

**Bestimmung der Sicherheitselemente
für die Anwendung von DIN EN
1993-1-5 „Plattenförmige Bauteile“
Teil 1**

T 3234

T 3234

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2010

ISBN 978-3-8167-8274-2

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

Im Auftrag des
Deutschen Instituts für Bautechnik

ZP 52-5-16.117.1-1130/04

ZP 52-5-16.117.1-1155/05

Bestimmung der Sicherheitselemente für die Anwendung von DIN EN 1993-1-5 „Plattenförmige Bauteile“

Schlussbericht

Teil I

Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann
Dipl.-Ing. Benjamin Braun
Institut für Konstruktion und Entwurf
Universität Stuttgart

Dezember 2009

Bitte beachten:

Fehlende Seiten sind **Leerseiten**,
die bei Erstellung
der PDF-Datei für den Download nicht
berücksichtigt wurden

Fraunhofer IRB Verlag

Inhaltsverzeichnis

Vorbemerkungen.....	1
1 Anlass	3
2 Nationale Festlegungen zu DIN EN 1993-1-5:2006.....	5
2.1 Abschnitt 2.2(5)	5
2.2 Abschnitt 3.3(1)	6
2.3 Abschnitt 4.3(6)	7
2.4 Abschnitt 5.1(2)	9
2.5 Abschnitt 6.4(2)	10
2.6 Abschnitt 8(2)	12
2.7 Abschnitt 9.1(1)	12
2.8 Abschnitt 9.2.1(9).....	13
2.9 Abschnitt 10(1)	13
2.10 Abschnitt 10(5)	14
2.11 Abschnitt C.2(1).....	16
2.12 Abschnitt C.5(2).....	16
2.13 Abschnitt C.8(1).....	17
2.14 Abschnitt C.9(3).....	18
2.15 Abschnitt D.2.2(2).....	18
3 Konfliktfreie Nationale Ergänzungen zu DIN EN 1993-1-5:2006	21
3.1 Allgemeines	21
3.2 Abschnitt 4.4(6)	21
3.3 Abschnitt 4.5.1(3).....	22
3.4 Abschnitt 5.3(2)	23
3.5 Abschnitt 5.3(3)	24
3.6 Abschnitt 5.3(4)	25
3.7 Kapitel 7	25
3.8 Abschnitt D.2.2(3).....	27
4 Literatur.....	29

Vorbemerkungen

Im Schlussbericht zu diesem Forschungsvorhaben werden der Inhalt und der Hintergrund des deutschen Nationalen Anhangs zu DIN EN 1993-1-5:2006 erläutert.

Der vorliegende Teil I des Schlussberichts stellt Inhalte und Vorschläge zu den nationalen Festlegungen und konfliktfreien nationalen Ergänzungen vor. Die Festlegungen und Ergänzungen werden dabei so begründet, dass sie auch als Vorlage für eine europäische Harmonisierung dienen können. Insgesamt behandeln die Teile I und II alle Festlegungen und Ergänzungen des Nationalen Anhangs. Dabei wird in Teil II [28] zu folgenden nationalen Festlegungen Stellung genommen:

- Abschnitt 3.3(1) „Wahl des Verfahrens zur Bestimmung der mittragende Breite im Grenzzustand der Tragfähigkeit“
- Abschnitt 5.1(2) „Erhöhung der zulässigen Schubfließspannung“
- Abschnitt 8(2) „Flanschinduziertes Stegblechbeulen“
- Abschnitt 9.1(1) „Anforderungen an Steifen und deren Detailausbildung“
- Abschnitt 9.2.1(9) „Drillknicken von Steifen mit Wölbsteifigkeit“
- Abschnitt C.8(1) „Maximalwert der Hauptmembrandehnung für Berechnungen mit der Finite-Element-Methode (FEM)“
- Abschnitt C.9(3) „Festlegung der Teilsicherheitsbeiwerte für Berechnungen mit der Finite-Element-Methode (FEM)“

Die Textstellen sind im vorliegenden Dokument entsprechend gekennzeichnet. Alle übrigen Abschnitte werden in diesem vorliegenden Teil I kommentiert.

1 Anlass

Wie es im Leitpapier L [6] zur Anwendung der Eurocodes formuliert ist, ist und bleibt die Bestimmung von nationalen Sicherheitsniveaus für Hoch- und Ingenieurbauwerke und für Teile davon einschließlich der Aspekte der Dauerhaftigkeit und der Wirtschaftlichkeit in der Zuständigkeit des jeweiligen europäischen Mitgliedstaats. Etwaige unterschiedliche Bedingungen geographischer, klimatischer oder lebensgewohnheitlicher Art sowie unterschiedliche Schutzniveaus werden durch Wahlmöglichkeiten in den Eurocodes für bestimmte Zahlenwerte oder alternative Verfahren berücksichtigt. Diese sind auf nationaler Ebene als so genannte nationale Festlegungen (Nationally Determined Parameters – NDPs) zu definieren. Auf diese Weise wird es den europäischen Mitgliedstaaten gestattet, das Schutzniveau einschließlich der Aspekte der Dauerhaftigkeit und Wirtschaftlichkeit zu wählen, das für Bauwerke auf ihrem Gebiet gilt.

Weiter heißt es, dass bei der Bestimmung der nationalen Festlegungen die Mitgliedstaaten

- aus den in den Eurocodes vorgesehenen Klassen auswählen sollten;
- den empfohlenen Wert oder einen Wert aus dem empfohlenen Wertebereich auswählen sollten, soweit die Eurocodes eine Empfehlung geben;
- wenn alternative Verfahren vorgegeben sind, das empfohlene Verfahren anwenden sollten, soweit die Eurocodes eine Empfehlung geben;
- berücksichtigen sollten, dass die nationalen Festlegungen, bestimmt für die unterschiedlichen Eurocodes und deren verschiedene Teile, kohärent sein müssen.

Darüber hinaus kann der Nationale Anhang auch Angaben machen

- zur Anwendung informativer Anhänge;
- zu konfliktfreien nationalen Ergänzungen (Non-Conflicting Complimentary Information – NCCIs), die dem Anwender beim Umgang mit den Eurocodes helfen.

Im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) werden im Schlussbericht zu diesem Forschungsvorhaben ein Vorschlag und Begründungen für den deutschen Nationalen Anhang zu DIN EN 1993-1-5:2006 [8] vorgestellt, die eine Anwendung von DIN EN 1993-1-5:2006 in Deutschland ermöglichen soll.

Neben den nationalen Festlegungen umfasst der Nationale Anhang eine Reihe von so genannten konfliktfreien nationalen Ergänzungen, die die zukünftige Bemessungspraxis erleichtern und das bisherige Sicherheitsniveau auch in der Zukunft sicherstellen sollen. In Kapitel 2 werden die nationalen Festlegungen vorgeschlagen und begründet, und in Kapitel 3 die konfliktfreien nationalen Ergänzungen.

2 Nationale Festlegungen zu DIN EN 1993-1-5:2006

2.1 Abschnitt 2.2(5)

Inhalt von DIN EN 1993-1-5:

Bei Anwendung der Methode der wirksamen Breiten sind gemäß Abschnitt 2.2(1) wirksame Breiten infolge Plattenbeulen nicht nur beim Nachweis der Bauteiltragfähigkeit, sondern auch bei der Tragwerksberechnung zu berücksichtigen, wenn dadurch die Steifigkeit der Bauteile wesentlich beeinflusst wird. Die Regelung gemäß Abschnitt 2.2(5) lautet, dass die Auswirkung des Plattenbeulens bei der Schnittgrößenermittlung vernachlässigt werden darf, wenn die wirksame Fläche eines unter Druckbeanspruchung stehenden Querschnittsteils größer ist als seine zugehörige ρ_{lim} -fache Bruttoquerschnittsfläche. In der Praxis bedeutet dies, dass für den ermittelten Abminderungsfaktor ρ des jeweiligen Querschnittsteils gelten muss:

$$\rho \geq \rho_{\text{lim}} \qquad \text{Gl. (1)}$$

In Anmerkung 1 zu Abschnitt 2.2(5) wird ein Wert von $\rho_{\text{lim}} = 0,5$ empfohlen.

Vorschlag zu DIN EN 1993-1-5 NA:

Es gilt die Empfehlung.

Begründung:

In [26] wurden für gängige Tragwerkssysteme im Brückenbau des kurzen und mittleren Spannweitenbereichs Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses schlanker Stegbleche auf die Bauteilsteifigkeit, die Schnittgrößenverteilung und die Verformungsgrößen durchgeführt. Hierin wurde zunächst der Einfluss der Bauteilsteifigkeit auf die Verteilung der Schnittgrößen untersucht. Für die Untersuchungen wurde den Tragwerkssystemen eine realitätsnahe Verteilung der Bauteilsteifigkeiten über die Trägerlänge zugrunde gelegt, die sich aus der Betrachtung bestehender Brückentragwerke ableitete. Um den möglichen Einfluss der unterschiedlichen Steifigkeitsverteilungen von Baustahl- und Verbundquerschnitten zu erfassen, wird zwischen Bau- und Endzustand unterschieden. Bild 1 aus [26] zeigt beispielhaft die Zunahme des Feldmoments aufgrund einer reduzierten Steifigkeit im Stützbereich für verschiedene statische Systeme und Laststellungen.

In [26] konnte gezeigt werden, dass nur bei hinreichend großer Steifigkeitsveränderung des Querschnitts der Einfluss auf die Schnittgrößen und die Verformungen berücksichtigt werden muss. So stellt sich eine signifikante Differenz in Größenordnungen über 5% bei der Schnittgrößenermittlung erst für Veränderungen in der Bauteilsteifigkeit in etwa ab 15% ein. Für die Verformungsgrößen liegt dieser Schwellenwert in etwa bei 10%. Inwiefern schlanke Stegbleche einen Einfluss auf die Schnittgrößenverteilung und die Verformungsgrößen haben, hängt im Wesentlichen davon ab, wie hoch ihr Einfluss auf die Bauteilsteifigkeit ist. Im Rahmen der Untersuchungen wurden daher Querschnittsvarianten untersucht, die typische Querschnitte in Trägerbereichen mit überwiegend negativer (Stützbereich) und positiver Momentenbeanspruchung (Feldbereich) sowie im Bau- und Endzustand darstellen. Die Flanschabmessungen wurden für die jeweilige Querschnittsvariante als konstant angenommen und lediglich die Schlankheit des

Steges wurde zwischen $h_w/t_w=100$ und 300 variiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Auswirkungen des Plattenbeulens auf die Verringerung der Bauteilsteifigkeit mit weniger als 3% sehr gering sind. Die Auswirkungen bei der Verwendung von schlanken Stegblechen sind daher vernachlässigbar. Die wirksamen Breiten sind im Allgemeinen also nur für den Tragfähigkeitsnachweis des Querschnitts und nicht bei der Tragwerksberechnung zu berücksichtigen. Ähnliches gilt für eine realistische Wahl der Gurtabmessungen. Für einen längs unversteiften Druckgurt müsste das Verhältnis $b/t > 70$ sein, um den in Abschnitt 2.2(5) empfohlenen Grenzwert ρ_{lim} zu erreichen. Dies wiederum führt zu einer sehr unwirtschaftlichen Bemessung, so dass ein solch schlanker Druckgurt aus diesem Grunde in der Praxis wohl nicht gewählt werden wird.

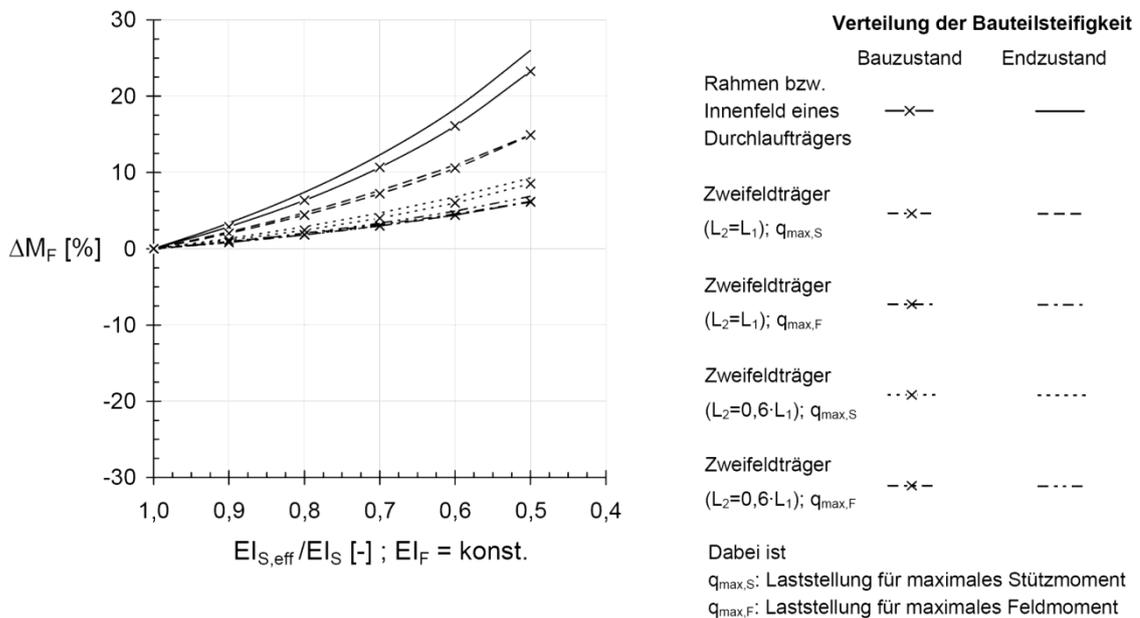


Bild 1: Zunahme des Feldmoments aufgrund einer reduzierten Steifigkeit im Stützbereich

2.2 Abschnitt 3.3(1)

Inhalt von DIN EN 1993-1-5:

Bei Biegeträgern mit breiten Flanschen bleibt der Querschnitt infolge der Schubverzerrung nicht eben und es kann sich aufgrund dieser Verwölbung keine konstante Verteilung der Biege- und Normalspannungen über die Breite des Gurtes einstellen. Die Spannungen sind daher am Steg maximal und nehmen aufgrund der Schubweichheit der Gurte mit zunehmender Entfernung vom Steg ab. Um eine Anwendung der Bernoulli-Hypothese, die von einem Ebenbleiben der Querschnitte ausgeht, zu ermöglichen, wird in Kapitel 3 eine mittragende Breite eingeführt. Zur Berücksichtigung der Schubverzerrungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit stehen in Abschnitt 3.3(1) folgende drei Verfahren zur Auswahl:

- Mittragende Breiten unter Voraussetzung elastischen Werkstoffverhaltens, siehe Abschnitt 3.2.1
- Mittragende Breiten unter Voraussetzung elastischen Werkstoffverhaltens und unter Berücksichtigung des Plattenbeulens, siehe Anmerkung 2 zu Abschnitt 3.3
- Mittragende Breiten unter Voraussetzung elastisch-plastischen Werkstoffverhaltens und unter Berücksichtigung des Plattenbeulens sowie der Begrenzung plastischer Dehnungen, siehe Anmerkung 3 zu Abschnitt 3.3

In Anmerkung 1 zu Abschnitt 3.3(1) wird die Vorgehensweise nach Anmerkung 3 unter Voraussetzung elastisch-plastischen Werkstoffverhaltens und unter Berücksichtigung des Plattenbeulens sowie der Begrenzung plastischer Dehnungen empfohlen.

Vorschlag zu DIN EN 1993-1-5 NA:

Es gilt die Empfehlung.

Begründung:

Siehe Teil II des Schlussberichts [28].

2.3 Abschnitt 4.3(6)

Inhalt von DIN EN 1993-1-5:

Hybridträger sind dadurch gekennzeichnet, dass für die Steg- und Gurtbleche Stähle mit unterschiedlichen Streckgrenzen zum Einsatz kommen. Gemäß Abschnitt 4.3(6) wird dabei vorausgesetzt, dass die Streckgrenze der Gurtbleche größer ist als die Streckgrenze des Stegblechs. Dies stimmt mit dem Anwendungsbereich in der Praxis überein, wo Stähle mit hohen Festigkeiten in der Regel nur dann eingesetzt werden, wenn diese tatsächlich ausgenutzt werden können. Plattenartige Bauteile bestehend aus Gurten und Stegen werden im Wesentlichen durch Biegemomente und Querkräfte beansprucht. Dabei besitzen die Flansche einen sehr hohen Anteil an der Momententragfähigkeit und können bei Anwendung der Methode der wirksamen Breiten im Grenzzustand der Tragfähigkeit bis zum vollen Wert ihrer rechnerischen Streckgrenze ausgenutzt werden. Das Stegblech hingegen stellt die Ausfachung zwischen den Flanschen dar und dient zur Abtragung der Querkräfte. Es ist in der Regel so schlank, dass es beulgefährdet ist und die Streckgrenze somit ab einem Verhältnis von Stegblechhöhe zu Stegblechdicke von $h_w/t_w > 60$ keinen Einfluss mehr hat, vgl. [17]. Das Streckgrenzenverhältnis von Gurtblech zu Stegblech ist durch den Verhältniswert φ_h definiert:

$$f_{yf} \leq \varphi_h \cdot f_{yw} \quad \text{Gl. (2)}$$

In der Anmerkung zu Abschnitt 4.3(6) wird ein Wert von $\varphi_h = 2,0$ empfohlen.

Vorschlag zu DIN EN 1993-1-5 NA:

Es gilt die Empfehlung.

Begründung:

Die Verwendung einer niedrigeren Stahlgüte im Steg im Vergleich zur Streckgrenze der Gurte führt im Grenzzustand der Tragfähigkeit zu einem Fließen der Stegbereiche in der Nähe der Gurte, siehe Bild 2. Es ist zu erkennen, dass sich bei Erreichen der Streckgrenze des Flansches eine höhere Spannung am Stegblechrand einstellen würde, als rechnerisch aufgenommen werden kann. Im Zug- und Druckbereich fehlt demnach ein dreiecksförmiger Spannungsblock. Ebenso wie eine Verschiebung der Schwerpunktlage infolge Plattenbeulen führt auch der Wegfall des dreiecksförmigen Spannungsblocks zu einer Verschiebung der Schwerpunktlage, wenn es sich um einen nicht doppelt-symmetrischen Querschnitt handelt. In [1] wird gezeigt, dass bei Einhaltung des Streckgrenzenverhältnisses von $\varphi_h \leq 2,0$ die Verschiebung der Schwerpunktlage vernachlässigt werden darf.

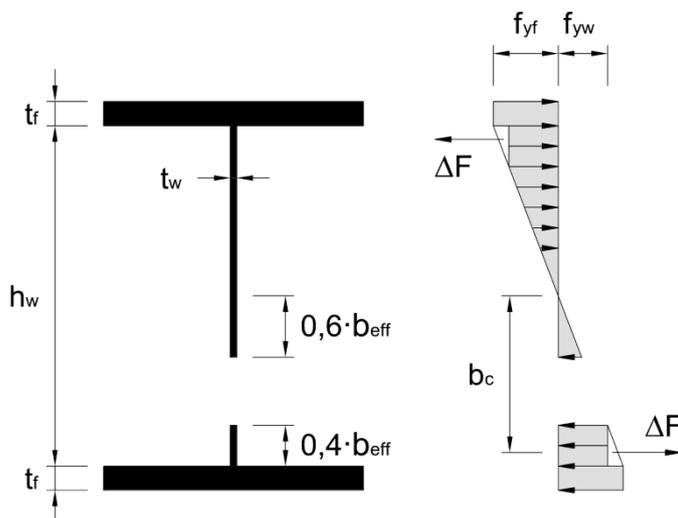


Bild 2: Spannungsverteilung in einem Hybridquerschnitt unter negativer Momentenbeanspruchung im Grenzzustand der Tragfähigkeit

Im Hinblick auf die Ermüdungsfestigkeit konnte in verschiedenen Veröffentlichungen [2], [27], [30] gezeigt werden, dass das lokale Fließen in Stegbereichen im Grenzzustand der Tragfähigkeit durch das elastische Verhalten der Flansche begrenzt wird und nach dem ersten Fließen dieser Vorgang umkehrbar ist. Eine sehr großzügige Interpretation, wie z. B. in Schweden [31], nimmt an, dass die Forderung zur Einhaltung elastischer Spannungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit lediglich für die Spannungen im Gurt, nicht jedoch für die Spannungen im Steg gilt. Dies gilt jedoch nicht für Deutschland. Hier ist der Nachweis zur Einhaltung elastischer Spannungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit z. B. gemäß Abs. 7.1(2), DIN EN 1993-2 [9], oder Abs. 7.1(1), DIN EN 1993-6 [10], zu führen und in der Regel maßgebend in Bezug auf den Wert des Streckgrenzenverhältnisses φ_h , so dass hier in der Praxis $\varphi_h = 2,0$ wohl kaum erreicht wird.

2.4 Abschnitt 5.1(2)

Inhalt von DIN EN 1993-1-5:

In Versuchen kann festgestellt werden, dass für gedrungene schubbeanspruchte Bleche die Schubbeanspruchbarkeit den 0,7- bis 0,8-fachen Wert der in Zugversuchen ermittelten Streckgrenze erreichen kann, siehe z. B. [16]. Diese liegt circa 20% über der eigentlichen Schubfließspannung $f_y / \sqrt{3}$. Die höhere Ausnutzbarkeit ist im Wesentlichen auf die Wiederverfestigung des Stahls zurückzuführen, deren Ausnutzung zugelassen werden kann, da sie im Allgemeinen nicht zu übermäßig großen Verformungen führt. Experimentell abgesicherte Werte liegen für Stahlsorten bis S460 vor. Die zulässige Erhöhung der Schubfließspannung ist über den Wert η definiert. Dieser legt auch die Lage des Plateaus der Schubbeulkurven fest, wie in Bild 3 dargestellt.

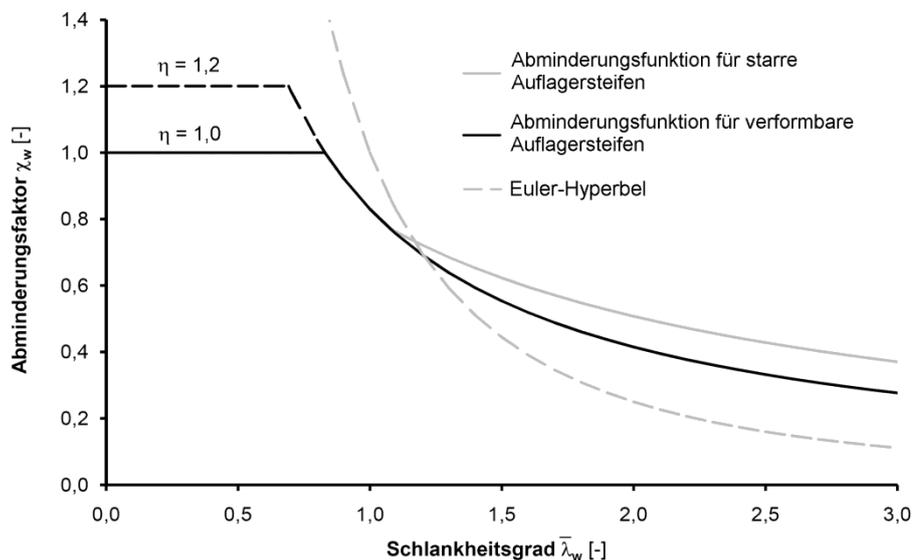


Bild 3: Abminderungskurven für das Schubbeulen

In Anmerkung 2 zu Abschnitt 5.1(2) wird für Streckgrenzen $f_y \leq 460$ MPa ein Wert von $\eta = 1,2$, für $f_y > 460$ MPa ein Wert von $\eta = 1,0$ empfohlen.

Vorschlag zu DIN EN 1993-1-5 NA:

Für den Hochbau gilt die Empfehlung.

Für den Brückenbau und ähnliche Anwendungsbereiche ist $\eta = 1,0$ anzusetzen.

Begründung:

Siehe Teil II des Schlussberichts [28].

2.5 Abschnitt 6.4(2)

Inhalt von DIN EN 1993-1-5:

Zur Ermittlung der Querbeltungstragfähigkeit war in ENV 1993-1-1 [11] noch das Minimum aus den Einzelnachweisen für plastisches Stauchen, örtliches Beulen und Beulen des Gesamtfeldes zu bestimmen. In Kapitel 6 sind die Einzelnachweise nun für Träger mit oder ohne Längssteifen in einem einzigen Nachweis zusammengefasst. Für unversteifte Blechfelder unter Querbeltung wurde von *Lagerqvist* [19] ein Bemessungsmodell entwickelt, das auf den in Gl. (3) angegebenen Beulwert zurückgreift. Von *Graciano* [15] wurde Gl. (3) zur Berücksichtigung einer Längssteife gemäß Gl. (4) erweitert.

$$k_F = 6 + 2 \cdot \left(\frac{h_w}{a} \right)^2 \quad \text{gemäß Bild 6.1 [7]} \quad \text{Gl. (3)}$$

$$k_F = 6 + 2 \cdot \left(\frac{h_w}{a} \right)^2 + \left[5,44 \cdot \frac{b_1}{a} - 0,21 \right] \cdot \sqrt{\gamma_s} \quad \text{gemäß Gl. (6.6) [7]} \quad \text{Gl. (4)}$$

$$\text{für } \frac{b_1}{h_w} \leq 0,3 \quad \text{und} \quad 0,05 \leq \frac{b_1}{a} \leq 0,3$$

Gl. (4) zur Bestimmung des Beulwerts für längs versteifte Träger darf nur unter Berücksichtigung der dort angegebenen Grenzen angewendet werden. Dies hängt mit dem Ansatz des kleinsten Eigenwertes zusammen, der bewirkt, dass durch das verwendete Bemessungsmodell sich mit zunehmendem Abstand b_1 der Längssteife vom belasteten Rand höhere Beanspruchbarkeiten ergeben. Dies steht im Widerspruch zu den bekannten experimentellen und numerischen Untersuchungen, für die mit zunehmendem Abstand der Längssteife geringere Versagenslasten beobachtet werden. In Bild 4 ist beispielhaft die rechnerisch ermittelte Beanspruchbarkeit nach Kapitel 6 den numerisch ermittelten Tragfähigkeiten $F_{R,num}$ gegenübergestellt. Die unzutreffende Beschreibung der Tragfähigkeit führt dazu, dass gemäß Bild 4 für Gl. (4) eine obere Schranke für die Lage der Längssteife angegeben werden muss.

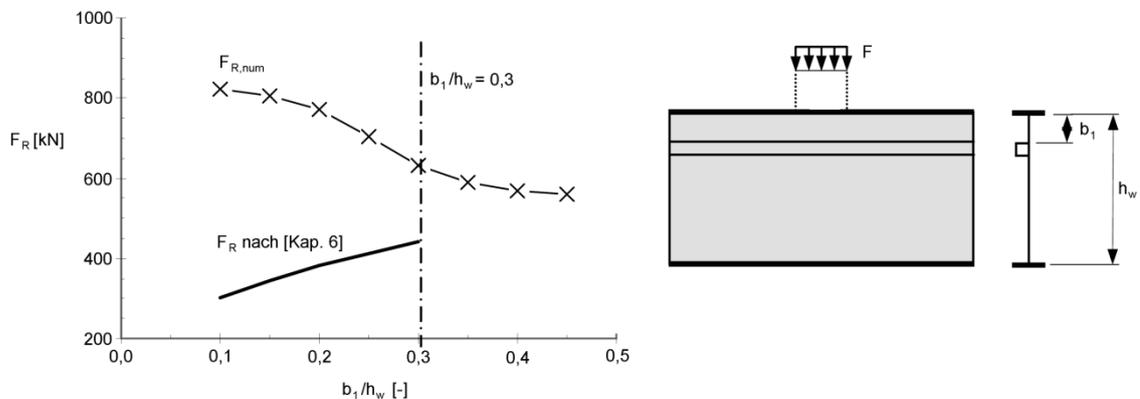


Bild 4: Vergleich von rechnerischer Beanspruchbarkeit und numerisch ermittelter Tragfähigkeit bei Querbeltung eines Längsrandes

Auf Grundlage der Anmerkung zu Abschnitt 6.4(2) dürfen im Nationalen Anhang zur Bestimmung der Tragfähigkeit von längs versteiften Trägern unter Querbelastung eines Längsrandes weitere Informationen gegeben werden.

Vorschlag zu DIN EN 1993-1-5 NA:

Für Stege mit Längssteifen darf folgendes Vorgehen angewendet werden:

- (1) Die Ersatzverzweigungslast F_{cr} ermittelt sich wie folgt:

$$F_{cr} = \frac{F_{cr,1} \cdot F_{cr,2}}{F_{cr,1} + F_{cr,2}} \quad \text{Gl. (5)}$$

mit

$$F_{cr,1} = k_{F,1} \cdot \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \cdot \frac{t_w^3}{h_w} \quad \text{Gl. (6)}$$

$$F_{cr,2} = k_{F,2} \cdot \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \cdot \frac{t_w^3}{b_1} \quad \text{Gl. (7)}$$

und

$$k_{F,1} = k_F \text{ nach Gl. (6.6), DIN EN 1993-1-5 [7]} \quad \text{Gl. (8)}$$

$$k_{F,2} = \left[0,8 \cdot \left(\frac{s_s + 2 \cdot t_f}{a} \right) + 0,6 \right] \cdot \left(\frac{a}{b_1} \right)^{0,6 \left(\frac{s_s + 2 \cdot t_f}{a} \right) + 0,5} \quad \text{Gl. (9)}$$

- (2) Der Schlankheitsgrad $\bar{\lambda}_F$ bestimmt sich mit $m_2 = 0$ nach Gl. (6.4), DIN EN 1993-1-5 [7].

- (3) Der Abminderungsfaktor ρ für Stege mit Längssteifen und Lasteinleitungstyp (a) ermittelt sich zu:

$$\rho = \frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \bar{\lambda}_F}} \leq 1,0 \quad \text{mit} \quad \varphi = 0,5 \left(1 + 0,21(\bar{\lambda}_F - 0,80) + \bar{\lambda}_F \right) \quad \text{Gl. (10)}$$

Begründung:

Die Beschreibung der Tragfähigkeit eines längsversteiften Trägers unter Querbelastung ist mit den aktuellen Regelungen des Kapitels 6 nicht zufriedenstellend. Von *Davaine* [4] wurde ein Vorschlag zur Ermittlung der Beanspruchbarkeit im Rahmen des bestehenden Nachweisverfahrens entwickelt, der die Regelungen für längs versteifte Träger mit Querbelastung eines Längsrandes deutlich verbessert. Bei der im vorgenannten Vorschlag zu DIN EN 1993-1-5 NA dargestellten Vorgehensweise nach [4] wird zunächst eine „Ersatzverzweigungslast“ nach Gl. (3) bestimmt, die sich aus den Verzweigungslasten $F_{cr,1}$ und $F_{cr,2}$ für lokales Beulen des direkt und indirekt belasteten Einzelfeldes ergibt. Für die Berechnung der Verzweigungslast $F_{cr,1}$ des indirekt belasteten Einzelfeldes wird die in Gl. (6.6) [7] angegebene Näherungslösung für den Beulwert $k_{F,1}$ übernommen. Für die Ermittlung der Verzweigungslast $F_{cr,2}$ des direkt belasteten Einzelfeldes wurde in [4] eine Näherungslösung nach Gl. (7) für ein gelenkig gelagertes Einzel-

feld abgeleitet. In Bild 5 ist die Anwendung des Vorschlag der aktuellen Regelungen nach DIN EN 1993-1-5 gegenübergestellt.

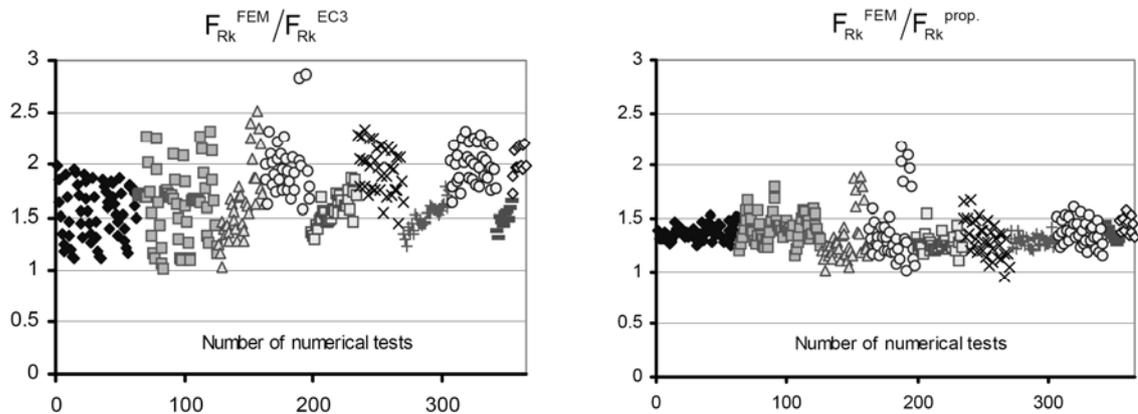


Bild 5: Vergleich von rechnerischer Beanspruchbarkeit nach aktueller DIN EN 1993-1-5 (links) bzw. Vorschlag zu DIN EN 1993-1-5 NA (rechts) und numerisch ermittelten Tragfähigkeiten bei Querbelastung eines Längsrandes nach [4]

2.6 Abschnitt 8(2)

Inhalt von DIN EN 1993-1-5:

Wird ein Blechträger durch ein Biegemoment beansprucht, so entstehen aufgrund der Krümmung des Trägers Umlenkkräfte, die vom Stegblech aufgenommen werden müssen. Können diese Kräfte nicht aufgenommen werden, beult das Stegblech aus und der Druckflansch scheint in den Steg hinein zu beulen. Das Phänomen wird als flanschinduziertes Stegblechbeulen bezeichnet. In Kapitel 8 sind Regelungen zum Nachweis gegen flanschinduziertes Stegblechbeulen angegeben.

Im Nationalen Anhang dürfen über das Kapitel 8 „Flanschinduziertes Stegblechbeulen“ hinaus weitere Informationen zu flanschinduziertem Stegblechbeulen angegeben werden.

Vorschlag zu DIN EN 1993-1-5 NA:

Keine weiteren Informationen.

Begründung:

Siehe Teil II des Schlussberichts [28].

2.7 Abschnitt 9.1(1)

Inhalt von DIN EN 1993-1-5:

Im Nationalen Anhang dürfen über das Kapitel 9 „Steifen und Detailausbildung“ hinaus weitere Anforderungen an Steifen und deren Detailausbildung festgelegt werden.

Vorschlag zu DIN EN 1993-1-5 NA:

Keine weiteren Informationen.

Begründung:

Siehe Teil II des Schlussberichts [28].

2.8 Abschnitt 9.2.1(9)

Inhalt von DIN EN 1993-1-5:

Neben dem Knicknachweis ist für Quersteifen ein Nachweis der Drillknicksicherheit erforderlich. Für Querschnitte mit geringer Wölbsteifigkeit, z. B. Flachstahlsteifen ist in der Regel das folgende Kriterium gemäß Gl. (11) zu erfüllen. Für Querschnitt mit hoher Wölbsteifigkeit, z. B. T- und L-Querschnitte oder Trapezhohlsteifen, ist entweder das sehr konservative Kriterium nach Gl. (9) oder das Kriterium nach Gl. (10) zu erfüllen. Dabei stellt der Beiwert θ in Gl. (12) elastisches Verhalten entsprechend der Querschnittsklasse 3 sicher.

$$\left(\frac{t_{st}}{b_{st}} \right)^2 \geq 5,3 \cdot \frac{f_y}{E} \quad \text{Gl. (11)}$$

$$\sigma_{cr} \geq \theta \cdot f_y \quad \text{Gl. (12)}$$

In der Anmerkung zu Abschnitt 9.2.1(9) wird ein Wert von $\theta = 6$ empfohlen.

Vorschlag zu DIN EN 1993-1-5 NA:

Es gilt die Empfehlung.

Begründung:

Siehe Teil II des Schlussberichts [28].

2.9 Abschnitt 10(1)

Inhalt von DIN EN 1993-1-5:

Im Nationalen Anhang dürfen für das Kapitel 10 „Methode der reduzierten Spannungen“ Anwendungsgrenzen angegeben werden.

Vorschlag zu DIN EN 1993-1-5 NA:

Das Verfahren der reduzierten Spannungen muss für Gebrauchstauglichkeitsnachweise verwendet werden, wenn diese gefordert sind. Es darf auch für Tragfähigkeitsnachweise angewendet werden.

Es gilt die Annahme gelenkig gelagerter Ränder.

Begründung:

In [17] wurde gezeigt, dass die Kalibrierung der Schubbeulkurve unter Annahme gelenkiger Ränder erfolgte und somit auch die Anwendung dieser Beulkurve die Annahme gelenkig gelagerter Ränder voraussetzt.

Des Weiteren wird vorausgesetzt, dass die Randbedingungen im Fall der Interpolation zwischen plattenähnlichen und knickstabähnlichen Verhalten zur Ermittlung der kritischen Spannungen identisch sind. In der Regel erfolgt die Ermittlung der kritischen Knickspannung jedoch an einem Ersatzsystem mit gelenkiger Randlagerung. Da die Vorgehensweise in Abschnitt 10 auf einem Systemschlankheitsgrad basiert, erfolgt in der Regel keine separate Betrachtung der Randbedingungen in den Grundlastfällen, so dass bei Anwendung von Abschnitt 10 die Annahme gelenkig gelagerter Ränder erfüllt sein muss.

2.10 Abschnitt 10(5)

Inhalt von DIN EN 1993-1-5:

Das Nachweiskonzept des Kapitels 10 wurde erstmals in [25] vorgestellt und enthält bereits eine Interaktion auf Grundlage der Vergleichspannungshypothese gemäß Gl. (13), die auch für den Fall beulgefährdeter Platten gilt, wenn Abminderungsbeiwerte zu bestimmen sind. Für gedrungene, nicht beulgefährdete Platten geht dieser Vergleichsspannungsnachweis in das von-Mises-Kriterium über.

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\rho_x \cdot f_y / \gamma_{M1}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{\rho_z \cdot f_y / \gamma_{M1}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\rho_x \cdot f_y / \gamma_{M1}}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{\rho_z \cdot f_y / \gamma_{M1}}\right) + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{Ed}}{\chi_w \cdot f_y / \gamma_{M1}}\right)^2} \leq 1 \quad \text{Gl. (13)}$$

Wird lediglich der ungünstigste Abminderungsbeiwert ρ zugrunde gelegt, vereinfacht sich Gl. (13) gemäß Gl. (14) zu:

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y / \gamma_{M1}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y / \gamma_{M1}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y / \gamma_{M1}}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y / \gamma_{M1}}\right) + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y / \gamma_{M1}}\right)^2} \leq \rho \quad \text{Gl. (14)}$$

Im Nationalen Anhang dürfen für die Anwendung von Gl. (13) und Gl. (14) weitere Informationen angegeben werden.

Vorschlag zu DIN EN 1993-1-5 NA:

Weitere Informationen zur Anwendung von Abschnitt 10 sind in Abschnitt 4 aus [26] enthalten.

Es gilt die Empfehlung, dass beim Auftreten von Zug- und Druckspannungen in einem Blechfeld, Gleichungen (10.4) und (10.5) lediglich auf die unter Druckbeanspruchung stehenden Querschnittsteile anzuwenden sind.

Für die Querbelastung ist folgende Beulkurve nach Anhang B.1(3), DIN EN 1993-1-5:2007-02, mit $\alpha_p = 0,34$ und $\bar{\lambda}_0 = 0,80$ anzuwenden:

$$\rho_z = \frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \bar{\lambda}_p}} \leq 1,0 \quad \text{mit} \quad \varphi = 0,5 \left(1 + \alpha_p (\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}_p \right) \quad \text{Gl. (15)}$$

Begründung:

Der Abminderungsbeiwert für plattenartiges Verhalten im Falle von Querspannungen, die nicht über die gesamte Länge des Längsrandes wirken, bestimmt sich nach Abschnitt 10(5) gemäß Abschnitt 4.5.4, d. h. wie für plattenartiges Verhalten im Falle von Längsspannungen. Wie von Seitz [29] gezeigt wurde, führt bei Anwendung von Abschnitt 4.5.4 die Interpolation zur Berücksichtigung des knickstabähnlichen Verhaltens jedoch zu Ergebnissen, die nicht sicher sind. Eine Übertragbarkeit des Abminderungsbeiwerts auf die Querrichtung ist somit nicht gegeben. Diese Diskrepanz ist in Bild 6 über dem Quotienten aus Beul- und Knickspannung dargestellt und erfordert entweder eine neue Interpolationsfunktion oder eine andere Beulkurve als Bezugswert z. B. für plattenartiges Verhalten.

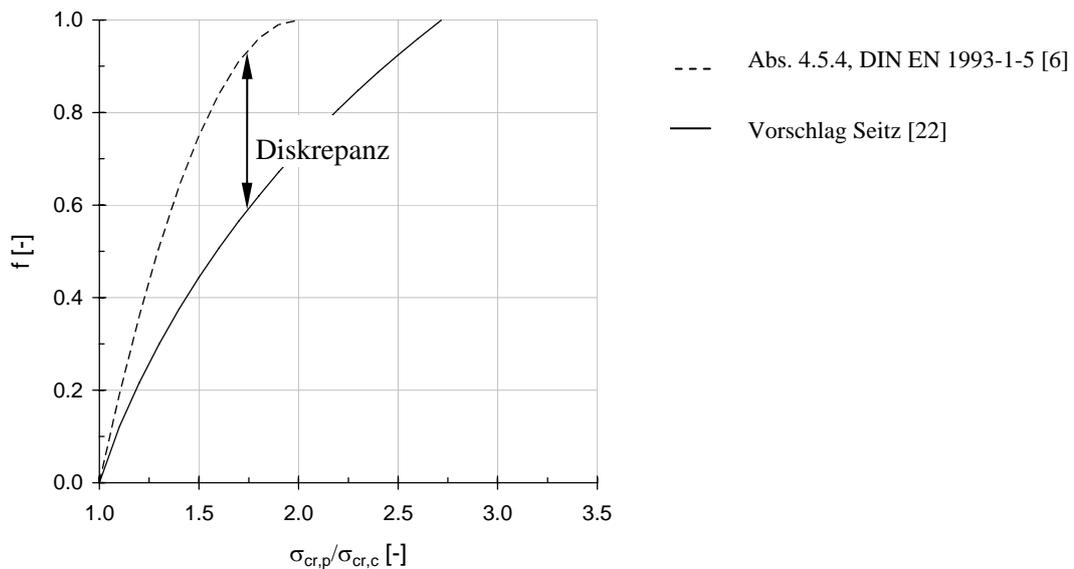


Bild 6: Vergleich der Interpolationsfunktionen nach DIN EN 1993-1-5 und dem Vorschlag nach Seitz [29]

In der 3. Ausgabe des DIN-Fachberichts 103 [12] wurde deshalb der Abminderungsbeiwert gemäß Anhang B, DIN EN 1993-1-5 [7] übernommen. Im Fall einer Querbelastung des Längsrandes, die nicht über die gesamte Länge des Längsrandes wirken, bestimmt sich der Abminderungsbeiwert für plattenartiges Verhalten gemäß Gl. (15).

Der Abminderungsbeiwert nach Kapitel 6 kann aus Kompatibilitätsgründen nicht in Zusammenhang mit Kapitel 10 verwendet werden, da die Abminderungsfunktion an eine spezielle Formulierung des Schlankheitsgrades in Abhängigkeit der kritischen Last F_{cr} und der plastischen Last F_y gebunden ist.

2.11 Abschnitt C.2(1)

Inhalt von DIN EN 1993-1-5:

In Abschnitt C.2(1) sind Punkte angegeben, auf die bei Berechnungen mit der Finite-Element-Methode (FEM) besonders zu achten ist. Solche Punkte sind z. B.

- Geeignetes Programmsystem und ausreichende Dokumentation
- Elementtyp und Netzfeinheit
- Werkstoffgesetz
- Randlagerungsbedingungen und Art der Lastaufbringung
- Imperfektionsansätze
- Grenzzustandskriterium

Nach der Anmerkung zu Abschnitt C.2(1) dürfen im Nationalen Anhang Bedingungen für die Anwendung der FEM für Entwurf und Bemessung festgelegt werden.

Vorschlag zu DIN EN 1993-1-5 NA:

Es ist durch Vergleichsrechnungen nachzuweisen, dass das gewählte Finite-Element-Modell geeignet ist und mit den gewählten Ansätzen, z. B. für Randbedingungen, Imperfektionen und Beanspruchungen, eine ausreichende Genauigkeit erreicht wird.

Begründung:

Bei der Finite-Element-Methode (FEM) handelt es sich um ein allgemeines numerisches Verfahren zur Lösung von Differentialgleichungen. Die Anforderungen, die das eingesetzte Programm und der berechnende Ingenieur dabei zu erfüllen haben, hängen in hohem Maße von der zu untersuchenden Fragestellung ab, wobei eine entsprechende Erfahrung bei Anwendung der FEM unabdingbar ist. Allen Berechnungsaufgaben ist gemein, dass eine sorgfältige Modellierung der eingehenden Parameter zu erfolgen hat, die durch Plausibilitätskontrollen des FE-Modells überprüft werden müssen. Bei allen Berechnungen ist es ratsam, einen Vergleich mit bekannten problemverwandten analytischen Lösungen und/oder experimentellen Ergebnissen zu ziehen und hierüber das eigene Modell zu verifizieren.

2.12 Abschnitt C.5(2)

Inhalt von DIN EN 1993-1-5:

Die Herstellung von Stahlbauteilen geht stets mit unvermeidbaren Imperfektionen einher. Im Allgemeinen wird zwischen geometrischen und strukturellen Imperfektionen unterschieden, die in der Regel bei Berechnungen mit der Finite-Element-Methode zu berücksichtigen sind. Geometrische Imperfektionen dürfen dabei mit der Form der modalen Beulfigur angesetzt werden. Alternativ dürfen geometrische Ersatzimperfektionen, z. B. auf Grundlage sinusförmiger Vorformungsmuster, verwendet werden.

In Abschnitt C.5(2) wird empfohlen, bei Anwendung geometrischer Imperfektionen in Form der modalen Beulfigur für die Imperfektionsamplitude einen Wert in Höhe von 80% der geometrischen Fertigungstoleranz anzusetzen.

Vorschlag zu DIN EN 1993-1-5 NA:

Es gilt der umformulierte Text zu C.5(2):

- (2) Anstelle der genaueren getrennten Ansätze von geometrischen und strukturellen Imperfektionen, dürfen geometrische Ersatzimperfektionen verwendet werden.

Sind zur Festlegung von geometrischen oder strukturellen Imperfektionen Versuche oder gutachterliche Stellungnahmen erforderlich, ist hierfür ein bauaufsichtlicher Verwendbarkeitsnachweis vorzulegen.

Zu Anmerkung 1:

Es gilt die Empfehlung, falls kein anderer Wert begründet wird.

Begründung:

Die Anforderungen für die Öffnungsklauseln C.5(2) sollten projektspezifisch festgelegt werden. Ein Vergleich verschiedener Ansätze der Imperfektionsmodellierung [23], [24], [32] zeigt, dass mit einer Kombination aus schlimmstmöglicher Imperfektion (z. B. Eigenform) und zulässiger geometrischer Herstelltoleranz eine übereinstimmende Nachrechnung der Beulkurven z. B. nach DIN EN 1993-1-5:2006, nicht möglich ist. Lediglich unter Ansatz einer realistischen, d.h. tatsächlich aus dem Fertigungsprozess zu erwartenden Vorverformung gelingt eine plausible Nachrechnung der Beulkurven und den zugehörige Traglasten. Bei Anwendung geometrischer Imperfektionen in Form der modalen Beulfigur kann eine Verringerung der Imperfektionsamplitude um 20% übernommen werden.

2.13 Abschnitt C.8(1)

Inhalt von DIN EN 1993-1-5:

Als Kriterien für den Grenzzustand ist für Bauteile, für die der Verlust der Stabilität maßgebend ist, das Erreichen des Maximums der Last-Verformungskurve definiert. Für Bereiche unter Zugbeanspruchungen, für die Werkstoffversagen zu erwarten ist, ist das Erreichen eines Maximalwerts der Hauptmembrandehnung als Grenzzustandskriterium definiert.

In Abschnitt C.8(1) wird ein Maximalwert der Hauptmembrandehnung in Höhe von 5% empfohlen.

Vorschlag zu DIN EN 1993-1-5 NA:

Es gilt die Empfehlung, falls kein anderer Wert begründet wird.

Begründung:

Siehe Teil II des Schlussberichts [28].

2.14 Abschnitt C.9(3)

Inhalt von DIN EN 1993-1-5:

Zur Abdeckung von Ungenauigkeiten des Belastungs- und Widerstandsmodells sind für den erforderlichen Lasterhöhungsfaktor α_u die Teilsicherheitsbeiwerte festzulegen: γ_{M1} , wenn der Verlust der Stabilität maßgebend ist, und γ_{M2} , wenn Werkstoffversagen zu erwarten ist.

In Abschnitt C.9(3) wird empfohlen, die Zahlenwerte für die Teilsicherheitsbeiwerte γ_{M1} und γ_{M2} aus den entsprechenden Anwendungsnormen von EN 1993 zu übernehmen.

Vorschlag DIN EN 1993-1-5 NA:

Zum Text C.9(2):

α_1 ist mit 1,05 anzusetzen bei gleichzeitiger Verwendung von α_2 mit $\gamma_{M1} = 1,1$ oder $\gamma_{M2} = 1,25$, sofern keine genaueren Untersuchungen im Rahmen eines bauaufsichtlichen Verwendbarkeitsnachweises erfolgen.

Zu C.9(3):

Es gilt die Empfehlung.

Begründung:

Siehe Teil II des Schlussberichts [28].

2.15 Abschnitt D.2.2(2)

Inhalt von DIN EN 1993-1-5:

Nach Abschnitt D.2.2(2) ist für den Nachweis des lokalen Schubbeulens die elastische kritische Schubbeulenspannung $\tau_{cr,\ell}$ für Blechträger mit trapezförmig profilierten Stegblechen nach Gl. (16) zu bestimmen.

$$\tau_{cr,\ell} = 4,83 \cdot E \cdot \left[\frac{t_w}{a_{\max}} \right]^2 \text{ gemäß Gl. (D.7) [7]} \quad \text{Gl. (16)}$$

Eine Berechnung der elastischen kritischen Schubbeulenspannung $\tau_{cr,\ell}$ für Blechträger mit sinusförmig profilierten Stegblechen ist bei Ersatz der Sinuswellenform durch eine Ersatztrapezform zwar möglich, führt jedoch zu sehr konservativen Ergebnissen.

In der Anmerkung zu Abschnitt D.2.2(2) wird daher für die Berechnung von $\tau_{cr,\ell}$ für Blechträger mit sinusförmig profilierten Stegblechen die Verwendung von Gl. (17) empfohlen.

$$\tau_{cr,\ell} = \left(5,34 + \frac{a_3 \cdot s}{h_w \cdot t_w} \right) \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{t_w}{s} \right)^2 \quad \text{Gl. (17)}$$

Vorschlag zu DIN EN 1993-1-5 NA:

Der Nachweis des lokalen Beulens für Träger mit sinusförmig profilierten Stegblechen darf vernachlässigt werden, wenn folgende Bedingungen eingehalten sind:

$$\frac{w}{a_3} \leq 2; \quad \frac{w}{t} \leq 52; \quad \frac{a_3}{t} \leq 27 \quad \text{Gl. (18)}$$

Begründung:

Die in der Anmerkung zu Abschnitt D.2.2(2) vorgeschlagene Gl. (17) für die Berechnung von $\tau_{cr,l}$ für sinusförmig profilierte Stegbleche ist nicht für allgemeine Stegblechgeometrien gültig. Gl. (17) wurde lediglich für die in [16] angegebenen Stegblechgeometrien entwickelt. Auf Grundlage von experimentellen und numerischen Untersuchungen konnte jedoch in [21] gezeigt werden, dass für sinusförmig profilierte Stegbleche lokales Beulen nicht auftritt, wenn die in Gl. (18) angegebenen Bedingungen eingehalten sind. Dieser Anwendungsbereich umfasst die auf dem Markt erhältlichen sinusförmigen Wellstegträgergeometrien. Gleichung (17) in der Anmerkung zu D.2.2(2) ist somit hinfällig, da sie lediglich für den Anwendungsbereich gilt, der durch untenstehenden Vorschlag beinhaltet wird. Gemäß dem österreichischen NA zu EN 1993-1-5 wird daher o.g. Vorschlag übernommen.

Auf der sicheren Seite liegend kann für abweichende sinusförmige Profilierungen der Nachweis der Schubtragfähigkeit bei Ersatz der Sinuswellenform durch eine Ersatztrapezform erfolgen, siehe beispielhaft in Bild 7.

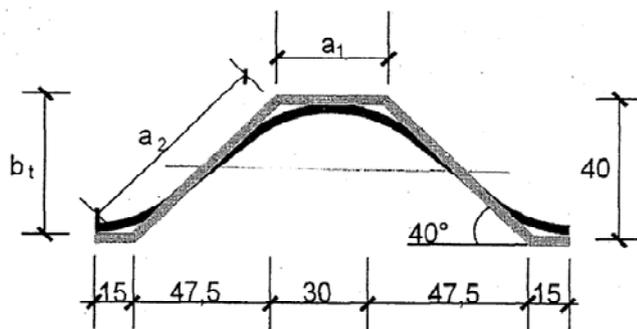


Bild 7: Idealisierte Wellsteggeometrie nach [22]

3 Konfliktfreie Nationale Ergänzungen zu DIN EN 1993-1-5:2006

3.1 Allgemeines

Bemessungshilfen für die Anwendung von DIN EN 1993-1-5 sind [3], [16], [20] und [26] zu entnehmen.

3.2 Abschnitt 4.4(6)

Vorschlag zu DIN EN 1993-1-5 NA:

Die Randbedingungen zur Bestimmung der elastischen kritischen Beul- und Knickspannung bei plattenartigen bzw. knickstabähnlichen Verhalten müssen identisch sein.

Begründung:

Der Einfluss des knickstabähnlichen Verhaltens auf das Plattenbeulverhalten wird durch eine Interpolation zwischen dem Abminderungsfaktor für Plattenbeulen ρ und dem Abminderungsfaktor für Knicken χ_c erfasst. Der Faktor ξ kann dabei als Maß für den „Abstand“ der Beulspannung zu Knickspannung verstanden werden.

$$\rho_c = (\rho - \chi_c) \cdot \xi \cdot (2 - \xi) + \chi_c \quad \text{Gl. (19)}$$

Dabei ist

$$\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1, \text{ jedoch } (0 = \text{„Knicken“}) \leq \xi \leq (1 = \text{„Beulen“})$$

$\sigma_{cr,p}$ elastische kritische Beulspannung

$\sigma_{cr,c}$ elastische kritische Knickspannung

ρ Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung des plattenartigen Verhaltens

χ_c Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung des knickstabähnlichen Verhaltens

Bei der Ermittlung der elastischen kritischen Beul- und Knickspannungen ist darauf zu achten, dass identische Randbedingungen vorliegen. Eine vermeintliche Abschätzung der Knickspannung auf der sicheren Seite liegend, also mit zu kleinem Wert für $\sigma_{cr,c}$, führt zu einer Überschätzung des Faktors ξ und somit zu einer Unterschätzung des knickstabähnlichen Verhaltens.

3.3 Abschnitt 4.5.1(3)

Vorschlag zu DIN EN 1993-1-5 NA:

Längssteifen mit Steifenquerschnitten, deren Steifigkeit $\gamma < 25$ (γ nach Anhang A in DIN EN 1993-1-5:2007-02) ist, sind zu vernachlässigen.

Begründung:

Das in Abschnitt 4.5, DIN EN 1993-1-5 [7], zugrunde liegende Modell zur Ermittlung der wirksamen Fläche eines längs versteiften Blechfeldes nach Bild 8 setzt voraus, dass Längssteifen mit hoher Steifigkeit eingesetzt werden. Werden hingegen Längssteifen mit geringer Steifigkeit - wie sie im übrigen heute in der Praxis unüblich sind - verwendet, führt die Anwendung von Gl. (20) zu einer Überschätzung der Tragfähigkeit des längs versteiften Blechfeldes. Die Ergebnisse der Untersuchungen in [17] zeigen, dass die Tragfähigkeit von längs versteiften Platten mit geringer Steifigkeit der Längssteifen unter Längsdruck bei Anwendung von EN 1993-1-5 überschätzt wird, und dies unabhängig davon, ob die elastische kritische Beulspannung $\sigma_{cr,p}$ nach Anhang A oder numerisch, z. B. mit EBPlate [13], ermittelt wird. Wie nachfolgend dargestellt, liegt die Ursache dieses Verhaltens im zugrunde liegenden Modell begründet.

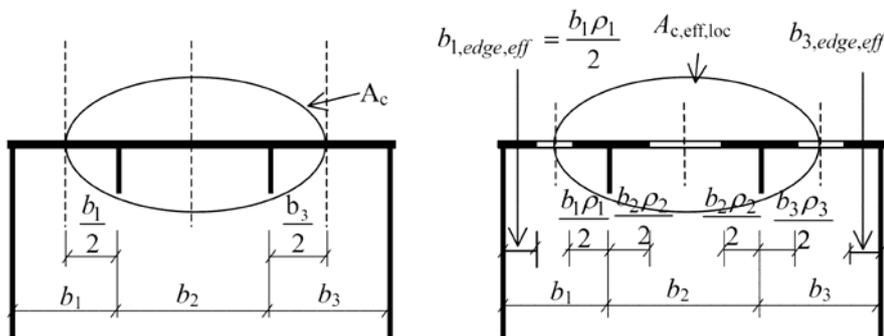


Bild 8: Längs versteiftes Blechfeld unter konstanter Druckbeanspruchung (aus [7])

$$A_{c,eff} = \rho_c \cdot A_{c,eff,loc} + \sum_m b_{m,edge,eff} \cdot t \quad \text{gemäß Gl. (4.5) [7]} \quad \text{Gl. (20)}$$

Dabei ist

ρ_c Abminderungsfaktor für Gesamtfeldbeulen

$A_{c,eff,loc}$ wirksame Fläche infolge lokalen Beulens

\sum_m Summe der im Druckbereich liegenden, durch angrenzende Plattenbauteile gestützten Querschnittsteile

$b_{\text{edge,eff}}$	wirksame Breite der durch angrenzende Plattenbauteile gestützten Querschnittsteile
t	Blechdicke

In [17] wurden Untersuchungen an längs versteiften Blechfeldern durchgeführt, in denen die Anzahl zwischen ein, zwei und vier Steifen und die Steifigkeit der Längssteifen zwischen $\gamma = 0,1$ und $\gamma = 500$ variiert wurden. Dabei stand zu erwarten, dass bei Verringerung der Steifigkeit sich die Tragfähigkeit des schwach ausgesteiften Bleches der Tragfähigkeit eines unversteiften Bleches annähern würde, was allerdings nicht der Fall ist. Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass die Fläche $A_{c,\text{eff,loc}}$ voraussetzt, dass die Längssteifen steif genug sind, um ein Einzelfeldbeulen vor Erreichen des Gesamtfeldbeulens hervorzurufen. Ist die Steifigkeit der Längssteifen jedoch zu gering ($\gamma < \gamma^*$), tritt als erstes Gesamtfeldbeulen auf, so dass die Annahme, dass die Längssteifen als Randlagerung für die Einzelfelder dienen, nicht länger gültig ist. Der Anteil der mitwirkenden Blechteile mit der Steife kann somit in Realität nicht in Anspruch genommen werden. Zum anderen bleibt die Breite der Querschnittsteile $b_{\text{edge,eff}}$, unabhängig von der Steifigkeit der Steife, konstant. Basierend auf [17] wird daher vorgeschlagen, dass Längssteifen mit Steifenquerschnitten, deren Steifigkeit $\gamma < 25$ ist, zu vernachlässigen sind. Diese Anwendungsgrenze sollte in der gegenwärtigen Praxis kein Problem darstellen, da heute fast ausschließlich kräftige Längssteifen eingesetzt werden. Für die Berechnung der Tragfähigkeit z. B. älterer Brücken kann dies jedoch relevant werden.

3.4 Abschnitt 5.3(2)

Vorschlag zu DIN EN 1993-1-5 NA:

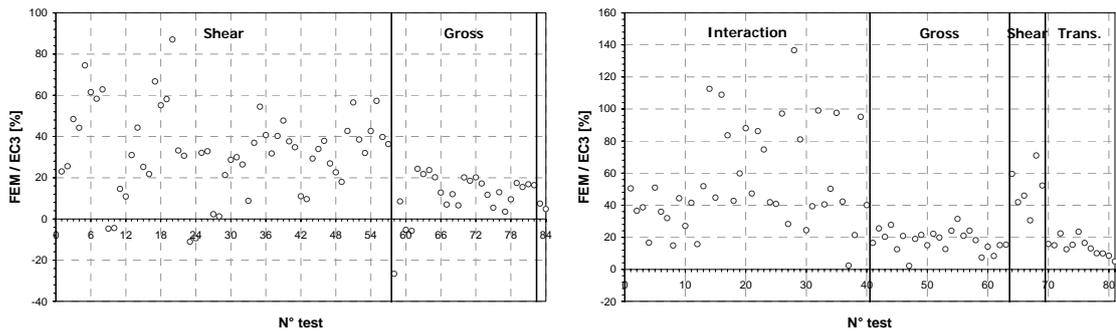
Für schubbeanspruchte Blechfelder mit geschlossenen Längssteifen, die an die Auflager- bzw. Vertikalsteife angeschlossen sind, darf stets eine starre Auflagersteife angenommen werden.

Begründung:

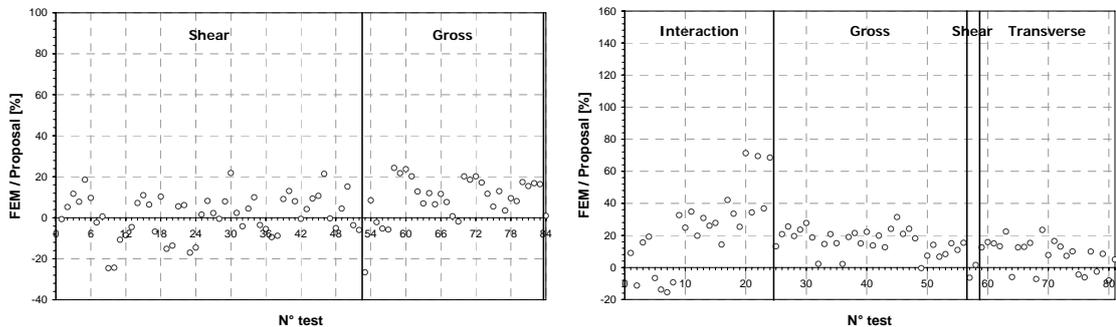
In DIN EN 1993-1-5 [7] wird der positive Einfluss der Torsionssteifigkeit, die geschlossene Steifenquerschnitte, z. B. Trapezhohlsteifen, bieten, nicht berücksichtigt. In [17] wurden daher experimentelle und umfangreiche numerische Untersuchungen durchgeführt, um diesen Einfluss zutreffender erfassen zu können. Die Untersuchungen umfassten Stegbleche mit starrer und verformbarer Auflagersteife, an die ein oder zwei Längssteifen angeschlossen sind. Die Konfiguration mit ein oder zwei Längssteifen wurde gewählt, da sie eine heute übliche und wirtschaftliche Lösung darstellt. Neben einer Erhöhung der Tragfähigkeit des gesamten Beulfeldes konnte gezeigt werden, dass verformbare Auflagersteifen von geschlossenen, mit der Quersteife verbundenen, Längssteifen profitieren. Der Anschluss von jeweils zwei Längssteifenstegen stabilisiert die verformbare Auflagersteife über einen so großen Bereich derart, dass diese sich wie eine starre Auflagersteife verhält.

Die Ergebnisse der Untersuchungen wurden mit den rechnerischen Tragfähigkeiten nach Kapitel 5 [7] verglichen. Wie in Bild 9a) dargestellt führt die Anwendung des aktuellen Kapitel 5 [7] teilweise zu sehr konservativen rechnerischen Tragfähigkeiten und auch zu einer großen Streu-

ung der Ergebnisse. Bild 9b) zeigt die Verbesserung des Bemessungsmodells nach Kapitel 5 [7] bei Anwendung der hierin genannten Vorschläge zu Abschnitt 5.3(2): Anwendung der Schubbeulkurve für starre Auflagersteifen auch im Fall von verformbaren Auflagersteifen, Abschnitt 5.3(3): Berücksichtigung der Randlagerungsbedingungen für längs versteifte Schubbeulfelder und Abschnitt 5.3(4): Vernachlässigung der Abminderung des Flächenträgheitsmoments der Längssteifen auf 1/3 seiner wirklichen Steifigkeit. Es kann gezeigt werden, dass die Vorschläge zu einer höheren Genauigkeit der rechnerischen Tragfähigkeiten führen und eine geringe Streuung der Ergebnisse zur Folge haben.



a) Vergleich mit Kapitel 5 [7]



b) Vergleich mit Kapitel 5 [7] unter Berücksichtigung der Vorschläge nach Abschnitt 3.4 bis Abschnitt 3.6

Bild 9: Vergleich der Tragfähigkeit aus FEM-Berechnungen für Blechträger mit einer Längsteife (jeweils linkes Diagramm) und mit zwei Längssteifen (jeweils rechtes Diagramm)

3.5 Abschnitt 5.3(3)

Vorschlag zu DIN EN 1993-1-5 NA:

Für die Ermittlung der kritischen Beulspannung τ_{cr} von längs unversteiften Beulfeldern müssen gelenkig gelagerte Randbedingungen angenommen werden.

Begründung:

Die Kalibrierung der Schubbeulkurven erfolgte unter Annahme gelenkiger Ränder. In [17] wurde gezeigt, dass für Beulfelder mit Längssteifen die Berücksichtigung der Randlagerungsbedingungen einen positiven Einfluss hat, vgl. Abschnitt 3.4. Die Einspannung der Ränder wurde

z. B. in den Berechnungen, deren Ergebnisse in Bild 9 dargestellt sind, berücksichtigt. Wie in Bild 10 dargestellt, führt die Berücksichtigung der Randlagerungsbedingungen für längs unversteifte Träger jedoch u. U. zu einer Überschätzung der Schubtragfähigkeit.

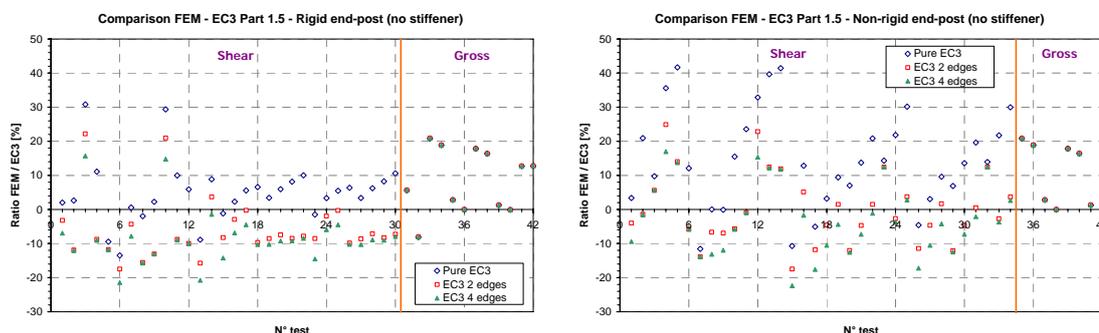


Bild 10: Vergleich der Tragfähigkeit aus FEM-Berechnungen für Blechträger ohne Längssteifen mit starrer Auflagersteife (links) und verformbarer Auflagersteife (rechts)

3.6 Abschnitt 5.3(4)

Vorschlag zu DIN EN 1993-1-5 NA:

Durch die hohe Torsionssteifigkeit geschlossener Längssteifen ist eine Abminderung des Flächenträgheitsmoments der Steifen auf 1/3 seines wirklichen Wertes nicht erforderlich.

Begründung:

Der tragfähigkeitserhöhende Einfluss von Längssteifen mit geschlossenen Querschnitten, z. B. Trapezhohlsteifen, wird in DIN EN 1993-1-5 unzureichend erfasst, da eine Kalibrierung des Bemessungsmodells lediglich mit Trägern mit offenen Längssteifenquerschnitten erfolgte. In [17] wurden experimentelle und numerische Untersuchungen im Hinblick auf die Querkrafttragfähigkeit durchgeführt, vgl. Abschnitt 3.4. Dabei konnte gezeigt werden, dass eine Abminderung des Flächenträgheitsmoments der Steifen auf 1/3 seiner wirklichen Steifigkeit nicht erforderlich ist. Die Torsionssteifigkeit der Längssteifen wurde in den Berechnungen, deren Ergebnisse in Bild 9 dargestellt sind, voll berücksichtigt. Es ist zu beachten, dass die Formeln nach Anhang A, DIN EN 1993-1-5, zur Bestimmung der Schubbeulwerte die Abminderung des Flächenträgheitsmoments bereits berücksichtigen.

3.7 Kapitel 7

Vorschlag zu DIN EN 1993-1-5 NA:

Bei gemeinsamer Wirkung von Querbeltung an den Längsrändern und Querkraft ist die Beanspruchbarkeit mit der folgenden Interaktionsbeziehung zu prüfen:

$$\left[\eta_3 \cdot \left(1 - \frac{F_{Ed}}{2 \cdot V_{Ed}} \right) \right]^{1,6} + \eta_2 \leq 1,0 \quad \text{Gl. (21)}$$

Begründung:

Die Interaktion zwischen Schub und Querbelastung an den Längsrändern nach Bild 11 wird in DIN EN 1993-1-5[7] nicht behandelt. Die in Bild 11 gewählte Darstellung ermöglicht es dabei, den im Nachweis der Querbelastung bereits enthaltenen Querkraftanteil in Höhe von $0,5 \cdot F$ zu isolieren und den Interaktionsnachweis widerspruchsfrei in den Nachweis der reinen Querbelastung zu überführen. In [17] wurden experimentelle und numerische Untersuchungen durchgeführt, die zur Entwicklung der in Gl. (17) angegebenen Interaktionsbedingung führten.

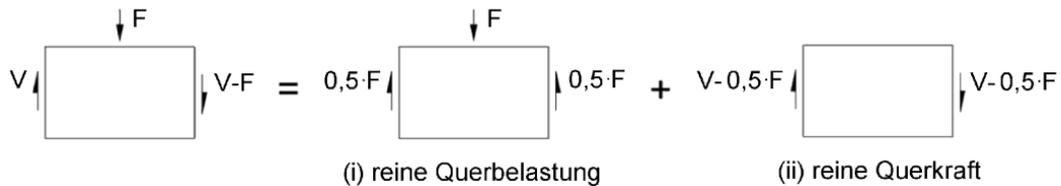


Bild 11: Zerlegung der gleichzeitigen Wirkung von Schub und Querbelastung in Grundlastfälle

Bild 12 zeigt die experimentellen und numerischen Ergebnisse im Vergleich mit Gl. (17). Als Bezugsgrößen wurde die Querkrafttragfähigkeit nach Kapitel 5, DIN EN 1993-1-5 [7], und für die Querbelastung das für unverteifte Träger weiterentwickelte Bemessungsmodell nach Gozzi [14] bzw. das für längsversteifte Träger weiterentwickelte Bemessungsmodell nach Davaine [4] gewählt. Eine Übertragbarkeit auf aktuelle Bemessungsmodelle nach DIN EN 1993-1-5 [7] ist gegeben.

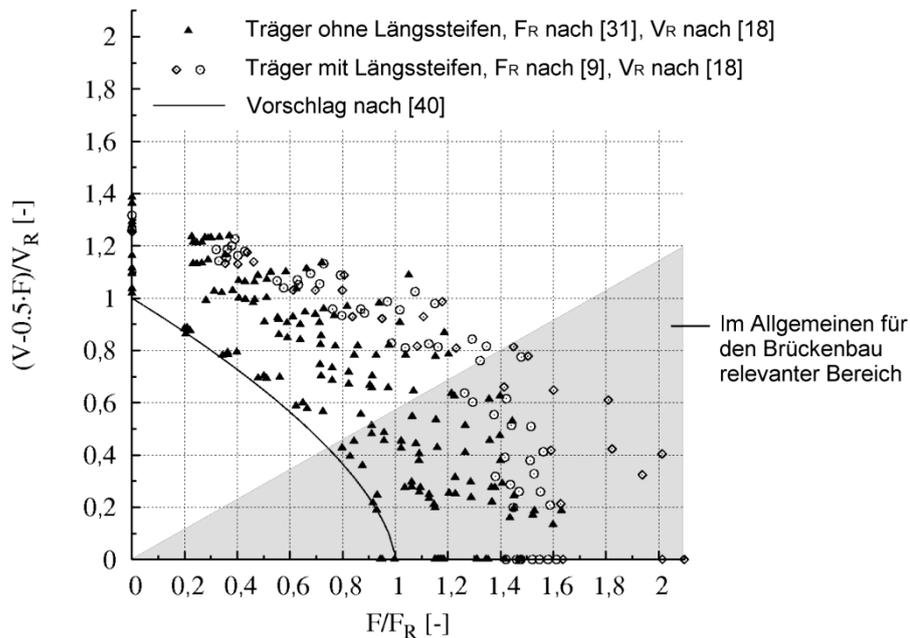
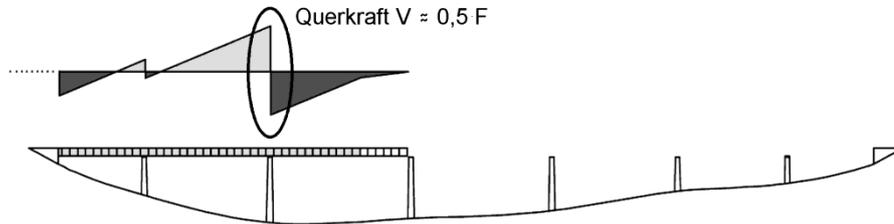


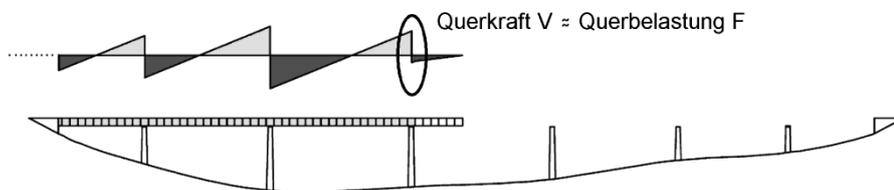
Bild 12: Vergleich der Interaktionsbedingung mit experimentellen und numerischen Ergebnissen

Die Auswirkungen z. B. für Einschiebsituationen im Brückenbau sind in **Bild 13** dargestellt. Für den Bauzustand „Kragarm“ liegt ein reiner Querbelastungszustand vor, wohingegen sich bei „Erreichen des Pfeilers“ lediglich ein asymmetrischer Querbelastungszustand einstellt. Eine zusätzlich einwirkende Querkraftbeanspruchung liegt in der Regel nicht vor, so dass die Interakti-

onsbedingung lediglich im unteren Bereich, vgl. schraffierter Bereich in Bild 12, relevant wird. Für die Dimensionierung der Querschnitte ist jedoch oftmals der Lastfall für die Interaktion zwischen Biegemoment und Querlast an den Längsrändern maßgebend.



a) Querkraftdiagramm - Bauzustand "Kragarm"



b) Querkraftdiagramm - Bauzustand "Erreichen des Pfeilers"

Bild 13: Repräsentative Querkraftdiagramme für verschiedene Bauzustände

3.8 Abschnitt D.2.2(3)

Vorschlag zu DIN EN 1993-1-5 NA:

Für trapezförmig profilierte Stegbleche sind D_x und D_z wie folgt zu berechnen:

$$D_x = \frac{a_1 + a_3}{a_1 + a_2} \cdot \frac{E \cdot t_w^3}{12} \quad \text{Gl. (22)}$$

$$D_z = \frac{3 \cdot a_1 \cdot a_3^2 + \sqrt{2} \cdot a_3^3}{a_1 + a_3} \cdot \frac{E \cdot t_w^3}{12} \quad \text{Gl. (23)}$$

Für sinusförmig profilierte Stegbleche sind D_x und D_z wie folgt zu berechnen:

$$D_x = \frac{E \cdot t_w^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{w}{s} \quad \text{Gl. (24)}$$

$$D_z = \frac{E \cdot I_z}{w} \quad \text{Gl. (25)}$$

Begründung:

In Abschnitt D.2.1(2) sind für die Hilfswerte D_x und D_z zur Bestimmung der Schubtragfähigkeit von profilierten Stegblechen lediglich Gleichungen für sinusförmig profilierte Stegbleche angegeben. Entsprechende Gleichungen für Bauteile mit trapezförmig profilierten Stegblechen sind in DASt-Richtlinie 015 [5] angegeben und werden übernommen

4 Literatur

- [1] Bitar, D.: Résistance à la flexion des pouters hybrids à section en I. *Construction Métallique* no. 2 (2003), S. 77-92
- [2] Bitar, D.: Strength and fatigue tests on hybrid girders - Design rules and recommendations. Konferenzbeitrag, Steelbridge, Millau, 2004
- [3] Braun, B.; Kuhlmann, U.: Bemessung und Konstruktion von aus Blechen zusammengesetzten Bauteilen nach EN 1993-1-5. Beitrag im Stahlbaukalender 2009 (Hrg. U. Kuhlmann), 2009
- [4] Davaine, L.: Formulation de la résistance au lancement d'une âme métallique de pont raidie longitudinalement. Dissertation D05-05, INSA de Rennes, France, 2005
- [5] DAST-Richtlinie 015: Träger mit schlanken Stegen. Deutscher Ausschuss für Stahlbau, 1990
- [6] DIBt: Leitpapier L – Anwendung der Eurocodes. Schriften des Deutschen Instituts für Bautechnik, Reihe LP, Heft L, 2002
- [7] DIN EN 1993-1-5: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile; Deutsche Fassung EN 1993-1-5:2006. Februar 2007
- [8] DIN EN 1993-1-5/NA: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter — Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile. Entwurf vom Januar 2009
- [9] DIN EN 1993-2: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 2: Stahlbrücken; Deutsche Fassung EN 1993-2:2006. Februar 2007
- [10] DIN EN 1993-6: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 6: Kranbahnen; Deutsche Fassung EN 1993-6:2007. Juli 2007
- [11] DIN V ENV 1993-1-1 : Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, April 1993
- [12] DIN-Fachbericht 103: Stahlbrücken. 3. Ausgabe, 2009
- [13] EBPlate: Software zur Ermittlung von elastischen kritischen Spannungen in Platten. *EBPlate steht unter www.cticm.com als kostenloser Download zur Verfügung*
- [14] Gozzi, J.: Patch loading resistance of plated girders - Ultimate and serviceability limit state. Dissertation 2007:30, Division of Steel Structures, Luleå University of Technology, 2007
- [15] Graciano, C.: Patch loading - Resistance of longitudinally stiffened steel girders webs. Dissertation No. 2002:18, Luleå University of Technology, 2002
- [16] Johansson, B.; Maquoi, R.; Sedlacek, G.; Müller, C.; Beg, D.: Commentary and worked examples to EN 1993-1-5 „Plated Structural Elements“, 1st Edition, ECCS-JRC Report No. EUR 22898 EN, October 2007
- [17] Kuhlmann, U.; Braun, B.; Detzel, A.; Feldmann, M.; Naumes, J.; Oppe, M.; Galéa, Y.; Martin, P.-O.; Raoul, J.; Davaine, L.; Johansson, B.; Clarin, M.; Gozzi, J.; Maquoi, R.;

- Degée, H.; Boissonnade, N.; Chica, J.; Espiga, F.; Grijalvo, J.; Rey, F.; Uria, G.; Nüsse, G.; Schröter, F.: *Competitive Steel and Composite Bridges by Improved Steel Plated Structures - COMBRI. Schlussbericht, RFCS-Forschungsprojekt RFS-CR-03018, 2007*
- [18] Kuhlmann, U.; Braun, B.; Feldmann, M.; Naumes, J.; Martin, P.-O.; Galéa, Y.; Johansson, B.; Collin, P.; Eriksen, J.; Degée, H.; Hausoul, N.; Chica, J.; Raoul, J.; Davaine, L.; Petel, A.: *COMBRI-Handbuch Brücken. RFCS-Projekt RFS2-CT-2007-00031, 2008*
- [19] Lagerqvist, O.: *Patch loading - Resistance of steel girders subjected to concentrated forces. Dissertation No. 1994:159D, Luleå University of Technology, 1994*
- [20] *Leitfaden zum DIN-Fachbericht 103: Stahlbrücken. Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2003*
- [21] Pasternak, H.: *Gutachterliche Stellungnahme zur Querkrafttragfähigkeit von Wellstegträgern. Braunschweig und Cottbus, 1996*
- [22] Pasternak, H.; Branka, P.: *Zum Tragverhalten von Wellstegträgern. Bauingenieur 73 (1998), S. 437-444*
- [23] Ruff, C.R.; Schulz, U.: *Der Einfluss von Imperfektionen auf das Tragverhalten von Platten. Stahlbau 68 (1999), Heft 10, S. 829-834*
- [24] Rusch, A.; Lindner, J.: *Tragfähigkeit von beulgefährdeten Querschnittselementen unter Berücksichtigung von Imperfektionen. Stahlbau 70 (2001), Heft 10, S. 765-774*
- [25] Scheer, J., Nölke, H.: *Zum Nachweis der Beulsicherheit von Platten bei gleichzeitiger Wirkung mehrerer Randspannungen. Stahlbau 70 (2001), H. 9, S. 718-729*
- [26] Sedlacek, G., Feldmann, M., Kuhlmann, U., Mensinger, M., Naumes, J., Müller, Ch., Braun, B., Ndogmo, J.: *Entwicklung und Aufbereitung wirtschaftlicher Bemessungsregeln für Stahl- und Verbundträger mit schlanken Stegblechen im Hoch- und Brückenbau. DASt-Forschungsbericht 1/2008, Projekt-Nr. AiF 14771, 2008*
- [27] Sedlacek, G.; Hoffmeister, B.; Trumpf, H.; Kühn, B.; Stötzl, J.; Hechler, O.; Stangenberg, H.; Bitar, D.; Galéa Y.; Lukic, M.; Bruls, A.; Johansson, B.; Stoltz, A.; Schleich, J.-B.; Cajot, L. G.; Hailer, M.; Collin, P.; Hanswille, G.; Schmitt, C.: *Composite Bridge Design for Small and Medium Spans. Schlussbericht, ECSC-Forschungsprojekt 7210-RP/113, 2001*
- [28] Sedlacek, G. et al.: *Bestimmung der Sicherheitselemente für die Anwendung von DIN EN 1993-1-5 „Plattenförmige Bauteile“. Schlussbericht Teil II, Lehrstuhl für Stahlbau und Leichtmetallbau, RWTH Aachen (in Vorbereitung)*
- [29] Seitz, M.: *Tragverhalten längsversteifter Blechträger unter quergerichteter Krafteinleitung. Dissertation, Universität Stuttgart, Mitteilung des Instituts für Konstruktion und Entwurf Nr. 2005-2, 2005*
- [30] Toprac A. A.: *Fatigue strength of full-size hybrid girders—a progress report. Proceedings, American Institute of Steel Construction, 1963*
- [31] Veljkovic, M.; Johansson, B.: *Design of hybrid steel girders. Journal of Constructional Steel Research 60 (2004), S. 535–547*
- [32] Winterstetter, T.A.: *Stabilität von Kreiszyinderschalen aus Stahl unter kombinierter Beanspruchung. Dissertation, Universität Gesamthochschule Essen, 2000*