begin{aligned}
 S_{y,o} &= 29,874 * 27,122 + \frac{24,437^2}{2} * 1,02 = 1114,80 \text{ cm}^3 \\
 S_{y,u} &= 36,274 * 20,886 + \frac{18,163^2}{2} * 1,02 = 925,86 \text{ cm}^3
 \end{aligned}$$

Dadurch lässt sich nun die Verhältniszahl α_c aufgrund der plastischen Spannungsverteilung bestimmen. Die Kennzeichnung *) in Abbildung 3.53 bedeutet, dass die Einwirkungen bis zum Erreichen der Fließgrenze gesteigert wurden.

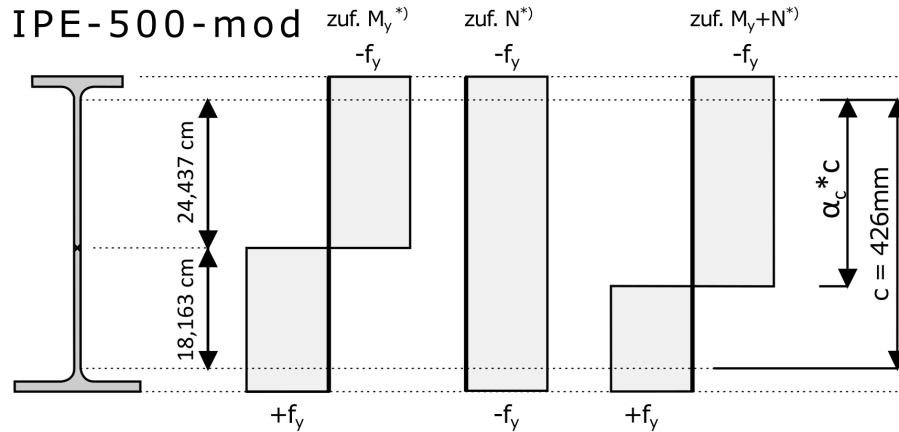


Abbildung 3.53: Spannungsverteilung

Die Lage der plastischen Nulllinie bei M/N -Interaktion lässt sich für doppelt-symmetrische I-Profile über die in EN 1993-1-1: Tab. 7.3 angegebene Gleichung für den Lageparameter α_c bestimmen. Die Gleichung für α_c lässt sich durch Aufspalten wie folgt interpretieren:

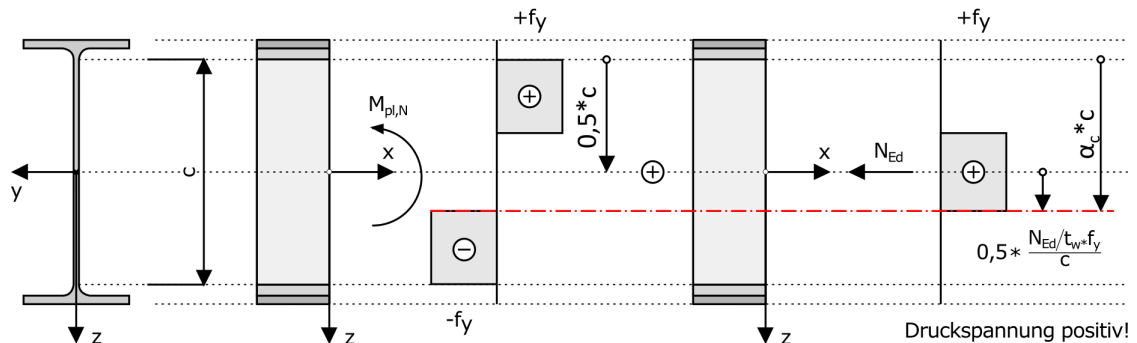


Abbildung 3.54: Erläuterungen zu α_c

$$\alpha_c = 0,5 * \left(1 + \frac{N_{Ed}}{c * t_w * f_y}\right) = 0,5^{(1)} + 0,5^{(2)} * \frac{N_{Ed}}{c * t_w * f_y}$$

— mit:

(1) ... relative Lage der plastischen Nulllinie im Steg bei reiner Biegung

(2) ... relative Verschiebung der plastischen Nulllinie bei zusätzlich einwirkender Normalkraftbeanspruchung (Druckkraft positiv einzusetzen!)

Im Fall von monosymmetrischen I-Profilen (I-Profile mit unterschiedlichen Gurten) bedarf es einer Modifikation von Anteil ⁽¹⁾. Hier fällt die Lage der Flächenhalbierenden (und somit der PNL bei reiner Biegung) nicht mit der Stegmitte ($\alpha_c = 0,5$) zusammen, sondern beträgt, relativ von der Stegoberkante gemessen:

$$\frac{h_1}{c} = \frac{24,437}{42,60} = 0,574$$

Dadurch ergibt sich die Verhältniszahl α_c wie folgt:

$$\alpha_c = 0,574 + 0,5 * \frac{300}{42,6 * 1,02 * 23,5} = 0,721 > 0,5$$

Mit dem Materialparameter $\epsilon = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1,0$ für S235 ergibt sich die Querschnittseinteilung wie folgt:

Steg:

$$\frac{c}{t} = 41,76 \leq \frac{126 * \epsilon}{5,5 * \alpha_c - 1} = \frac{126 * 1,0}{5,5 * 0,721 - 1} = 42,49 \rightarrow QK1$$

Flansch:

$$\frac{c}{t} = 3,37 \leq 9 * \epsilon = 9 * 1,0 = 9,0 \rightarrow QK1$$

Die Querschnittsklasse des Gesamtquerschnitts ergibt sich aus der höchsten Querschnittsklasse der einzelnen Blechteile (hier: Steg- bzw. Gurtblech). Da sowohl Steg- als auch Gurtblech in Querschnittsklasse 1 fallen, ist der vorhandene modifizierte IPE-500 für die vorliegende Belastung (Druck und Biegung) QKL1 zuzuordnen. Somit können plastische Widerstandsgrößen verwendet werden.

— nach „EC3-alt“

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 5.5

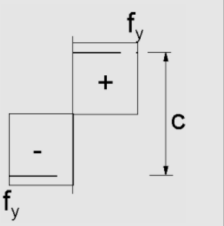
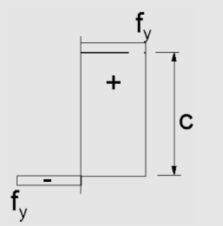
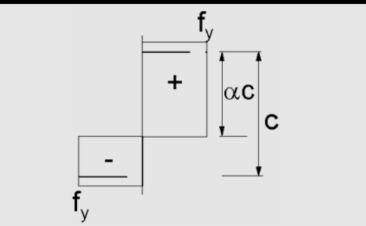
Spannungsverteilung über Querschnittsteile (Druck positiv)			
1	$clt \leq 72\epsilon$	$clt \leq 33\epsilon$	für $\alpha > 0,5$: $clt \leq \frac{396\epsilon}{13\alpha - 1}$ für $\alpha \leq 0,5$: $clt \leq \frac{36\epsilon}{\alpha}$
2	$clt \leq 83\epsilon$	$clt \leq 38\epsilon$	für $\alpha > 0,5$: $clt \leq \frac{456\epsilon}{13\alpha - 1}$ für $\alpha \leq 0,5$: $clt \leq \frac{41,5\epsilon}{\alpha}$

Abbildung 3.55: Klassifizierungsgrenzwerte des Stegblechs (Auszug aus EN 1993-1-1-„alt“: Tab. 5.2)

Steg:

$$\frac{c}{t} = 41,76 \leq \frac{396 * \epsilon}{13 * \alpha - 1} = \frac{396 * 1,0}{13 * 0,721 - 1} = 47,29 \rightarrow QK1$$

Flansch:

$$\frac{c}{t} = 3,37 \leq 9 * \epsilon = 9 * 1,0 = 9,0 \rightarrow QK1$$

→ Gesamtquerschnitt: Klasse 1

Biegedrillknicknachweis

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.3

Aufgrund der Lagerungsverhältnisse und dem monosymmetrischen Querschnitt, sowie der Kombination aus Drucknormalkraft- und Biegemomentenbeanspruchung (mit Druck im kleineren Flansch), ist ein Biegedrillknickversagen in Form von seitlichem Ausweichen um die schwache Querschnittsachse z-z zwischen den seitlichen Abstützungen über eine Länge von 4m bzw. ein Biegeknickversagen um y-y mit BDK-Effekt zwischen den seitlichen Abstützungen nachzuweisen. (siehe Abbildung 3.56)

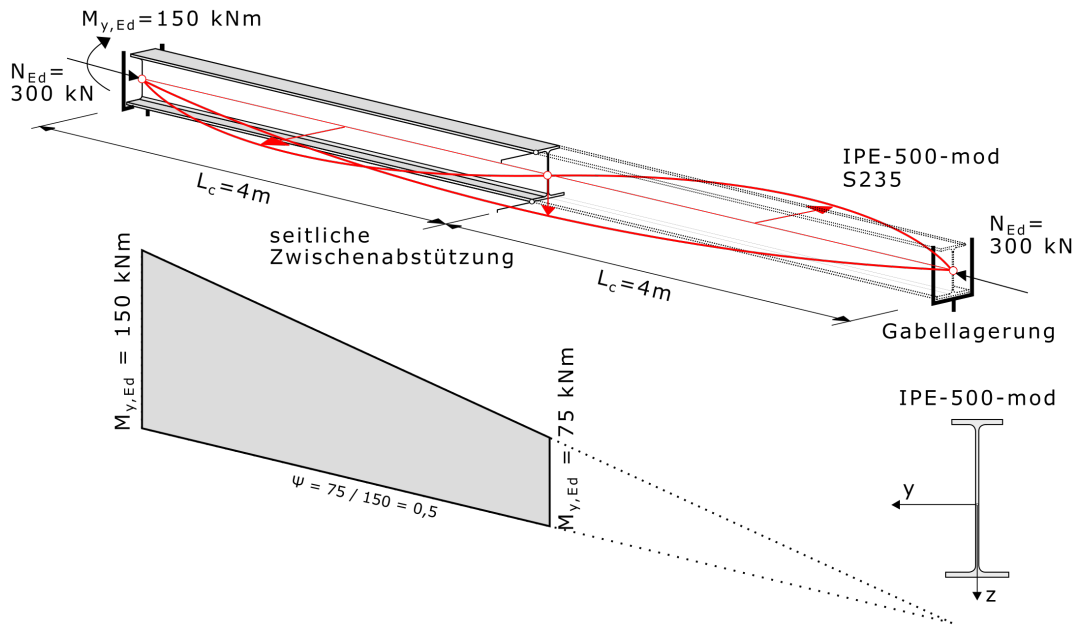


Abbildung 3.56: Momentenverteilung und mögliche Versagensformen

Der für den BDK-Nachweis maßgebende Stababschnitt ist in Abbildung 3.56 grau hinterlegt. Da die jeweiligen Abstände zwischen den seitlichen Halterungen gleich groß sind, ergibt sich der maßgebende Abschnitt somit rein aufgrund der Größe der Biegemomentenbeanspruchung. Da die Biegelinie der Knickeigenform (in Abbildung 3.56 rot eingezeichnet) Wendepunkte in den Punkten der seitlichen Stützungen hat, beträgt der β -Faktor gleich 1,0 (Euler-Fall 2).

$$L_{cr,y} = L_{c,y} * \beta = 800\text{cm}$$

$$L_{cr,z} = L_{cr,LT} = L_{c,z} * \beta = 400\text{cm}$$

• Schlankheitsgrade $\bar{\lambda}_y$ und $\bar{\lambda}_z$ für das Biegeknicken

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.1.2

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{N_{pl}}{N_{cr,y}}} = \frac{L_{cr,y}}{i_y * \lambda_1} = \frac{800}{20,02 * 93,9} = 0,426$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{N_{pl}}{N_{cr,z}}} = \frac{L_{cr,z}}{i_z * \lambda_1} = \frac{400}{3,85 * 93,9} = 1,106$$

— mit:

$$\lambda_1 = \pi * \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi * \sqrt{\frac{21000}{23,5}} = 93,9$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.1.3

• Imperfektionsfaktoren α_y und α_z für das Biegeknicken EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.1.3

Bei der Ermittlung der Imperfektionsfaktoren α für das Biegeknicken wird zunächst unterschieden, ob das Querschnittsverhältnis h/b größer oder kleiner als 1,2 ist, bzw. ob die Blechdicke des Flansches t_f über oder unter dem jeweiligen Grenzwert liegt und zuletzt welche Stahlgüte das Profil aufweist. Als Wert b ist die Breite des kleineren Flansches (b_{min}) zu verwenden.

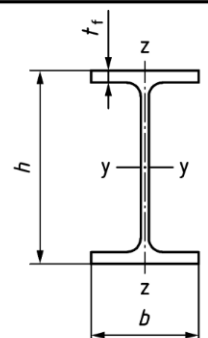
Cross-section	Limits	Buckling about axis	Buckling curve		
			S235 S275 S355 S420	S460 Up to S700 inclusive	
	$h/b > 1,2$	y-y z-z	$t_f \leq 40$ mm	a b	a ₀ a
			$t_f > 40$ mm	b c	a b
	$h/b \leq 1,2$	y-y z-z	$t_f \leq 100$ mm	b c	a b
			$t_f > 100$ mm	d d	c c

Abbildung 3.57: Ermittlung der Knickspannungslinie (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.3)

Buckling curve	a ₀	a	b	c	d
Imperfection factor α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Abbildung 3.58: Zugehörige Werte der Imperfektionsfaktoren (EN 1993-1-1: Tab. 8.2)

Aus $h/b = 500/160 = 3,125 > 1,2$ und $t_f = 16\text{mm} < 40\text{mm}$ folgt:

Ausweichen um y-y: $a \rightarrow \alpha_y = 0,21$

Ausweichen um z-z: $b \rightarrow \alpha_z = 0,34$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.1.2

• **Abminderungsfaktoren χ_y und χ_z für das Biegeknicken EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.1.3**

$$\phi = 0,5 * [1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \quad (3.38)$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad (3.39)$$

Einsetzen der bezogenen Schlankheiten und der Imperfektionsfaktoren in die Gleichungen (3.38) und (3.39) liefert die Werte für ϕ_i und die Knickabminderungsfaktoren χ_i :

$$\phi_y = 0,5 * [1 + 0,21 * (0,426 - 0,2) + 0,426^2] = 0,614$$

$$\chi_y = \frac{1}{0,614 + \sqrt{0,614^2 - 0,426^2}} = 0,946$$

$$\phi_z = 0,5 * [1 + 0,34 * (1,106 - 0,2) + 1,106^2] = 1,266$$

$$\chi_z = \frac{1}{1,266 + \sqrt{1,266^2 - 1,106^2}} = 0,532$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.1.2

• **Schlankheitsgrad $\bar{\lambda}_{LT}$ für das Biegedrillknicken**

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.2.2

Bei monosymmetrischen Querschnitten ist auf die Belastungsrichtung zu achten (Druck im kleineren oder größeren Flansch). Erzeugt das Biegemoment wie hier eine Druckkraft im kleineren Flansch, so wird dies in EC3 als M_{cr}^+ bezeichnet. Das kritische Biegemoment wird mithilfe von LTBeam ermittelt und beträgt:

$$M_{cr}^+ = 760,76 \text{ kNm}$$

Hinweis: In ÖNORM B 1993-1-1: Pkt. 8.7.2.a (2) werden auch Formeln zur Berechnung des idealen Verzweigungsmoments monosymmetrischer Querschnitte bereitgestellt.

Das plastische Widerstandsmoment wurde bereits zuvor bestimmt. Dadurch kann die bezogene Schlankheit für Biegedrillknicken ermittelt werden:

$$\bar{\lambda}_{LT}^+ = \sqrt{\frac{M_{pl,y,Rk}}{M_{cr}^+}} = \sqrt{\frac{47955,51}{76076}} = 0,794$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.2.3

• **Imperfektionsfaktor α_{LT} für das Biegedrillknicken**

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.2.3

Bei der Ermittlung des Imperfektionsfaktors α_{LT} für Biegedrillknicken bei einfach-symmetrischen Querschnitten ist zwischen geschweißten und gewalzten Profilen zu differenzieren und im Weiteren das Querschnittsverhältnis h/b_{min} entscheidend.

Buckling curve	a ₀	a	b	c	d
Imperfection factor α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Abbildung 3.59: Zugehörige Werte des Imperfektionsfaktors α_{LT} (EN 1993-1-1: Tab. 8.2)

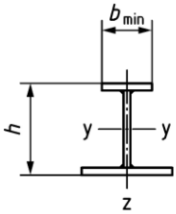
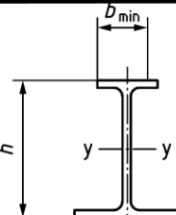
Cross-section		Limits	Buckling curve
Welded I-sections ^a		$h/b_{\min} \leq 2,0$	c
		$h/b_{\min} > 2,0$	d
Rolled I-sections ^a		$h/b_{\min} \leq 2,0$	a
		$h/b_{\min} > 2,0$	b

Abbildung 3.60: Zuordnung der Knickspannungslinie (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.4)

Aus $h/b_{\min} = 500 / 160 = 3,125 > 2,0$ folgt, dass für den Biegedrillknicknachweis die Knickspannungslinie b zu verwenden ist.

Ausweichen in Form von BDK: $b \rightarrow \alpha_{LT} = 0,34$

In „EC3-alt“ ident, gemäß

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.2.3

• Abminderungsfaktor χ_{LT} für das Biegedrillknicken EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.1.3

Gemäß EN 1993-1-1: Pkt. 8.3.2.3(2) sollen für nicht-doppelt-symmetrische Querschnitte die Formeln für die Abminderungsfaktoren aus Punkt 8.3.1.3(1) verwendet werden. Die Formeln wurden als Gleichungen (3.38) und (3.39) bereits angeführt. Es handelt sich hierbei um die BDK-Linien des „Allgemeinen Falls“, deren Definition jener des Stabknickens (seitlichen Ausweichens des Druckgurtes ohne Aktivierung des Torsionswiderstands) entspricht. Das Einsetzen der bezogenen Schlankheit $\bar{\lambda}_{LT}$ und des Imperfektionsfaktors α_{LT} in diese Gleichungen liefert die Werte für ϕ_{LT} und den Abminderungsfaktor χ_{LT} für das Biegedrillknicken:

$$\phi_{LT} = 0,5 * [1 + 0,34 * (0,794 - 0,2) + 0,794^2] = 0,916$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0,916 + \sqrt{0,916^2 - 0,794^2}} = 0,728$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.1.2

• Momentenbeiwerte C_{my} und C_{mLT}

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.3(10)

Um die Momentenbeiwerte $C_{m,i}$ bestimmen zu können, wird der zum jeweils zutreffenden Stababschnitt zugehörige Biegemomentenverlauf M_y benötigt.

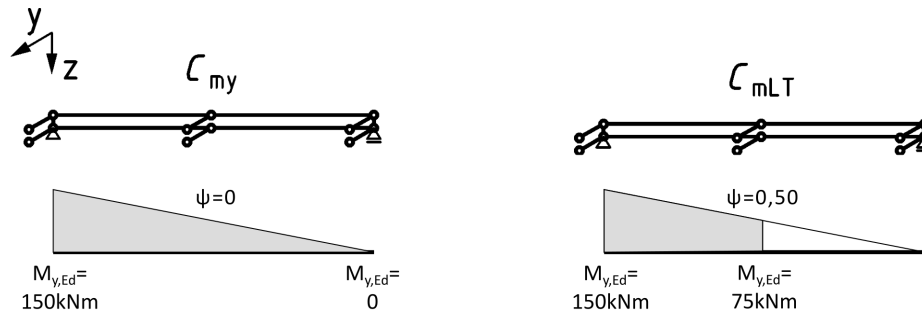


Abbildung 3.61: Relevante Stababschnitte und zugehörige Momentenverläufe zur Bestimmung der Momentenbeiwerte C_{my} und C_{mLT}

Wie aus Abbildung 3.61 ersichtlich muss zur Bestimmung von C_{my} die Gesamtlänge und für C_{mLT} der Bereich zwischen den Zwischenabstützungen mit der größeren Momentenbeanspruchung betrachtet werden.


Moment diagram	Range	C_{my} and C_{mz} and C_{mLT}
	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,6 + 0,4\psi \geq 0,4$

Abbildung 3.62: Ermittlung der äquivalenten Momentenbeiwerte (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.9)

$$C_{my} = 0,6 + 0,4 * \psi = 0,6 + 0,4 * 0 = 0,60 \quad \text{— mit: } \psi = \frac{0}{150} = 0$$

$$C_{mLT} = 0,6 + 0,4 * \psi = 0,6 + 0,4 * 0,50 = 0,80 \quad \text{— mit: } \psi = \frac{75}{150} = 0,50$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Anhang B

• Interaktionsfaktoren

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.3(8)

Zunächst ist durch das Abgrenzungskriterium (3.40) zu überprüfen, ob es sich beim vorliegenden offenen Querschnitt um ein verdrehweiches oder verdrehsteifes Profil handelt. Die Grenزشlankheit $\bar{\lambda}_{LT,lim}$ für verdrehsteife Profile ist gegeben durch:

$$\bar{\lambda}_{LT,lim} = \bar{\lambda}_{LT,0} * \sqrt{1 - \bar{\lambda}_z^2 * \chi_z} \quad (3.40)$$

Der Vergleich der Schlankheit für das Biegedrillknicken mit dem Abgrenzungskriterium nach (3.40) liefert:

$$\bar{\lambda}_{LT} = 0,874 > \bar{\lambda}_{LT,lim} = 0,4 * \sqrt{1 - 1,106^2 * 0,532} = 0,236$$

— mit:

$$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4$$

Damit ist das Profil unter der vorliegenden Belastung und Lagerung als verdrehweich einzustufen.

Um die Interaktionsfaktoren berechnen zu können, müssen zunächst die Ausnutzungsgrade n_y und n_z anhand der folgenden Gleichungen bestimmt werden:

$$n_y = \frac{N_{Ed}}{\chi_y * N_{Rk} / \gamma_{M1}} \quad (3.41)$$

$$n_z = \frac{N_{Ed}}{\chi_z * N_{Rk} / \gamma_{M1}} \quad (3.42)$$

Einsetzen in (3.41) und (3.42) liefert:

$$n_y = \frac{300}{0,946 * 2575,6 / 1,0} = 0,123$$

$$n_z = \frac{300}{0,532 * 2575,6 / 1,0} = 0,219$$

Die Interaktionsfaktoren werden anhand der Tabellen in den nachfolgenden Abbildungen ermittelt, wobei hier zwischen den jeweiligen Querschnittsklassen unterschieden werden muss.

Anmerkung: Gemäß EN 1993-1-1: Anhang C sind für monosymmetrische Querschnitte die modifizierten Interaktionsfaktoren k_{yy} aus Tab. C.1 zu verwenden.

Plastic cross-sectional properties Class 1, Class 2		Elastic cross-sectional properties Class 3, Class 4	
For $\bar{\lambda}_y < 1,0$:	$k_{yy} = C_{my}[1 + 2(\bar{\lambda}_y - 0,2) n_y]$	For $\bar{\lambda}_y < 1,0$:	$k_{yy} = C_{my}(1 + \bar{\lambda}_y n_y)$
For $\bar{\lambda}_y \geq 1,0$:	$k_{yy} = C_{my}(1 + 1,6n_y)$	For $\bar{\lambda}_y \geq 1,0$:	$k_{yy} = C_{my}(1 + n_y)$

Abbildung 3.63: Ermittlung des Interaktionsfaktors k_{yy} (EN 1993-1-1: Tab. C.1)

	Type of section	Plastic cross-sectional properties Class 1, Class 2, Class 3 (with W_{ep} according to Annex B)	Elastic cross-sectional properties Class 3(with W_{el}), Class 4
k_{zy}	Not susceptible to LT-buckling	$k_{zy} = 0,6 k_{yy}$ See Table 8.7.	$k_{zy} = 0,8 k_{yy}$ See Table 8.7.
	Susceptible to LT-buckling	For $\bar{\lambda}_z < 1,0$: $k_{zy} = 1 - \frac{0,1 \bar{\lambda}_z n_z}{C_{mLT} - 0,25}$ but $k_{zy} \leq 0,6 + \bar{\lambda}_z$ for $\bar{\lambda}_z < 0,4$	For $\bar{\lambda}_z < 1,0$: $k_{zy} = 1 - \frac{0,05 \bar{\lambda}_z n_z}{C_{mLT} - 0,25}$
		For $\bar{\lambda}_z \geq 1,0$: $k_{zy} = 1 - \frac{0,1 n_z}{C_{mLT} - 0,25}$	For $\bar{\lambda}_z \geq 1,0$: $k_{zy} = 1 - \frac{0,05 n_z}{C_{mLT} - 0,25}$
k_{zz}	I-sections	For $\bar{\lambda}_z < 1,0$: $k_{zz} = C_{mz}[1 + (2 \bar{\lambda}_z - 0,6) n_z]$ For $\bar{\lambda}_z \geq 1,0$: $k_{zz} = C_{mz}(1 + 1,4 n_z)$	For $\bar{\lambda}_z < 1,0$: $k_{zz} = C_{mz}(1 + 0,6 \bar{\lambda}_z n_z)$
	Rectangular, circular or elliptical hollow sections	For $\bar{\lambda}_z < 1,0$: $k_{zz} = C_{mz}[1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) n_z]$ For $\bar{\lambda}_z \geq 1,0$: $k_{zz} = C_{mz}[1 + 0,8 n_z]$	For $\bar{\lambda}_z \geq 1,0$: $k_{zz} = C_{mz}(1 + 0,6 n_z)$

Abbildung 3.64: Ermittlung des Interaktionsfaktors k_{zy} (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.8)

Da keine Momentenbelastung um die Achse z-z am System angreift, werden lediglich die Interaktionsfaktoren k_{yy} und k_{zy} benötigt. Diese errechnen sich gemäß den Abbildungen 3.63 und 3.64 wie folgt:

Für $\bar{\lambda}_y = 0,426 < 1,0$:

$$k_{yy} = C_{my} * [1 + 2 * (\bar{\lambda}_y - 0,2) * n_y] = 0,60 * [1 + 2 * (0,426 - 0,2) * 0,123] = 0,633$$

Für verdrehweichen Querschnitt, mit $\bar{\lambda}_z = 1,106 > 1,0$:

$$k_{zy} = 1 - \frac{0,1 * n_z}{C_{mLT} - 0,25} = 1 - \frac{0,1 * 0,219}{0,80 - 0,25} = 0,960$$

— nach „EC3-alt“

EN 1993-1-1-„alt“ Anhang B

Bei der Ermittlung der Interaktionsfaktoren gibt es keine Veränderungen zwischen „EC3-alt“ und „EC3-neu“. Das Alternativverfahren 2 aus EN 1993-1-1: Anhang B wurde in den Haupttext aufgenommen und befindet sich in der Neuauflage in EN 1993-1-1: Pkt. 8.3.3(8). Zusätzlich muss auch hier ÖNORM B 1993-1-1: Anhang A berücksichtigt werden, um dem besonderen Tragverhalten von mono-symmetrischen Querschnitten Rechnung zu tragen.

• **Abminderungsfaktor χ_{TF} für BDK unter N-alleine** **EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.3(7)**

Für verdrehweiche, mono-symmetrische Querschnitte mit Druck im kleineren Flansch wird in EN 1993-1-1: Pkt. 8.3.3(7) empfohlen, den Abminderungsfaktor χ_z (Biegeknicken um z-z) durch χ_{TF} (Biegedrillknicken um den Schubmittelpunkt infolge N) zu ersetzen, da dieser die Versagensform von verdrehweichen, mono-symmetrischen Querschnitten besser beschreibt. Zur Ermittlung der bezogenen Schlankheit λ_{TF} wird in EN 1993-1-1: Pkt. 8.3.1.2(1) auf den Europäischen Technischen Bericht CEN TR 1993-1-103 verwiesen. Eine alternative Lösung wird in ÖNORM B 1993-1-1: Abschnitt 8.7.1 (Nationales Anwendungsdokument zu „EC3-alt“) beschrieben. Die Berechnung erfolgt anhand von Gleichung (3.43):

$$\bar{\lambda}_{TF} = \bar{\lambda}_z * \sqrt{\frac{c^2 + i_o^2}{2 * c^2} * \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4 * c^2 * i_p^2}{(c^2 + i_o^2)^2}}\right)} \quad (3.43)$$

Anmerkung: Für die Ermittlung der bezogenen Schlankheit $\bar{\lambda}_{TF}$ werden die Ausrundungen vernachlässigt.

— mit:

$$i_p = \sqrt{i_y^2 + i_z^2} = \sqrt{20,02^2 + 3,92^2} = 20,40 \text{ cm}$$

$$i_o = \sqrt{i_p^2 + z_o^2}$$

z_o steht für den Abstand des Schwerpunktes vom Schubmittelpunkt. Die Lage des Schubmittelpunktes berechnet sich wie folgt:

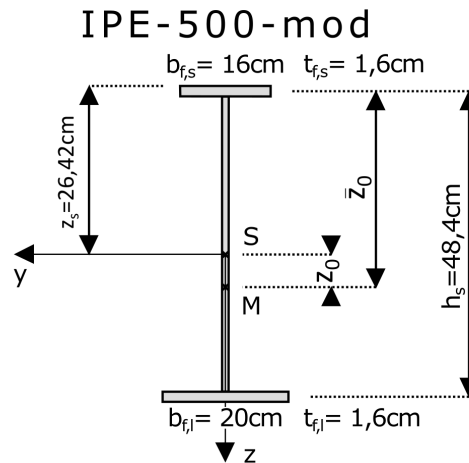


Abbildung 3.65: Geometrieverhältnisse

$I_{z,o}$... Trägheitsmoment des Obergurts um die z -Achse

$$I_{z,o} = \frac{t_f * b_{f,s}^3}{12} = \frac{1,6 * 16,0^3}{12} = 546,13 \text{ cm}^4$$

$I_{z,u}$... Trägheitsmoment des Untergurts um die z -Achse

$$I_{z,u} = \frac{t_f * b_{f,l}^3}{12} = \frac{1,6 * 20,0^3}{12} = 1066,67 \text{ cm}^4$$

$$h_s = 50 - 1,6/2 - 1,6/2 = 48,4 \text{ cm}$$

$$\bar{z}_0 = \frac{I_{z,u}}{I_{z,o} + I_{z,u}} * h_s = \frac{1066,67}{546,13 + 1066,67} * 48,4 = 32,01 \text{ cm}$$

$$z_0 = \bar{z}_0 - \left(z_s - \frac{t_{f,s}}{2} \right) = 32,01 - 26,47 + \frac{1,6}{2} = 6,34 \text{ cm}$$

Daraus lässt sich nun der Abstand i_o bestimmen:

$$i_o = \sqrt{20,40^2 + 6,34^2} = 21,36 \text{ cm}$$

$$c = \sqrt{\frac{I_\omega}{I_z} + 0,039 * \frac{I_T * L_T^2}{I_z}}$$

— mit:

$I_\omega \dots$ Wölbwiderstand

$$I_\omega = \frac{I_{z,o} * I_{z,u}}{I_{z,o} + I_{z,u}} * h_s^2 = \frac{546,13 * 1066,67}{546,13 + 1066,67} * 48,4^2 = 846128 \text{ cm}^6$$

$I_T \dots$ Torsionswiderstand

$$I_T = \frac{1}{3} * \sum b_i * t_i^3 = \frac{1}{3} * (16,0 * 1,6^3 + 46,8 * 1,02^3 + 20,0 * 1,6^3) = 65,71 \text{ cm}^4$$

$L_T \dots$ freie Biegedrillknicklänge

$$L_T = 4,0 \text{ m (aufgrund der verdrehsteifen Zwischenabstützung)}$$

Daraus lässt sich nun der Wert für c bestimmen:

$$c = \sqrt{\frac{846128}{1617} + 0,039 * \frac{65,71 * 400^2}{1617}} = 27,87 \text{ cm}$$

Durch das Einsetzen all dieser Faktoren in Gleichung (3.43) folgt:

$$\bar{\lambda}_{TF} = 1,106 * \sqrt{\frac{27,87^2 + 21,36^2}{2 * 27,87^2}} * \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4 * 27,87^2 * 20,40^2}{(27,87^2 + 21,36^2)^2}}\right) = 1,160$$

Durch die bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}_{TF}$ für Biegedrillknicken und den bereits ermittelten Imperfektionsfaktor α_z für Ausweichen in Richtung der Achse z-z lässt sich nun der Abminderungsfaktor χ_{TF} bestimmen:

$$\phi_{TF} = 0,5 * [1 + \alpha_z * (\bar{\lambda}_{TF} - 0,2) + \bar{\lambda}_{TF}^2] = 0,5 * [1 + 0,34 * (1,160 - 0,2) + 1,160^2] = 1,336$$

$$\chi_{TF} = \frac{1}{\phi_{TF} + \sqrt{\phi_{TF}^2 - \lambda_{TF}^2}} = \frac{1}{1,336 + \sqrt{1,336^2 - 1,160^2}} = 0,500$$

— nach „EC3-alt“

EN 1993-1-1-„alt“ 6.3.1.4

EN 1993-1-1-„alt“: Pkt. 6.3.1.4 gab ebenfalls Auskunft darüber, dass bei verdrehweichen Querschnitten die bezogene Schlankheit χ_{TF} zu verwenden ist. Die Berechnung erfolgte anhand von ÖNORM B 1993-1-1: Pkt. 8.7.1.

• **Nachweis für Biegedrillknicken unter N_{Ed} und $M_{y,Ed}$ EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.3(5)**

Das Nachweisformat für den Stabilitätsnachweis unter Biegung $M_{y,Ed}$ mit Normalkraftbeanspruchung ist in EN 1993-1-1: Pkt. 8.3.3(5) unter Berücksichtigung der Modifikation von EN 1993-1-1: Pkt. 8.3.3(7), sprich das Ersetzen von χ_z durch χ_{TF} in (3.45), durch die Gleichungen (3.44) und (3.45) getrennt für die beiden Ausweichrichtungen gegeben:

$$y - y : \frac{N_{Ed}}{\chi_y * \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} * \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} * \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0 \quad (3.44)$$

$$z - z : \frac{N_{Ed}}{\chi_{TF} * \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} * \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} * \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0 \quad (3.45)$$

— mit: $\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}} = M_{pl,y,Rd}$

Zusatzmomente $\Delta M_{y,Ed}$ bzw. $\Delta M_{z,Ed}$ aus der Schwerpunktverschiebung zwischen Bruttoquerschnitt und effektivem Querschnitt ergeben sich nur bei Querschnitten der Klasse 4. Durch das Einsetzen aller ermittelten Unbekannten wird nun in (3.44) der Nachweis für Ausweichen um y-y und durch (3.45) für Ausweichen um z-z geführt:

$$y - y : \frac{300}{0,946 * 2575,6} + 0,633 * \frac{150}{0,728 * 479,56} = 0,395 \leq 1,0$$

$$z - z : \frac{300}{0,500 * 2575,6} + 0,960 * \frac{150}{0,728 * 479,56} = 0,645 \leq 1,0$$

— nach „EC3-alt“

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.3(4)

Beim Nachweisformat für kombinierte Biegung mit axialer Druckbeanspruchung nach EN 1993-1-1-„alt“: Pkt. 6.3.3(4) unter Berücksichtigung der Modifikation von EN 1993-1-1-„alt“: Pkt. 6.3.1.4, sprich das Ersetzen von χ_z durch χ_{TF} , sind von „EC3-alt“ auf „EC3-neu“ keine Änderungen vorgenommen worden.

Hinweis: gleiche Ausnutzungsgrade nach „EC3-alt“ und „EC3-neu“!

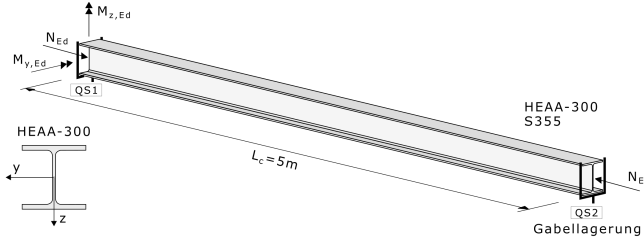
4 Querschnittstragfähigkeit

Zum Thema Querschnittstragfähigkeit haben sich in der Neuauflage von EN 1993-1-1 Änderungen und Ergänzungen in folgenden Bereichen ergeben:

- 4.1 Querschnittsklassifizierung
- 4.2 Neues, alternatives Bemessungskonzept zur wirtschaftlicheren Ausnutzung von Querschnitten der Klasse 3
- 4.3 Neue Querschnittsinteraktion für die Bemessung von Querschnitten der Klassen 1 und 2 unter Biegung und Wölbkrafttorsion
- 4.4 Neues Berechnungsmodell für den Widerstand unausgesteifter Stegbleche gegenüber lokalen Querlasten

Dazu wurden folgende Berechnungsbeispiele ausgearbeitet:

Tabelle 4.1: Beispielübersicht

Bsp. Nr.	Thema	Angabe
4.2.1	Tragfähigkeit von Querschnitten der Klasse 3 nach dem neuen Bemessungsmodell (EN 1993-1-1 „neu“: Anhang B)	

— Fortsetzung auf der nächsten Seite —

Bsp. Nr.	Thema	Angabe
4.2.2	Tragfähigkeit von Querschnitten der Klasse 3 nach dem neuen Bemessungsmodell (EN 1993-1-1-„neu“: Anhang B)	
4.3.1	Querschnittsinteraktion für Biegung und Wölbkrafttorsion bei Querschnitten der Klassen 1 und 2	
4.4.1	Tragfähigkeit unausgesteifter Stegbleche gegen lokale Querlasten	

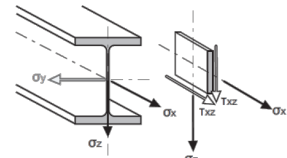
Allgemein

Ein Querschnittsnachweis auf Basis der Elastizitätstheorie (Fließen in der kritischen Querschnittsfaser) ist grundsätzlich immer zulässig, sofern bei Querschnitten mit beulgefährdeten Querschnittsteilen (Querschnitte der Klasse 4) mit wirksamen Querschnittswerten gerechnet wird. Hierfür sind die Normalspannungen $\sigma_{x,Ed}$ und Schubspannungen τ_{Ed} zu ermitteln um anschließend den Nachweis über das Von-Mises-Fließkriterium mit der Fließgrenze f_y und dem Materialteilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,0}$ im kritischen Querschnittspunkt führen zu können.

Im Gegensatz dazu ist eine plastische Querschnittsausnutzung nur bei Einhaltung bestimmter Beulschlankheiten c/t der druckbeanspruchten Querschnittsteile (Querschnitte der Klassen 1 und 2) gestattet. Für die Ermittlung der plastischen Querschnittstragfähigkeit wird die Spannungsverteilung, die mit den plastischen Verformungen kompatibel ist, mit den einwirkenden Schnittgrößen ins Gleichgewicht gesetzt, ohne dabei die Streckgrenze zu überschreiten. Nachdem die Lage der plastischen Nulllinie (PNL) bestimmt ist, können die plastischen Grenzschnittgrößen aus den einzelnen Spannungsergebnissen und den jeweiligen Abständen zur PNL bestimmt werden. Der Nachweis wird somit auf Schnittkraftebene (Vergleich zwischen einwirkender Schnittgröße und plastischer Grenzschnittgröße) geführt. Bei kombinierter Beanspruchung sind die entsprechenden Interaktionsvorschriften aus EN 1993-1-1: Abschnitt 8.2 anzuwenden.

Generelle Nachweisführung [gem. EN 1993-1-1: 8.2.1]

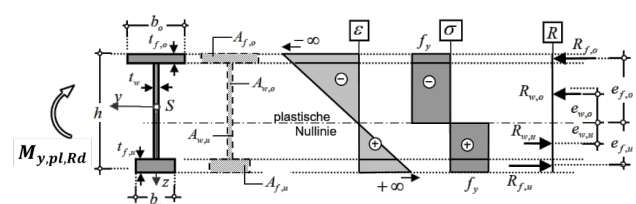
- **Elastische Querschnittstragfähigkeit**
 - möglich bei: QK 1 QK 2 QK 3 QK 4* * bei Verwendung von wirksamen Querschnittswerten A_{eff} W_{eff}



- Ermittlung der **Spannungskomponenten** $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{z,Ed}$ und τ_{Ed} nach der **Elastizitätstheorie**
- Nachweis über **Fließkriterium** im **kritischen Querschnittspunkt**:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right) + 3\left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right)^2 \leq 1$$

- **Plastische Querschnittstragfähigkeit**
 - möglich bei: QK 1 QK 2 QK 3 QK 4
 - **Ermittlung** aus einer zu den plastischen Verformungen kompatiblen **Spannungsverteilung**, die mit den **einwirkenden Schnittgrößen im Gleichgewicht** steht, ohne dass die Streckgrenze überschritten wird
z.B.: *plastische Biegetragfähigkeit* $M_{y,pl,Rd}$



$\Sigma H = 0:$
 $A_{f,o} + A_{w,o} = A_{f,u} + A_{w,u}:$

$\Sigma M = 0:$
 $M_{y,pl,Rd} = \Sigma R_i \cdot e_i$

- Nachweis auf Schnittkraftebene (z.B. einachsige Biegung: $M_{y,Ed} \leq M_{y,pl,Rd}$)
- Interaktionsregeln siehe EC3-1-1 Abschnitt 8.2

Abbildung 4.1: Generelle Nachweisführung

155

4.1 Querschnittsklassifizierung

Die Klassifizierung von Querschnitten dient der Abklärung, inwiefern die Querschnittstragfähigkeit und Rotationskapazität durch lokales Beulen einzelner Querschnittsteile begrenzt ist. Dies dient als Entscheidungsgrundlage, ob die Querschnitts- bzw. Systemberechnung plastisch vorgenommen werden darf oder aber elastisch zu erfolgen hat. Die Charakteristika der vier Querschnittsklassen werden nachfolgend in aller Kürze beschrieben. Das Kriterium zur Beurteilung ist das c/t -Verhältnis der gedrückten (ein- oder zweiseitig gehaltenen) Querschnittsteile.

- **Querschnittsklasse 1 (plastische Querschnitte):** Diese Querschnitte sind in der Lage, die vollplastische Querschnittstragfähigkeit zu erreichen und ohne lokale Beulerscheinungen zu halten. Die Querschnitte sind relativ dickwandig, was wiederum ein kleines c/t -Verhältnis bedeutet. Dadurch können sich Fließgelenke ausbilden, welche die Schnittkraftumlagerung im System möglich machen.
- **Querschnittsklasse 2 (kompakte Querschnitte):** Diese Querschnitte können zwar die vollplastische Querschnittstragfähigkeit erreichen, allerdings haben sie nicht ausreichend Rotationskapazität um Fließgelenke auszubilden und Schnittkräfte im System voll umzulagern; es wird jedoch eine begrenzte Umlagerungsfähigkeit von 15 % der elastischen Biegemomente bei Durchlaufträgern angerechnet.
- **Querschnittsklasse 3 (semi-kompakte Querschnitte):** Bei diesen Querschnitten ist es möglich, die Randfaser bis zur Fließgrenze auszunutzen, ohne dass lokales Beulen eintritt.
- **Querschnittsklasse 4 (schlanke Querschnitte):** Es kommt zum Ausfall von Querschnittsteilen durch Beulen, wenn die Randfaser bis zur Fließgrenze ausgenutzt wird. Die Bemessung erfolgt entweder durch den Nachweis der effektiven Breiten bzw. Querschnitte oder über eine elastische Spannungsberechnung mit zusätzlichem Beulnachweis.

Die konkreten Änderungen hinsichtlich der Klassifizierungsgrenzwerte c/t für die einzelnen Querschnittsklassen nach EC3 beschränken sich auf zweiseitig gestützte Querschnittsteile sowie runde und elliptische Hohlprofile und wurden bereits in Kapitel 2 aufgezeigt. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle nicht mehr explizit darauf eingegangen.

4.2 Neues, alternatives Bemessungskonzept zur wirtschaftlicheren Ausnutzung von Querschnitten der Klasse 3

Hintergrund für dieses neue, alternative Bemessungskonzept ist die bisherige Problematik, dass auch für Querschnitte der Klasse 3 nahe der Klasse-2-Grenze ausschließlich elastische Tragfähigkeiten in Rechnung zu stellen sind, wohingegen bei Querschnitten der Klasse 2 nahe der Klasse-3-Grenze bereits die vollplastische Querschnittstragfähigkeit nutzbar ist. Dies führt zu einem sprunghaften Übergang der Tragfähigkeiten an der Grenze von Klasse 3 zu 2 und führt in vielen Fällen zu konservativen bzw. unwirtschaftlichen Ergebnissen. Bereits in „EC3-alt“ gab es in EN 1993-1-1: Pkt. 6.2.2.4 ein vereinfachtes Modell zur Bestimmung von teilplastischen Momententragfähigkeiten. Hierfür wird ein effektives Widerstandsmoment, unter Abzug einer als nicht wirksam betrachteten Teilfläche im Abstand von $20 \cdot \epsilon \cdot t_w$ von der plastischen Nulllinie bzw. vom Ausrundungsradiusende innerhalb der gedrückten Stegfläche, gebildet. Diese vereinfachte Regelung beschränkt sich auf I- und H-Profile mit Klasse-3-Stegen und Klasse-1- oder Klasse-2-Gurten unter alleiniger Wirkung von M_y und ist auch in „EC3-neu“ in EN 1993-1-1: Pkt. 8.2.2.4 weiterhin enthalten.

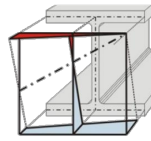
Das neue, alternative Bemessungsmodell für semi-kompakte Querschnitte, wie in EN 1993-1-1-„neu“: Anhang B verankert, liefert deutlich zutreffendere Ergebnisse und bietet erweiterte Anwendungsmöglichkeiten wie etwa die Erfassung von geschlossenen Querschnitten (rechteckig, rund oder elliptisch) sowie auch die Anwendung bei kombinierter Beanspruchung (z.B. $N + M_y + M_z$). Der Grundgedanke besteht darin, in Abhängigkeit der Schlankheit c/t des maßgebenden Querschnittsteils einen teilplastischen Tragwiderstand durch Interpolation zwischen rein elastischer und voll plastischer Tragfähigkeit zu ermitteln. Die teilplastischen Biegemomente werden als $M_{ep,y,Rd}$ und $M_{ep,z,Rd}$ bezeichnet. Die weitere Vorgehensweise zur Interaktion bei kombinierter Beanspruchung entspricht sowohl schematisch als auch formelmäßig weitgehend den Regelungen, die bereits in „EC3-alt“ für Querschnitte der Klassen 1 und 2 vorgesehen waren.

Die Vorgehensweise im Detail: Zunächst muss der Querschnitt anhand der elastischen Spannungsverteilung klassifiziert werden und notwendigerweise die c/t -Grenzwerte der Klasse 3 erfüllen, damit dieses Verfahren Anwendung finden kann. Es muss also ausgeschlossen werden können, dass es zu lokalen Beulerscheinungen kommt, bevor die Fließspannung in den maßgebenden Querschnittsfasern erreicht wird. Der zweite Schritt stellt die grundlegende Neuerung dieses Verfahrens dar, nämlich die Interpolation der elasto-plastischen Widerstandsmomente $W_{ep,y,Rd}$ und $W_{ep,z,Rd}$. Wie in Abbildung 4.2 ersichtlich, ist linear zwischen dem bisher für Querschnitte der Klasse 3 zu verwendenden rein elastischen Widerstandsmoment W_{el} und dem plastischen Widerstandsmoment W_{pl} zu interpolieren. Dies geschieht in Abhängigkeit des querschnittsabhängigen Interpolationsparameters β_{ep} . Bei einem c/t -Verhältnis nahe der Grenze zu Klasse 2 ergeben sich Werte gegen $\beta_{ep} = 0$, was in einer annähernd vollplastischen Tragfähigkeit resultiert ($W_{ep} \approx W_{pl}$). Am anderen Ende des Spektrums, sprich an der Grenze zu Klasse 4, ergeben sich Werte gegen $\beta_{ep} = 1$, was bedeutet, dass so gut wie keine teilplastischen Reserven genutzt werden können ($W_{ep} \approx W_{el}$).

Neues, alternatives Bemessungsmodell in „EC3-neu“

[gem. EN 1993-1-1: Anhang B]

1. Querschnittsklassifikation mit elastischer Spannungsverteilung



Klasse 3 (Voraussetzung der Anwendbarkeit)

2. Interpolation der elasto-plastischen Widerstandsmomente $W_{ep,y}$ und $W_{ep,z}$

$$W_{ep,y} = (W_{pl,y} - W_{el,y}) \cdot \beta_{ep,y}$$

$$W_{ep,z} = (W_{pl,z} - W_{el,z}) \cdot \beta_{ep,z}$$

• I- Querschnitte (gewalzt od. geschweißt)

$$\beta_{ep,y} = \max \left[\frac{(c_f/t_f) - 10\epsilon}{4\epsilon}; \frac{(c_w/t_w) - 83\epsilon}{38\epsilon} \right] \leq 1,0$$

$$\beta_{ep,z} = \max \left[\frac{(c_f/t_f) - 10\epsilon}{6\epsilon}; 0 \right] \leq 1,0$$

• rechteckige Hohl- od. Kastenquerschnitte

$$\beta_{ep,y} = \max \left[\frac{(c_f/t_f) - 34\epsilon}{4\epsilon}; \frac{(c_w/t_w) - 83\epsilon}{38\epsilon} \right] \leq 1,0$$

$$\beta_{ep,z} = \max \left[\frac{(c_f/t_f) - 34\epsilon}{4\epsilon}; 0 \right] \leq 1,0$$

• runde oder elliptische Hohlquerschnitte

$$\beta_{ep,y} = \beta_{ep,z} = \max \left[\frac{(d_e/t) - 70\epsilon^2}{70\epsilon^2}; 0 \right] \leq 1,0$$

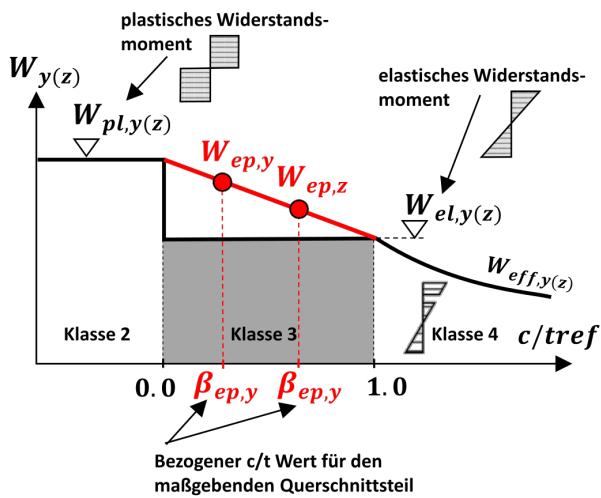


Abbildung 4.2: Vorgehensweise zur Bestimmung von teilplastischen Tragfähigkeiten nach dem neuen, alternativen Bemessungsmodell für semi-kompakte Querschnitte aus EN 1993-1-1- „neu“: Anhang B [1/3]

Im 3. Schritt müssen die Biegetragfähigkeiten $M_{ep,Rd}$ im Falle einer zusätzlichen Normalkraftbeanspruchung N_{Ed} auf den Wert $M_{N,ep,Rd}$ reduziert werden. Die Vorgehensweise entspricht jener der plastischen Querschnittsbemessung unter $N + M$. Die jeweiligen Interaktionsbeziehungen sind sowohl formelmäßig als auch graphisch in Abbildung 4.3 dargestellt.

Im Falle einer gleichzeitigen Wirkung von Biegemomenten $M_{y,Ed}$ und $M_{z,Ed}$ muss die Querschnittsinteraktion zwischen $M_{N,ep,y,Rd}$ und $M_{N,ep,z,Rd}$ anhand der Formelapparate aus Abbildung 4.4 stattfinden.

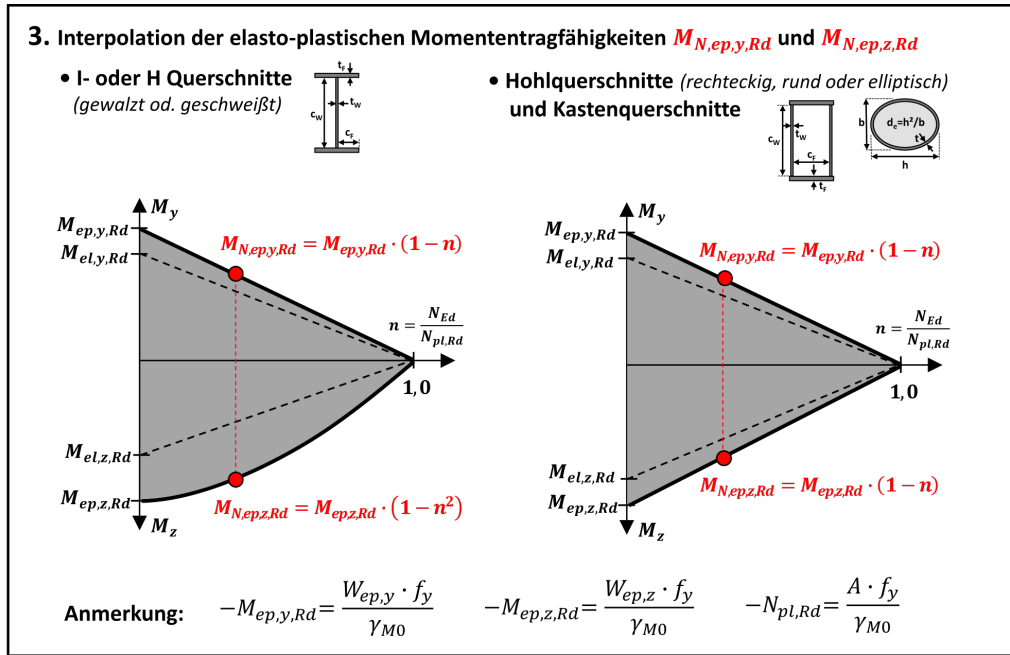


Abbildung 4.3: Vorgehensweise zur Bestimmung von teilplastischen Tragfähigkeiten nach dem neuen, alternativen Bemessungsmodell für semi-kompakte Querschnitte aus EN 1993-1-1- „neu“: Anhang B [2/3]

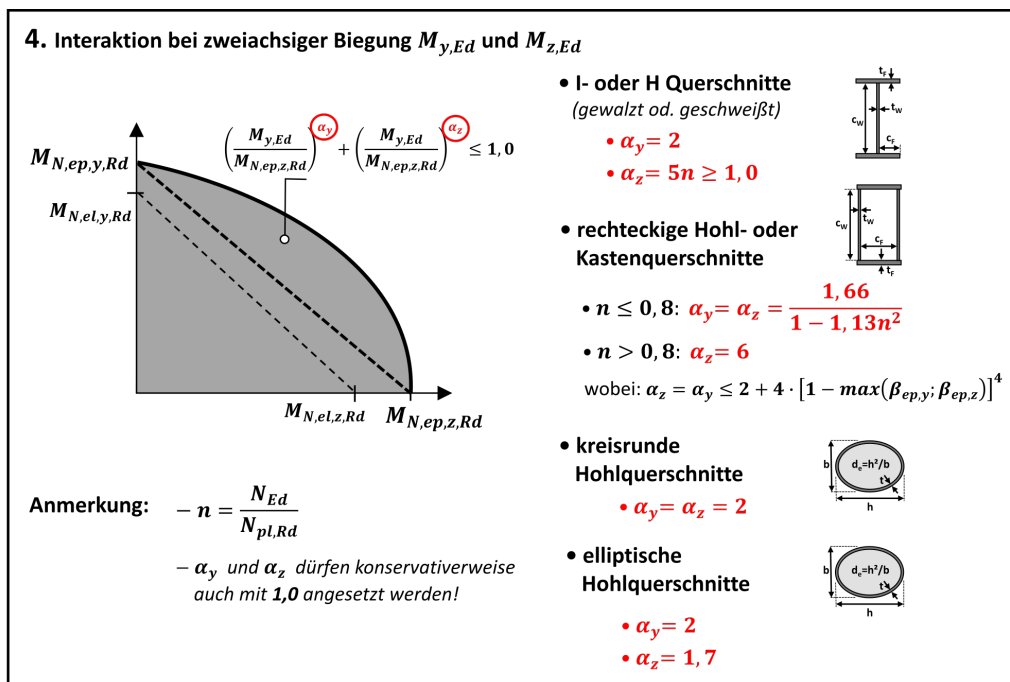


Abbildung 4.4: Vorgehensweise zur Bestimmung von teilplastischen Tragfähigkeiten nach dem neuen, alternativen Bemessungsmodell für semi-kompakte Querschnitte aus EN 1993-1-1- „neu“: Anhang B [3/3]

Die Nutzung teilplastischer Tragfähigkeiten von Querschnitten der Klasse 3 hat auch Auswirkungen auf die Bauteiltragfähigkeit. Dies betrifft folgende Bereiche:

- Schlankheitsgrad für das Biegedrillknicken

$$- \bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{ep,y} * f_y}{M_{cr}}}$$

- $W_{el,y}$ ist zu ersetzen mit dem teilplastischen Widerstandsmoment $W_{ep,y}$. Somit muss die Schlankheitsermittlung direkt über M_{cr} und kann nicht wie für Walzprofile gewohnt durch Modifikation von $\bar{\lambda}_z$ vorgenommen werden.

- Interaktionsfaktoren $k_{yy}, k_{yz}, k_{zy}, k_{zz}$

- Anstelle der bisher für Klasse 3 vorgesehenen Interaktionsfaktoren sind die Werte für plastische Querschnitte zu verwenden.

4.2.1 Beispiel: Tragfähigkeit semi-kompakter Querschnitte nach EN 1993-1-1-„neu“: Anhang B — HEAA-300 unter zweiachsiger Biegung und Druck

Gegeben sei der in Abbildung 4.5 dargestellte Biegeträger, bestehend aus einem HEAA-300-Profil der Stahlgüte S355 mit einer Spannweite von 5m. An den Enden ist das Profil jeweils durch Gabellagerungen gehalten. Als Beanspruchung erfährt das System eine konstante Drucknormalkraft von $N_{Ed} = 946,8kN$, sowie Biegemomente $M_{y,Ed} = 87,0kNm$ und $M_{z,Ed} = 34,0kNm$.

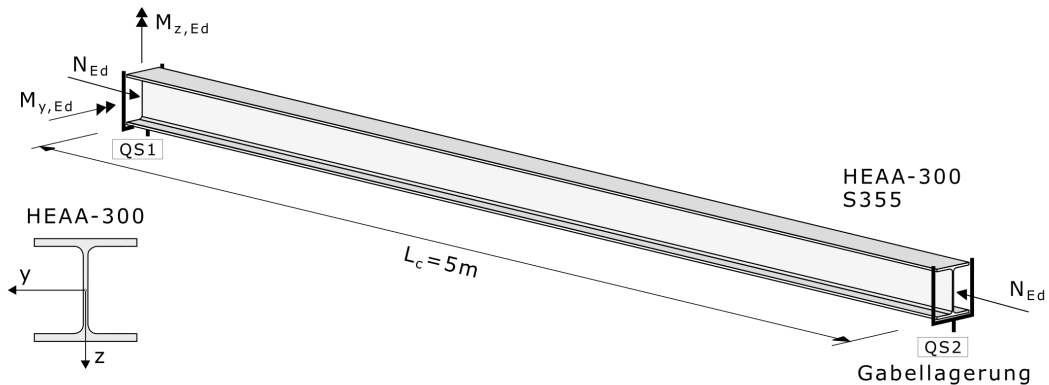


Abbildung 4.5: Statisches System, Belastung und Querschnitt

Tabelle 4.2 zeigt die zutreffenden Material- und Querschnittskennwerte des vorliegenden HEAA-300-Profiles:

Tabelle 4.2: Material- und Querschnittskennwerte HEAA-300

$f_y = 35,5kN/cm^2$	$A = 88,91cm^2$	$\gamma_{M,0} = \gamma_{M,1} = 1,0$	$r = 2,7cm$
$h = 28,3cm$	$b = 30,0cm$	$t_f = 1,05cm$	$t_w = 0,75cm$
$I_y = 13800cm^4$	$I_z = 4734cm^4$	$i_y = 12,46cm$	$i_z = 7,30cm$
$W_{el,y} = 976cm^3$	$W_{el,z} = 315,6cm^3$	$W_{pl,y} = 1065cm^3$	$W_{pl,z} = 482,3cm^3$
$G = 81000N/mm^2$	$I_T = 49,35cm^4$	$I_\omega = 877,2 * 10^3cm^6$	

Belastungs- und Schnittkraftverläufe

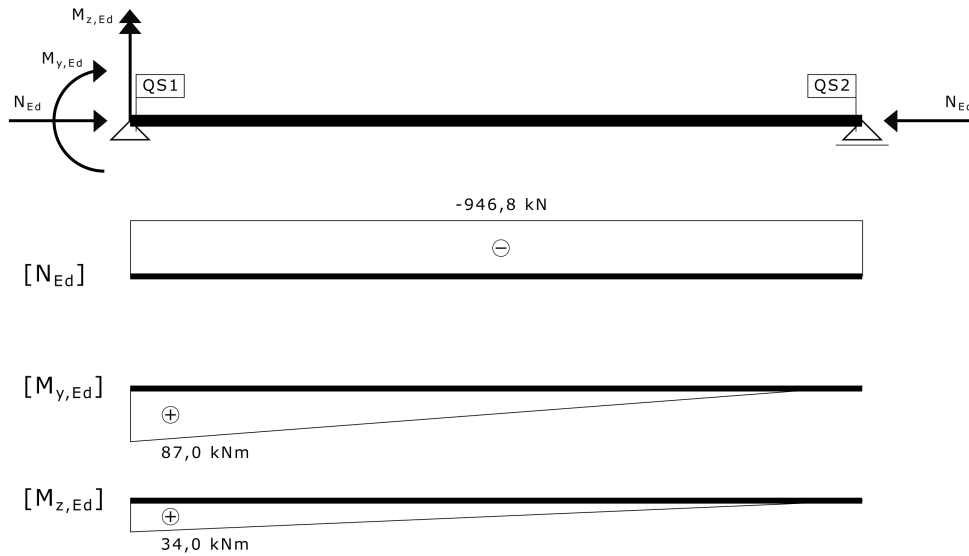


Abbildung 4.6: *Belastungs- und Schnittkraftverläufe*

Elastische und plastische Widerstandsgrößen

EN 1993-1-1 Pkt. 8.2.2.6

$$N_{el,Rd} = N_{pl,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M,0}} = \frac{88,91 * 35,5}{1,0} = 3156,3 \text{ kN}$$

$$M_{el,y,Rd} = \frac{W_{el,y} * f_y}{\gamma_{M,0}} = \frac{976,0 * 35,5}{1,0} * 10^{-2} = 346,5 \text{ kNm}$$

$$M_{el,z,Rd} = \frac{W_{el,z} * f_y}{\gamma_{M,0}} = \frac{315,6 * 35,5}{1,0} * 10^{-2} = 112,0 \text{ kNm}$$

$$M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} * f_y}{\gamma_{M,0}} = \frac{1065,0 * 35,5}{1,0} * 10^{-2} = 378,1 \text{ kNm}$$

$$M_{pl,z,Rd} = \frac{W_{pl,z} * f_y}{\gamma_{M,0}} = \frac{482,3 * 35,5}{1,0} * 10^{-2} = 171,2 \text{ kNm}$$

Querschnittsklassifizierung

EN 1993-1-1 Pkt. 7.5

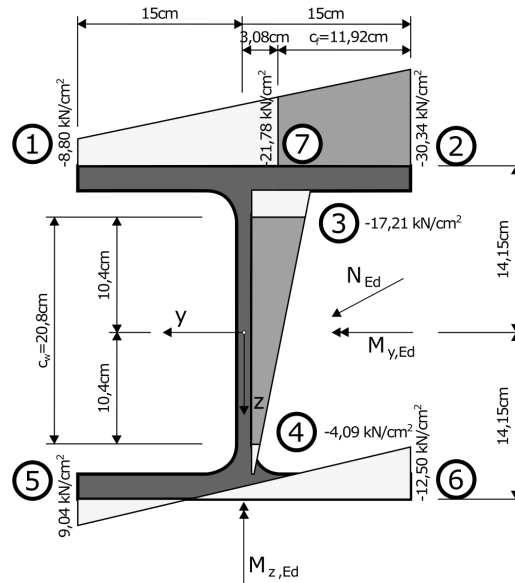


Abbildung 4.7: Elastische Spannungsverteilung in Querschnitt QS1

Normalspannung im Querschnittspunkt i : $\sigma_{x,i} = \pm \frac{N_{Ed}}{A} \pm \frac{M_{y,Ed}}{I_y} * z_i \pm \frac{M_{z,Ed}}{I_z} * y_i$

$$\sigma_{x,1} = -\frac{946,8}{88,91} - \frac{87 * 10^2}{13800} * 14,15 + \frac{34 * 10^2}{4734} * 15,0 = -8,80 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{x,2} = -\frac{946,8}{88,91} - \frac{87 * 10^2}{13800} * 14,15 - \frac{34 * 10^2}{4734} * 15,0 = -30,34 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{x,3} = -\frac{946,8}{88,91} - \frac{87 * 10^2}{13800} * 10,40 = -17,21 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{x,4} = -\frac{946,8}{88,91} + \frac{87 * 10^2}{13800} * 10,40 = -4,09 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{x,5} = -\frac{946,8}{88,91} + \frac{87 * 10^2}{13800} * 14,15 + \frac{34 * 10^2}{4734} * 15,0 = 9,04 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{x,6} = -\frac{946,8}{88,91} + \frac{87 * 10^2}{13800} * 14,15 - \frac{34 * 10^2}{4734} * 15,0 = -12,50 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{x,7} = -\frac{946,8}{88,91} - \frac{87 * 10^2}{13800} * 14,15 - \frac{34 * 10^2}{4734} * 3,08 = -21,78 \text{ kN/cm}^2$$

Spannungsverhältnis $\psi_w = \frac{\sigma_{x,4}}{\sigma_{x,3}} = \frac{-4,09}{-17,21} = 0,238$

Spannungsverhältnis $\psi_f = \frac{\sigma_{x,7}}{\sigma_{x,2}} = \frac{-21,78}{-30,34} = 0,718$

Stress distribution in parts (compression positive)			
Class 3	$c/t \leq 121 \varepsilon$	$c/t \leq 38 \varepsilon$	when $\psi > -1$: $c/t \leq \frac{38 \varepsilon}{0,608 + 0,343 \psi + 0,049 \psi^2}$ when $\psi \leq -1^a$: $\frac{c}{t} \leq 60,5 \varepsilon (1 - \psi)$
		QS2	QS1

Abbildung 4.8: Klassifizierungsgrenzwerte Stegblech (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 7.3)

Stress distribution in parts (compression positive)			
Class 3	$c/t \leq 14 \varepsilon$	$c/t \leq 21 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}$ For k_σ see EN 1993-1-5	
	QS2	QS1	

Abbildung 4.9: Klassifizierungsgrenzwerte Flanschblech (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 7.3)

Spannungsverteilung (Druck positiv)		Wirksame Breite b_{eff}	
	$1 > \psi \geq 0$:	$b_{eff} = \rho c$	
	$\psi < 0$:	$b_{eff} = \rho b_c = \rho c l (1 - \psi)$	
$\psi = \sigma_2/\sigma_1$	1	0	-1
Beulwert k_σ	0,43	0,57	0,85
			$1 \geq \psi \geq -3$
			$0,57 - 0,21 \psi + 0,07 \psi^2$

Abbildung 4.10: Beulwert k_σ für die Klassifizierung des Flansches (Auszug aus EN 1993-1-5: Tab. 4.2)

Tabelle 4.3: HEAA-300: Werte für c und t bzw. c/t

HEAA-300	c [mm]	t [mm]	c/t [-]
Steg	208,0	7,5	27,73
Flansch	119,25	10,5	11,36

Mit dem Materialparameter $\epsilon = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,814$ für S355 kann die Querschnittsklassifizierung wie folgt vorgenommen werden:

Steg: ($\psi_w = 0,238 > -1$)

$$\begin{aligned} \frac{c}{t} = 27,73 &\leq \frac{38 * \epsilon}{0,608 + 0,343 * \psi_w + 0,049 * \psi_w^2} = \\ &= \frac{38 * 0,814}{0,608 + 0,343 * 0,238 + 0,049 * 0,238^2} = 44,67 \rightarrow QK3 \end{aligned}$$

Flansch: ($\psi_f = 0,718$)

$$\frac{c}{t} = 11,36 \leq 21 * \epsilon * \sqrt{k_\sigma} = 21 * 0,814 * \sqrt{0,455} = 11,53 \rightarrow QK3$$

— mit:

$$k_\sigma = 0,57 - 0,21 * \psi_f + 0,07 * \psi_f^2 = 0,57 - 0,21 * 0,718 + 0,07 * 0,718^2 = 0,455$$

Da die Schnittkrafteinleitung am System nicht konstant ist, wird auch für den Querschnitt QS2 eine Querschnittsklassifizierung vorgenommen. Als Belastung wirkt hier lediglich die Normalkraft N_{Ed} , sodass der Querschnitt hier gleichmäßig über die gesamte Fläche unter Drucknormalspannung steht. Die Klassifizierungsgrenzwerte sind in EN 1993-1-1: Tab. 7.3 abzulesen:

Steg:

$$\frac{c}{t} = 27,73 \leq 38 * \epsilon = 38 * 0,814 = 30,92 \rightarrow QK3$$

Flansch:

$$\frac{c}{t} = 11,36 \leq 14 * \epsilon = 14 * 0,814 = 11,40 \rightarrow QK3$$

Die Querschnittsklasse des Gesamtquerschnitts ergibt sich aus der höchsten Querschnittsklasse der einzelnen Blechteile (hier: Steg- bzw. Gurtblech). Da in den Querschnitten QS1 und QS2 sowohl Steg- als auch Flanschblech in Querschnittsklasse 3 fallen, ist das vorhandene HEAA-300-Profil für die vorliegende Beanspruchung entlang des gesamten Stabes Querschnittsklasse 3 zuzuordnen. Alternativ zu den rein elastischen Grenzschnittgrößen können also teilplastische Tragreserven gemäß dem in Abschnitt 4.2 dargelegten neuen Bemessungsmodell aus EN 1993-1-1-„neu“: Anhang B genutzt werden.

— nach „EC3-alt“

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 5.5

• Querschnittsklassifizierung für Querschnitt QS1:

Steg: ($\psi_w = 0,238 > -1$)

$$\frac{c}{t} = 27,73 \leq \frac{42 * \epsilon}{0,67 + 0,33 * \psi_w} = \frac{42 * 0,814}{0,67 + 0,33 * 0,238} = 45,67 \rightarrow QK3$$

Flansch: ($\psi_f = 0,718$)

$$\frac{c}{t} = 11,36 \leq 21 * \epsilon * \sqrt{k_\sigma} = 21 * 0,814 * \sqrt{0,455} = 11,53 \rightarrow QK3$$

— mit:

$$k_\sigma = 0,57 - 0,21 * \psi_f + 0,07 * \psi_f^2 = 0,57 - 0,21 * 0,718 + 0,07 * 0,718^2 = 0,455$$

• Querschnittsklassifizierung für Querschnitt QS2:

Steg:

$$\frac{c}{t} = 27,73 \leq 38 * \epsilon = 38 * 0,814 = 30,92 \rightarrow QK2$$

Flansch:

$$\frac{c}{t} = 11,36 \leq 14 * \epsilon = 14 * 0,814 = 11,40 \rightarrow QK3$$

→ Gesamtquerschnitt: Klasse 3

Ermittlung der elasto-plastischen Widerstandsmomente	EN 1993-1-1 Anhang B
---	-----------------------------

Für gewalzte oder geschweißte I-Querschnitte erfolgt die Ermittlung der (Interpolations-) Parameter $\beta_{ep,y}$ und $\beta_{ep,z}$ zur Ermittlung der teilplastischen Widerstandsmomente $W_{ep,y}$ und $W_{ep,z}$ anhand der nachfolgenden Gleichungen (4.1) und (4.2):

$$\beta_{ep,y} = \max \left[\frac{c_f/t_f - 10 * \epsilon}{4 * \epsilon}; \frac{c_w/t_w - 83 * \epsilon}{38 * \epsilon}; 0 \right] \leq 1,0 \quad (4.1)$$

$$\beta_{ep,z} = \max \left[\frac{c_f/t_f - 10 * \epsilon}{6 * \epsilon}; 0 \right] \leq 1,0 \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} \beta_{ep,y} &= \max \left[\frac{11,36 - 10 * 0,814}{4 * 0,814}; \frac{27,73 - 83 * 0,814}{38 * 0,814}; 0 \right] = \\ &= \max [0,989; -1,288; 0] = 0,989 \leq 1,0 \end{aligned}$$

$$\beta_{ep,z} = \max \left[\frac{11,36 - 10 * 0,814}{6 * 0,814}; 0 \right] = \max [0,659; 0] = 0,659 \leq 1,0$$

Dadurch können nun die elasto-plastischen Widerstandsmomente $W_{ep,y}$ und $W_{ep,z}$ bestimmt werden:

$$W_{ep,y} = W_{pl,y} - (W_{pl,y} - W_{el,y}) * \beta_{ep,y} = 1065 - (1065 - 976) * 0,989 = 977,0 \text{ cm}^3$$

$$M_{ep,y,Rd} = \frac{W_{ep,y} * f_y}{\gamma_{M,0}} = \frac{977 * 35,5}{1,0} * 10^{-2} = 346,8 \text{ kNm}$$

$$W_{ep,z} = W_{pl,z} - (W_{pl,z} - W_{el,z}) * \beta_{ep,z} = 482,3 - (482,3 - 315,6) * 0,659 = 372,4 \text{ cm}^3$$

$$M_{ep,z,Rd} = \frac{W_{ep,z} * f_y}{\gamma_{M,0}} = \frac{372,4 * 35,5}{1,0} * 10^{-2} = 132,2 \text{ kNm}$$

Querschnittsnachweis**EN 1993-1-1 Anhang B**

Im nächsten Schritt sind die elasto-plastischen Biegetragfähigkeiten $M_{ep,y,Rd}$ und $M_{ep,z,Rd}$ aufgrund der gleichzeitig wirkenden Normalkraftbeanspruchung auf die Werte $M_{N,ep,y,Rd}$ und $M_{N,ep,z,Rd}$ zu reduzieren. Die dafür vorgesehenen Interaktionsgleichungen finden sich in EN 1993-1-1: Anhang B.3 bzw. auch in Abbildung 4.3:

- $M_{N,ep,y,Rd} = M_{ep,y,Rd} * (1 - n)$ (lineare Interaktion von M_y und N)
- $M_{N,ep,z,Rd} = M_{ep,z,Rd} * (1 - n^2)$ (quadratische Interaktion von M_z und N)

— mit:

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = \frac{946,8}{3156,3} = 0,300$$

$$M_{N,ep,y,Rd} = 346,8 * (1 - 0,300) = 242,8 \text{ kNm}$$

$$M_{N,ep,z,Rd} = 132,2 * (1 - 0,300^2) = 120,3 \text{ kNm}$$

Aufgrund der Beanspruchungskombination aus doppelter Biegung und Drucknormalkraft ($M_y + M_z + N$) gilt der Querschnitt gemäß EN 1993-1-1: Pkt. B.3(3) als ausreichend tragfähig wenn nachfolgendes Kriterium erfüllt ist:

$$\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{N,ep,y,Rd}} \right)^{\alpha_y} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{N,ep,z,Rd}} \right)^{\alpha_z} \leq 1,0 \quad (4.3)$$

Für doppelt-symmetrische I- und H-Profile mit:

$$\alpha_y = 2$$

$$\alpha_z = 5 * n = 5 * 0,3 = 1,5$$

$$\left(\frac{87,0}{242,8} \right)^2 + \left(\frac{34,0}{120,3} \right)^{1,5} = 0,279 \leq 1,0 \quad \checkmark$$

— nach „EC3-alt“

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.2

- Vereinfachte, konservative elastische Querschnittsinteraktion nach EC3-1-„alt“: 6.2.1(7)

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,el,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,el,Rd}} = \frac{946,8}{3156,3} + \frac{87}{345,5} + \frac{34}{112,0} = 0,855 \leq 1,0 \quad \checkmark$$

- elastischer Spannungsnachweis nach EC3-1-„alt“: 6.2.9.2(1)P

$$\left| \frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y} \right| = \left| \frac{-30,34 \text{ kN/cm}^2}{35,5 \text{ kN/cm}^2} \right| = 0,855 \leq 1,0 \quad \checkmark$$

Wie bereits in Abschnitt 4.2 hingewiesen, können die teilplastischen Tragfähigkeitsreserven auch für den Bauteilnachweis genutzt werden. Zur Vollständigkeit wird aus diesem Grund zusätzlich zum Nachweis der Querschnittstragfähigkeit (dem eigentlichen Thema dieses Kapitels) auch ein Stabilitätsnachweis geführt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden die Ergebnisse unmittelbar im Anschluss an den Querschnittsnachweis hier in Kapitel 4 präsentiert und nicht in das thematisch zutreffende Kapitel 3 (Stabilitätsnachweis) ausgelagert.

Biegedrillknicknachweis

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.3

Aufgrund der Lagerungsverhältnisse und Querschnittsgeometrie, sowie der Kombination aus Drucknormalkraft- und zweiachsiger Biegemomentenbeanspruchung, kann davon ausgegangen werden, dass ein Biegedrillknickversagen in Form von seitlichem Ausweichen in Richtung der schwachen Querschnittsachse z-z bzw. Ausweichen in Richtung der starken Querschnittsachse y-y zwischen den Auflagern über eine Länge von 5m die nachzuweisenden Versagensformen darstellen. (siehe Abbildung 4.11)

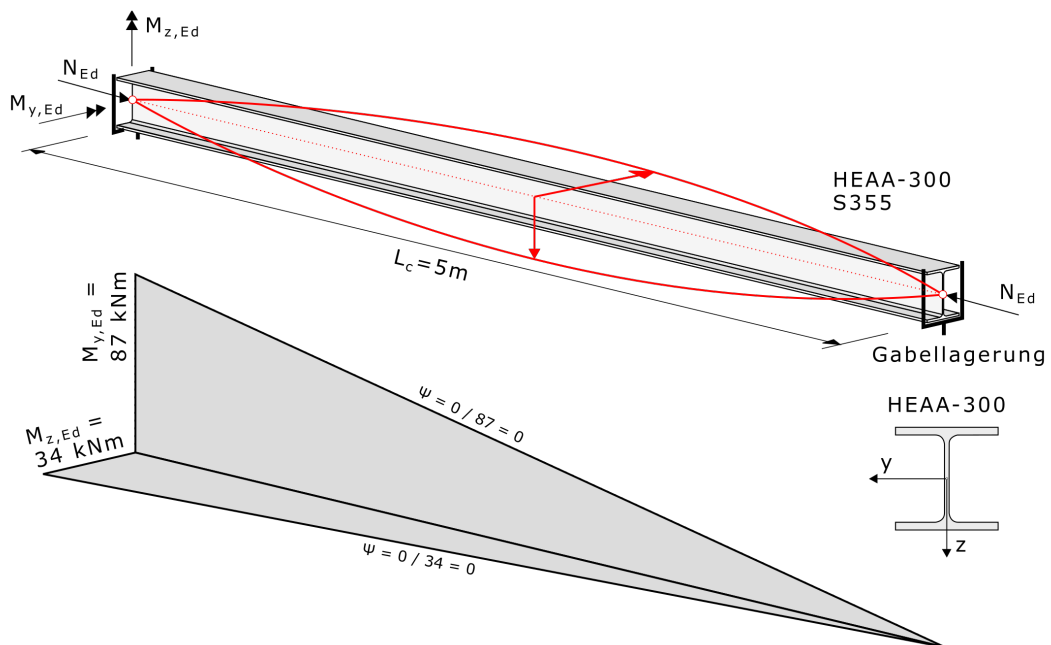


Abbildung 4.11: Momentenverteilungen und mögliche Versagensformen

Aufgrund der beidseits gelenkigen Lagerung ($\beta = 1, 0$) ergeben sich folgende Knicklängen:

$$L_{cr,y} = L_{c,y} * \beta = 500cm$$

$$L_{cr,z} = L_{cr,LT} = L_{c,z} * \beta = 500cm$$

• Schlankheitsgrade $\bar{\lambda}_y$ und $\bar{\lambda}_z$ für das Biegeknicken

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.1.2

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{N_{pl}}{N_{cr,y}}} = \frac{L_{cr,y}}{i_y * \lambda_1} = \frac{500}{12,46 * 76,4} = 0,525$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{N_{pl}}{N_{cr,z}}} = \frac{L_{cr,z}}{i_z * \lambda_1} = \frac{500}{7,30 * 76,4} = 0,897$$

— mit:

$$\lambda_1 = \pi * \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi * \sqrt{\frac{21000}{35,5}} = 76,4$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.1.3

• Imperfektionsfaktoren α_y und α_z für das Biegeknicken

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.1.3

Bei der Ermittlung der Imperfektionsfaktoren α für das Biegeknicken wird zunächst unterschieden, ob das Querschnittsverhältnis h / b größer oder kleiner als 1,2 ist, bzw. ob die Blechdicke des Flansches t_f über oder unter dem jeweiligen Grenzwert liegt und zuletzt welche Stahlgüte das Profil aufweist.

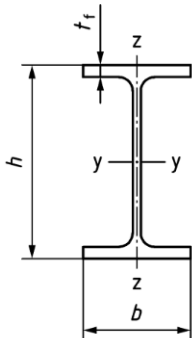
Cross-section		Limits		Buckling about axis	Buckling curve	
					S235 S275 S355 S420	S460 Up to S700 inclusive
Rolled sections		$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40$ mm	y-y z-z	a b	a ₀ a
			$t_f > 40$ mm	y-y z-z	b c	a b
		$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100$ mm	y-y z-z	b c	a b
			$t_f > 100$ mm	y-y z-z	d d	c c

Abbildung 4.12: Ermittlung der Knickspannungslinie (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.3)

Buckling curve	a ₀	a	b	c	d
Imperfection factor α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Abbildung 4.13: Zugehörige Werte der Imperfektionsfaktoren (EN 1993-1-1: Tab. 8.2)

Aus $h/b = 283/300 = 0,94 < 1,2$ und $t_f = 10,5\text{mm} < 100\text{mm}$ folgt:

Ausweichen um y-y: $b \rightarrow \alpha_y = 0,34$

Ausweichen um z-z: $c \rightarrow \alpha_z = 0,49$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.1.2

• **Abminderungsfaktoren χ_y und χ_z für das Biegeknicken EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.1.3**

$$\phi = 0,5 * [1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \quad (4.4)$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad (4.5)$$

Einsetzen der bezogenen Schlankheiten und der Imperfektionsfaktoren in die Gleichungen (4.4) und (4.5) liefert die Werte für ϕ_i und die Knickabminderungsfaktoren χ_i :

$$\phi_y = 0,5 * [1 + 0,34 * (0,525 - 0,2) + 0,525^2] = 0,693$$

$$\chi_y = \frac{1}{0,693 + \sqrt{0,693^2 - 0,525^2}} = 0,873$$

$$\phi_z = 0,5 * [1 + 0,49 * (0,897 - 0,2) + 0,897^2] = 1,072$$

$$\chi_z = \frac{1}{1,072 + \sqrt{1,072^2 - 0,897^2}} = 0,602$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.1.2

• Schlankheitsgrad $\bar{\lambda}_{LT}$ für das Biegedrillknicken

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.2.2

$$M_{cr} = C_1 * \frac{\pi^2 * EI_z}{L^2} * \sqrt{\frac{I_\omega}{I_z} + \frac{L^2 * GI_T}{\pi^2 * EI_z}} =$$

$$= 1,847 * \frac{\pi^2 * 21000 * 4734}{500^2} * \sqrt{\frac{877,2 * 10^3}{4734} + \frac{500^2 * 8100 * 49,35}{\pi^2 * 21000 * 4734}} = 122837 kNcm$$

— mit:

 C_1 ... Beiwert zur Berücksichtigung der Momentenverteilung ($\psi = 0$)

$$C_1(\psi = 0) = 1,847$$

(aus ÖNORM B 1993-1-1: Tab. 3)

Anmerkung: Zusätzlich wurde die exakte Lösung numerisch mit LTBeam ermittelt. Diese beträgt $M_{cr} = 1199,8 kNm$ ($\sim 2\%$ Abweichung zwischen analytischem und numerischem Ergebnis) und wird für die weiteren Berechnungen herangezogen.

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{M_{ep,y,Rk}}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{346,8}{1199,8}} = 0,538$$

— nach „EC3-alt“

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.3

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{M_{el,y,Rk}}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{346,5}{1199,8}} = 0,537$$

• Momentenfaktor f_M für das Biegedrillknicken

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.2.3

$$f_M = 1,25 - 0,10 * \psi - 0,15 * \psi^2 = 1,25 - 0,10 * 0 - 0,15 * 0^2 = 1,250$$

— mit:

$$\psi = \frac{0}{87,0} = 0$$

• Imperfektionsfaktor α_{LT} für das Biegedrillknicken EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.2.3

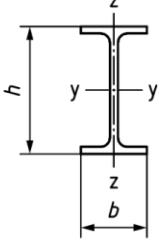
Cross-section		Limits		α_{LT}
Rolled I-sections		$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	$0,12 \sqrt{\frac{W_{el,y}}{W_{el,z}}}$ but: $\alpha_{LT} \leq 0,34$
			$t_f > 40 \text{ mm}$	$0,16 \sqrt{\frac{W_{el,y}}{W_{el,z}}}$ but: $\alpha_{LT} \leq 0,49$
		$h/b \leq 1,2$	—	$0,16 \sqrt{\frac{W_{el,y}}{W_{el,z}}}$ but: $\alpha_{LT} \leq 0,49$

Abbildung 4.14: Ermittlung des Imperfektionsfaktors α_{LT} (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.5)

$$\alpha_{LT} = 0,16 * \sqrt{\frac{W_{el,y}}{W_{el,z}}} = 0,16 * \sqrt{\frac{976,0}{315,6}} = \underline{0,281} < 0,49 \rightarrow \alpha_{LT} = 0,281$$

— nach „EC3-alt“

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.2.3

Querschnitt	Grenzen	Biegedrillknicklinien
gewalztes I-Profil	$h/b \leq 2$	b
	$h/b > 2$	c
geschweißtes I-Profil	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d

Abbildung 4.15: Zuordnung der Knickspannungslinie (EN 1993-1-1-„alt“: Tab. 6.5)

Knicklinie	a	b	c	d
Imperfektionsbeiwert α_{LT}	0,21	0,34	0,49	0,76

Abbildung 4.16: Imperfektionsbeiwert α_{LT} (EN 1993-1-1-„alt“: Tab. 6.3)

Ausweichen in Form von BDK: $b \rightarrow \alpha_{LT} = 0,34$

• **Abminderungsfaktor χ_{LT} für das Biegedrillknicken** **EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.2.3**

$$\phi_{LT} = 0,5 * \left[1 + f_M * \left(\left(\frac{\bar{\lambda}_{LT}}{\bar{\lambda}_z} \right)^2 * \alpha_{LT} * (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right) \right] \quad (4.6)$$

$$\chi_{LT} = \frac{f_M}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - f_M * \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad (4.7)$$

$$\phi_{LT} = 0,5 * \left[1 + 1,250 * \left(\left(\frac{0,538}{0,897} \right)^2 * 0,281 * (0,897 - 0,2) + 0,538^2 \right) \right] = 0,725$$

$$\chi_{LT} = \frac{1,250}{0,725 + \sqrt{0,725^2 - 1,250 * 0,538^2}} = 1,106 > \underline{1,0} \rightarrow \chi_{LT} = 1,0$$

— nach „EC3-alt“

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.2.3

$$\phi_{LT} = 0,5 * [1 + \alpha_{LT} * (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2] \quad (4.8)$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad (4.9)$$

In EN 1993-1-1: Pkt. 6.3.2.3(1) wurden folgende Werte für den Parameter β und die Plateaulänge $\bar{\lambda}_{LT,0}$ empfohlen:

$$\begin{aligned} \beta &= 0,75 \\ \bar{\lambda}_{LT,0} &= 0,4 \end{aligned}$$

$$\phi_{LT} = 0,5 * [1 + 0,34 * (0,537 - 0,4) + 0,75 * 0,537^2] = 0,631$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0,631 + \sqrt{0,631^2 - 0,75 * 0,537^2}} = 0,946$$

Weiters war eine entsprechende Modifikation von χ_{LT} aufgrund einer begünstigenden Momentenverteilung (erfasst durch den Faktor f) gestattet:

$$k_c = \frac{1}{1,33 - 0,33 * \psi} = \frac{1}{1,33 - 0,33 * 0} = 0,752$$

$$f = 1 - 0,5 * (1 - k_c) * \left[1 - 2 * (\bar{\lambda}_{LT} - 0,8)^2 \right] =$$

$$= 1 - 0,5 * (1 - 0,752) * \left[1 - 2 * (0,538 - 0,8)^2 \right] = 0,893 < 1,0$$

$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f} = \frac{0,944}{0,893} = 1,057 > \underline{1,0} \rightarrow \chi_{LT,mod} = 1,0$$

• **Momentenbeiwerte C_{my} , C_{mz} und C_{mLT}**

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.3(10)

Um die Momentenbeiwerte $C_{m,i}$ bestimmen zu können, werden die zum jeweils zutreffenden Stababschnitt zugehörigen Biegemomentenverläufe M_y bzw. M_z benötigt.

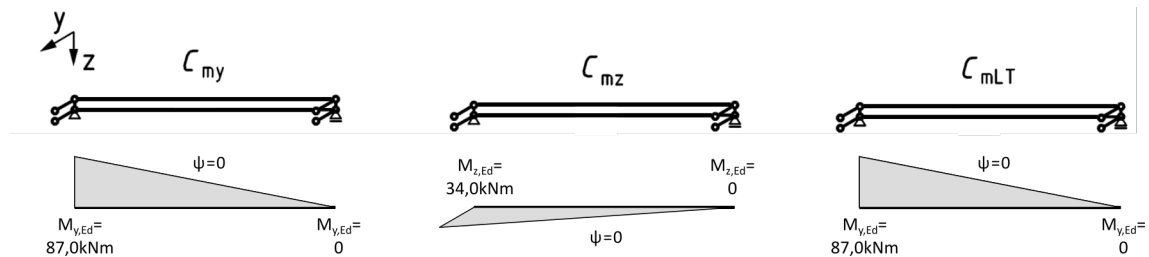


Abbildung 4.17: Relevante Stababschnitte und zugehörige Momentenverläufe zur Bestimmung der Momentenbeiwerte C_{my} , C_{mz} und C_{mLT}

Moment diagram	Range	C_{my} and C_{mz} and C_{mLT}
	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,6 + 0,4\psi \geq 0,4$

Abbildung 4.18: Ermittlung der äquivalenten Momentenbeiwerte (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.9)

$$C_{my} = C_{mLT} = 0,6 + 0,4 * \psi = 0,6 + 0,4 * 0 = 0,60 \quad \text{— mit: } \psi = \frac{0}{87,0} = 0$$

$$C_{mz} = 0,6 + 0,4 * \psi = 0,6 + 0,4 * 0 = 0,60 \quad \text{— mit: } \psi = \frac{0}{34,0} = 0$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Anhang B

• Interaktionsfaktoren

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.3(8)

Zunächst ist durch das Abgrenzungskriterium (4.10) zu überprüfen, ob es sich beim vorliegenden offenen Querschnitt um ein verdrehweiches oder verdrehsteifes Profil handelt. Die Grenزشlankheit $\bar{\lambda}_{LT,lim}$ für verdrehsteife Profile ist gegeben durch:

$$\bar{\lambda}_{LT,lim} = \bar{\lambda}_{LT,0} * \sqrt{1 - \bar{\lambda}_z^2 * \chi_z} \quad (4.10)$$

Der Vergleich der Schlankheit für das Biegedrillknicken mit dem Abgrenzungskriterium nach (4.10) liefert:

$$\bar{\lambda}_{LT} = 0,538 > \bar{\lambda}_{LT,lim} = 0,4 * \sqrt{1 - 0,897^2 * 0,602} = 0,287$$

— mit:

$$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4$$

Damit ist das Profil unter der vorliegenden Belastung und Lagerung als verdrehweich einzustufen.

Um die Interaktionsfaktoren berechnen zu können, müssen zunächst die Ausnutzungsgrade n_y und n_z anhand der folgenden Gleichungen bestimmt werden:

$$n_y = \frac{N_{Ed}}{\chi_y * N_{Rk} / \gamma_{M1}} = \frac{946,8}{0,873 * 3156,3 / 1,0} = 0,344$$

$$n_z = \frac{N_{Ed}}{\chi_z * N_{Rk} / \gamma_{M1}} = \frac{946,8}{0,602 * 3156,3 / 1,0} = 0,498$$

Die Interaktionsfaktoren werden anhand der Tabellen in den nachfolgenden Abbildungen ermittelt. Hierbei ist zu beachten, dass für Querschnitte der Klasse 3, bei denen das elastoplastische Widerstandsmoment herangezogen wird, die gleichen Interaktionsfaktoren wie bei der plastischen Bemessung verwendet werden dürfen.

Plastic cross-sectional properties Class 1, Class 2, Class 3 (with W_{ep} according to Annex B)	Elastic cross-sectional properties Class 3(with W_{el}), Class 4
For $\bar{\lambda}_y < 1,0$: $k_{yy} = C_{my}[1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) n_y]$	For $\bar{\lambda}_y < 1,0$: $k_{yy} = C_{my}(1 + 0,6 \bar{\lambda}_y n_y)$
For $\bar{\lambda}_y \geq 1,0$: $k_{yy} = C_{my}(1 + 0,8 n_y)$	For $\bar{\lambda}_y \geq 1,0$: $k_{yy} = C_{my}(1 + 0,6 n_y)$
$k_{yz} = 0,6 k_{zz}$, see Table 8.8	$k_{yz} = k_{zz}$, see Table 8.8
NOTE 1 See (9) for n_y .	
NOTE 2 See (10) and Table 8.9 for C_{my} .	

Abbildung 4.19: Ermittlung der Interaktionsfaktoren k_{yy} und k_{yz} (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.7)

Type of section	Plastic cross-sectional properties Class 1, Class 2, Class 3 (with W_{ep} according to Annex B)	Elastic cross-sectional properties Class 3(with W_{el}), Class 4
k_{zy}	Not susceptible to LT-buckling	$k_{zy} = 0,6 k_{yy}$ See Table 8.7.
	Susceptible to LT-buckling	For $\bar{\lambda}_z < 1,0$: $k_{zy} = 1 - \frac{0,1 \bar{\lambda}_z n_z}{C_{mLT} - 0,25}$ but $k_{zy} \leq 0,6 + \bar{\lambda}_z$ for $\bar{\lambda}_z < 0,4$ For $\bar{\lambda}_z \geq 1,0$: $k_{zy} = 1 - \frac{0,1 n_z}{C_{mLT} - 0,25}$
k_{zz}	I-sections	For $\bar{\lambda}_z < 1,0$: $k_{zz} = C_{mz}[1 + (2 \bar{\lambda}_z - 0,6) n_z]$
		For $\bar{\lambda}_z \geq 1,0$: $k_{zz} = C_{mz}(1 + 1,4 n_z)$
	Rectangular, circular or elliptical hollow sections	For $\bar{\lambda}_z < 1,0$: $k_{zz} = C_{mz}[1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) n_z]$ For $\bar{\lambda}_z \geq 1,0$: $k_{zz} = C_{mz}[1 + 0,8 n_z]$

Abbildung 4.20: Ermittlung der Interaktionsfaktoren k_{zy} und k_{zz} (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.8)

Die Interaktionsfaktoren errechnen sich gemäß der Abbildungen 4.19 und 4.20 wie folgt:

Für $\bar{\lambda}_y = 0,525 < 1,0$:

$$k_{yy} = C_{my} * [1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) * n_y] = 0,60 * [1 + (0,525 - 0,2) * 0,344] = 0,667$$

$$k_{yz} = 0,6 * k_{zz} = 0,6 * 0,957 = 0,574$$

Für verdrehweichen Querschnitt, mit $0,4 < \bar{\lambda}_z = 0,897 < 1,0$:

$$k_{zy} = 1 - \frac{0,1 * \bar{\lambda}_z * n_z}{C_{mLT} - 0,25} = 1 - \frac{0,1 * 0,897 * 0,498}{0,60 - 0,25} = 0,872$$

$$k_{zz} = C_{mz} * [1 + (2 * \bar{\lambda}_z - 0,6) * n_z] = 0,60 * [1 + (2 * 0,897 - 0,6) * 0,498] = 0,957$$

— nach „EC3-alt“

EN 1993-1-1-„alt“ Anhang B

Nach „EC3-alt“ waren für Stabilitätsnachweise bei Querschnitten der Klasse 3 aufgrund der nicht genutzten teilplastischen Tragreserven stets die für die elastischen Biegetragfähigkeiten (M_{el}) zutreffenden Interaktionsfaktoren k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} und k_{zz} zu verwenden:

$$k_{yy} = C_{my} * (1 + 0,6 * \bar{\lambda}_y * n_y) = 0,60 * (1 + 0,6 * 0,525 * 0,344) = 0,665$$

$$k_{yz} = k_{zz} = C_{mz} * (1 + 0,6 * \bar{\lambda}_z * n_z) = 0,60 * (1 + 0,6 * 0,897 * 0,498) = 0,761$$

$$k_{zy} = 1 - \frac{0,05 * \bar{\lambda}_z * n_z}{C_{mLT} - 0,25} = 1 - \frac{0,05 * 0,897 * 0,498}{0,60 - 0,25} = 0,936$$

• Nachweis für Biegedrillknicken

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.3(5)

Das Nachweisformat für den Stabilitätsnachweis unter zweiachsiger Biegung mit Normalkraftbeanspruchung ist in EN 1993-1-1: Pkt. 8.3.3(5) durch die folgenden Gleichungen (4.11) und (4.12) getrennt für die beiden Ausweichrichtungen gegeben:

$$y - y : \frac{N_{Ed}}{\chi_y * \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} * \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} * \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} * \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0 \quad (4.11)$$

$$z - z : \frac{N_{Ed}}{\chi_z * \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} * \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} * \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} * \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0 \quad (4.12)$$

— mit: $\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}} = M_{ep,y,Rd}$ bzw. $\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}} = M_{ep,z,Rd}$

Zusatzmomente $\Delta M_{y,Ed}$ bzw. $\Delta M_{z,Ed}$ aus der Schwerpunktverschiebung zwischen Bruttoquerschnitt und effektivem Querschnitt ergeben sich nur bei Querschnitten der Klasse 4. Durch das Einsetzen aller ermittelten Unbekannten wird nun in (4.11) der Nachweis für Ausweichen um $y-y$ und durch (4.12) für Ausweichen um $z-z$ geführt:

$$y - y : \frac{946,8}{0,873 * 3156,3} + 0,667 * \frac{87,0}{1,0 * 346,8} + 0,574 * \frac{34,0}{132,2} = 0,659 \leq 1,0$$

[0,742]

$$z - z : \frac{946,8}{0,602 * 3156,3} + 0,872 * \frac{87,0}{1,0 * 346,8} + 0,957 * \frac{34,0}{132,2} = 0,963 \leq 1,0$$

[0,964]

— nach „EC3-alt“

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.3(4)

Das Nachweisformat war auch in „EC3-alt“ durch die Gleichungen (4.11) und (4.12) gegeben. Mangels der Möglichkeit zur Erfassung teilplastischer Tragreserven in „EC3-alt“ waren die Biegetragfähigkeiten $M_{y,Rk}$ und $M_{z,Rk}$ bei Querschnitten der Klasse 3 durch die elastischen Grenzbiegemomente $M_{el,y,Rk}$ und $M_{el,z,Rk}$ zu begrenzen.

4.2.2 Beispiel: Tragfähigkeit semi-kompakter Querschnitte nach EN 1993-1-1-, „neu“: Anhang B — IPE-500 unter einachsiger Biegung und Druck

Gegeben sei der in Abbildung 4.21 dargestellte Biegeträger, bestehend aus einem IPE-500-Profil der Stahlgüte S355 mit einer Spannweite von 10m. An den Enden ist das Profil jeweils durch Gabellagerungen gehalten und in Feldmitte zusätzlich durch eine seitliche Zwischenabstützung sowohl gegen Ausweichen um z-z, als auch gegen Verdrehung um x-x gehindert. Als Beanspruchung erfährt das System eine konstante Drucknormalkraft von $N_{Ed} = 700kN$, sowie Biegemomente $M_{y1,Ed} = 250kNm$ und $M_{y2,Ed} = -75kNm$.

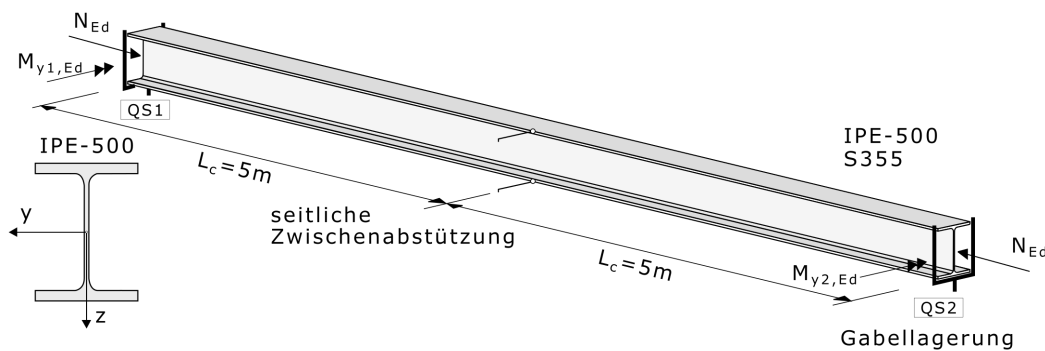


Abbildung 4.21: Statisches System, Belastung und Querschnitt

Tabelle 4.4 zeigt die zutreffenden Material- und Querschnittskennwerte des vorliegenden IPE-500-Profiles:

Tabelle 4.4: Material- und Querschnittskennwerte IPE-500

$f_y = 35,5kN/cm^2$	$A = 116cm^2$	$\gamma_{M,0} = \gamma_{M,1} = 1,0$	$r = 2,1cm$
$h = 50,0cm$	$b = 20,0cm$	$t_f = 1,6cm$	$t_w = 1,02cm$
$I_y = 48200cm^4$	$I_z = 2142cm^4$	$i_y = 20,43cm$	$i_z = 4,31cm$
$W_{el,y} = 1928cm^3$	$W_{el,z} = 214cm^3$	$W_{pl,y} = 2194cm^3$	$W_{pl,z} = 336cm^3$
$G = 81000N/mm^2$	$I_T = 89,29cm^4$	$I_\omega = 1249 * 10^3cm^6$	

Belastungs- und Schnittkraftverläufe

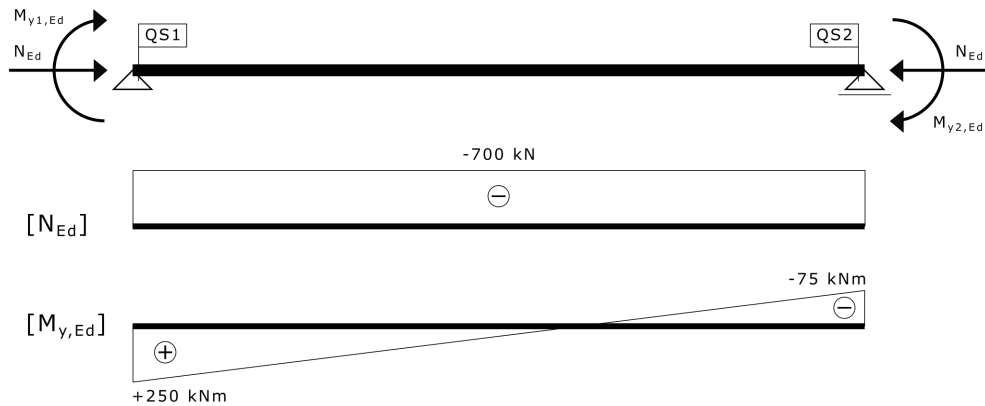


Abbildung 4.22: Belastungs- und Schnittkraftverläufe

Elastische und plastische Widerstandsgrößen

EN 1993-1-1 Pkt. 8.2.2.6

$$N_{el,Rd} = N_{pl,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M,0}} = \frac{116 * 35,5}{1,0} = 4118 kN$$

$$M_{el,y,Rd} = \frac{W_{el,y} * f_y}{\gamma_{M,0}} = \frac{1928 * 35,5}{1,0} * 10^{-2} = 684,4 kNm$$

$$M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} * f_y}{\gamma_{M,0}} = \frac{2194 * 35,5}{1,0} * 10^{-2} = 778,9 kNm$$

Querschnittsklassifizierung

EN 1993-1-1 Pkt. 7.5

Tabelle 4.5: IPE-500: Werte für c und t bzw. c/t

IPE-500	c [mm]	t [mm]	c/t [-]
Steg	426,0	10,2	41,76
Flansch	73,9	16,0	4,62

Stress distribution in parts (compression positive)			
Class 1	$c/t \leq 72 \varepsilon$	$c/t \leq 28 \varepsilon$	when $\alpha_c > 0,5$: $c/t \leq \frac{126 \varepsilon}{5,5 \alpha_c - 1}$ when $\alpha_c \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{36 \varepsilon}{\alpha_c}$
Class 2	$c/t \leq 83 \varepsilon$	$c/t \leq 34 \varepsilon$	when $\alpha_c > 0,5$: $c/t \leq \frac{188 \varepsilon}{6,53 \alpha_c - 1}$ when $\alpha_c \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5 \varepsilon}{\alpha_c}$
Stress distribution in parts (compression positive)			
Class 3	$c/t \leq 121 \varepsilon$	$c/t \leq 38 \varepsilon$	when $\psi > -1$: $c/t \leq \frac{38 \varepsilon}{0,608 + 0,343 \psi + 0,049 \psi^2}$ when $\psi \leq -1^a$: $\frac{c}{t} \leq 60,5 \varepsilon (1 - \psi)$

Abbildung 4.23: Klassifizierungsgrenzwerte Stegblech (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 7.3)

Stress distribution in parts (compression positive)			
Class 1	$c/t \leq 9 \varepsilon$	$c/t \leq \frac{9 \varepsilon}{\alpha_c}$	$c/t \leq \frac{9 \varepsilon}{\alpha_c \sqrt{\alpha_c}}$
Class 2	$c/t \leq 10 \varepsilon$	$c/t \leq \frac{10 \varepsilon}{\alpha_c}$	$c/t \leq \frac{10 \varepsilon}{\alpha_c \sqrt{\alpha_c}}$
Stress distribution in parts (compression positive)			
Class 3	$c/t \leq 14 \varepsilon$	$c/t \leq 21 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}$ For k_σ see EN 1993-1-5	

Abbildung 4.24: Klassifizierungsgrenzwerte Flanschblech (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 7.3)

Die Querschnittsklassifizierung wird aufgrund der entlang des Stabes veränderlichen Biegemomente getrennt für beide Stabendquerschnitte (QS1 und QS2) vorgenommen.

— Querschnitt QS1:

Die elastische Spannungsverteilung im Stegblech kann aus der nachfolgenden Abbildung 4.25 abgelesen werden. Das Flanschblech steht am Obergurt vollständig unter Druck.

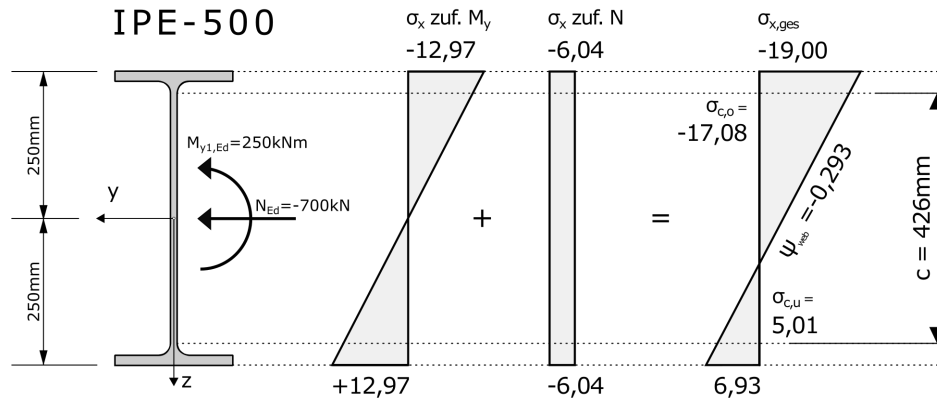


Abbildung 4.25: Elastische Spannungsverteilung im Stegblech

$$\sigma_o = -\frac{700}{116} - \frac{250 \cdot 10^2}{1928} = -19,00 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_u = -\frac{700}{116} + \frac{250 \cdot 10^2}{1928} = 6,93 \text{ kN/cm}^2$$

Daraus folgen die Spannungen an den Enden der Ausrundungen im Stegblech:

$$\sigma_{c,o} = -\frac{700}{116} - \frac{250 \cdot 10^3}{48200} \cdot \frac{42,6}{2} = -17,08 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{c,u} = -\frac{700}{116} + \frac{250 \cdot 10^3}{48200} \cdot \frac{42,6}{2} = 5,01 \text{ kN/cm}^2$$

$$\psi = \frac{\sigma_{c,u}}{\sigma_{c,o}} \frac{5,01}{-17,08} = -0,293$$

Mit dem Materialparameter $\epsilon = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,814$ für S355 ergibt sich die Querschnittseinteilung in Querschnitt QS1 wie folgt:

Steg: ($\psi = -0,293 > -1$)

$$\begin{aligned} \frac{c}{t} &= 41,76 \leq \frac{38 * \epsilon}{0,608 + 0,343 * \psi + 0,049 * \psi^2} = \\ &= \frac{38 * 0,814}{0,608 + 0,343 * (-0,293) + 0,049 * (-0,293)^2} = 60,45 \rightarrow QK3 \end{aligned}$$

Flansch:

$$\frac{c}{t} = 4,62 \leq 9 * \epsilon = 9 * 0,814 = 7,32 \rightarrow QK1$$

→ Gesamtquerschnitt QS1: Klasse 3

— nach „EC3-alt“

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 5.5

Steg: ($\psi = -0,293 > -1$)

$$\frac{c}{t} = 41,76 \leq \frac{42 * \epsilon}{0,67 + 0,33 * \psi} = \frac{42 * 0,814}{0,67 + 0,33 * (-0,293)} = 59,63 \rightarrow QK3$$

Flansch:

$$\frac{c}{t} = 4,62 \leq 9 * \epsilon = 9 * 0,814 = 7,32 \rightarrow QK1$$

→ Gesamtquerschnitt QS1: Klasse 3

— Querschnitt QS2:

Die Querschnittsklassifizierung erfolgt sinngemäß gleich wie für QS1. Der Querschnitt QS2 ist Querschnittsklasse 4 zuzuordnen.

Der für den Querschnittsnachweis maßgebende Querschnitt liegt aufgrund des Biegemomentenmaximums am linken Stabende (QS1). Hier liegt Querschnittsklasse 3 vor, sodass anstelle einer rein elastischen Querschnittsbemessung eine teilplastische Auslegung nach EN 1993-1-1-„neu“: Anhang B möglich ist.

Für den Bauteilnachweis wird empfohlen, eine äquivalente Querschnittsklasse zu Grunde zu legen, die sich an der Stelle des höchsten Ausnutzungsgrades für den reinen Querschnittsnachweis (hier Querschnitt QS1) einstellt. Die äquivalente Querschnittsklasse des Stabes ist somit Klasse 3.

Ermittlung der elasto-plastischen Widerstandsmomente	EN 1993-1-1 Anhang B
---	-----------------------------

Für gewalzte oder geschweißte I-Querschnitte erfolgt die Ermittlung des (Interpolations-) Parameters $\beta_{ep,y}$ zur Ermittlung des teilplastischen Widerstandsmoments $W_{ep,y}$ anhand der nachfolgenden Gleichung (4.13):

$$\beta_{ep,y} = \max \left[\frac{c_f/t_f - 10 * \epsilon}{4 * \epsilon}; \frac{c_w/t_w - 83 * \epsilon}{38 * \epsilon}; 0 \right] \leq 1,0 \quad (4.13)$$

$$\begin{aligned} \beta_{ep,y} &= \max \left[\frac{4,62 - 10 * 0,814}{4 * 0,814}; \frac{41,76 - 83 * 0,814}{38 * 0,814} \right] = \\ &= \max [-1,081; -0,834; 0] = 0 < 1,0 \end{aligned}$$

Dadurch kann nun das elasto-plastische Widerstandsmoment $W_{ep,y}$ bestimmt werden:

$$W_{ep,y} = W_{pl,y} - (W_{pl,y} - W_{el,y}) * \beta_{ep,y} = 2194 - (2194 - 1928) * 0 = 2194 \text{ cm}^3$$

$$M_{ep,y,Rd} = \frac{W_{ep,y} * f_y}{\gamma_{M,0}} = \frac{2194 * 35,5}{1,0} * 10^{-2} = 778,9 \text{ kNm}$$

Gemäß EN 1993-1-1: Anhang B.3 muss bei Vorhandensein von Biegemomenten- und Normalkraftbeanspruchung das nachfolgende Nachweiskriterium erfüllt sein:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{N,ep,y,Rd}} \leq 1,0 \quad (4.14)$$

— mit:

$$\begin{aligned} M_{N,ep,y,Rd} \dots \text{ das durch die axiale Druckkraft reduzierte elasto-plastische Moment} \\ M_{N,ep,y,Rd} = M_{ep,y,Rd} * (1 - n) \end{aligned}$$

— mit:

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}}$$

$$n = \frac{700}{4118} = 0,17$$

$$M_{N,ep,y,Rd} = 778,9 * (1 - 0,17) = 646,5 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{N,ep,Rd}} = \frac{250}{646,5} = 0,387 \leq 1,0$$

Wie bereits in Abschnitt 4.2 hingewiesen, können die teilplastischen Tragfähigkeitsreserven auch für den Bauteilnachweis genutzt werden. Zur Vollständigkeit wird aus diesem Grund zusätzlich zum Nachweis der Querschnittstragfähigkeit (dem eigentlichen Thema dieses Kapitels) auch ein Stabilitätsnachweis geführt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden die Ergebnisse unmittelbar im Anschluss an den Querschnittsnachweis hier in Kapitel 4 präsentiert und nicht in das thematisch zutreffende Kapitel 3 (Stabilitätsnachweis) ausgelagert.

Biegedrillknicknachweis
EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.3

Aufgrund der Lagerungsverhältnisse und Querschnittsgeometrie, sowie der Kombination aus Drucknormalkraft- und Biegemomentenbeanspruchung, kann davon ausgegangen werden, dass ein Biegedrillknickversagen in Form von seitlichem Ausweichen in Richtung der schwachen Querschnittsachse z-z zwischen den seitlichen Abstützungen bzw. ein Biegeknickversagen um y-y mit BDK-Effekt zwischen den seitlichen Halterungen die nachzuweisenden Versagensformen darstellen. (siehe Abbildung 4.26)

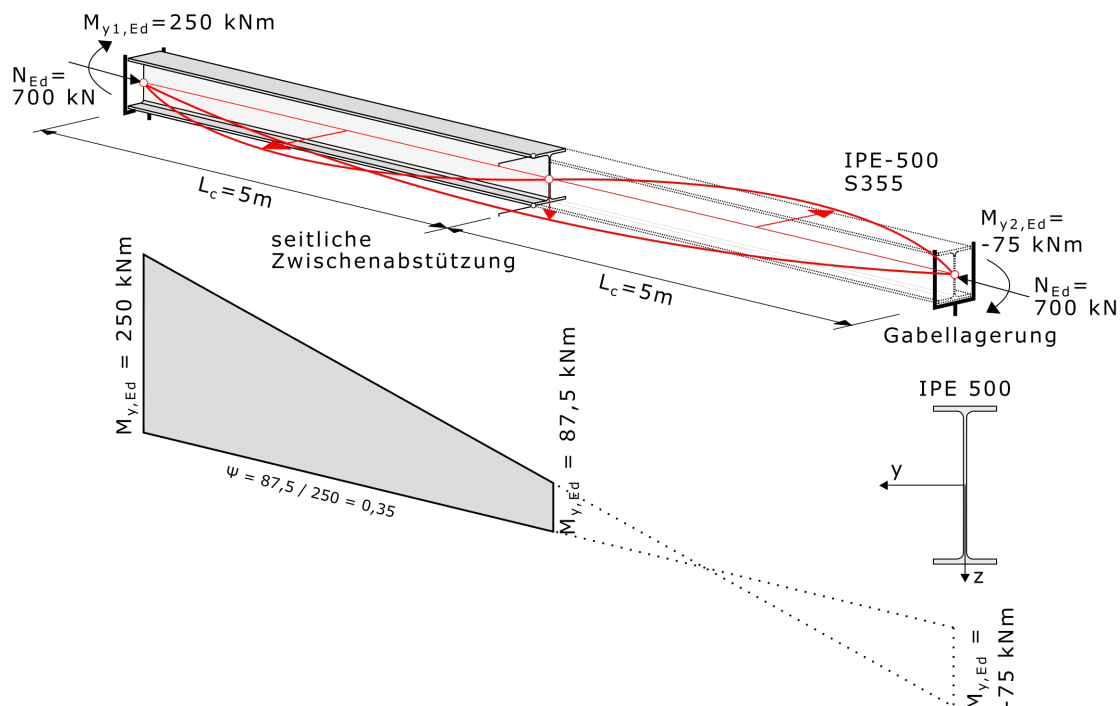


Abbildung 4.26: Momentenverteilung und mögliche Versagensformen

Der für den BDK-Nachweis maßgebende Stababschnitt ist in Abbildung 4.26 grau hinterlegt. Da die jeweiligen Abstände zwischen den seitlichen Halterungen gleich groß sind,

ergibt sich der maßgebende Abschnitt somit rein aufgrund der Größe der Biegemomenbeanspruchung. Aufgrund der beidseits gelenkigen Lagerung bzw. der gelenkig um z-z ausgebildeten Zwischenhalterungen ($\beta = 1, 0$) ergeben sich folgende Knicklängen:

$$L_{cr,y} = L_{c,y} * \beta = 1000\text{cm}$$

$$L_{cr,z} = L_{cr,LT} = L_{c,z} * \beta = 500\text{cm}$$

• **Schlankheitsgrade $\bar{\lambda}_y$ und $\bar{\lambda}_z$ für das Biegeknicken** **EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.1.2**

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{N_{pl}}{N_{cr,y}}} = \frac{L_{cr,y}}{i_y * \lambda_1} = \frac{1000}{20,4 * 76,4} = 0,642$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{N_{pl}}{N_{cr,z}}} = \frac{L_{cr,z}}{i_z * \lambda_1} = \frac{500}{4,31 * 76,4} = 1,518$$

— mit:

$$\lambda_1 = \pi * \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi * \sqrt{\frac{21000}{35,5}} = 76,4$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.1.3

• **Imperfektionsfaktoren α_y und α_z für das Biegeknicken** **EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.1.3**

Bei der Ermittlung der Imperfektionsfaktoren α für das Biegeknicken wird zunächst unterschieden, ob das Querschnittsverhältnis h / b größer oder kleiner als 1,2 ist, bzw. ob die Blechdicke des Flansches t_f über oder unter dem jeweiligen Grenzwert liegt und zuletzt welche Stahlgüte das Profil aufweist.

Buckling curve	a_0	a	b	c	d
Imperfection factor α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Abbildung 4.27: Zugehörige Werte der Imperfektionsfaktoren (EN 1993-1-1: Tab. 8.2)

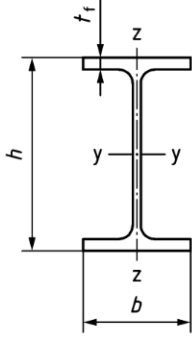
Cross-section		Limits	Buckling about axis	Buckling curve		
				S235 S275 S355 S420	S460 Up to S700 inclusive	
Rolled sections		$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y z-z	a a ₀	
			$t_f > 40 \text{ mm}$	y-y z-z	b c	
		$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100 \text{ mm}$	y-y z-z	b c	a b
			$t_f > 100 \text{ mm}$	y-y z-z	d d	c c

Abbildung 4.28: Ermittlung der Knickspannungslinie (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.3)

Aus $h/b = 500/200 = 2,5 > 1,2$ und $t_f = 10,5 \text{ mm} < 40 \text{ mm}$ folgt:

Ausweichen um y-y: $a \rightarrow \alpha_y = 0,21$

Ausweichen um z-z: $b \rightarrow \alpha_z = 0,34$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.1.2

• **Abminderungsfaktoren χ_y und χ_z für das Biegeknicken EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.1.3**

$$\phi = 0,5 * [1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \tag{4.15}$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \tag{4.16}$$

Einsetzen der bezogenen Schlankheiten und der Imperfektionsfaktoren in die Gleichungen (4.15) und (4.16) liefert die Werte für ϕ_i und die Knickabminderungsfaktoren χ_i :

$$\phi_y = 0,5 * [1 + 0,21 * (0,642 - 0,2) + 0,642^2] = 0,752$$

$$\chi_y = \frac{1}{0,752 + \sqrt{0,752^2 - 0,642^2}} = 0,874$$

$$\phi_z = 0,5 * [1 + 0,34 * (1,518 - 0,2) + 1,518^2] = 1,877$$

$$\chi_z = \frac{1}{1,877 + \sqrt{1,877^2 - 1,518^2}} = 0,336$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.1.2

• Schlankheitsgrad $\bar{\lambda}_{LT}$ für das Biegedrillknicken

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.2.2

$$M_{cr} = C_1 * \frac{\pi^2 * EI_z}{L^2} * \sqrt{\frac{I_\omega}{I_z} + \frac{L^2 * GI_T}{\pi^2 * EI_z}} =$$

$$= 1,459 * \frac{\pi^2 * 21000 * 2140}{500^2} * \sqrt{\frac{1249 * 10^3}{2140} + \frac{500^2 * 8100 * 89,3}{\pi^2 * 21000 * 2140}} = 81501 kNm$$

— mit:

C_1 ... Beiwert zur Berücksichtigung der Momentenverteilung ($\psi = 0,35$)

$$C_1(\psi = 0,50) = 1,320$$

$$C_1(\psi = 0,25) = 1,551$$

(aus ÖNORM B 1993-1-1: Tab. 3)

Lineare Interpolation:

$$C_1 = 1,320 + \frac{1,551 - 1,320}{0,25} * (0,5 - 0,35) = 1,459$$

Anmerkung: Zusätzlich wurde die exakte Lösung numerisch mit LTBeam ermittelt. Diese beträgt $M_{cr} = 811,08 kNm$ ($\sim 0,5\%$ Abweichung zwischen analytischem und numerischem Ergebnis) und wird für die weiteren Berechnungen herangezogen.

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{M_{ep,y,Rk}}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{778,9}{811,1}} = 0,980$$

— nach „EC3-alt“

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.3

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{M_{el,y,Rk}}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{684,4}{811,1}} = 0,919$$

• Imperfektionsfaktor α_{LT} für das Biegedrillknicken **EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.2.3**

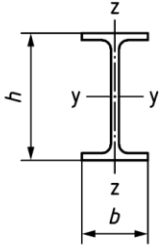
Cross-section		Limits	α_{LT}
Rolled I-sections		$h/b > 1,2$	$0,12 \sqrt{\frac{W_{el,y}}{W_{el,z}}}$ but: $\alpha_{LT} \leq 0,34$
		$t_f \leq 40 \text{ mm}$	
		$t_f > 40 \text{ mm}$	$0,16 \sqrt{\frac{W_{el,y}}{W_{el,z}}}$ but: $\alpha_{LT} \leq 0,49$
	$h/b \leq 1,2$	—	$0,16 \sqrt{\frac{W_{el,y}}{W_{el,z}}}$ but: $\alpha_{LT} \leq 0,49$

Abbildung 4.29: Ermittlung des Imperfektionsfaktors α_{LT} (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.5)

$$\alpha_{LT} = 0,12 * \sqrt{\frac{W_{el,y}}{W_{el,z}}} = 0,12 * \sqrt{\frac{1930}{214}} = 0,36 > \underline{0,34} \rightarrow \alpha_{LT} = 0,34$$

— nach „EC3-alt“

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.2.3

Querschnitt	Grenzen	Biegedrillknicklinien
gewalztes I-Profil	$h/b \leq 2$	b
	$h/b > 2$	c
geschweißtes I-Profil	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d

Abbildung 4.30: Zuordnung der Knickspannungslinie (EN 1993-1-1-„alt“: Tab. 6.5)

Knicklinie	a	b	c	d
Imperfektionsbeiwert α_{LT}	0,21	0,34	0,49	0,76

Abbildung 4.31: Imperfektionsbeiwert α_{LT} (EN 1993-1-1-„alt“: Tab. 6.3)

Ausweichen in Form von BDK: $c \rightarrow \alpha_{LT} = 0,49$

• Momentenfaktor f_M für das Biegedrillknicken **EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.2.3**

$$f_M = 1,25 - 0,10 * \psi - 0,15 * \psi^2 = 1,25 - 0,10 * 0,35 - 0,15 * 0,35^2 = 1,197$$

— mit: $\psi = \frac{87,5}{250} = 0,35$

• **Abminderungsfaktor χ_{LT} für das Biegedrillknicken** **EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.2.3**

$$\phi_{LT} = 0,5 * \left[1 + f_M * \left(\left(\frac{\bar{\lambda}_{LT}}{\lambda_z} \right)^2 * \alpha_{LT} * (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right) \right] \quad (4.17)$$

$$\chi_{LT} = \frac{f_M}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - f_M * \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad (4.18)$$

$$\phi_{LT} = 0,5 * \left[1 + 1,197 * \left(\left(\frac{0,980}{1,518} \right)^2 * 0,34 * (1,518 - 0,2) + 0,980^2 \right) \right] = 1,187$$

$$\chi_{LT} = \frac{1,197}{1,187 + \sqrt{1,187^2 - 1,197 * 0,980^2}} = 0,706$$

— nach „EC3-alt“

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.2.3

$$\phi_{LT} = 0,5 * [1 + \alpha_{LT} * (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2] \quad (4.19)$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad (4.20)$$

In EN 1993-1-1: Pkt. 6.3.2.3(1) wurden folgende Werte für den Parameter β und die Plateaulänge $\bar{\lambda}_{LT,0}$ empfohlen:

$$\begin{aligned} \beta &= 0,75 \\ \bar{\lambda}_{LT,0} &= 0,4 \end{aligned}$$

$$\phi_{LT} = 0,5 * [1 + 0,49 * (0,919 - 0,4) + 0,75 * 0,919^2] = 0,944$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0,944 + \sqrt{0,944^2 - 0,75 * 0,919^2}} = 0,689$$

Weiters war eine entsprechende Modifikation von χ_{LT} aufgrund einer begünstigenden Momentenverteilung (erfasst durch den Faktor f) gestattet:

$$k_c = \frac{1}{1,33 - 0,33 * \psi} = \frac{1}{1,33 - 0,33 * 0,35} = 0,823$$

$$\begin{aligned}
 f &= 1 - 0,5 * (1 - k_c) * \left[1 - 2 * (\bar{\lambda}_{LT} - 0,8)^2 \right] = \\
 &= 1 - 0,5 * (1 - 0,823) * \left[1 - 2 * (0,919 - 0,8)^2 \right] = 0,914 < 1,0
 \end{aligned}$$

$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f} = \frac{0,689}{0,914} = 0,754 < 1,0$$

• **Momentenbeiwerte C_{my} und C_{mLT}**

EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.3(10)

Um die Momentenbeiwerte $C_{m,i}$ bestimmen zu können, wird der zum jeweils zutreffenden Stababschnitt zugehörige Biegemomentenverlauf M_y benötigt.

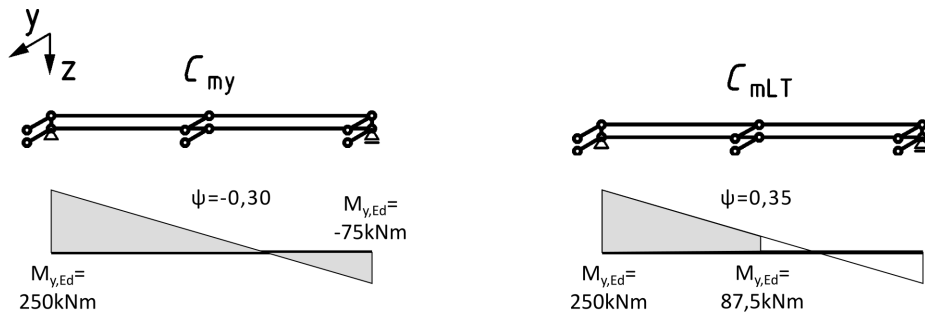


Abbildung 4.32: Relevante Stababschnitte und zugehörige Momentenverläufe zur Bestimmung der Momentenbeiwerte C_{my} und C_{mLT}

Moment diagram	Range	C_{my} and C_{mz} and C_{mLT}
	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,6 + 0,4\psi \geq 0,4$

Abbildung 4.33: Ermittlung der äquivalenten Momentenbeiwerte (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.9)

$$C_{my} = 0,6 + 0,4 * \psi = 0,6 + 0,4 * (-0,3) = 0,48 \quad \text{— mit: } \psi = \frac{-75,0}{250} = -0,3$$

$$C_{mLT} = 0,6 + 0,4 * \psi = 0,6 + 0,4 * 0,35 = 0,74 \quad \text{— mit: } \psi = \frac{87,5}{250} = 0,35$$

In „EC3-alt“ ident, gemäß:

EN 1993-1-1-„alt“ Anhang B

• **Interaktionsfaktoren****EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.3(8)**

Zunächst ist durch das Abgrenzungskriterium (4.15) zu überprüfen, ob es sich beim vorliegenden offenen Querschnitt um ein verdrehweiches oder verdrehsteifes Profil handelt. Die Grenزشlankheit $\bar{\lambda}_{LT,lim}$ für verdrehsteife Profile ist gegeben durch:

$$\bar{\lambda}_{LT,lim} = \bar{\lambda}_{LT,0} * \sqrt{1 - \bar{\lambda}_z^2 * \chi_z} \quad (4.21)$$

Der Vergleich der Schlankheit für das Biegedrillknicken mit dem Abgrenzungskriterium nach (4.15) liefert:

$$\bar{\lambda}_{LT} = 0,980 > \bar{\lambda}_{LT,lim} = 0,4 * \sqrt{1 - 1,518^2 * 0,336} = 0,190$$

— mit:

$$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4$$

Damit ist das Profil unter der vorliegenden Belastung und Lagerung als verdrehweich einzustufen.

Um die Interaktionsfaktoren berechnen zu können, müssen zunächst die Ausnutzungsgrade n_y und n_z anhand der folgenden Gleichungen bestimmt werden:

$$n_y = \frac{N_{Ed}}{\chi_y * N_{Rk} / \gamma_{M1}} = \frac{700}{0,874 * 4118 / 1,0} = 0,194$$

$$n_z = \frac{N_{Ed}}{\chi_z * N_{Rk} / \gamma_{M1}} = \frac{700}{0,336 * 4118 / 1,0} = 0,506$$

Die Interaktionsfaktoren werden anhand der Tabellen in den nachfolgenden Abbildungen ermittelt. Hierbei ist zu beachten, dass für Querschnitte der Klasse 3, bei denen das elasto-plastische Widerstandsmoment herangezogen wird, die gleichen Interaktionsfaktoren wie bei der plastischen Bemessung verwendet werden dürfen.

Plastic cross-sectional properties Class 1, Class 2, Class 3 (with W_{ep} according to Annex B)	Elastic cross-sectional properties Class 3 (with W_{el}), Class 4
For $\bar{\lambda}_y < 1,0$: $k_{yy} = C_{my}[1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) n_y]$	For $\bar{\lambda}_y < 1,0$: $k_{yy} = C_{my}(1 + 0,6 \bar{\lambda}_y n_y)$
For $\bar{\lambda}_y \geq 1,0$: $k_{yy} = C_{my}(1 + 0,8 n_y)$	For $\bar{\lambda}_y \geq 1,0$: $k_{yy} = C_{my}(1 + 0,6 n_y)$
$k_{yz} = 0,6 k_{zz}$, see Table 8.8	$k_{yz} = k_{zz}$, see Table 8.8
NOTE 1 See (9) for n_y .	
NOTE 2 See (10) and Table 8.9 for C_{my} .	

Abbildung 4.34: Ermittlung des Interaktionsfaktors k_{yy} (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.7)

	Type of section	Plastic cross-sectional properties Class 1, Class 2, Class 3 (with W_{ep} according to Annex B)	Elastic cross-sectional properties Class 3 (with W_{el}), Class 4
k_{zy}	Not susceptible to LT-buckling	$k_{zy} = 0,6 k_{yy}$ See Table 8.7.	$k_{zy} = 0,8 k_{yy}$ See Table 8.7.
	Susceptible to LT-buckling	For $\bar{\lambda}_z < 1,0$: $k_{zy} = 1 - \frac{0,1 \bar{\lambda}_z n_z}{C_{mLT} - 0,25}$ but $k_{zy} \leq 0,6 + \bar{\lambda}_z$ for $\bar{\lambda}_z < 0,4$	For $\bar{\lambda}_z < 1,0$: $k_{zy} = 1 - \frac{0,05 \bar{\lambda}_z n_z}{C_{mLT} - 0,25}$
		For $\bar{\lambda}_z \geq 1,0$: $k_{zy} = 1 - \frac{0,1 n_z}{C_{mLT} - 0,25}$	For $\bar{\lambda}_z \geq 1,0$: $k_{zy} = 1 - \frac{0,05 n_z}{C_{mLT} - 0,25}$
k_{zz}	I-sections	For $\bar{\lambda}_z < 1,0$: $k_{zz} = C_{mz}[1 + (2 \bar{\lambda}_z - 0,6) n_z]$ For $\bar{\lambda}_z \geq 1,0$: $k_{zz} = C_{mz}(1 + 1,4 n_z)$	For $\bar{\lambda}_z < 1,0$: $k_{zz} = C_{mz}(1 + 0,6 \bar{\lambda}_z n_z)$
	Rectangular, circular or elliptical hollow sections	For $\bar{\lambda}_z < 1,0$: $k_{zz} = C_{mz}[1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) n_z]$ For $\bar{\lambda}_z \geq 1,0$: $k_{zz} = C_{mz}[1 + 0,8 n_z]$	For $\bar{\lambda}_z \geq 1,0$: $k_{zz} = C_{mz}(1 + 0,6 n_z)$

Abbildung 4.35: Ermittlung des Interaktionsfaktors k_{zy} (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.8)

Die Interaktionsfaktoren errechnen sich gemäß der Abbildungen 4.34 und 4.35 wie folgt:

Für $\bar{\lambda}_y = 0,642 < 1,0$:

$$k_{yy} = C_{my} * [1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) * n_y] = 0,48 * [1 + (0,642 - 0,2) * 0,194] = 0,521$$

Für verdrehweichen Querschnitt, mit $\bar{\lambda}_z = 1,518 > 1,0$:

$$k_{zy} = 1 - \frac{0,1 * n_z}{C_{mLT} - 0,25} = 1 - \frac{0,1 * 0,506}{0,74 - 0,25} = 0,897$$

— nach „EC3-alt“

EN 1993-1-1-„alt“ Anhang B

Nach „EC3-alt“ waren für Stabilitätsnachweise bei Querschnitten der Klasse 3 aufgrund der nicht genutzten teilplastischen Tragreserven stets die für die elastischen Biegetragfähigkeiten (M_{el}) zutreffenden Interaktionsfaktoren k_{yy} und k_{zy} zu verwenden:

$$k_{yy} = C_{my} * (1 + 0,6 * \bar{\lambda}_y * n_y) = 0,48 * (1 + 0,6 * 0,642 * 0,194) = 0,516$$

$$k_{zy} = 1 - \frac{0,05 * n_z}{C_{mLT} - 0,25} = 1 - \frac{0,05 * 0,506}{0,74 - 0,25} = 0,948$$

• **Nachweis für Biegedrillknicken unter N_{Ed} und $M_{y,Ed}$ EN 1993-1-1 Pkt. 8.3.3(5)**

Das Nachweisformat für den Stabilitätsnachweis unter Biegung $M_{y,Ed}$ mit Normalkraftbeanspruchung ist in EN 1993-1-1: Pkt. 8.3.3(5) durch die folgenden Gleichungen (4.22) und (4.23) getrennt für die beiden Ausweichrichtungen gegeben:

$$y - y : \frac{N_{Ed}}{\chi_y * \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} * \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} * \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0 \quad (4.22)$$

$$z - z : \frac{N_{Ed}}{\chi_z * \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} * \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} * \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0 \quad (4.23)$$

— mit: $\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}} = M_{ep,y,Rd}$

Zusatzmomente $\Delta M_{y,Ed}$ aus der Schwerpunktverschiebung zwischen Bruttoquerschnitt und effektivem Querschnitt ergeben sich nur bei Querschnitten der Klasse 4.

Durch das Einsetzen aller ermittelten Unbekannten wird nun in (4.22) der Nachweis für Ausweichen um $y-y$ und durch (4.23) für Ausweichen um $z-z$ geführt:

$$y - y : \frac{700}{0,874 * 4118,0} + 0,521 * \frac{250}{0,706 * 778,9} = 0,431 \leq 1,0 \quad [0,444]$$

$$z - z : \frac{700}{0,336 * 4118,0} + 0,897 * \frac{250}{0,706 * 778,9} = 0,914 \leq 1,0 \quad [0,965]$$

— nach „EC3-alt“

EN 1993-1-1-„alt“ Pkt. 6.3.3(4)

Das Nachweisformat war auch in „EC3-alt“ durch die Gleichungen (4.22) und (4.23) gegeben. Mangels der Möglichkeit zur Erfassung teilplastischer Tragreserven in „EC3-alt“ war die Biegetragfähigkeit $M_{y,Rk}$ bei Querschnitten der Klasse 3 durch das elastische Grenzbiegemoment $M_{el,y,Rk}$ zu begrenzen.

4.3 Neue Querschnittsinteraktion für die Bemessung von Querschnitten der Klassen 1 und 2 unter Biegung und Wölbkrafttorsion

Die Nachweisgleichungen bzw. Interaktionsvorschriften für Querschnitte der Klassen 1 und 2, also jene, die die voll plastische Querschnittstragfähigkeit erreichen, sind in der Neuauflage von EN 1993-1-1 unverändert geblieben. In EC3-„neu“ wird das bereits bestehende Bemessungsmodell für plastische Querschnitte jedoch um einen weiteren Interaktionsnachweis für Biegung und Wölbkrafttorsion bei doppelt-symmetrischen I-Profilen erweitert. Dadurch kann die gemeinsame Wirkung von Biegemoment ($M_{y,Ed}$) und dem durch Wölbkrafttorsion verursachten Wölbmoment (B_{Ed}) im plastischen Querschnittsnachweis erfasst werden.

Da für diese Beanspruchungskombination die Profilgurte den Großteil der Lastabtragung übernehmen, lässt sich die neue quadratische Interaktionsgleichung für $M_{y,Ed} + B_{Ed}$ bei isolierter Betrachtung der Gurtbleche einfach nachvollziehen (Analogie zur M-N-Interaktion für den Rechteckquerschnitt, mit $M = B_{Ed}/h$, $N = M_{y,Ed}/h$).

Abbildung 4.36 zeigt die formelmäßige und graphische Darstellung des Interaktionsnachweises und gibt Hinweise zur Ermittlung des aufnehmbaren Wölbmoments B_{Rd} .

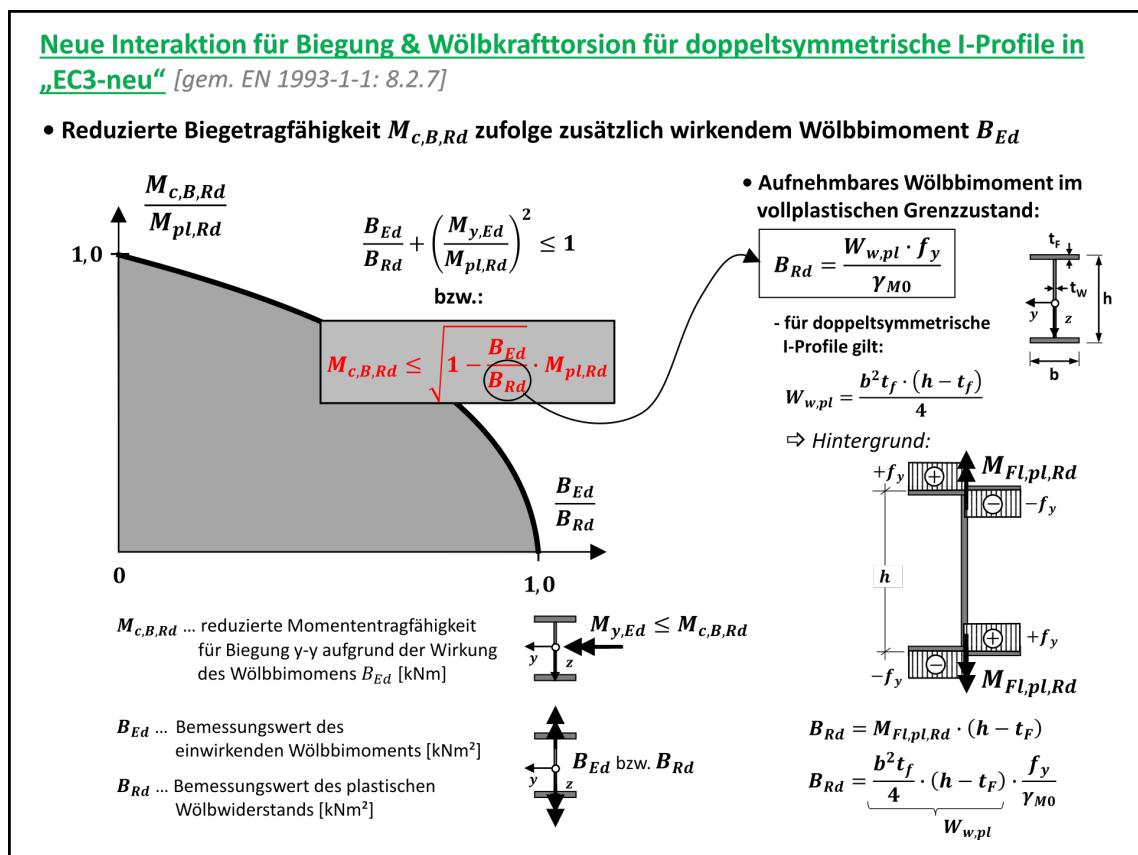


Abbildung 4.36: Neue Interaktion von Biegung und Wölbkrafttorsion

4.3.1 Beispiel: Exzentrisch eingeleitete Vertikallast

Gegeben sei der in Abbildung 4.37 dargestellte Biegeträger, bestehend aus einem HEB-400-Profil der Stahlgüte S355 mit einer Spannweite von 6m. An den Enden ist das Profil jeweils durch Gabellagerungen wölbfrei gehalten. Als Beanspruchung erfährt das System eine um $e = 0,1\text{m}$ außerhalb des Schwerpunktes exzentrisch eingeleitete Vertikallast von $F_{z,Ed} = 300\text{kN}$.

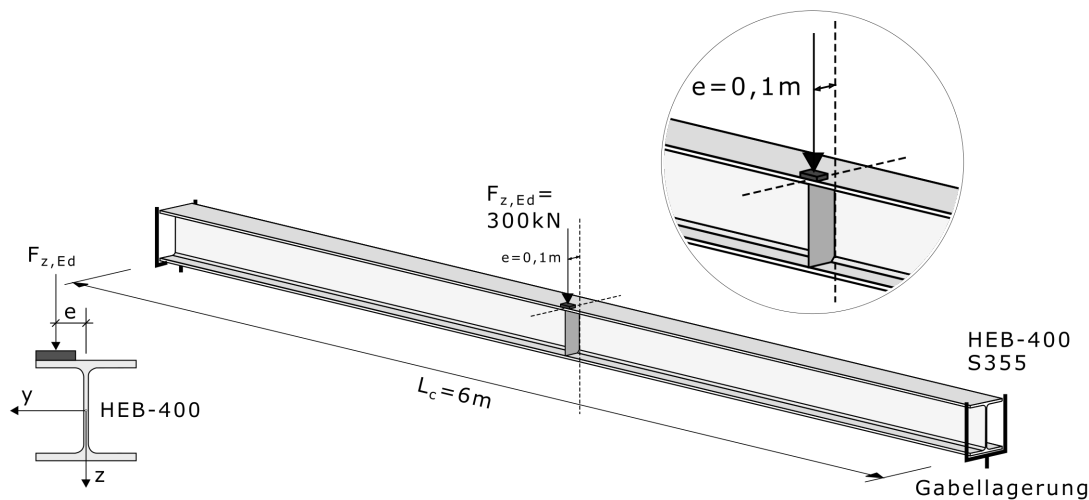


Abbildung 4.37: Statisches System, Belastung und Querschnitt

Tabelle 4.6 zeigt die zutreffenden Material- und Querschnittskennwerte des vorliegenden HEB-400-Profiles:

Tabelle 4.6: Material- und Querschnittskennwerte HEB-400

$f_y = 35,5\text{kN/cm}^2$	$A = 198\text{cm}^2$	$\gamma_{M,0} = \gamma_{M,1} = 1,0$	$r = 2,7\text{cm}$
$h = 40,0\text{cm}$	$b = 30,0\text{cm}$	$t_f = 2,4\text{cm}$	$t_w = 1,35\text{cm}$
$I_y = 57680\text{cm}^4$	$I_z = 10820\text{cm}^4$	$i_y = 17,1\text{cm}$	$i_z = 7,4\text{cm}$
$W_{el,y} = 2880\text{cm}^3$	$W_{el,z} = 721\text{cm}^3$	$W_{pl,y} = 3232\text{cm}^3$	

Zur Berechnung der Schnittkräfte wird die exzentrisch wirkende Vertikallast zunächst in den Schwerpunkt verschoben und das daraus resultierende Torsionsmoment M_T berechnet:

$$F_{z,Ed} = 300\text{kN}$$

$$M_T = F_{z,Ed} * e = 300 * 0,1 = 30\text{kNm}$$

Bemessungswölbbimoment B_{Ed}

Die Größe und der Verlauf des Wölbbimoments lassen sich nun über 2 verschiedene Ansätze bestimmen:

- a) Näherungslösung über das Ingenieurmodell der „Flanschbiegung“ (dies impliziert die Vernachlässigung des bei offenen Profilen geringen St. Vernant’schen Torsionswiderstands)
- b) Numerische Lösung durch Stabwerksprogramme (zutreffende Berücksichtigung des Torsionstragverhaltens durch korrekte Erfassung der St. Vernant’schen Torsionssteifigkeit GI_T bzw. Wölbsteifigkeit EI_ω)

a) Die Ermittlung des Wölbbimoments durch das Ingenieurmodell der „Flanschbiegung“ wird durch die nachfolgende Abbildung 4.38 erläutert:

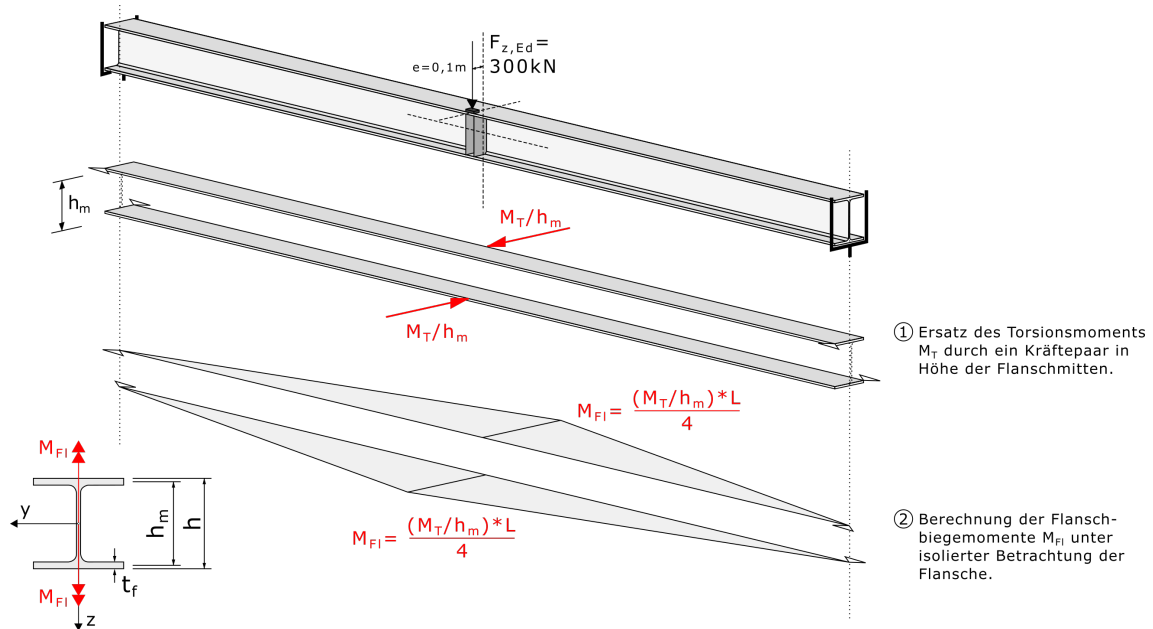


Abbildung 4.38: Ingenieurmodell „Flanschbiegung“

$$h_m = h - t_f = 40,0 - 2,4 = 37,6 \text{ cm}$$

$$M_T/h_m = 30/0,376 = 79,8 \text{ kN}$$

$$M_{FI} = \frac{(M_T/h_m) * L}{4} = \frac{79,79 * 6,0}{4} = 119,7 \text{ kNm}$$

$$B_{Ed} = M_{FI} * h_m = 119,7 * 0,376 = 45,0 \text{ kNm}^2$$

b) Wie bereits beschrieben lässt sich das Wölbmoment durch Stabwerksprogramme, in diesem Fall RFEM, exakt bestimmen. Hierzu wird der vorliegende Stab mit der gegebenen Lagerung, den Wölbrandbedingungen und der Belastung modelliert um anschließend eine Wölbkraftanalyse durchzuführen. Diese Analyse erfasst sowohl die primäre (St. Venant'sche) Torsion als auch die sekundäre (Wölbkraft-)Torsion.

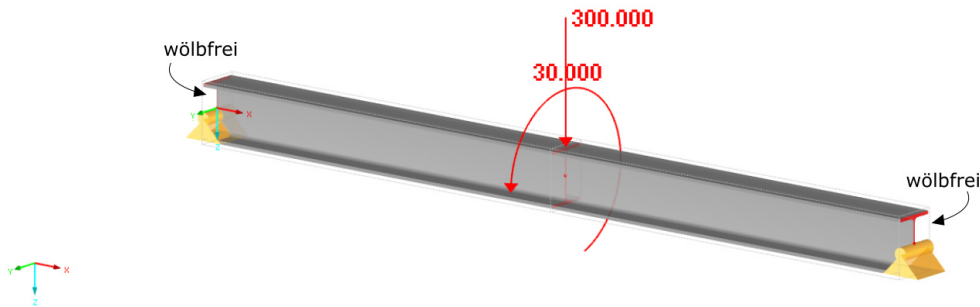


Abbildung 4.39: Darstellung des Systems und der Belastung

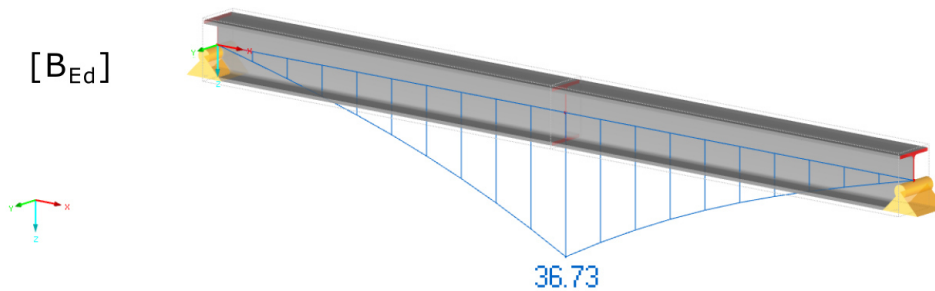


Abbildung 4.40: Verlauf des Wölbmoments B_{Ed} [kNm^2]

Ein Ergebnisvergleich der beiden Berechnungsmethoden (a) Ingenieurmodell „Flanschbiegung“ und b) „exakte“ numerische Wölbkraftanalyse nach Theorie II. Ordnung) zeigt das deutlich konservative Ergebnis nach dem Ingenieurmodell:

$$\Delta = \frac{45,0 - 36,73}{36,73} \approx 22\%$$

Die Abweichung beläuft sich auf etwa 20%. Die Näherungslösung durch das Ingenieurmodell der „Flanschbiegung“ liefert also ein deutlich höheres, dementsprechend konservatives, Ergebnis. Für die weiteren Berechnungsschritte wird die „exakte Lösung“ des Wölbmoments aus der numerischen Wölbkraftanalyse verwendet.

Bemessungsbiegemoment $M_{y,Ed}$

$$M_{y,Ed} = \frac{F_{z,Ed} * L}{4} = \frac{300,0 * 6,0}{4} = 450 \text{ kNm}$$

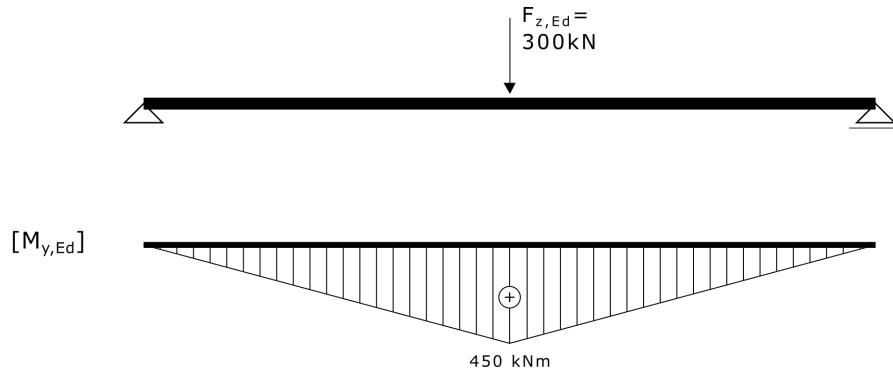


Abbildung 4.41: Biegemoment $M_{y,Ed}$ [kNm]

Plastischer Spannungsverlauf unter $M_{y,Ed} + B_{Ed}$

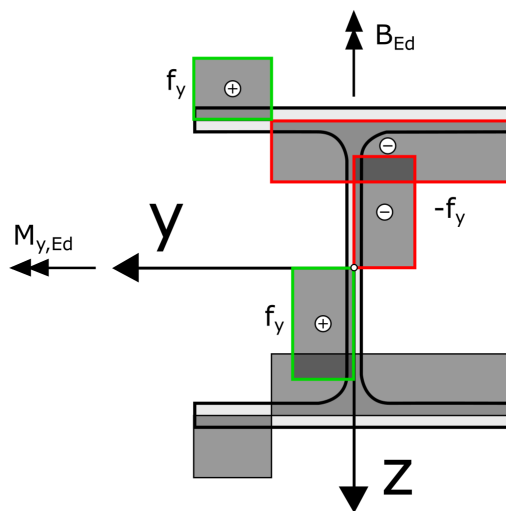


Abbildung 4.42: Plastische Spannungsverteilung unter $M_{y,Ed} + B_{Ed}$

Aus der voll plastischen Spannungsverteilung unter $M_{y,Ed} + B_{Ed}$ folgt die Querschnittsklassifizierung der Flanschbleche für konstante Druckbeanspruchung bzw. die Klassifizierung des Stegblechs für reine Biegung.

Querschnittsklassifizierung

EN 1993-1-1 Pkt. 7.5

Stress distribution in parts (compression positive)			
Class 1	$c/t \leq 72 \varepsilon$	$c/t \leq 28 \varepsilon$	when $\alpha_c > 0,5$: $c/t \leq \frac{126 \varepsilon}{5,5 \alpha_c - 1}$ when $\alpha_c \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{36 \varepsilon}{\alpha_c}$

Abbildung 4.43: Klassifizierungsgrenzwerte Stegblech (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 7.3)

Stress distribution in parts (compression positive)			
Class 1	$c/t \leq 9 \varepsilon$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha_c}$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha_c \sqrt{\alpha_c}}$

Abbildung 4.44: Klassifizierungsgrenzwerte Flanschblech (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 7.3)

Tabelle 4.7: HEB-400: Werte für c und t bzw. c/t

HEB-400	c [mm]	t [mm]	c/t [-]
Steg	298,0	13,5	22,07
Flansch	116,25	24,0	4,84

Mit dem Materialparameter $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,814$ für S355 ergibt sich die Querschnittseinteilung wie folgt:

Steg:

$$\frac{c}{t} = 22,07 \leq 72 * \varepsilon = 72 * 0,814 = 58,61 \rightarrow QK1$$

Flansch:

$$\frac{c}{t} = 4,84 \leq 9 * \varepsilon = 9 * 0,814 = 7,32 \rightarrow QK1$$

→ Gesamtquerschnitt: Klasse 1

Querschnittsnachweis

EN 1993-1-1 Pkt. 8.2.7

Der in EN 1993-1-1: Pkt. 8.2.7 neu formulierte reduzierte Biege­widerstand $M_{c,B,Rd}$ auf­grund der Interaktion mit dem gleichzeitig wirkendem Wölb­bimoment B_{Ed} für Quer­schnitte der Klassen 1 und 2 ist gegeben durch (4.24):

$$M_{c,B,Rd} = \sqrt{1 - \frac{B_{Ed}}{B_{Rd}}} * M_{pl,Rd} \quad (4.24)$$

Einsetzen in Gleichung (4.24) liefert:

$$M_{c,B,Rd} = \sqrt{1 - \frac{B_{Ed}}{B_{Rd}}} * M_{pl,Rd} = \sqrt{1 - \frac{36,73}{72,08}} * 114736 = 80350,21 \text{ kNm}$$

— mit:

B_{Rd} . . . plastisch aufnehmbares Wölb­bimoment [kNm^2]

$$B_{Rd} = \frac{Z_{pl} * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{20304 * 35,5}{1,0} = 720792 \text{ kNm}^2 \hat{=} 72,08 \text{ kNm}^2$$

— mit:

Z_{pl} . . . plastisches Wölb­widerstandsmoment [cm^4]

$$Z_{pl} = 0,25 * t_f * b^2 * (h - t_f) = 0,25 * 2,4 * 30,0^2 * (40,0 - 2,4) = 20304 \text{ cm}^4$$

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl,y} * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{3232 * 35,5}{1,0} = 114736 \text{ kNm}$$

Somit kann der Querschnittsnachweis wie folgt geführt werden:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{c,B,Rd}} = \frac{450,0 * 10^2}{80350,21} = 0,560 \leq 1,0 \quad \checkmark$$

4.4 Neues Berechnungsmodell für den Widerstand unausgesteifter Stegbleche gegenüber lokalen Querlasten

Durch den erhöhten arbeitstechnischen Aufwand der durch das Anbringen von Steifen an Stellen konzentrierter Lasteinleitung notwendig ist, wird vor allem im Hochbau versucht, eine steifenlose Krafteinleitung zu erreichen, um wirtschaftlichere Stahlkonstruktionen zu ermöglichen. Steifen ermöglichen die Verteilung der Lasten entlang einer größeren Länge. Fehlen diese Steifen, treten als logischen Konsequenz größere lokale Spannungen σ_z im Stegblech auf. Zusätzlich wird es planmäßig vorkommen, dass diese Beanspruchung durch weitere Effekte zu überlagern sein wird. Zu beachtende Effekte sind demnach:

- **Tragfähigkeit des Steges gegenüber konzentrierter Querlasten:** Diese ist hauptsächlich von der Lastverteilungslänge l_{eff} abhängig.
- **Beulgefährdung des Stegblechs zufolge Querlasten:** Stege mit hoher Schlankheit (h_w/t_w) neigen bei Querdruckbeanspruchung zum Ausbeulen. Dies ist zusätzlich abhängig von der Position der Krafteinleitung in Trägerlängsrichtung (z.B. Trägertrandbereich oder Trägermitte) zu beachten.
- **Interaktion von σ_z und σ_x :** Üblicherweise sind neben den lokalen vertikalen Spannungen auch Längsspannungen aus Biege- oder Normalkraftbeanspruchung vorhanden. Hierbei ist zu unterscheiden, ob es sich um eine Längsdruck- oder Längszugspannung handelt.
- **Interaktion von σ_z und τ :** Die zusätzlichen Schubspannungen τ bewirken eine Festigkeitsreduktion für σ_z und können bei schlanken Stegen mitunter zu Schubbeulerscheinungen führen.

Bezüglich des Nachweises bei steifenloser Krafteinleitung gab es bereits Bemessungsmodelle in DIN 18800 sowie auch in „EC3-alt“ in den Punkten EN 1993-1-8: Pkt. 6.2.6.2 und EN 1993-1-5: Abschnitt 6. Auf die bisher bestehenden Regelungen wird an dieser Stelle nicht eingegangen, sondern nur das neue, vereinfachte Berechnungsmodell aus „EC3-neu“, welches in EN 1993-1-1: Pkt. 8.2.11 zu finden ist, vorgestellt:

Zunächst muss von der starren Lasteinleitungslänge s_s ausgehend die effektive Lastausbreitungslänge L_y mit einem Lastausbreitungsverhältnis von 1 : 2,5 bis zum Ende der Abrundung bzw. des Kehlnahtansatzes im belasteten Stegblech ermittelt werden. Durch die Multiplikation der effektiven Lastausbreitungslänge L_y mit der Stegstärke t_w ergibt sich die Pressungsfläche, aus der sich mithilfe der Fließgrenze die Grundtragfähigkeit des Stegstreifens $F_{z,Rd}$ unter alleiniger Wirkung der Querlast bestimmen lässt. Der

Abminderungs- bzw. Interaktionsfaktor k_w berücksichtigt die gleichzeitige Wirkung möglicher Längs- und Schubspannungen im belasteten Trägersteg. Die tatsächliche Tragfähigkeit gegenüber der Querlast ergibt sich aus der Multiplikation der Grundtragfähigkeit $F_{z,Rd}$ mit dem Reduktionsfaktor k_w . Lokales Beulen kann ausgeschlossen werden, sofern der Grenzwert von $F_{z,Ed}$, der im Wesentlichen von der Stegslankheit t_w/d_w abhängt, eingehalten wird. Zusätzlich beschränkt sich die Anwendung der Regelungen in EN 1993-1-1: Pkt. 8.2.11 auf eine elastische Querschnittsausnutzung im querbelasteten Träger unmittelbar an der Stelle der Lasteinleitung.

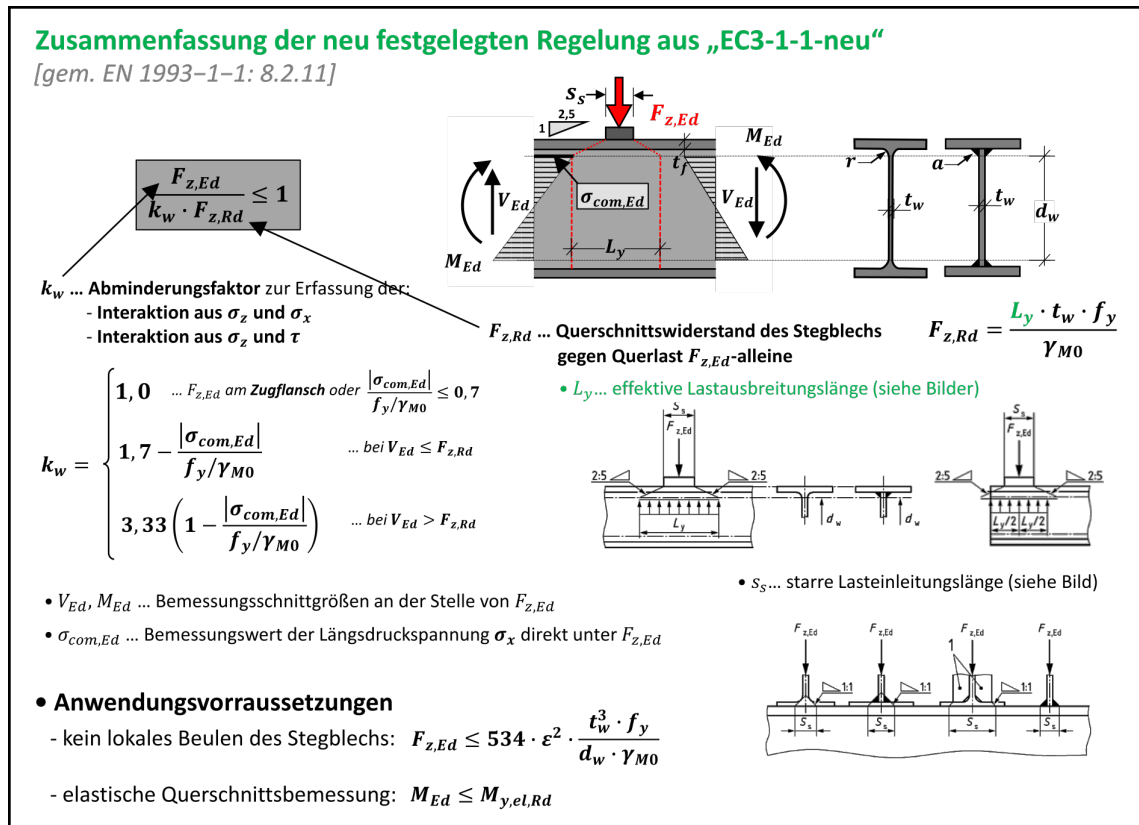


Abbildung 4.45: Zusammenfassung der Regelungen in EN 1993-1-1- „neu“ zur steifenlosen Kräfteinleitung

4.4.1 Beispiel: Steifenlose Krafteinleitung

Gegeben sei der in Abbildung 4.46 dargestellte Biegeträger, bestehend aus einem IPE-500-Profil der Stahlgüte S355 mit einer Spannweite von 8m. An den Enden ist das Profil jeweils durch Gabellagerungen gehalten. Als Beanspruchung erfährt das System eine konzentrierte vertikale Querlast von $F_{z,Ed} = 300kN$, die über eine starre Lasteinleitungsplatte der Breite $s_s = 8cm$ ohne eine zusätzliche Quersteife eingeleitet wird.

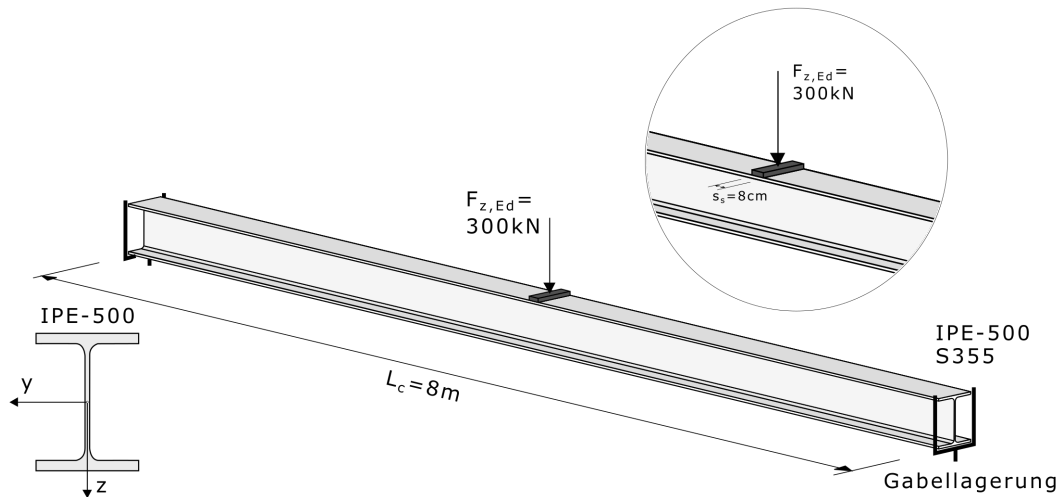


Abbildung 4.46: Statisches System, Belastung und Querschnitt

Tabelle 4.8 zeigt die zutreffenden Material- und Querschnittskennwerte des vorliegenden IPE-500-Profils:

Tabelle 4.8: Material- und Querschnittskennwerte IPE-500

$f_y = 35,5kN/cm^2$	$A = 116cm^2$	$\gamma_{M,0} = \gamma_{M,1} = 1,0$	$r = 2,1cm$
$h = 50,0cm$	$b = 20,0cm$	$t_f = 1,6cm$	$t_w = 1,02cm$
$I_y = 48200cm^4$	$I_z = 2142cm^4$	$i_y = 20,43cm$	$i_z = 4,31cm$
	$W_{el,y} = 1928cm^3$	$W_{el,z} = 214cm^3$	

Die Schnittkraftverläufe werden in Abbildung 4.47 dargestellt:

$$A_v = B_v = \frac{F_{z,Ed}}{2} = \frac{300}{2} = 150kN$$

$$M_{y,Ed} = \frac{F_{z,Ed}}{2} * \frac{L}{2} = \frac{300 * 8,0}{2 * 2} = 600kNm$$

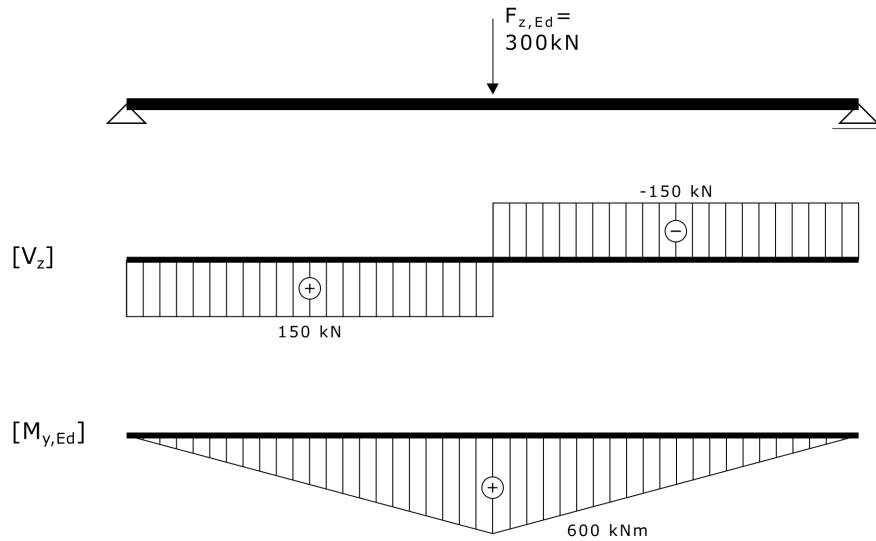


Abbildung 4.47: Schnittkraftverläufe

Es müssen zunächst die Grenzen der Anwendbarkeit des Bemessungsmodells zur steifenlosen Krafteinleitung überprüft werden. Hierzu müssen folgende 2 Bedingungen eingehalten werden:

a) kein lokales Beulen des Stegblechs:

$$F_{z,Ed} \leq 534 * \epsilon^2 * \frac{t_w^3 * f_y}{d_w * \gamma_{M0}} \quad (4.25)$$

b) kein Plastizieren des Trägers aus der Haupttragwirkung direkt unter der Lasteinleitung

$$M_{Ed} \leq M_{y,el,Rd} \quad (4.26)$$

$$a) F_{z,Ed} = 300 \text{ kN} \leq 534 * 0,814^2 * \frac{1,02^3 * 35,5}{42,6 * 1,0} = 312,9 \text{ kN} \quad \checkmark$$

— mit:

$$\bullet \epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,814$$

$$\bullet d_w = h - 2 * t_f - 2 * r = 500 - 2 * 16 - 2 * 21 = 426 \text{ mm} = 42,6 \text{ cm}$$

$$b) M_{Ed} = 600 \text{ kNm} \leq M_{y,el,Rd} = W_{y,el} * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 1930 * \frac{35,5}{1,0} * 10^{-2} = 685,15 \text{ kNm} \quad \checkmark$$

Da beide Kriterien erfüllt sind, darf das neue, vereinfachte Bemessungsmodell aus EN 1993-1-1 angewendet werden.

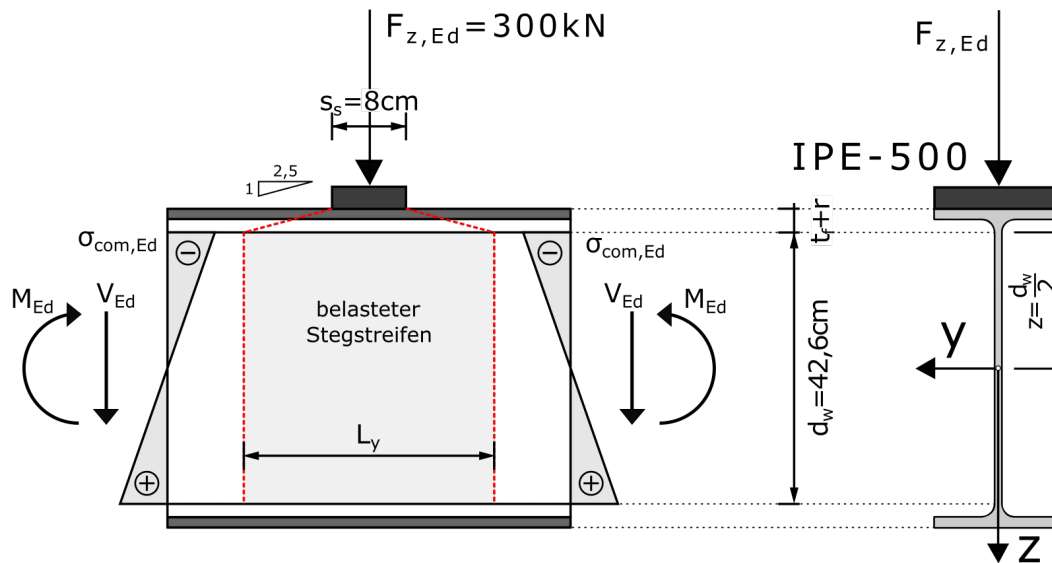


Abbildung 4.48: Darstellung der Lastausbreitung

Die Spannung am Ende der Ausrundung $\sigma_{com,Ed}$ lässt sich wie folgt bestimmen:

$$\sigma_{com,Ed} = \frac{M_{Ed}}{I_y} * z = \frac{600 * 10^2}{48200} * \frac{42,6}{2} = 26,52 \text{ kN/cm}^2$$

Da bei der vorliegenden Belastungssituation eine Kombination aus Schubspannung τ und Drucknormalspannung σ_x vorliegt, muss durch den Interaktions- bzw. Abminderungsfaktor k_w eine Abminderung der Tragfähigkeit erfolgen:

$k_w = 1,0$ bei:

$$\frac{|\sigma_{com,Ed}|}{f_y/\gamma_{M0}} = \frac{26,515}{35,5/1,0} = 0,747 \not\leq 0,7 \quad \text{X}$$

k_w bei $V_{Ed} \leq F_{z,Ed}$ ($V_{Ed} = 150 \text{ kN} < F_{z,Ed} = 300 \text{ kN}$):

$$k_w = 1,7 - \frac{|\sigma_{com,Ed}|}{f_y/\gamma_{M0}} = 1,7 - \frac{26,52}{35,5/1,0} = 0,953$$

Hinsichtlich der Lastausbreitungslänge wird in EN 1993-1-1: Pkt. 8.2.11 zwischen 2 Fällen unterschieden:

- Fall 1: Die Lastausbreitung ist in Trägerlängsrichtung auf keiner Seite begrenzt
- Fall 2: Die Lastausbreitung ist in Trägerlängsrichtung entweder auf einer oder zwei Seiten begrenzt.

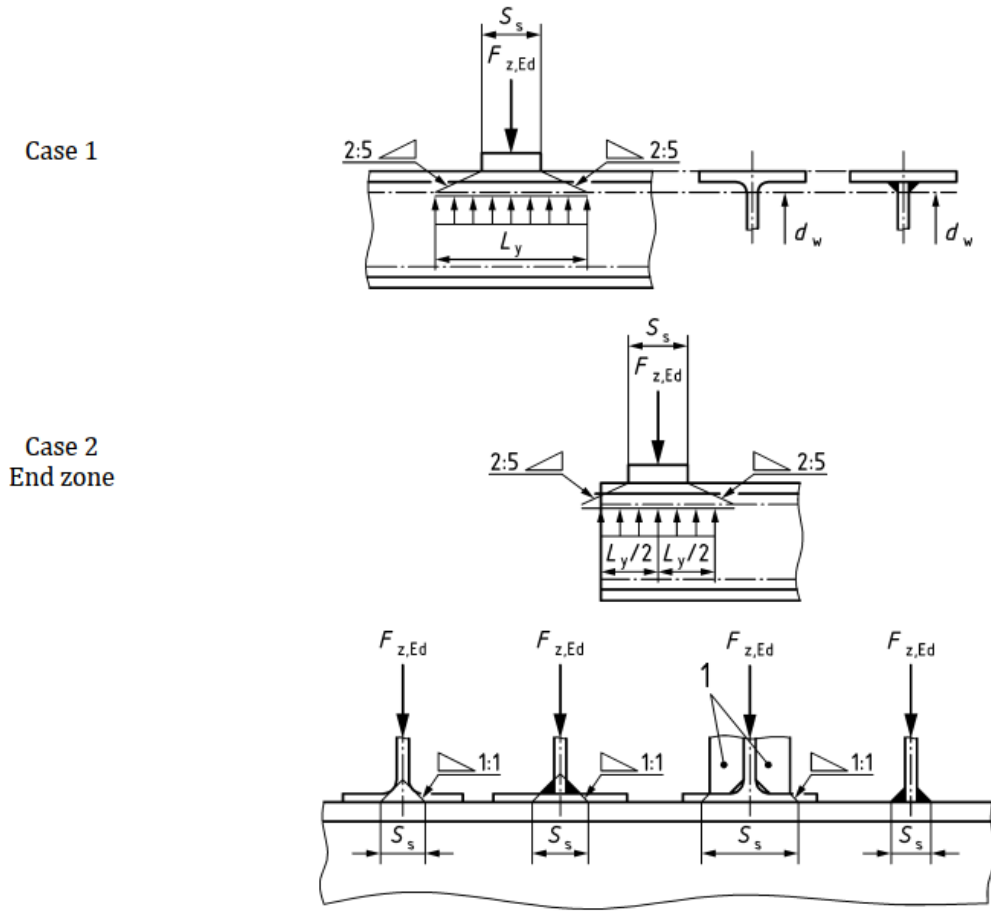


Abbildung 4.49: Darstellung der Lastausbreitung (Auszug aus EN 1993-1-1: Abb. 8.4)

Für den im Beispiel vorliegenden Fall 1 lässt sich die Lastausbreitungslänge L_y über die starre Lasteinleitungslänge s_s , das Ausbreitungsverhältnis von 1 : 2,5 sowie das Maß zwischen Profilorberkante und Ende der Ausrundung bestimmen:

$$L_y = s_s + 2 * 2,5 * (t_f + r) = 8,0 + 2 * 2,5 * (1,6 + 2,1) = 26,5 \text{ cm}$$

Daraus ergibt sich die Grundtragfähigkeit $F_{z,Rd}$:

$$F_{z,Rd} = \frac{L_y * t_w * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{26,5 * 1,02 * 35,5}{1,0} = 959,57 \text{ kN}$$

Somit kann schlussendlich nachgewiesen werden, ob sich die konzentrierte Last auch ohne darunter angebrachter Steife einleiten lässt:

$$\frac{F_{z,Ed}}{k_w * F_{z,Rd}} = \frac{300}{0,953 * 959,57} = 0,328 \leq 1,0 \quad \checkmark$$

Literaturverzeichnis

- Ch. Derler. *Beitrag zu den inhaltlichen Änderungen in der Neuauflage von EN 1993-1-1*. Institutsveröffentlichung, Technische Universität Graz, 2020.
- Bauforumstahl e.V. *Eurocode 3. Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Band 1*. Beuth Verlag, 2014. ISBN 978-3-410-24120-1.
- U. Kuhlmann. *Stahlbau-Kalender 2020*. Ernst & Sohn Verlag, 2020. ISBN 978-3-433-03290-9.
- Ch. Petersen. *Stahlbau*. Springer Verlag, 2013. ISBN 978-3-8348-8610-1.
- A. Taras. *Beitrag zur Entwicklung konsistenter Bemessungsregeln für Stabstabilitätsfälle im Stahlbau*. Dissertation, Technische Universität Graz, 2012.
- Technisches Komitee CEN/TC 250. *Eurocode 3 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbauteilen; Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. Austrian Standards Institute, 2014.
- Technisches Komitee CEN/TC 250. *ÖNORM B 1993-1-1: Nationale Ergänzungen zu EN 1993-1-1*. Austrian Standards Institute, 2017.
- Technisches Komitee CEN/TC 250. *Eurocode 3 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbauteilen; Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. Austrian Standards Institute, 2020.
- Technisches Komitee CEN/TC 250. *Eurocode 3 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbauteilen; Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile*. Austrian Standards Institute, 2020/01.
- G. Wagenknecht. *Stahlbau-Praxis nach Eurocode 3 - Band 1*. Beuth Verlag, 2014. ISBN 978-3-410-24089-1.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Klassifizierungsgrenzwerte beidseitig gestützter Querschnittsteile (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 7.3) — Anm.: Druckspannungen sind hier positiv definiert.	4
2.2	Flussdiagramm zu den Methoden der Tragwerksberechnung (Auszug aus EN 1993-1-1: Abb. 7.3)	5
2.3	Statisches System des Rahmentragwerks	6
2.4	Abmessungen der verwendeten Profile	6
2.5	γ_F -fache charakteristische Lasten (Bemessungslasten)	7
2.6	Bemessungsbiegemomente $M_{y,Ed}^{I.O.}$ [kNm]	9
2.7	Bemessungsnormalkräfte $N_{Ed}^{I.O.}$ [kN]	9
2.8	Bemessungsquerkräfte $V_{z,Ed}^{I.O.}$ [kN]	9
2.9	Klassifizierungsgrenzwerte Stegblech (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 7.3)	10
2.10	Klassifizierungsgrenzwerte Flanschblech (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 7.3)	11
2.11	Plastische Spannungsverteilungen im jeweils maßgebenden Querschnitt in Stütze und Träger	11
2.12	Klassifizierungsgrenzwerte des Stegblechs (Auszug aus EN 1993-1-1-„alt“: Tab. 5.2)	13
2.13	Ermittlung der Knickspannungslinie (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.3)	14
2.14	Zugehörige Werte der Imperfektionsfaktoren (EN 1993-1-1: Tab. 8.2) . .	14
2.15	Ermittlung des Imperfektionsfaktors α_{LT} (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.5)	15
2.16	Zuordnung der Knickspannungslinie (EN 1993-1-1-„alt“: Tab. 6.5)	15
2.17	1. Eigenform des Systems mit $\alpha_{cr,sw} = 6,09$	16
2.18	2. Eigenform des Systems mit $\alpha_{cr,ns,in} = 43,54$	16

2.19	3. Eigenform des Systems mit $\alpha_{cr,ns,out} = 50,98$	16
2.20	Verschiebefigur zufolge der fiktiven Horizontalkraft $H_f = 1kN$	17
2.21	Verschiebefigur zufolge der Bemessungslasten	18
2.22	Vergleich von N_{cr} mit N_{Ed}	19
2.23	Prüfung der Anwendungsvoraussetzungen der jeweiligen Methoden	20
2.24	Übersicht über die Methoden der Tragwerksberechnung, Charakteristika und Anwendbarkeit	21
2.25	Zugehörige Werte für β (EN 1993-1-1: Tab. 7.1)	23
2.26	Zugehörige Werte für β_{LT} (EN 1993-1-1: Tab. 7.2)	24
2.27	Designwerte der Stabvorkrümmung (EN 1993-1-1-,„alt“: Tab. 5.1)	24
2.28	Verformungsfigur und Knicklängen $L_{k,y}$ und $L_{k,z}$ für den maßgebenden Stab 4	27
2.29	Aufteilung der Gesamlast aus w_d in symmetrischen und antimetrischen Lastanteil	28
2.30	Momentenverlauf nach Theorie I. Ordnung zufolge der Gesamlast sowie der symmetrischen und antimetrischen Lastanteile	29
2.31	Momentenverlauf nach Theorie II. Ordnung zufolge der Gesamlast sowie der symmetrischen und antimetrischen Lastanteile	29
2.32	Ermittlung der Faktoren f_M und k_c (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.6)	31
2.33	Relevante Stababschnitte und zugehörige Momentenverläufe zur Bestimmung der Momentenbeiwerte C_{my} und C_{mLT}	35
2.34	Ermittlung der äquivalenten Momentenbeiwerte (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.9)	35
2.35	Ermittlung des Interaktionsfaktors k_{yy} (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.7)	37
2.36	Ermittlung des Interaktionsfaktors k_{zy} (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.8)	37
2.37	Anzusetzende Imperfektionen und Knicklängen $L_{k,y}$ und $L_{k,z}$ für den maßgebenden Stab 4	40
2.38	Horizontale Ersatzlasten F_h als Alternative zum Ansatz der Schiefstellung als Vorverformung	41
2.39	Bemessungsbiegemomente $M_{y,Ed}^{II.O.}$ [kNm]	41
2.40	Bemessungsnormalkräfte $N_{Ed}^{II.O.}$ [kN]	42
2.41	Bemessungsquerkräfte $V_{z,Ed}^{II.O.}$ [kN]	42
2.42	Ermittlung der Faktoren f_M und k_c (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.6)	44

2.43	Relevante Stababschnitte und zugehörige Momentenverläufe zur Bestimmung der Momentenbeiwerte C_{my} und C_{mLT}	48
2.44	Ermittlung der äquivalenten Momentenbeiwerte (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.9)	48
2.45	Ermittlung des Interaktionsfaktors k_{yy} (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.7)	49
2.46	Ermittlung des Interaktionsfaktors k_{zy} (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.8)	50
2.47	Ansatz der Imperfektionen ϕ und $e_{0,y}$, sowie maßgebender Stababschnitt für Stabnachweis $BDK(BK_{zz})$	52
2.48	Äquivalente Ersatzlasten zur Erfassung der Anfangsschiefstellung ϕ bzw. Vorkrümmungen $e_{0,y}$	53
2.49	Äquivalente Ersatzlasten zur Erfassung der Vorkrümmungen	53
2.50	Bemessungsbiegemomente $M_{y,Ed}^{II.O.}$ [kNm]	54
2.51	Bemessungsnormalkräfte $N_{Ed}^{II.O.}$ [kN]	54
2.52	Bemessungsquerkräfte $V_{z,Ed}^{II.O.}$ [kN]	54
2.53	Ermittlung der Faktoren f_M und k_c (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.6) .	56
2.54	Relevanter Stababschnitt und zugehöriger Momentenverlauf zur Bestimmung des Momentenbeiwerts C_{mLT}	60
2.55	Ermittlung der äquivalenten Momentenbeiwerte (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.9)	60
2.56	Ermittlung des Interaktionsfaktors k_{zy} (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.8)	62
2.57	Exakte Ermittlung von $EI_y * \eta''_{cr} $ in ABAQUS	64
2.58	Statisches System und Lastfall Knotenverschiebung $\Delta = 1mm$	65
2.59	Schnittkräfte M_y zufolge Knotenverschiebung $\Delta = 1mm$	65
2.60	Statisches System, Lasten und Vorverformung	66
2.61	Schnittkräfte $M_{y,Ed}$ zufolge Systemauslenkung	66
2.62	Auswertung von $\eta_{cr}(x)$, $\eta'_{cr}(x)$ und $ \eta''_{cr}(x) $ an den Stützstellen	67
2.63	Bemessungsbiegemomente $M_{y,Ed}^{II.O.}$ [kNm]	69
2.64	Bemessungsnormalkräfte $N_{Ed}^{II.O.}$ [kN]	69
2.65	Bemessungsquerkräfte $V_{z,Ed}^{II.O.}$ [kN]	69
2.66	Belastung und Imperfektionen (Schiefstellung ϕ und Vorkrümmungen $e_{0,y}$ bzw. $e_{0,LT}$)	72
2.67	Biegemomentenverlauf M_y eine Laststufe vor dem Versagen ($k = 1, 211$)	73

2.68	Biegemomentenverlauf M_y bei Erreichen des max. Laststeigerungsfaktors (Traglastzustand; $k_{ult} = 1, 212$)	74
2.69	Normalspannungsverlauf σ_x bei maximalem Lastniveau ($k_{ult} = 1, 212$)	74
2.70	Gegenüberstellung der Ausnutzungsgrade der jeweiligen Berechnungsmethoden	76
3.1	Zusammenfassung der Änderungen bei der Knickklinienauswahl	79
3.2	Statisches System, Belastung und Querschnitt	80
3.3	Klassifizierungsgrenzwerte Stegblech (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 7.3)	81
3.4	Klassifizierungsgrenzwerte Flanschblech (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 7.3)	81
3.5	Klassifizierungsgrenzwerte des Stegblechs (Auszug aus EN 1993-1-1-„alt“: Tab. 5.2)	82
3.6	Mögliche Versagensformen des Biegeknickens in Richtung der Achsen y-y und z-z	83
3.7	Ermittlung der Knickspannungslinie (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.3)	84
3.8	Zugehörige Werte der Imperfektionsfaktoren (EN 1993-1-1: Tab. 8.2)	85
3.9	Ermittlung der Knickspannungslinie (Auszug aus EN 1993-1-1-„alt“: Tab. 6.2)	85
3.10	Zugehörige Werte der Imperfektionsfaktoren (EN 1993-1-1-„alt“: Tab. 6.1)	85
3.11	Zusammenfassung der Regelungen bezüglich der Biegedrillknickkurven für den allgemeinen Fall (GC ... general case)	88
3.12	Zusammenfassung der in „EC3-neu“ neu verankerten Biegedrillknickkurven für Walzprofile bzw. gleichartige geschweißte Profile	89
3.13	Statisches System, Belastung und Querschnitt	90
3.14	Klassifizierungsgrenzwerte Stegblech (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 7.3)	91
3.15	Klassifizierungsgrenzwerte Flanschblech (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 7.3)	91
3.16	Momentenverteilung und mögliche Versagensform	93
3.17	Ermittlung der Faktoren f_M und k_c (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.6)	95
3.18	Ermittlung des Imperfektionsfaktors α_{LT} (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.5)	96
3.19	Zuordnung der Knickspannungslinie (EN 1993-1-1-„alt“: Tab. 6.5)	97
3.20	Imperfektionsbeiwert α_{LT} (EN 1993-1-1-„alt“: Tab. 6.3)	97

3.21 Zusammenfassung der Änderungen der Knicklinien für den allgemeinen Fall	101
3.22 Zusammenfassung der Änderungen der Knicklinien für doppelt-symmetrische I-Profile	101
3.23 Statisches System und Belastung	102
3.24 Klassifizierungsgrenzwerte Stegblech (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 7.3)	103
3.25 Klassifizierungsgrenzwerte Flanschblech (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 7.3)	103
3.26 Klassifizierungsgrenzwerte des Stegblechs (Auszug aus EN 1993-1-1-„alt“: Tab. 5.2)	104
3.27 Mögliche Versagensformen: Biegedrillknicken um die gebundene Drehachse in Flanschhöhe bzw. Biegeknicken um die y-y-Achse	105
3.28 Ermittlung der Knickspannungslinie (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.3)	106
3.29 Zugehörige Werte der Imperfektionsfaktoren (EN 1993-1-1: Tab. 8.2) . .	107
3.30 Zusammenfassung der Änderungen beim Stabilitätsnachweis für verdrehsteife Stäbe unter N und M_y	112
3.31 Zusammenfassung der Änderungen beim Stabilitätsnachweis für verdrehweiche Stäbe unter N und M_y	112
3.32 Statisches System, Belastung und Querschnitt	113
3.33 Klassifizierungsgrenzwerte Stegblech (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 7.3)	114
3.34 Klassifizierungsgrenzwerte Flanschblech (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 7.3)	114
3.35 Spannungsverteilung	115
3.36 Klassifizierungsgrenzwerte des Stegblechs (Auszug aus EN 1993-1-1-„alt“: Tab. 5.2)	116
3.37 Momentenverteilung und mögliche Versagensformen	118
3.38 Ermittlung der Knickspannungslinie (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.3)	119
3.39 Zugehörige Werte der Imperfektionsfaktoren (EN 1993-1-1: Tab. 8.2) . .	120
3.40 Ermittlung der Faktoren f_M und k_c (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.6) .	122
3.41 Ermittlung des Imperfektionsfaktors α_{LT} (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.5)	123
3.42 Zuordnung der Knickspannungslinie (EN 1993-1-1-„alt“: Tab. 6.5)	124
3.43 Imperfektionsbeiwert α_{LT} (EN 1993-1-1-„alt“: Tab. 6.3)	124

3.44	Relevante Stababschnitte und zugehörige Momentenverläufe zur Bestimmung der Momentenbeiwerte C_{my} und C_{mLT}	127
3.45	Ermittlung der äquivalenten Momentenbeiwerte (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.9)	127
3.46	Ermittlung des Interaktionsfaktors k_{yy} (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.7)	129
3.47	Ermittlung des Interaktionsfaktors k_{zy} (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.8)	129
3.48	Zusammenfassung der Änderungen bei der Stabbemessung von monosymmetrischen Querschnitten	133
3.49	Statisches System, Belastung und Querschnitt	134
3.50	Klassifizierungsgrenzwerte Stegblech (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 7.3)	135
3.51	Klassifizierungsgrenzwerte Flanschblech (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 7.3)	135
3.52	Geometrie des Profils und Lage der PNL	136
3.53	Spannungsverteilung	137
3.54	Erläuterungen zu α_c	137
3.55	Klassifizierungsgrenzwerte des Stegblechs (Auszug aus EN 1993-1-1-„alt“: Tab. 5.2)	139
3.56	Momentenverteilung und mögliche Versagensformen	140
3.57	Ermittlung der Knickspannungslinie (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.3)	141
3.58	Zugehörige Werte der Imperfektionsfaktoren (EN 1993-1-1: Tab. 8.2) . .	142
3.59	Zugehörige Werte des Imperfektionsfaktors α_{LT} (EN 1993-1-1: Tab. 8.2)	143
3.60	Zuordnung der Knickspannungslinie (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.4)	144
3.61	Relevante Stababschnitte und zugehörige Momentenverläufe zur Bestimmung der Momentenbeiwerte C_{my} und C_{mLT}	145
3.62	Ermittlung der äquivalenten Momentenbeiwerte (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.9)	145
3.63	Ermittlung des Interaktionsfaktors k_{yy} (EN 1993-1-1: Tab. C.1)	147
3.64	Ermittlung des Interaktionsfaktors k_{zy} (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.8)	147
3.65	Geometrieverhältnisse	149
4.1	Generelle Nachweisführung	155
4.2	Vorgehensweise zur Bestimmung von teilplastischen Tragfähigkeiten nach dem neuen, alternativen Bemessungsmodell für semi-kompakte Querschnitte aus EN 1993-1-1-„neu“: Anhang B [1/3]	158

4.3	Vorgehensweise zur Bestimmung von teilplastischen Tragfähigkeiten nach dem neuen, alternativen Bemessungsmodell für semi-kompakte Querschnitte aus EN 1993-1-1-„neu“: Anhang B [2/3]	159
4.4	Vorgehensweise zur Bestimmung von teilplastischen Tragfähigkeiten nach dem neuen, alternativen Bemessungsmodell für semi-kompakte Querschnitte aus EN 1993-1-1-„neu“: Anhang B [3/3]	159
4.5	Statisches System, Belastung und Querschnitt	161
4.6	Belastungs- und Schnittkraftverläufe	162
4.7	Elastische Spannungsverteilung in Querschnitt QS1	163
4.8	Klassifizierungsgrenzwerte Stegblech (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 7.3)	164
4.9	Klassifizierungsgrenzwerte Flanschblech (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 7.3)	164
4.10	Beulwert k_{σ} für die Klassifizierung des Flansches (Auszug aus EN 1993-1-5: Tab. 4.2)	164
4.11	Momentenverteilungen und mögliche Versagensformen	169
4.12	Ermittlung der Knickspannungslinie (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.3)	170
4.13	Zugehörige Werte der Imperfektionsfaktoren (EN 1993-1-1: Tab. 8.2)	171
4.14	Ermittlung des Imperfektionsfaktors α_{LT} (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.5)	173
4.15	Zuordnung der Knickspannungslinie (EN 1993-1-1-„alt“: Tab. 6.5)	173
4.16	Imperfektionsbeiwert α_{LT} (EN 1993-1-1-„alt“: Tab. 6.3)	173
4.17	Relevante Stababschnitte und zugehörige Momentenverläufe zur Bestimmung der Momentenbeiwerte C_{my} , C_{mz} und C_{mLT}	175
4.18	Ermittlung der äquivalenten Momentenbeiwerte (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.9)	175
4.19	Ermittlung der Interaktionsfaktoren k_{yy} und k_{yz} (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.7)	177
4.20	Ermittlung der Interaktionsfaktoren k_{zy} und k_{zz} (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.8)	177
4.21	Statisches System, Belastung und Querschnitt	180
4.22	Belastungs- und Schnittkraftverläufe	181
4.23	Klassifizierungsgrenzwerte Stegblech (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 7.3)	182
4.24	Klassifizierungsgrenzwerte Flanschblech (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 7.3)	182

4.25	Elastische Spannungsverteilung im Stegblech	183
4.26	Momentenverteilung und mögliche Versagensformen	186
4.27	Zugehörige Werte der Imperfektionsfaktoren (EN 1993-1-1: Tab. 8.2) . . .	187
4.28	Ermittlung der Knickspannungslinie (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.3)	188
4.29	Ermittlung des Imperfektionsfaktors α_{LT} (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.5)	190
4.30	Zuordnung der Knickspannungslinie (EN 1993-1-1-„alt“: Tab. 6.5)	190
4.31	Imperfektionsbeiwert α_{LT} (EN 1993-1-1-„alt“: Tab. 6.3)	190
4.32	Relevante Stababschnitte und zugehörige Momentenverläufe zur Bestimmung der Momentenbeiwerte C_{my} und C_{mLT}	192
4.33	Ermittlung der äquivalenten Momentenbeiwerte (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.9)	192
4.34	Ermittlung des Interaktionsfaktors k_{yy} (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.7)	194
4.35	Ermittlung des Interaktionsfaktors k_{zy} (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 8.8)	194
4.36	Neue Interaktion von Biegung und Wölbkrafttorsion	197
4.37	Statisches System, Belastung und Querschnitt	198
4.38	Ingenieurmodell „Flanschbiegung“	199
4.39	Darstellung des Systems und der Belastung	200
4.40	Verlauf des Wölbmoments B_{Ed} [kNm^2]	200
4.41	Biegemoment $M_{y,Ed}$ [kNm]	201
4.42	Plastische Spannungsverteilung unter $M_{y,Ed} + B_{Ed}$	201
4.43	Klassifizierungsgrenzwerte Stegblech (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 7.3)	202
4.44	Klassifizierungsgrenzwerte Flanschblech (Auszug aus EN 1993-1-1: Tab. 7.3)	202
4.45	Zusammenfassung der Regelungen in EN 1993-1-1-„neu“ zur steifenlosen Krafteinleitung	205
4.46	Statisches System, Belastung und Querschnitt	206
4.47	Schnittkraftverläufe	207
4.48	Darstellung der Lastausbreitung	208
4.49	Darstellung der Lastausbreitung (Auszug aus EN 1993-1-1: Abb. 8.4) . . .	209

Tabellenverzeichnis

2.1	Querschnittskennwerte HEA-320 (Stützenprofil)	8
2.2	Querschnittskennwerte IPE-400 (Trägerprofil)	8
2.3	HEA-320: Werte für c und t bzw. c/t	10
2.4	IPE-400: Werte für c und t bzw. c/t	10
2.5	Gegenüberstellung der Resultate für das Biegemoment $M_{y,m}^* = EI_y * \eta''_{cr} $	68
2.6	Imperfektionen	72
3.1	Beispielübersicht	77
3.2	Material- und Querschnittskennwerte HEB-200	80
3.3	HEB-200: Werte für c und t bzw. c/t	81
3.4	Material- und Querschnittskennwerte IPE-500	90
3.5	IPE-500: Werte für c und t bzw. c/t	91
3.6	Material- und Querschnittskennwerte IPE-360	102
3.7	IPE-360: Werte für c und t bzw. c/t	103
3.8	Material- und Querschnittskennwerte IPE-500	113
3.9	IPE-500: Werte für c und t bzw. c/t	114
3.10	Material- und Querschnittskennwerte IPE-500-mod	134
3.11	modifiziertes IPE-500-Profil: Werte für c und t bzw. c/t	135
4.1	Beispielübersicht	153
4.2	Material- und Querschnittskennwerte HEAA-300	161
4.3	HEAA-300: Werte für c und t bzw. c/t	165
4.4	Material- und Querschnittskennwerte IPE-500	180
4.5	IPE-500: Werte für c und t bzw. c/t	181

4.6	Material- und Querschnittskennwerte HEB-400	198
4.7	HEB-400: Werte für c und t bzw. c/t	202
4.8	Material- und Querschnittskennwerte IPE-500	206

Dies ist eine Veröffentlichung des

FACHBEREICHS INGENIEURBAUKUNST (IBK) AN DER TU GRAZ

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst umfasst die dem konstruktiven Ingenieurbau nahe stehenden Institute für Baustatik, Betonbau, Stahlbau, Holzbau & Holztechnologie, Materialprüfung & Baustofftechnologie, Baubetrieb & Bauwirtschaft, Hochbau & Industriebau, Bauinformatik und Allgemeine Mechanik der Fakultät für Bauingenieurwissenschaften an der Technischen Universität Graz.

Dem Fachbereich Ingenieurbaukunst ist das Bautechnikzentrum (BTZ) zugeordnet, welches als gemeinsame hochmoderne Laboreinrichtung zur Durchführung der experimentellen Forschung aller beteiligten Institute dient. Es umfasst die drei Laboreinheiten für konstruktiven Ingenieurbau, für Bauphysik und für Baustofftechnologie.

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst kooperiert im gemeinsamen Forschungsschwerpunkt „Advanced Construction Technology“. Dieser Forschungsschwerpunkt umfasst sowohl Grundlagen- als auch praxisorientierte Forschungs- und Entwicklungsprogramme.

Weitere Forschungs- und Entwicklungskooperationen bestehen mit anderen Instituten der Fakultät, insbesondere mit der Gruppe Geotechnik, sowie nationalen und internationalen Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft.

Die Lehrinhalte des Fachbereichs Ingenieurbaukunst sind aufeinander abgestimmt. Aus gemeinsam betreuten Projektarbeiten und gemeinsamen Prüfungen innerhalb der Fachmodule können alle Beteiligten einen optimalen Nutzen ziehen.

Durch den gemeinsamen, einheitlichen Auftritt in der Öffentlichkeit präsentiert sich der Fachbereich Ingenieurbaukunst als moderne Lehr- und Forschungsgemeinschaft, welche die Ziele und Visionen der TU Graz umsetzt.

Nummerierungssystematik der Schriftenreihe:

D – Diplom-, Masterarbeiten/Dissertationen | F – Forschungsberichte
S – Skripten, Vorlesungsunterlagen | V – Vorträge, Tagungen

Institutskenzahl:

1 – Allgemeine Mechanik | 2 – Baustatik | 3 – Betonbau
4 – Holzbau & Holztechnologie | 5 – Stahlbau & Flächentragwerke
6 – Materialprüfung & Baustofftechnologie | 7 – Baubetrieb & Bauwirtschaft
8 – Hochbau & Industriebau | 9 – Bauinformatik
10 – Labor für Konstruktiven Ingenieurbau

Fortlaufende Nummer pro Reihe und Institut / Jahreszahl