

DIN EN 1993-1-5



ICS 91.010.30; 91.080.13

Entwurf

Einsprüche bis 2022-04-11
Vorgesehen als Ersatz für
DIN EN 1993-1-5:2019-10 und
DIN EN 1993-1-5
Berichtigung 1:2020-07

**Eurocode 3 –
Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten –
Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile;
Deutsche und Englische Fassung prEN 1993-1-5:2022**

Eurocode 3 –
Design of steel structures –
Part 1-5: Plated structural elements;
German and English version prEN 1993-1-5:2022

Eurocode 3 –
Calcul des structures en acier –
Partie 1-5: Plaques planes;
Version allemande et anglaise prEN 1993-1-5:2022

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2022-02-11 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an nabau@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau), 10772 Berlin oder Am DIN-Platz, Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 157 Seiten

DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (prEN 1993-1-5:2022) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 250 „Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau“ erarbeitet, dessen Sekretariat von BSI (Vereinigtes Königreich) gehalten wird.

Das zuständige deutsche Normungsgremium ist der Arbeitsausschuss NA 005-08-16 AA „Tragwerksbemessung (SpA zu CEN/TC 250/SC 3, ISO/TC 167/SC 1)“ im DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau).

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen Text.

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

Änderungen

Gegenüber DIN EN 1993-1-5:2019-10 und DIN EN 1993-1-5 Berichtigung 1:2020-07 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Dokument vollständig überarbeitet;
- b) redaktionell überarbeitet.

Titel de: Eurocode 3 — Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile

Titel en: Eurocode 3 — Design of steel structures — Part 1-5: Plated structural elements

Titel fr: Eurocode 3 — Calcul des structures en acier — Partie 1-5: Plaques planes

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	5
0 Einleitung	6
0.1 Einleitung zu den Eurocodes	6
0.2 Einleitung zu EN 1993 (alle Teile)	6
0.3 Einleitung zu prEN 1993-1-5	8
0.4 In den Eurocodes verwendete Verbformen	8
0.5 Nationaler Anhang zu prEN 1993-1-5	8
1 Anwendungsbereich	9
1.1 Anwendungsbereich von prEN 1993-1-5	9
1.2 Annahmen	9
2 Normative Verweisungen	10
3 Begriffe	10
3.1 Begriffe	10
3.2 Vorzeichenregelung	11
3.3 Formelzeichen	12
4 Grundlagen der Tragwerksplanung	13
4.1 Allgemeine Regeln	13
4.1.1 Grundlegende Anforderungen	13
4.2 Teilsicherheitsbeiwerte	13
4.3 Effektive Breiten bei der Tragwerksberechnung	13
4.4 Einfluss des Plattenbeulens auf die Tragfähigkeit gleichförmiger Bauteile	15
4.5 Methode der reduzierten Spannungen	16
4.6 Bemessung mithilfe der Finite-Elemente-Methode	16
4.7 Bauteile mit veränderlichem Querschnitt	16
4.8 Bauteile mit profilierten Stegblechen	16
5 Berücksichtigung der Schubverzerrungen bei der Bemessung von Bauteilen	16
5.1 Allgemeines	16
5.2 Elastische Schubverzerrung	17
5.2.1 Mittragende Breiten	17
5.2.2 Spannungsverteilung unter Berücksichtigung der Schubverzerrung	19
5.2.3 Lasteinleitung von Querlasten in Blechebene	20
5.3 Berücksichtigung der Schubverzerrungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit	21
5.3.1 Berücksichtigung der Schubverzerrungen	21
5.3.2 Interaktion zwischen der Berücksichtigung von Schubverzerrung und Plattenbeulen	22
6 Plattenbeulen bei Längsspannungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit	22
6.1 Allgemeines	22
6.2 Beanspruchbarkeit bei Längsspannungen	23
6.3 Effektive Querschnittsgrößen	23
6.4 Einzelbeulfelder ohne Längssteifen	25
6.4.1 Plattenbeulen	25
6.4.2 Knickstabähnliches Verhalten	29
6.5 Längs ausgesteifte Beulfelder	30
6.5.1 Allgemeines	30
6.5.2 Plattenbeulen	32
6.5.3 Knickstabähnliches Verhalten	33

6.6	Interpolation zwischen plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten	35
6.6.1	Allgemeines	35
6.6.2	Alternative Methode zur Berechnung des Wichtungsfaktors ξ	36
6.6.3	Alternatives vereinfachtes Verfahren für längs ausgesteifte Beulfelder unter Biegemoment	40
6.7	Nachweis	41
7	Schubbeulen	43
7.1	Allgemeines	43
7.2	Bemessungswert der Beanspruchbarkeit	44
7.3	Beitrag des Steges	45
7.4	Beitrag der Flansche	48
7.5	Nachweis	49
8	Beanspruchbarkeit bei Lasteinleitung von Querlasten in der Blechebene	49
8.1	Allgemeines	49
8.2	Bemessungswert der Beanspruchbarkeit	50
8.3	Länge der starren Lasteinleitung	50
8.4	Abminderungsbeiwert χ_F	51
8.5	Wirksame Lastausbreitungslänge	51
8.6	Nachweis	52
9	Interaktion	52
9.1	Interaktion zwischen Schub, Biegemoment und Normalkraft	52
9.2	Interaktion zwischen Querbelastrung an den Längsrändern, Biegemoment und Normalkraft	53
9.3	Interaktion zwischen Querbelastrung an den Längsrändern, Biegemoment und Schub	54
10	Flanschinduziertes Stegblechbeulen	54
11	Steifen und Detailausbildung	55
11.1	Allgemeines	55
11.2	Längsspannungen	56
11.2.1	Mindestanforderungen an Quersteifen	56
11.2.2	Mindestanforderungen an Längssteifen	59
11.2.3	Geschweißte Blechstöße	60
11.2.4	Steifenausschnitte	60
11.3	Schubspannungen	62
11.3.1	Starre Auflagersteifen	62
11.3.2	Verformbare Auflagersteifen	62
11.3.3	Zwischenliegende Quersteifen	62
11.3.4	Längssteifen	63
11.3.5	Schweißnähte	63
11.4	Querlasten	63
12	Methode der reduzierten Spannungen	63
12.1	Allgemeines	63
12.2	Beulnachweis	64
12.3	Beulschlankheitsgrad	66
12.4	Abminderungsbeiwerte	67
13	Bauteile mit profilierten Stegblechen	70
13.1	Allgemeines	70
13.2	Grenzzustand der Tragfähigkeit	71
13.2.1	Momententragfähigkeit	71
13.2.2	Schubtragfähigkeit	72
13.2.3	Beanspruchbarkeit bei Querbelastrung	74
13.2.4	Interaktion zwischen Schubkraft und Biegemoment	75
13.2.5	Interaktion zwischen Querbelastrung an den Längsrändern, Biegemoment und Schub	75

13.2.6 Anforderungen an Endsteifen	76
Anhang A (informativ) Berechnung kritischer Spannungen für ausgesteifte Beulfelder	77
A.1 Anwendung dieses informativen Anhangs.....	77
A.2 Anwendungs- und Gültigkeitsbereich.....	77
A.3 Äquivalente orthotrope Platten für Beulfelder mit mindestens drei Längssteifen	77
A.4 Äquivalente orthotrope Platte für Beulfelder mit einer oder zwei Längssteifen	78
A.5 Schubbeulwerte	79
A.6 Beulwert für Querbelastrung als Teilflächenbelastrung.....	79
Anhang B (informativ) Bauteile mit veränderlichem Querschnitt	81
B.1 Anwendung dieses informativen Anhangs.....	81
B.2 Anwendungs- und Gültigkeitsbereich.....	81
B.3 Allgemeines	81
B.4 Interaktion von Plattenbeulen und Biegedrillknicken von Bauteilen.....	81
Literaturhinweise.....	82

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN 1993-1-5:2022) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 250 „Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau“ erarbeitet, dessen Sekretariat von BSI gehalten wird. CEN/TC 250 ist für alle Eurocodes des konstruktiven Ingenieurbaus zuständig. Die Verantwortung für alle Angelegenheiten der Tragwerks- und geotechnischen Planung wurde dem CEN/TC 250 von CEN übertragen.

Dieses Dokument ist derzeit zur CEN-Umfrage vorgelegt.

Dieses Dokument wird EN 1993-1-5:2006 sowie zugehörige Änderungen und Berichtigungen ersetzen.

Die erste Generation der EN Eurocodes wurde zwischen den Jahren 2002 und 2007 veröffentlicht. Dieses Dokument wurde als Teil der zweiten Generation der Eurocodes im Rahmen des Mandats M/515 erarbeitet, das die Europäische Kommission und die Europäische Freihandelsassoziation CEN erteilt haben.

Die Eurocodes wurden erarbeitet, um in Verbindung mit einschlägigen Ausführungs-, Werkstoff-, Produkt- und Prüfnormen angewendet zu werden und um Anforderungen an Ausführung, Werkstoffe, Produkte und Prüfung zu identifizieren, auf denen die Eurocodes beruhen.

Die Eurocodes erkennen die Verantwortlichkeit aller Mitgliedstaaten an und wahren deren Recht, sicherheitsbezogene Werte auf nationaler Ebene in Nationalen Anhängen festzulegen.

0 Einleitung

0.1 Einleitung zu den Eurocodes

Die Eurocodes des konstruktiven Ingenieurbaus umfassen die folgenden Normen, die in der Regel aus mehreren Teilen bestehen:

- EN 1990, *Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung*
- EN 1991, *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke*
- EN 1992, *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken*
- EN 1993, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten*
- EN 1994, *Eurocode 4: Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton*
- EN 1995, *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten*
- EN 1996, *Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten*
- EN 1997, *Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik*
- EN 1998, *Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben*
- EN 1999, *Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken*
- Neue Teile sind derzeit in Erarbeitung, z. B. der Eurocode für die Bemessung von tragenden Konstruktionen aus Glas

0.2 Einleitung zu EN 1993 (alle Teile)

EN 1993 (alle Teile) gilt für den Entwurf, die Berechnung und die Bemessung von Bauwerken aus Stahl. Eurocode 3 entspricht den Grundsätzen und Anforderungen an die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit von Tragwerken sowie den Grundlagen für ihre Bemessung und Nachweise, die in EN 1990, Grundlagen der Tragwerksplanung, enthalten sind.

EN 1993 (alle Teile) behandelt ausschließlich Anforderungen an die Tragfähigkeit, die Gebrauchstauglichkeit, die Dauerhaftigkeit und den Feuerwiderstand von Tragwerken aus Stahl. Andere Anforderungen, wie z. B. bezüglich Wärmeschutz oder Schallschutz, werden nicht berücksichtigt.

EN 1993 ist in folgende Teile unterteilt:

EN 1993-1, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*;

EN 1993-2, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 2: Stahlbrücken*;

EN 1993-3, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 3: Türme, Maste und Schornsteine*;

EN 1993-4, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 4: Silos*;

EN 1993-5, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 5: Pfähle und Spundwände*;

EN 1993-6, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 6: Kranbahnen*;

EN 1993-7, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 7: Bemessung von Sandwich-Paneelen.*

EN 1993-1 existiert nicht als physisches Dokument, sondern besteht aus den folgenden 14 Einzelteilen, deren grundlegender Teil EN 1993-1-1 ist:

EN 1993-1-1, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau;*

EN 1993-1-2, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-2: Allgemeine Regeln — Tragwerksbemessung für den Brandfall;*

EN 1993-1-3, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-3: Allgemeine Regeln — Ergänzende Regeln für kaltgeformte dünnwandige Bauteile und Bleche;*

ANMERKUNG Kaltgeformte Hohlquerschnitte nach EN 10219 werden in EN 1993-1-1 behandelt.

EN 1993-1-4, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-4: Allgemeine Bemessungsregeln — Ergänzende Regeln zur Anwendung von nichtrostenden Stählen;*

EN 1993-1-5, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile;*

EN 1993-1-6, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-6: Festigkeit und Stabilität von Schalen;*

EN 1993-1-7, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-7: Plattenförmige Bauteile mit Querbelaastung;*

EN 1993-1-8, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen;*

EN 1993-1-9, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-9: Ermüdung;*

EN 1993-1-10, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-10: Stahlsortenauswahl im Hinblick auf Bruchzähigkeit und Eigenschaften in Dickenrichtung;*

EN 1993-1-11, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-11: Bemessung und Konstruktion von Tragwerken mit Zuggliedern aus Stahl;*

EN 1993-1-12, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-12: Zusätzliche Regeln zur Erweiterung von EN 1993 auf Stahlsorten bis S960;*

EN 1993-1-13, *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-13: Regeln für Träger mit großen Stegöffnungen;*

EN 1993-1-14, *Design of Steel Structures — Part 1-14: Design assisted by finite element analysis.*

Alle Teile von EN 1993-1-2 bis EN 1993-1-14 behandeln allgemeine Themen, die unabhängig von der Art des Bauwerks sind, wie die Tragwerksbemessung für den Brandfall, ergänzende Regeln für kaltgeformte Bauteile und Bleche, nichtrostende Stähle, plattenförmige Bauteile usw.

Alle Teile von EN 1993-2 bis EN 1993-7 behandeln Themen, die für eine bestimmte Bauwerksart relevant sind, wie Stahlbrücken; Türme, Maste und Schornsteine; Silos und Flüssigkeitsbehälter; Pfähle und Spundwände; Kranbahnen usw. EN 1993-2 bis EN 1993-7 beziehen sich auf die allgemeinen Regeln in EN 1993-1 und ergänzen, ändern oder ersetzen diese.

0.3 Einleitung zu prEN 1993-1-5

prEN 1993-1-5 enthält Anforderungen für die Bemessung und Konstruktion von Blechen mit oder ohne Steifen die in ihrer Ebene belastet sind. prEN 1993-1-5 gilt ebenfalls für aus Blechen zusammengesetzte Bauteile, wie z. B. Träger mit I-Querschnitt und Kastenträger, sowie ebene Bauteile, die in Tankbauwerken und Silos eingesetzt werden.

0.4 In den Eurocodes verwendete Verbformen

Das Verb „muss“ beschreibt eine Anforderung die zwingend zu befolgen ist und von der bei Anwendung der Eurocodes keine Abweichung zulässig ist.

Das Verb „sollte“ beschreibt eine streng empfohlene Auswahl oder Vorgehensweise. In Abhängigkeit von nationalen Regeln und/oder relevanten Vertragsbestimmungen könnten alternative Lösungen verwendet/angenommen werden, wenn sie technisch verifiziert sind.

Das Verb „darf“ beschreibt eine erlaubte Vorgehensweise innerhalb der Anwendungsgrenzen der Eurocodes.

Das Verb „kann“ beschreibt Möglichkeiten und Fähigkeiten; es wird für Tatsachenfeststellungen und Erklärungen verwendet.

0.5 Nationaler Anhang zu prEN 1993-1-5

Nationale Festlegungen sind in dieser Norm zulässig, wo diese Möglichkeit ausdrücklich in Anmerkungen angegeben wird. Nationale Festlegungen umfassen die Auswahl der Werte für national festzulegende Parameter (NDP).

Hierzu kann die jeweilige nationale Ausgabe von prEN 1993-1-5 einen Nationalen Anhang mit allen national festzulegenden Parametern enthalten, die für den Entwurf und die Bemessung von Hoch- und Ingenieurbauten im jeweiligen Land Verwendung finden.

Wird keine nationale Festlegung angeführt, ist der in dieser Norm angegebene Standardwert anzuwenden.

Wenn keine nationale Festlegung angeführt wird und kein Standardwert in dieser Norm angegeben ist, kann die Festlegung durch eine zuständige Behörde getroffen werden, oder sofern keine Festlegungen getroffen wurden, können die beteiligten Parteien im Einzelfall eine Vereinbarung treffen.

Nationale Festlegungen sind in prEN 1993-1-5 durch Anmerkungen zu den folgenden Abschnitten gestattet:

4.6(2)	6.4.1(10)	7.1(2)
--------	-----------	--------

Nationale Festlegungen sind in prEN 1993-1-5 zulässig bei Anwendung der folgenden informativen Anhänge:

Anhang A	Anhang B
----------	----------

1 Anwendungsbereich

1.1 Anwendungsbereich von prEN 1993-1-5

(1) Dieses Dokument enthält Regelungen für die Tragwerksplanung von nominell ebenen und in ihrer Ebene belasteten Blechen mit oder ohne Steifen.

(2) Diese Regelungen gelten für Blechträger mit I-Querschnitt und Kastenträger, bei denen ungleichmäßige Spannungsverteilungen infolge Schubverzerrungen sowie Beulen unter Längsspannungen, Schubspannungen und Querlasten auftreten. Sie gelten auch für ebene Bleche aller anderen Bauteile, z. B. von Tankbauwerken und Silos, soweit Lasten und Beanspruchungen in der Ebene der Bauteile wirken. Die Wirkungen von Lasten quer zur Bauteilebene werden in diesem Dokument nicht behandelt.

ANMERKUNG 1 Die Regelungen in diesem Teil ergänzen die Regelungen für Querschnitte der Querschnittsklassen 1, 2, 3 und 4, siehe EN 1993-1-1.

ANMERKUNG 2 Regelungen zu schlanken Platten mit wechselnden Längsspannungen und/oder Schubspannungen, die zu Ermüdung durch wechselnde Biegung aus der Plattenebene („Blechatmen“) führen können, sind in EN 1993-2 und EN 1993-6 angegeben.

ANMERKUNG 3 Regelungen zur Wirkung von Lasten quer zur Plattenebene und zur Kombination von Lastwirkungen in der Ebene und aus der Ebene sind EN 1993-2 und EN 1993-1-7 zu entnehmen.

(3) Einzelne Blechfelder werden als nominell eben angesehen, wenn für den Krümmungsradius r in der Richtung senkrecht zur Druckrichtung gilt:

$$r \geq \frac{b^2}{t} \quad (1.1)$$

Dabei ist

b die Blechbreite;

t die Blechdicke.

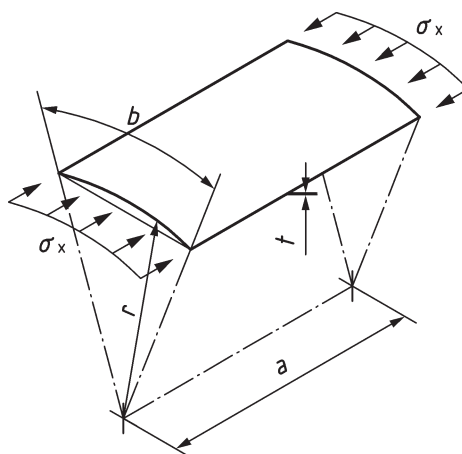


Bild 1.1 — Definition der Plattenkrümmung

1.2 Annahmen

(1) Sofern nicht spezifisch angegeben, gelten EN 1990, EN 1991 (alle Teile) und EN 1993-1-1.

- (2) Die in EN 1993-1-5 angegebenen Bemessungsverfahren sind anwendbar, wenn
- die Qualität der Ausführung den Festlegungen nach EN 1090-2 entspricht; und
 - die verwendeten Baustoffe und Produkte den Festlegungen nach den maßgebenden Teilen von EN 1993 (alle Teile) oder nach den maßgebenden Baustoffproduktspezifikationen entsprechen.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente, die in diesem Dokument teilweise oder als Ganzes zitiert werden, sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

ANMERKUNG In den Literaturhinweisen sind weitere zitierte Dokumente aufgelistet, die keine normativen Verweisungen sind, einschließlich solcher Dokumente, die als Empfehlungen (d. h. durch „sollte“-Sätze) und Erlaubnisse (d. h. durch „darf“-Sätze) in Bezug genommen werden.

EN 1090-2:2018, *Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken — Teil 2: Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken*

EN 1990, *Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung*

EN 1991 (alle Teile), *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke*

prEN 1993-1-1:2020, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

3.1 Begriffe

3.1.1

Blech

Bauteil mit im Allgemeinen zwei großen Maßen a und b und einem einheitlichen, viel kleineren Maß t sowie einer Form, bei der die beiden großen Maße in einer einzelnen Ebene liegen

3.1.2

elastische kritische Spannung

Spannung in einem Bauteil oder Beulfeld, bei dem das Gleichgewicht im Bauteil oder im Beulfeld nach der elastischen Theorie für perfekte Tragelemente unter Annahme kleiner Verformungen instabil wird

3.1.3

Membranspannung

Spannung in der Mittelebene des Blechs

3.1.4

Bruttoquerschnitt

gesamte Querschnittsfläche eines Bauteils ohne Berücksichtigung nicht durchlaufender Längssteifen

3.1.5

effektiver Querschnitt und effektive Breite

Bruttoquerschnitt oder Bruttoquerschnittsbreite, reduziert infolge gemeinsamer Wirkung von Plattenbeulen und Schubverzerrung

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Begriff „effektiv“ wird wie folgt unterschieden:

- „wirksam (effektiv^p)“ bezeichnet die Wirkung von Plattenbeulen;
- „mittragend (effektiv^s)“ bezeichnet die Wirkung der ungleichförmigen Spannungsverteilung aus Schubverzerrung;
- „effektiv“ bezeichnet die Verbindung von wirksamem Querschnitt und mittragendem Querschnitt

3.1.6

Blechträger

Bauteil, das aus ebenen Blechen (ebenen Flachstählen oder Blechen) zusammengesetzt ist

Anmerkung 1 zum Begriff: Die ebenen Bleche können ausgesteift oder nicht ausgesteift sein.

3.1.7

Steifen

Flachstäbe oder Profilstäbe, die an ein Blech angeschlossen werden, um Beulen zu verhindern oder das Blech auszusteifen

Anmerkung 1 zum Begriff: Steifen werden bezeichnet als:

- Längssteifen, wenn sie parallel zur Achse des aus zusammengesetzten Blechen bestehenden Bauteils laufen;
- Quersteifen, wenn sie quer zur Achse des aus zusammengesetzten Blechen bestehenden Bauteils laufen.

3.1.8

ausgesteiftes Beulfeld (Gesamtfeld, Blech)

Beulfeld (Gesamtfeld, Blech) mit Quer- und/oder Längssteifen

3.1.9

Einzelfeld

von Quer- und/oder Längssteifen oder Flansche umrandetes, nicht weiter ausgesteiftes Blech

3.1.10

Hybridträger

Blechträger mit unterschiedlichen Stahlsorten für Gurte und Steg(e)

3.1.11

Längsspannungen

Normalspannungen, die in Richtung der Bauteillängsachse wirken

3.1.12

Teilflächenbelastung von Querlasten

lokale Lasteinleitung von Querlasten in der Blechebene

3.2 Vorzeichenregelung

Sofern nicht anders angegeben, sind Druckkräfte bzw. Druckspannungen positiv definiert.

3.3 Formelzeichen

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Formelzeichen nach EN 1990, EN 1993-1-1 und die folgenden Formelzeichen.

$A_{s\ell}$	gesamte Bruttoquerschnittsfläche aller Längssteifen in einem ausgesteiften Beulfeld ohne mitwirkende Blechteile;
A_{st}	Bruttoquerschnittsfläche einer Quersteife;
A_{eff}	effektive Querschnittsfläche;
$A_{c,eff}$	wirksame Querschnittsfläche;
$A_{c,eff,loc}$	wirksame Querschnittsfläche infolge lokalen Plattenbeulens;
a	Länge eines ausgesteiften oder nicht ausgesteiften Beulfeldes;
b	Breite eines ausgesteiften oder nicht ausgesteiften Beulfeldes;
b_0	Bruttobreite des einseitig gestützten Flanschteils oder Hälfte der Breite eines beidseitig gestützten Flanschteils;
b_g	Bruttobreite des druckbeanspruchten Teils entsprechend $A_{c,eff}$;
b_{eff}	mittragende Breite zur Berücksichtigung der Schubverzerrungen bei elastischem Werkstoffverhalten;
F_{Ed}	Bemessungswert der einwirkenden Querlast;
h_w	lichte Steghöhe zwischen den Flanschen;
L_{eff}	wirksame Lastausbreitungslänge von Querlasten zur Ermittlung des Beulwiderstandes;
$M_{f,Rd}$	Bemessungswert der plastischen Biegebeanspruchbarkeit bei Berücksichtigung allein der effektiven Flächen der Flansche;
$M_{f,Rk}$	charakteristischer Wert der plastischen Biegebeanspruchbarkeit bei Berücksichtigung allein der effektiven Flächen der Flansche;
$M_{f,eff,Rd}$	Bemessungswert der plastischen Momentenbeanspruchbarkeit des Querschnitts, der mit der effektiven Querschnittsfläche der Flansche und der vollen Querschnittsfläche des Steges berechnet wird (unabhängig von der Querschnittsklasse);
$M_{pl,Rd}$	Bemessungswert der plastischen Momententragfähigkeit (unabhängig von der Querschnittsklassifizierung);
M_{Ed}	Bemessungswert des einwirkenden Biegemomentes;
N_{Ed}	Bemessungswert der einwirkenden Normalkraft;
t	Blechdicke;

V_{Ed}	Bemessungswert der einwirkenden Schubkraft aus Querkraft und Torsion;
W_{eff}	effektives elastisches Widerstandsmoment;
β	Abminderungsfaktor für die mittragende Breite zur Berücksichtigung der elastischen Schubverzerrung.

Weitere Formelzeichen sind im Text definiert.

4 Grundlagen der Tragwerksplanung

4.1 Allgemeine Regeln

4.1.1 Grundlegende Anforderungen

(1) Die Bemessung und Konstruktion der Bauteile von Stahlblechbauten müssen den allgemeinen Regeln nach EN 1990 und EN 1991 (alle Teile) sowie den spezifischen Bemessungsvorschriften für Stahlbauten nach EN 1993-1-1 entsprechen.

(2) Die Ausführung von nach diesem Dokument bemessenen Stahlbauten muss EN 1090-2 entsprechen, wobei die Baustoffe und Bauprodukte entsprechend den Festlegungen nach den maßgebenden Teilen von EN 1993 oder nach den maßgebenden Baustoff- und Bauproduktspezifikationen verwendet werden.

(3) Die Auswirkungen der ungleichförmigen Spannungsverteilung aus Schubverzerrung und die Auswirkungen von Plattenbeulen müssen berücksichtigt werden, wenn dadurch der Grenzzustand der Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Ermüdung wesentlich beeinflusst wird.

4.2 Teilsicherheitsbeiwerte

(1) Die in EN 1993-1-1 definierten Teilsicherheitsbeiwerte sollten auf die charakteristischen Werte der folgenden Tragfähigkeiten angewendet werden:

— Beanspruchbarkeit bei Längsspannungen	γ_{M0}
— Schubbeulen	γ_{M1}
— Beanspruchbarkeit bei Lasteinleitung von Querlasten in der Blechebene	γ_{M1}
— Beanspruchbarkeit von Quersteifen	γ_{M1}
— Beanspruchbarkeit entsprechend der Methode der reduzierten Spannungen	γ_{M1}
— Beanspruchbarkeit der Druckgurte von Trägern mit profilierten Stegblechen infolge Biegedrillknicken	γ_{M1}

(2) Die Teilsicherheitsbeiwerte γ_{M0} und γ_{M1} haben den Wert, der ihnen im Nationalen Anhang der maßgebenden Teile von EN 1993-1 bis EN 1993-6 zugewiesen wird.

4.3 Effektive Breiten bei der Tragwerksberechnung

(1) Die Auswirkungen der ungleichförmigen Spannungsverteilung aus Schubverzerrung und des Plattenbeulens auf die Steifigkeit der Bauteile und Anschlüsse müssen in der Tragwerksberechnung berücksichtigt werden.

(2) Die Auswirkungen der ungleichförmigen Spannungsverteilung aus Schubverzerrung dürfen in der Tragwerksberechnung durch den Ansatz einer mittragenden Breite berücksichtigt werden. Als Vereinfachung darf diese mittragende Breite als über die gesamte Spannweite konstant angenommen werden.

(3) In jedem Feld eines Trägers sollte als mittragende Breite der Flansche auf jeder Stegseite der kleinere Wert aus der vollen geometrischen Breite und $L/8$ angesetzt werden, wobei L die Spannweite bzw. bei Kragarmen die doppelte Kragarmlänge ist.

(4) Die Auswirkungen des Plattenbeulens dürfen bei der Tragwerksberechnung nach Elastizitätstheorie durch die wirksamen Flächen der unter Druckbeanspruchung stehenden Querschnittsteile berücksichtigt werden, siehe 6.3.

(5) Für die Berechnung der effektiven Flächen für die Steifigkeit darf die Schlankheit im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit $\bar{\lambda}_{p,ser}$ wie folgt ermittelt werden:

$$\bar{\lambda}_{p,ser} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\frac{\sigma_{com,Ed,ser}}{f_y}} \quad (4.1)$$

Dabei ist

$\sigma_{com,Ed,ser}$ definiert als die maximale Druckspannung (berechnet auf der Basis des effektiven Querschnitts) in dem betrachteten Querschnittsteil unter Belastungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.

(6) Das Flächenträgheitsmoment im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit darf für die relevante Lastkombination durch eine Interpolation des Bruttoquerschnitts und des effektiven Querschnitts nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$I_{eff} = I_{gr} - \frac{\sigma_{gr}}{\sigma_{com,Ed,ser}} (I_{gr} - I_{eff}(\sigma_{com,Ed,ser})) \quad (4.2)$$

Dabei ist

I_{gr} das Flächenträgheitsmoment des Bruttoquerschnitts;

σ_{gr} die größte am Bruttoquerschnitt ermittelte Druckbiegespannung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit;

$I_{eff}(\sigma_{com,Ed,ser})$ das für den wirksamen Querschnitt unter Berücksichtigung des lokalen Beulens nach 6.4.1(7) berechnete Flächenträgheitsmoment; der wirksame Querschnitt wird für die größte Spannung innerhalb der betrachteten Spannweite $\sigma_{com,Ed,ser} \geq \sigma_{gr}$ unter Anwendung der mit Gleichung (4.1) bestimmten reduzierten Schlankheit ermittelt.

(7) Das effektive Flächenträgheitsmoment I_{eff} darf entlang der Spannweite entsprechend den kritischsten Stellen als variabel angenommen werden. Alternativ darf ein konstanter Wert angesetzt werden, der auf dem größten absoluten Biegemoment im Feld bei Beanspruchung im Gebrauchszustand beruht.

(8) Die in (5) und (6) beschriebenen Berechnungen erfordern ein iteratives Vorgehen. Auf der sicheren Seite darf die Berechnung auch in einem Schritt für eine Spannung größer oder gleich $\sigma_{com,Ed,ser}$ durchgeführt werden.

(9) Die Auswirkung des Plattenbeulens auf die Steifigkeit darf bei der Tragwerksberechnung vernachlässigt werden, wenn die wirksame Fläche eines unter Druckbeanspruchung stehenden Querschnittsteils im Grenzzustand der Tragfähigkeit größer als seine 0,5-fache Bruttoquerschnittsfläche ist. Das Kriterium ist für alle Bleche des Querschnitts einzeln anwendbar.

4.4 Einfluss des Plattenbeulens auf die Tragfähigkeit gleichförmiger Bauteile

(1) Die Verfahren mit wirksamen Breiten bei Längsspannungen, die Verfahren zur Ermittlung der Tragfähigkeit bei Schubbeulen und bei Beulen infolge Querlasten auf den Längsrändern sowie die Interaktionsformeln zur Bestimmung der Beanspruchbarkeit im Grenzzustand der Tragfähigkeit beim Zusammenwirken dieser Effekte dürfen unter folgenden Bedingungen angewendet werden:

- die Beulfelder sind rechteckig und die Flansche verlaufen parallel;
- der Durchmesser nicht ausgesteifter Löcher oder Ausschnitte ist nicht größer als $0,05 b$, wobei b die Beulfeldbreite ist.

(2) Wenn das Beulfeld nicht rechteckig ist, jedoch mit einem Winkel ϕ (siehe Bild 4.1) kleiner oder gleich 10° , darf das Beulfeld unter Ansatz eines rechteckigen Ersatzbeulfeldes mit der größeren der beiden Abmessungen b_1 und b_2 (nach Bild 4.1) als Referenzbreite b für die Berechnung der relevanten Abminderungsbeiwerte angesehen werden.

(3) Ist das Beulfeld nicht rechteckig mit einem Winkel ϕ größer als 10° , aber gleich oder kleiner als $17,5^\circ$, sollten die Regeln für nicht rechteckige Beulfelder angewendet werden.

ANMERKUNG Der elastische kritische Lasterhöhungsfaktor α_{cr} kann entweder auf der Basis eines rechteckigen Ersatzbeulfeldes mit der größeren Breite oder auf der Basis der tatsächlichen Trapezform und der entsprechenden Randspannungen berechnet werden. Der Abminderungsfaktor wird für jeden Querschnitt individuell auf der Basis seiner örtlichen kritischen Spannung berechnet. Für die Definition des Abminderungsfaktors siehe 6.4.1(1) und für die Definition von α_{cr} siehe 12.3(1).

(4) Für nicht rechteckige Beulfelder mit einem Winkel ϕ größer als $17,5^\circ$ siehe 4.7.

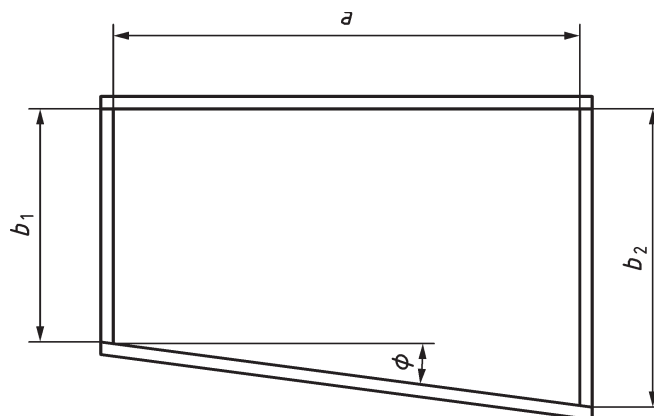


Bild 4.1 — Definition des Winkels ϕ

(5) Für die Berechnung von Spannungen für Gebrauchstauglichkeitsnachweise oder von Spannungsschwingbreiten für Ermüdungsnachweise darf die mitttragende Querschnittsfläche verwendet werden, wenn die Bedingung nach 4.3(9) erfüllt ist. Für Grenzzustände der Tragfähigkeit sollte die effektive Fläche nach 5.3 verwendet werden, wobei β durch β_{ult} ersetzt wird.

4.5 Methode der reduzierten Spannungen

(1) Als Alternative zur Verwendung der Modelle wirksamer Breiten für Spannungszustände nach Abschnitt 6 bis Abschnitt 9 dürfen die Querschnitte der Querschnittsklasse 3 zugeordnet werden, sofern die Spannungen für jedes Blechfeld die in Abschnitt 12 festgelegten Grenzwerte nicht überschreiten.

ANMERKUNG Für Einzelbleche entspricht die Methode der reduzierten Spannungen der Methode mit wirksamen Breiten (siehe 4.4). Es ist jedoch zu beachten, dass bei der Methode der reduzierten Spannungen Lastumlagerungen zwischen den Einzelblechen eines Bauteils nicht berücksichtigt werden.

4.6 Bemessung mithilfe der Finite-Elemente-Methode

(1) Die Finite-Elemente-Berechnung für die Berechnung des Verzweigungszustandes, der Grenzzustände der Tragfähigkeit, Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit oder als Grundlage der Ermüdungsnachweise sollte entsprechend den Regeln nach EN 1993-1-14 durchgeführt werden.

(2) Die Ergebnisse numerischer Simulation sollten nach EN 1993-1-14 bewertet werden.

ANMERKUNG Der Wert der höchstzulässigen plastischen Dehnung beträgt $\varepsilon_{\text{mpp}} = 5\%$, sofern nicht anders im Nationalen Anhang festgelegt.

4.7 Bauteile mit veränderlichem Querschnitt

(1) Bei Bauteilen mit veränderlichen Querschnitten (z. B. gevoutete Bauteile oder nicht rechteckige Beulfelder mit einem Winkel größer als $17,5^\circ$) oder Bauteilen mit regelmäßigen oder unregelmäßigen großen Ausschnitten dürfen Verfahren auf der Grundlage von Finite-Elemente-Berechnungen angewendet werden.

ANMERKUNG Empfehlungen für Bauteile mit veränderlichem Querschnitt sind auch in Anhang B angegeben.

4.8 Bauteile mit profilierten Stegblechen

(1) Bei der Berechnung von Bauteilen mit profilierten Stegblechen sollte angenommen werden, dass die Biegesteifigkeit allein aus den Flanschen herrührt und die profilierten Stege nur Schubkräfte und Querlasten aus den Längsrändern übertragen. Zur Bemessung von Trägern mit profilierten Stegblechen siehe Abschnitt 13.

5 Berücksichtigung der Schubverzerrungen bei der Bemessung von Bauteilen

5.1 Allgemeines

(1) In Flanschen darf der Einfluss der Schubverzerrungen vernachlässigt werden, wenn die Bedingung $b_0 < L_e/50$ erfüllt ist; dabei ist b_0 die Bruttobreite bei einseitig gestützten Flanschteilen bzw. die Hälfte der Breite bei zweiseitig gestützten Flanschteilen und L_e die Länge zwischen Momentennullpunkten, siehe 5.2.1(2).

(2) Wird die vorstehend angegebene Grenze für b_0 überschritten, sollten bei den Nachweisen sowohl im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit als auch der Ermüdung die Einflüsse der Schubverzerrungen auf das Tragverhalten der Flansche berücksichtigt werden, indem eine mittragende Breite nach 5.2.1 und eine Spannungsverteilung nach 5.2.2 angenommen wird. Für den Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit darf eine effektive Breite nach 5.3 eingesetzt werden.

(3) Elastische Spannungen sollten nach 5.2.3 ermittelt werden, wenn diese aus einer in Blechebene wirkenden lokalen Lastenleitung von Querlasten resultieren, wobei die Lastenleitung über den Flansch in den Steg erfolgt.

5.2 Elastische Schubverzerrung

5.2.1 Mittragende Breiten

(1) Zur Berücksichtigung elastischer Schubverzerrungen sollte die mittragende Breite b_{eff} wie folgt ermittelt werden:

$$b_{\text{eff}} = \beta b_0 \quad (5.1)$$

Der Faktor β ist Tabelle 5.1 zu entnehmen.

Diese mittragende Breite kann gegebenenfalls bei den Nachweisen sowohl im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit als auch der Ermüdung verwendet werden.

(2) Unterscheiden sich angrenzende Feldweiten um nicht mehr als 50 % bzw. sind die Kragarme nicht länger als 50 % der angrenzenden Feldweite, so darf die effektive Länge L_e nach Bild 5.1 bestimmt werden. In allen anderen Fällen sollte L_e als der Abstand zwischen zwei benachbarten Momentennullpunkten angenommen werden.

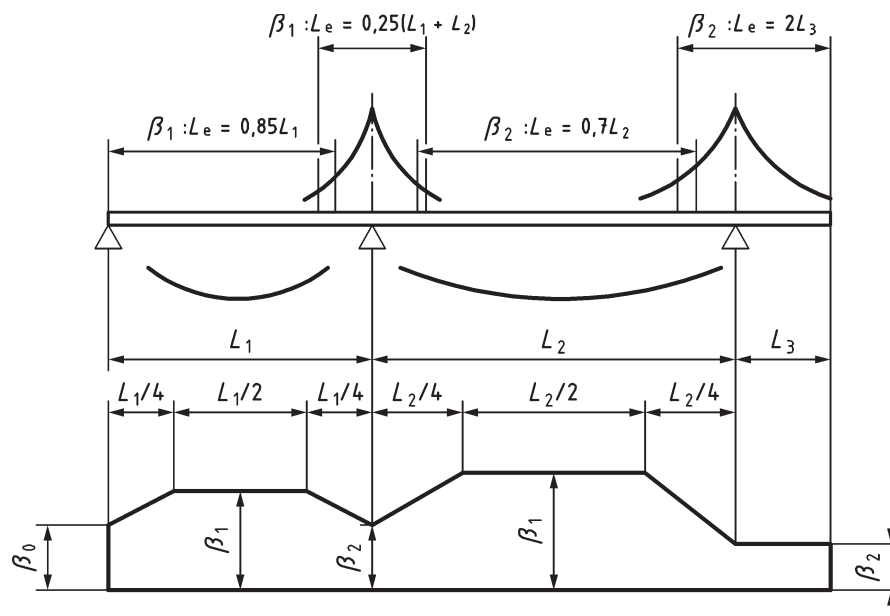
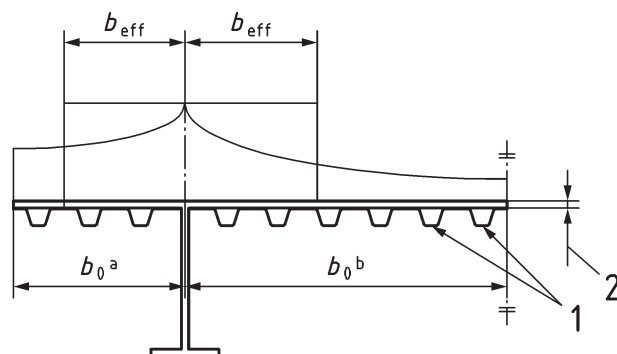


Bild 5.1 — Effektive Länge L_e für Durchlaufträger und Verteilung der mittragenden Breite



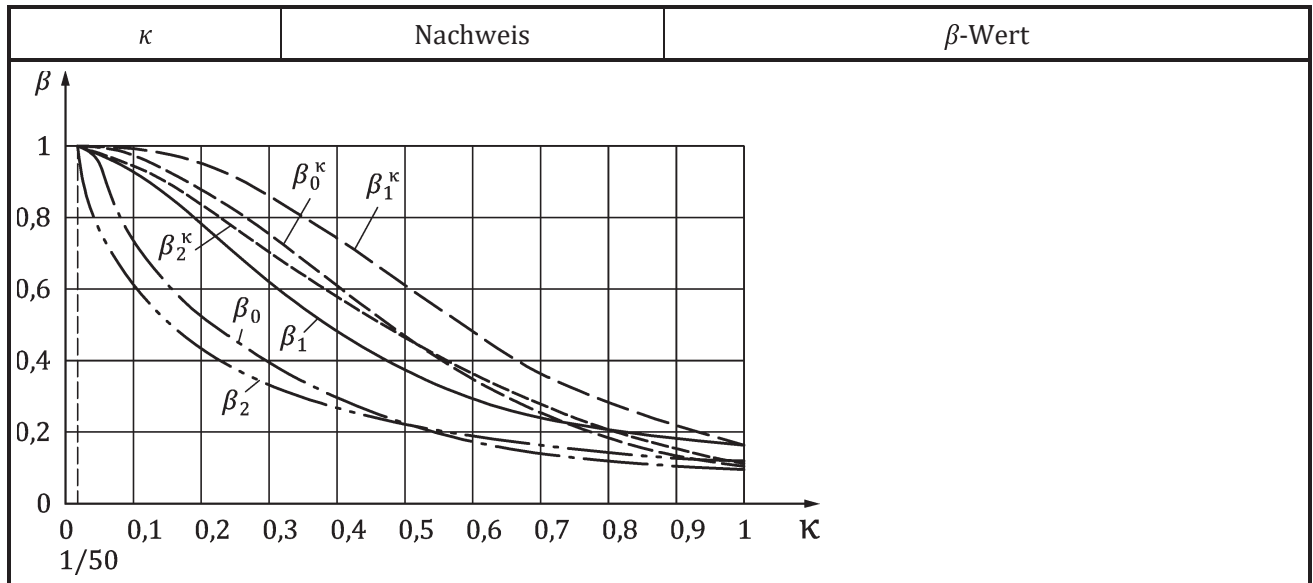
Legende

- ^a bei einseitig gestütztem Flanschteil
- ^b bei zweiseitig gestütztem Flanschteil
- 1 Längssteifen mit $A_{s\ell} = \sum A_{s\ell,i}$
- 2 Blechdicke t

Bild 5.2 — Bezeichnungen für die mittragende Breite

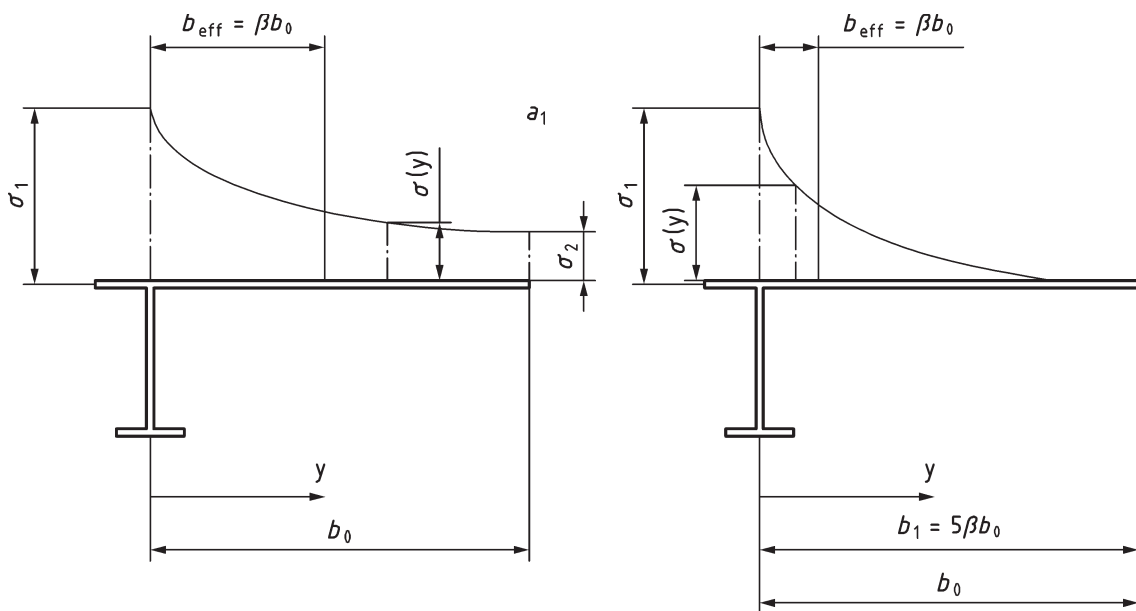
Tabelle 5.1 — Abminderungsfaktor β für die mittragende Breite

κ	Nachweis	β -Wert
$\kappa \leq 0,02$		$\beta = 1,0$
$0,02 < \kappa \leq 0,70$	Feldmoment	$\beta = \beta_1 = \frac{1}{1 + 6,4\kappa^2}$
	Stützmoment	$\beta = \beta_2 = \frac{1}{1 + 6,0 \left(\kappa - \frac{1}{2 \cdot 500\kappa} \right) + 1,6\kappa^2}$
$\kappa > 0,70$	Feldmoment	$\beta = \beta_1 = \frac{1}{5,9\kappa}$
	Stützmoment	$\beta = \beta_2 = \frac{1}{8,6\kappa}$
alle κ -Werte	Endauflager	$\beta_0 = (0,55 + 0,025/\kappa) \beta_1$, jedoch $\beta_0 < \beta_1$
alle κ -Werte	Kragarm	$\beta = \beta_2$ am Auflager und am Kragarmende
$\kappa = \alpha_0 b_0 / L_e$ mit $\alpha_0 = \sqrt{1 + \frac{A_{s\ell}}{b_0 t}}$ Dabei ist $A_{s\ell}$ die Querschnittsfläche aller Längssteifen innerhalb der Breite b_0 . Weitere Formelzeichen sind in Bild 5.1 und Bild 5.2 angegeben.		



5.2.2 Spannungsverteilung unter Berücksichtigung der Schubverzerrung

(1) Die Verteilungen der Längsspannungen über das Flanschblech aufgrund von Schubverzerrungen sollten wie folgt bestimmt werden:



$$\beta > 0,20:$$

$$\sigma_2 = 1,25 (\beta - 0,20) \sigma_1$$

$$\sigma(y) = \sigma_2 + (\sigma_1 - \sigma_2) \left(1 - \frac{y}{b_0}\right)^4$$

$$\beta \leq 0,20:$$

$$\sigma_2 = 0$$

$$\sigma(y) = \sigma_1 \left(1 - \frac{y}{b_1}\right)^4$$

σ_1 wird mit der mitttragenden Breite b_{eff} des Flansches ermittelt.

Bild 5.3 — Verteilung der Längsspannungen über das Flanschblech unter Berücksichtigung der Schubverzerrungen

5.2.3 Lasteinleitung von Querlasten in Blechebene

(1) Die elastische Spannungsverteilung in einem nicht ausgesteiften oder ausgesteiften Blech infolge einer lokalen Lasteinleitung von Querlasten in der Blechebene sollte wie folgt ermittelt werden, siehe Bild 5.4:

$$\sigma_{z,Ed} = \frac{F_{Ed}}{b_{eff}(t_w + a_{st,1})} \quad (5.2)$$

Dabei ist

$$b_{eff} = s_e \sqrt{1 + \left(\frac{z}{s_e n}\right)^2}$$

$$n = 0,636 \sqrt{1 + \frac{0,878 a_{st,1}}{t_w}}$$

$$s_e = s_s + 2 t_f$$

Dabei ist

$a_{st,1}$ die Bruttoquerschnittsfläche der längsbelasteten Steifen je Längeneinheit der Stegbleche innerhalb der Länge s_e . Dieser Wert darf als die Fläche einer über die Abstandslänge verschmierten Steife s_{st} angenommen werden;

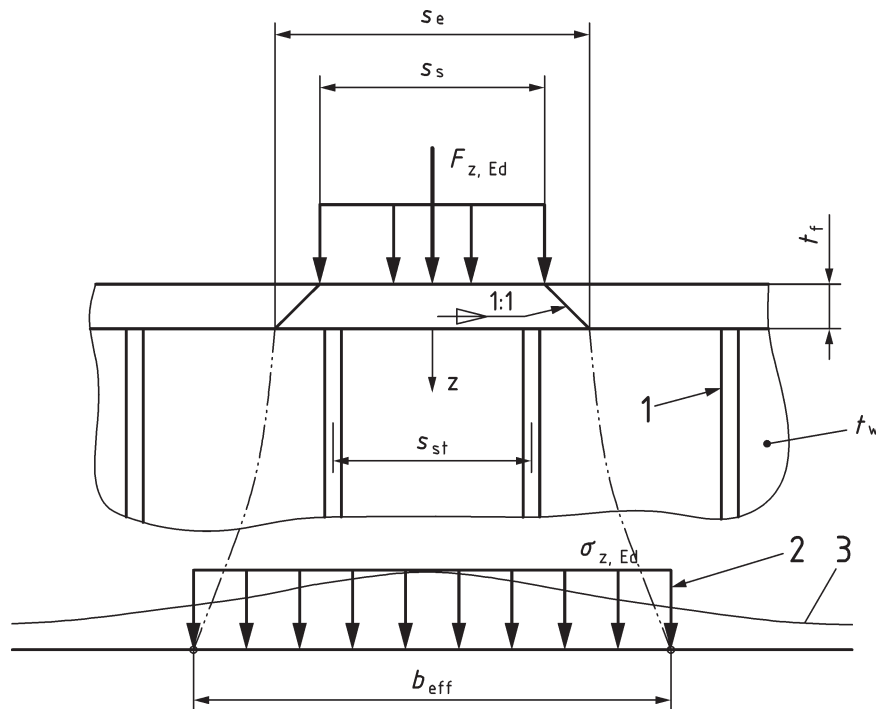
t_w die Stegblechdicke;

z der Abstand zum Flansch;

s_s die Länge der starren Lasteinleitung;

s_{st} der Abstand der Steifen.

Gleichung (5.2) sollte verwendet werden, wenn $s_{st}/s_e \leq 0,5$. Anderenfalls sollte der Beitrag der Steifen vernachlässigt werden.



Legende

- 1 Steife
- 2 vereinfachte Spannungsverteilung
- 3 tatsächliche Spannungsverteilung

Bild 5.4 — Lasteinleitung von Querlasten in Blechebene

5.3 Berücksichtigung der Schubverzerrungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit

5.3.1 Berücksichtigung der Schubverzerrungen

(1) Im Grenzzustand der Tragfähigkeit dürfen die Auswirkungen von Schubverzerrungen mit einem der folgenden Verfahren bestimmt werden:

- a) wie elastische Schubverzerrungen entsprechend den Nachweisen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit und den Nachweisen für die Ermüdung (siehe 5.2.1);
- b) für die elastisch-plastische Wirkung von Schubverzerrungen unter Berücksichtigung begrenzter plastischer Dehnungen.

ANMERKUNG Das Verfahren zur Berücksichtigung der elastischen Schubverzerrungen erfasst nicht die elastisch-plastische Spannungsverteilung, seine Anwendung im Grenzzustand der Tragfähigkeit ist ein konservativer Ansatz.

(2) In Flanschen, bei denen das Spannungsniveau die Streckgrenze erreicht, darf die elastisch-plastische Wirkung von Schubverzerrungen unter Berücksichtigung begrenzter plastischer Dehnungen durch Ersetzen von β durch $\max(\beta, \beta^\kappa)$ in Gleichung (5.1) berücksichtigt werden, wobei β und κ Tabelle 5.1 entnommen werden.

(3) Die Gleichung in (2) darf auch für Flansche unter Zugbeanspruchung angewendet werden.

5.3.2 Interaktion zwischen der Berücksichtigung von Schubverzerrung und Plattenbeulen

(1) Die gleichzeitige Wirkung von Plattenbeulen und Schubverzerrung darf mittels der effektiven Querschnittsfläche A_{eff} wie folgt berücksichtigt werden:

$$A_{\text{eff}} = A_{\text{c,eff}} \beta_{\text{ult}} \quad (5.3)$$

Dabei ist

$A_{\text{c,eff}}$ die wirksame Querschnittsfläche des Druckflansches unter Berücksichtigung von Plattenbeulen (siehe 6.4 und 6.5);

β_{ult} der Abminderungsfaktor für die mittragende Breite zur Berücksichtigung der elastischen Schubverzerrungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit, der als β angesetzt werden darf, bestimmt nach Tabelle 5.1, wobei α_0 ersetzt wird durch

$$\alpha_0^* = \sqrt{\frac{A_{\text{c,eff}}}{b_g t_f}} \quad (5.4)$$

t_f die Flanschdicke;

b_g die Bruttobreite der Druckzone entsprechend $A_{\text{c,eff}}$. b_g ist gleich b_0 für einseitig gestützte Flanschteile und gleich $2b_0$ für zweiseitig gestützte Flanschteile.

(2) Im Fall der Berücksichtigung der elastisch-plastischen Wirkung von Schubverzerrungen darf A_{eff} wie folgt definiert werden:

$$A_{\text{eff}} = A_{\text{c,eff}} \beta^{\kappa} \geq A_{\text{c,eff}} \beta \quad (5.5)$$

6 Plattenbeulen bei Längsspannungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit

6.1 Allgemeines

(1) Dieser Abschnitt gilt für Beulnachweise von Beulfeldern mit Längsspannungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit, wenn die folgenden Bedingungen zutreffen:

- a) die Beulfelder sind rechteckig und die Flansche parallel oder näherungsweise parallel innerhalb der in 4.4 und Bild 4.1 angegebenen Winkelgrenze;
- b) soweit Steifen vorhanden sind, verlaufen diese in Längs- und/oder Querrichtung;
- c) Löcher oder Ausschnitte sind klein (siehe 4.4);
- d) die Bauteile haben einen gleichförmigen Querschnitt;
- e) flanschinduziertes Stegblechbeulen ist ausgeschlossen.

ANMERKUNG 1 Anforderungen zur Vermeidung von druckflanschinduziertes Stegblechbeulen sind in Abschnitt 10 angegeben.

ANMERKUNG 2 Anforderungen an Steifen sowie Hinweise zur Detailausbildung von Blechträgern beim Ausbeulen sind in Abschnitt 11 angegeben.

6.2 Beanspruchbarkeit bei Längsspannungen

(1) Die Beanspruchbarkeit von Blechträgern darf nach dem Verfahren der wirksamen Flächen für druckbeanspruchte Querschnittsteile der Querschnittsklasse 4 mit den Querschnittswerten (A_{eff} , I_{eff} , W_{eff}) ermittelt werden. Damit können die Querschnittsnachweise oder die Bauteilnachweise für Knicken oder Biegedrillknicken nach prEN 1993-1-1 geführt werden.

(2) Die wirksamen Flächen sollten auf der Grundlage der linearen Dehnungsverteilungen bis zum Erreichen der Fließdehnung in der Mittelebene des druckbeanspruchten Bleches ermittelt werden.

6.3 Effektive Querschnittsgrößen

(1) Bei der Berechnung der Längsspannungen sollten die Einflüsse der Schubverzerrung und des Plattenbeulens durch effektive Breiten berücksichtigt werden, siehe 5.3.2.

(2) Die effektiven Querschnittswerte von Bauteilen sollten mit den effektiven Flächen der druckbeanspruchten Querschnittsteile und den mittragenden Flächen der zugbeanspruchten Querschnittsteile ermittelt werden.

(3) Die wirksame Querschnittsfläche A_{eff} sollte unter der Annahme von Druckspannungen infolge einer konstanten Drucknormalkraft berechnet werden. Bei unsymmetrischen Querschnitten erzeugt die Verschiebung der Schwerelinie e_N der wirksamen Querschnittsfläche A_{eff} gegenüber der Schwerelinie des Bruttoquerschnitts ein zusätzliches Moment, siehe Bild 6.1, das beim Querschnittsnachweis nach 6.7 berücksichtigt werden sollte.

(4) Das wirksame Widerstandsmoment W_{eff} sollte unter der Annahme reiner Biegelängsspannungen bestimmt werden, siehe Bild 6.2. Bei zweiachsiger Biegung sollten die wirksamen Widerstandsmomente für beide Hauptachsen bestimmt werden.

(5) Alternativ zu 6.3(3) und (4) darf ein einzelner gemeinsamer wirksamer Querschnitt aus der gleichzeitigen Wirkung von N_{Ed} und M_{Ed} bestimmt werden. Die Auswirkungen einer Verschiebung der Schwerelinie e_N sollten entsprechend 6.3(3) berücksichtigt werden. Dabei ist ein iteratives Vorgehen erforderlich.

(6) Die Spannung in einem Flansch sollte mit dem elastischen Widerstandsmoment, bezogen auf die Mittelebene des Gurtbleches, berechnet werden.

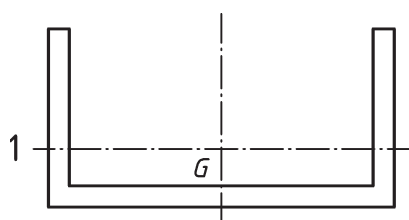
(7) Hybridträger dürfen in den Flanschen Werkstoffe haben, deren Streckgrenze f_{yf} im Bereich zwischen f_{yw} und $2f_{yw}$ liegt (siehe Bild 6.3), sofern gilt:

a) die Erhöhung der Spannungen im Flansch infolge Fließens im Steg wird durch eine Begrenzung der Stegspannungen auf f_{yw} berücksichtigt;

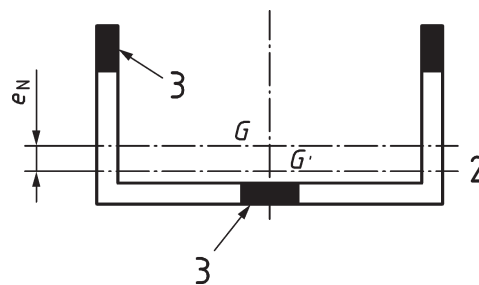
b) die wirksame Fläche des Steges wird mit f_{yf} ermittelt.

(8) Die Vergrößerung der Verformungen und Spannungen darf in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit und Ermüdung bei Hybridträgern, die 6.3(7) einhalten, vernachlässigt werden.

(9) Bei Hybridträgern, die mit 6.3(7) übereinstimmen, darf für die Begrenzung der Spannungsschwingbreite nach EN 1993-1-9 der Wert $1,5 \cdot f_{yf}$ zugrunde gelegt werden.



a) Bruttoquerschnitt

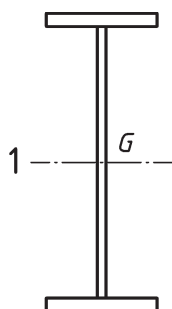


b) Wirksamer Querschnitt

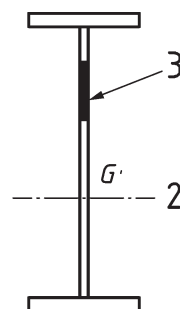
Legende

- G Schwerpunkt des Bruttoquerschnitts
- G' Schwerpunkt des wirksamen Querschnitts
- 1 Schwerelinie des Bruttoquerschnitts
- 2 Schwerelinie des wirksamen Querschnitts
- 3 nicht wirksame Querschnittsflächen

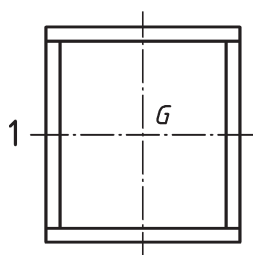
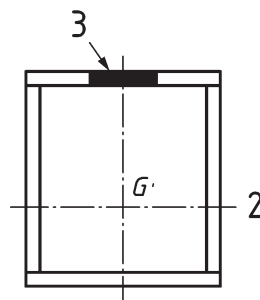
Bild 6.1 — Klasse-4-Querschnitt bei Wirkung einer Normalkraft



a) Bruttoquerschnitt



b) Wirksamer Querschnitt



Legende

- G Schwerpunkt des Bruttoquerschnitts
- G' Schwerpunkt des wirksamen Querschnitts
- 1 Schwerelinie des Bruttoquerschnitts
- 2 Schwerelinie des wirksamen Querschnitts
- 3 nicht wirksame Querschnittsflächen

Bild 6.2 — Klasse-4-Querschnitt bei Wirkung eines Biegemomentes

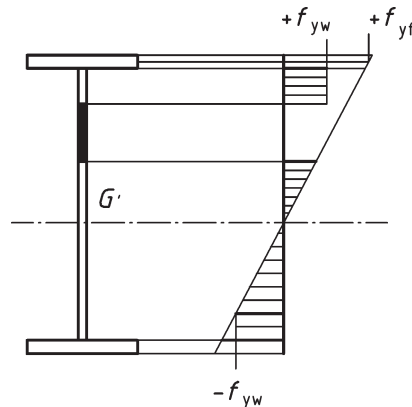


Bild 6.3 — Spannungsverteilung in Hybridträgern (Grenzzustand der Tragfähigkeit)

6.4 Einzelbeulfelder ohne Längssteifen

6.4.1 Plattenbeulen

(1) Die wirksamen Flächen ebener druckbeanspruchter Querschnittsteile sollten für beidseitig gestützte Querschnittsteile nach Tabelle 6.1 und für einseitig gestützte Querschnittsteile nach Tabelle 6.2 bestimmt werden. Die wirksame Fläche eines druckbeanspruchten Teils eines Beulfeldes mit der vorhandenen Bruttoquerschnittsfläche A_c sollte wie folgt ermittelt werden.

$$A_{c,eff} = \rho A_c \quad (6.1)$$

Dabei ist ρ der Abminderungsfaktor für Plattenbeulen.

(2) Der Abminderungsfaktor ρ darf wie folgt angesetzt werden:

— Bei beidseitig gestützten druckbeanspruchten Querschnittsteilen:

$$\begin{aligned} \rho &= 1,0 && \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 \psi} \\ \rho &= \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 (3 + \psi)}{(\bar{\lambda}_p)^2} && \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 \psi} \end{aligned} \quad (6.2)$$

— Bei einseitig gestützten druckbeanspruchten Querschnittsteilen:

$$\begin{aligned} \rho &= 1,0 && \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748 \\ \rho &= \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{(\bar{\lambda}_p)^2} && \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \end{aligned} \quad (6.3)$$

Dabei ist

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,p}}} = \frac{\bar{b}/t}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}} \quad (6.4)$$

ψ das nach 6.4.1(3) und 6.4.1(4) bestimmte Spannungsverhältnis;

$\bar{b}$ die maßgebende Breite wie folgt: für Winkel h und für alle anderen Fälle c entsprechend den Festlegungen nach prEN 1993-1-1:2020, Tabelle 7.3;

k_{σ} der Beulwert entsprechend dem Spannungsverhältnis ψ . Für lange Beulfelder sind Beulwerte k_{σ} in Tabelle 6.1 bzw. Tabelle 6.2 angegeben. Falls der Beulwert nicht anhand dieser Tabellen bestimmt wird, sollte der Beulwert k_{σ} unter Annahme von gelenkig gelagerten oder ggf. freien Rändern berechnet werden, wobei jegliche Rotationsbehinderung durch benachbarte Querschnittsteile vernachlässigt wird;

t die Blechdicke;

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

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad \text{wobei } f_y \text{ in [N/mm}^2\text{]} \text{ eingesetzt werden sollte.}$$

(3) $\sigma_{cr,p}$ darf nach Gleichung (6.5) sowie Tabelle 6.1 und Tabelle 6.2 ermittelt werden. Für Beulfelder mit einem Spannungsverhältnis ψ ungleich 1,0 ist $\sigma_{cr,p}$ die elastische kritische Beulspannung am Rand des Beulfeldes, an dem die maximale Druckspannung auftritt.

$$\sigma_{cr,p} = k_{\sigma} \sigma_E \quad (6.5)$$

Dabei ist

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 E t^2}{12 (1 - \nu^2) \bar{b}^2} = 190\,000 \left(\frac{t}{\bar{b}} \right)^2 \quad \text{in [N/mm}^2\text{]} \quad (6.6)$$

(4) Für Flansche von I-Querschnitten und Kastenträgern darf das Spannungsverhältnis ψ für die Anwendung der Tabelle 6.1 und Tabelle 6.2 mit Bruttoquerschnittswerten bestimmt werden, wobei auf eine möglicherweise erforderliche Reduzierung der Bruttoquerschnittswerte durch mittragende Breiten zu achten ist. Für Stegelemente darf das Spannungsverhältnis ψ für die Tabelle 6.1 mit der Spannungsverteilung ermittelt werden, die sich aus der effektiven Fläche des Druckflansches und dem Bruttoquerschnitt des Steges ergibt.

(5) Sind Spannungsverteilungen für verschiedene Montagezustände (z. B. bei Verbundbrücken) zu berücksichtigen, so dürfen im ersten Schritt die Spannungsverteilungen für einen Querschnitt berechnet werden, der sich aus den effektiven Flanschen und dem Bruttoquerschnitt des Steges zusammensetzt. Mit der hieraus resultierenden Spannungsverteilung darf die wirksame Querschnittsfläche des Steges bestimmt werden; diese wirksame Querschnittsfläche des Steges darf für alle Montagezustände zur Bestimmung der endgültigen Spannungsverteilung verwendet werden.

(6) Mit der Einschränkung nach 6.4.1(9) darf der Beulschlankheitsgrad $\bar{\lambda}_p$ eines Beulfeldes ersetzt werden durch:

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\frac{\sigma_{com,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}}} \quad (6.7)$$

Dabei ist

$\sigma_{com,Ed}$ der größte Bemessungswert der einwirkenden Druckbeanspruchung in dem Beulfeld unter Berücksichtigung aller einwirkenden Lasten.

ANMERKUNG Dieses Vorgehen ist konservativ und erfordert eine iterative Berechnung, in der das Spannungsverhältnis ψ (siehe Tabelle 6.1 und Tabelle 6.2) in jedem Schritt neu aus der Spannungsverteilung mit dem wirksamen Querschnitt des vorherigen Iterationsschritts ermittelt wird.

Tabelle 6.1 — Zweiseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile

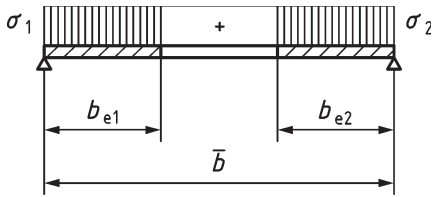
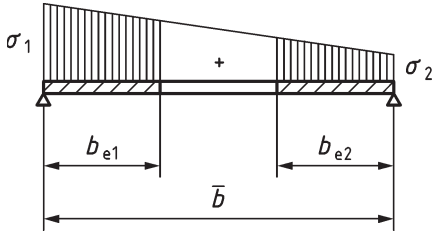
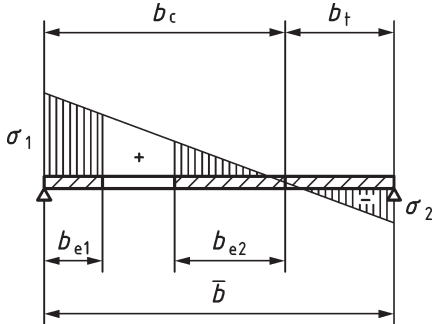
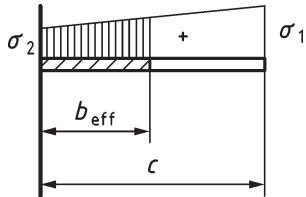
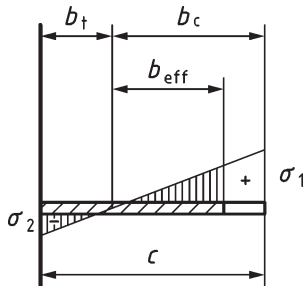
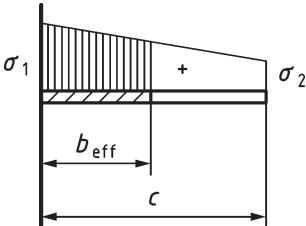
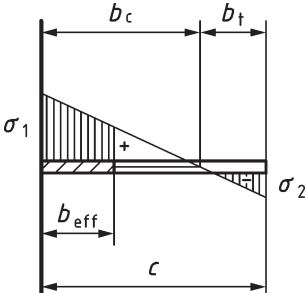
Spannungsverteilung (Druck positiv)				Wirksame Breite b_{eff}			
				$\psi = 1:$ $b_{\text{eff}} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{\text{eff}}$ $b_{e2} = 0,5 b_{\text{eff}}$			
				$1 > \psi \geq 0:$ $b_{\text{eff}} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5 - \psi} b_{\text{eff}}$ $b_{e2} = b_{\text{eff}} - b_{e1}$			
				$\psi < 0:$ $b_{\text{eff}} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{\text{eff}}$ $b_{e2} = 0,6 b_{\text{eff}}$			
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi \geq -3$	$\psi < -3$
Beulwert k_σ	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$	23,9	$5,98 (1 - \psi)^2$	95,68

Tabelle 6.2 — Einseitig gestützte Querschnittsteile

Spannungsverteilung (Druck positiv)		Wirksame Breite b_{eff}					
		$1 > \psi \geq 0:$ $b_{\text{eff}} = \rho c$					
		$\psi < 0:$ $b_{\text{eff}} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$					
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	0	-1	$1 \geq \psi \geq -3$		$\psi < -3$	
Beulwert k_σ	0,43	0,57	0,85	$0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$		1,83	

Spannungsverteilung (Druck positiv)		Wirksame Breite b_{eff}			
		$1 > \psi \geq 0:$ $b_{\text{eff}} = \rho c$			
		$\psi < 0:$ $b_{\text{eff}} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$			
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	$\psi \leq -1$
Beulwert k_σ	0,43	$0,578 / (\psi + 0,34)$	1,70	$1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$	23,8

(7) Wird der Beulschlankheitsgrad nach 6.4.1(6) berechnet, dürfen folgende Gleichungen zur Ermittlung wirksamer Flächen für Spannungen unterhalb der Streckgrenze angewendet werden:

a) für zweiseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile:

$$\rho = 1,0 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p < 0,673 \quad (6.8)$$

$$\rho = \frac{1 - 0,055 (3 + \psi) / \bar{\lambda}_{p,\text{red}}}{\bar{\lambda}_{p,\text{red}}} + 0,18 \frac{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_{p,\text{red}}}{\bar{\lambda}_p - 0,6} \quad \text{aber } \rho \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \geq 0,673 \quad (6.9)$$

b) für einseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile:

$$\rho = 1,0 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p < 0,748 \quad (6.10)$$

$$\rho = \frac{1 - 0,188 / \bar{\lambda}_{p,\text{red}}}{\bar{\lambda}_{p,\text{red}}} + 0,18 \frac{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_{p,\text{red}}}{\bar{\lambda}_p - 0,6} \quad \text{aber } \rho \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \geq 0,748 \quad (6.11)$$

Zu Bezeichnungen siehe 6.4.1(2) und 6.4.1(6). Für die Berechnung des Widerstands gegen Stabilitätsversagen der Stäbe gilt 6.4.1(9). Ist der Wert von $\sigma_{\text{com,Ed}} / (f_y / \gamma_{M0})$ oder $\sigma_{\text{com,Ed}} / f_y$ kleiner als 0,11, sollte in der Gleichung zur Bestimmung von $\bar{\lambda}_{p,\text{red}}$ der Wert 0,11 verwendet werden.

(8) Für einseitig gestützte Querschnittsteile darf alternativ das in EN 1993-1-3, Anhang C, angegebene Verfahren zur Berechnung der wirksamen Fläche $A_{\text{c,eff}}$ angewendet werden.

(9) Beim Knicknachweis von Bauteilen der Querschnittsklasse 4 nach prEN 1993-1-1:2022, 8.3.1, 8.3.2 oder 8.3.4, sollte entweder der Beulschlankheitsgrad $\bar{\lambda}_p$ oder $\bar{\lambda}_{p,\text{red}}$ mit $\sigma_{\text{com,Ed}}$ verwendet werden, wobei $\sigma_{\text{com,Ed}}$ nach Theorie II. Ordnung unter Berücksichtigung globaler Imperfektionen bestimmt wird.

(10) Für unausgesteifte beidseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile, die aufgrund der Lagerungsbedingungen weder Membran- noch Einspanneffekte entwickeln können, sollte Gleichung (6.2) durch Gleichung (12.6) mit $\alpha_p = 0,34$ und $\bar{\lambda}_{p0} = 0,70$ ersetzt werden.

ANMERKUNG Das ist typisch für unausgesteifte rechteckige Hohlquerschnitte unter reiner Druckbeanspruchung oder für Fälle, in denen das betrachtete Beulfeld nicht vollständig mit den benachbarten Querschnittsteilen verbunden ist, d.h. keine durchgeschweißte Naht oder beidseitige Kehlnaht vorhanden ist. Der Nationale Anhang kann weitere Fälle als „nicht gehalten“ festlegen.

6.4.2 Knickstabähnliches Verhalten

(1) Als elastische kritische Knickspannung $\sigma_{cr,c}$ eines Beulfeldes sollte die Knickspannung angesetzt werden, die sich bei Freisetzen der parallel zur Beanspruchungsrichtung verlaufenden Ränder ergibt.

(2) Bei Seitenverhältnissen $a/b < 1$, bei denen knickstabähnliches Verhalten auftreten kann, sollte der Nachweis nach 6.6 unter Verwendung des Abminderungsfaktors ρ_c geführt werden.

ANMERKUNG Dies betrifft z.B. schmale Einzelfelder zwischen Quersteifen, bei denen das Plattenbeulen knickstabähnlich sein und einen Abminderungsfaktor ρ_c in der Größenordnung des Abminderungsfaktors χ_c für Stabknicken erfordern kann, siehe Bild 6.4 a) und b).

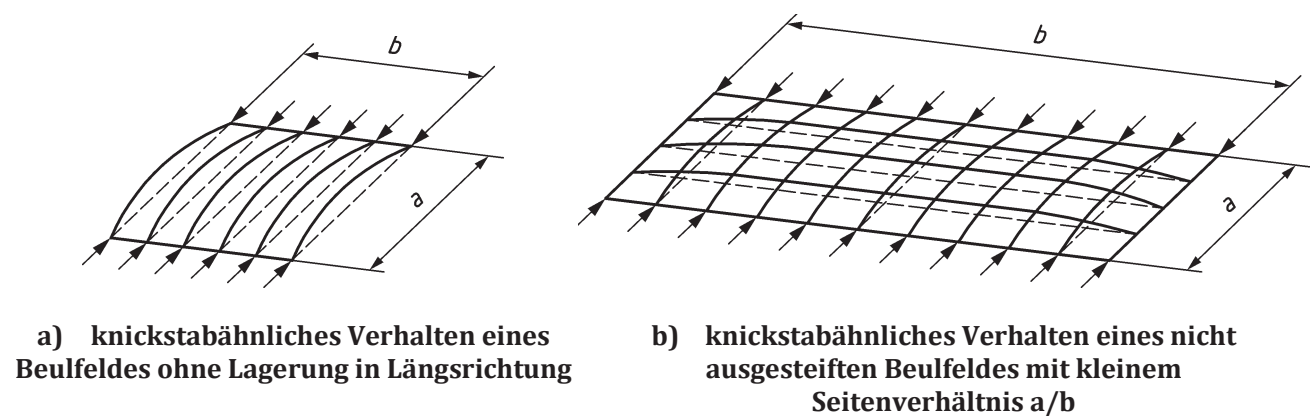


Bild 6.4 — Knickstabähnliches Verhalten

(3) Die elastische kritische Knickspannung $\sigma_{cr,c}$ eines unausgesteiften Beulfeldes darf wie folgt bestimmt werden

$$\sigma_{cr,c} = \frac{\pi^2 E t^2}{12 (1 - \nu^2) a^2} \quad (6.12)$$

(4) Die bezogene Knickschlankheit $\bar{\lambda}_c$ eines unausgesteiften Beulfeldes ist wie folgt definiert:

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,c}}} \quad (6.13)$$

(5) Bei ungleicher Spannungsverteilung an beiden Enden des betrachteten Beulfeldes sollte die Beulfeldlänge a in Gleichung (6.12) durch eine modifizierte Knicklänge a_{cr} ersetzt werden. Die modifizierte Knicklänge sollte wie folgt bestimmt werden:

$$a_{cr} = a \sqrt{\frac{1 + 0,88 \frac{N_1}{N_2}}{1,88}} \quad \text{für } \frac{N_1}{N_2} \leq 1,0 \quad (6.14)$$

wobei N_1 und N_2 die resultierenden Normalkräfte aus den Spannungen an den jeweiligen Enden des Beulfeldes sind.

(6) Der Abminderungsfaktor χ_c für die Anwendung in 6.6.1 sollte nach prEN 1993-1-1:2020, 8.3.1.3, bestimmt werden. Bei unausgesteiften Beulfeldern sollte $\alpha = 0,21$ entsprechend Knicklinie a verwendet werden.

6.5 Längs ausgesteifte Beulfelder

6.5.1 Allgemeines

(1) Bei längs ausgesteiften Beulfeldern sollten sowohl die wirksamen Flächen infolge lokalen Beulens der verschiedenen Einzelfelder zwischen den Steifen als auch die wirksamen Flächen aus dem Gesamtfeldbeulen des ausgesteiften Gesamtfeldes berücksichtigt werden.

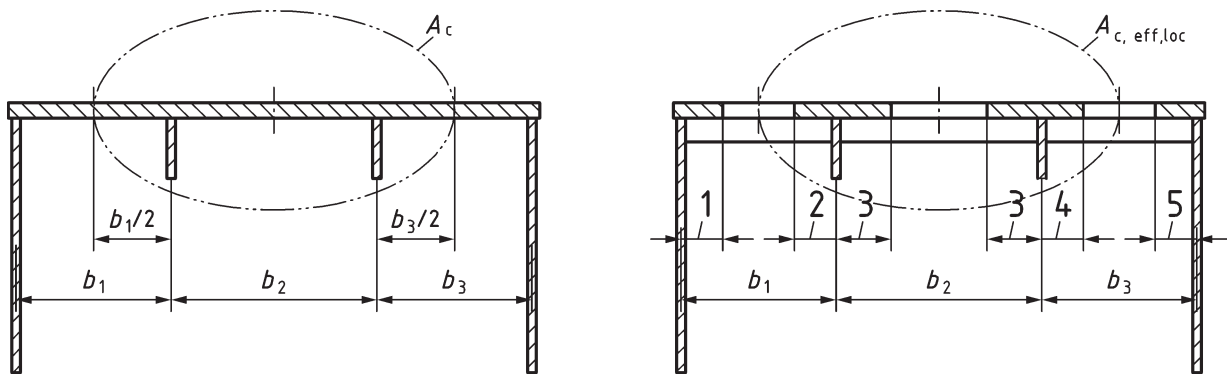
(2) Zur Berücksichtigung des Einzelfeldbeulens sollten die wirksamen Querschnittsflächen jedes Einzelfeldes mithilfe eines Abminderungsfaktors nach 6.4 bestimmt werden. Das ausgesteifte Gesamtfeld mit den wirksamen Flächen der Steifen sollte mithilfe des Abminderungsfaktors ρ_c für Gesamtfeldbeulen nachgewiesen werden (über das Modell der äquivalenten orthotropen Platte). Der Abminderungsfaktor ρ_c sollte für das Gesamtfeldbeulen unter Berücksichtigung von plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten bestimmt werden.

(3) Die wirksame Fläche der Druckzone eines ausgesteiften Beulfeldes sollte angesetzt werden mit:

$$A_{c,eff} = \rho_c A_{c,eff,loc} + \sum b_{edge,eff} t \quad (6.15)$$

wobei $A_{c,eff,loc}$ aus den wirksamen Querschnittsflächen aller Steifen und Einzelfelder besteht, die sich vollständig oder teilweise in der Druckzone befinden, mit Ausnahme der wirksamen Querschnittsteile am Rand, die durch benachbarte Querschnittsteile gestützt werden.

ANMERKUNG Siehe die Beispiele in Bild 6.5 ($b_{1,edge,eff}$ und $b_{3,edge,eff}$) sowie Bild 6.9 ($b_{1,sup}$).



Legende

- 1 $b_{1,edge,eff} = \rho_1 \frac{b_1}{2}$
- 2 $\rho_1 \frac{b_1}{2}$
- 3 $\rho_2 \frac{b_2}{2}$
- 4 $\rho_3 \frac{b_3}{2}$
- 5 $b_{3,edge,eff} = \rho_3 \frac{b_3}{2}$

Bild 6.5 — Längsausgesteiftes Beulfeld unter konstanter Druckbeanspruchung

(4) Die Fläche $A_{c,eff,loc}$ sollte ermittelt werden mit:

$$A_{c,eff,loc} = A_{s\ell,eff} + \sum_c \rho_{loc} b_{c,loc} t \quad (6.16)$$

Dabei ist

- $\sum_c$ bezogen auf den druckbeanspruchten Teil des längs ausgesteiften Beulfeldes mit Ausnahme der Querschnittsteile $b_{edge,eff}$ siehe Bild 6.5;
- $A_{s\ell,eff}$ die Summe der wirksamen Querschnitte nach 6.4 aller Längssteifen mit der Bruttoquerschnittsfläche $A_{s\ell}$ in der Druckzone;
- $b_{c,loc}$ die Breite des druckbeanspruchten Teils jedes Einzelfeldes;
- ρ_{loc} der Abminderungsfaktor nach 6.4.1(2) für jedes Einzelfeld.

(5) Ausgesteifte Beulfelder mit schwachen Längssteifen sollten im Hinblick auf ihre Beanspruchbarkeit bei Längsspannungen als unausgesteifte Beulfelder betrachtet und ihre wirksame Fläche sollte nach 6.4 ermittelt werden. Längssteifen sollten als schwache Steifen angesehen werden, wenn die bezogene Biegesteifigkeit jeder einzelnen Steife $\gamma_{s\ell,i}^*$ kleiner als 25 ist, wobei $\gamma_{s\ell,i}^*$ wie folgt definiert ist:

$$\gamma_{s\ell,i}^* = \frac{E I_{s\ell,i}^*}{b D} \quad (6.17)$$

Dabei ist

- E der Elastizitätsmodul;

b die Gesamtbreite des ausgesteiften Beulfeldes;

D die Biegesteifigkeit des Bleches definiert durch:

$$D = \frac{E t^3}{12 (1 - \nu^2)}$$

t die Blechdicke;

ν die Poissonsche Zahl

$I_{s\ell,i}^*$ das Flächenträgheitsmoment der Steife für Biegung aus der Blechebene, wobei die Steife und ein angrenzender Blechstreifen von $10 \cdot t$ auf jeder Seite der Verbindung von Steife und Blech als Querschnitt berücksichtigt werden.

(6) Die Abminderung der druckbeanspruchten Fläche $A_{c,eff,loc}$ durch ρ_c darf als eine über diesen Gesamtquerschnitt gleichmäßig verteilte Reduktion angenommen werden.

(7) Sind mittragende Breiten zu berücksichtigen (siehe 5.3), sollte für die unter Druckbeanspruchung stehenden Querschnittsteile eines längs ausgesteiften Blechfeldes die effektive Querschnittsfläche $A_{c,eff}$ zur Berücksichtigung der Wirkung sowohl aus Plattenbeulen als auch aus Schubverzerrungen verwendet werden.

(8) Als wirksame Querschnittsfläche der unter Zug stehenden Flächen des ausgesteiften Beulfeldes sollte die Bruttofläche der Zugzone angenommen werden, wobei erforderlichenfalls mittragende Breiten zu berücksichtigen sind, siehe 5.3.

(9) Das wirksame Widerstandsmoment W_{eff} sollte als Flächenträgheitsmoment des wirksamen Gesamtquerschnitts geteilt durch den Randabstand vom Schwerpunkt zur Mittelebene des betrachteten Bleches angesetzt werden.

6.5.2 Plattenbeulen

(1) Der Schlankheitsgrad $\bar{\lambda}_p$ einer äquivalenten orthotropen Platte ist wie folgt definiert:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\beta_{A,c} f_y}{\sigma_{cr,p}}} = \sqrt{\frac{\beta_{A,c} f_y}{k_{\sigma,p} \sigma_E}} \quad (6.18)$$

$$\text{mit } \beta_{A,c} = \frac{A_{c,eff,loc}}{A_c}$$

Dabei ist

A_c die Bruttoquerschnittsfläche der Druckzone des längs ausgesteiften Beulfeldes ohne Berücksichtigung der durch ein angrenzendes Querschnittsteil gestützten Einzelfelder am Rand, siehe Bild 6.5 (A_c ist gegebenenfalls mit einem Faktor zur Berücksichtigung der Wirkung aus Schubverzerrungen zu multiplizieren, siehe 5.3);

$A_{c,eff,loc}$ die effektive Querschnittsfläche (ggf. unter Berücksichtigung von Schubverzerrungen) des oben beschriebenen Bereiches des längs ausgesteiften Beulfeldes unter Berücksichtigung des Beulens der Einzelfelder und/oder der Steifen;

- $\sigma_{cr,p}$ die elastische kritische Beulspannung, berechnet ohne Berücksichtigung der Torsionssteifigkeit von geschlossenen Längssteifen;
- $k_{\sigma,p}$ der Beulwert des ausgesteiften Beulfeldes nach Gleichung (6.5) und Gleichung (6.6), wobei $\bar{b}$ gleich b nach Bild 6.9 angenommen wird.

ANMERKUNG Zur Berechnung von $\sigma_{cr,p}$ oder $k_{\sigma,p}$ siehe Anhang A.

(2) Der Abminderungsfaktor ρ für die äquivalente orthotrope Platte wird nach 6.4.1(2) bestimmt; Voraussetzung hierfür ist die Ermittlung von $\bar{\lambda}_p$ nach Gleichung (6.18).

(3) Wenn die Torsionssteifigkeit von Steifen mit geschlossenem Querschnitt bei der Berechnung von $\sigma_{cr,p}$ berücksichtigt wird, sollte der Abminderungsbeiwert ρ für die äquivalente orthotrope Platte nach Gleichung (12.6) ermittelt werden.

6.5.3 Knickstabähnliches Verhalten

(1) Knickstabähnliches Verhalten entspricht der Situation, bei der die Längsränder keinen Einfluss auf das Beulverhalten haben, wie beispielsweise in Bild 6.6 dargestellt. Diese Wirkung kann sowohl in kurzen als auch in langen Beulfeldern beobachtet werden.

(2) Als elastische kritische Knickspannung $\sigma_{cr,c}$ eines ausgesteiften Beulfeldes sollte die Knickspannung angesetzt werden, die sich bei Freisetzen der parallel zur Beanspruchungsrichtung verlaufenden Ränder ergibt.

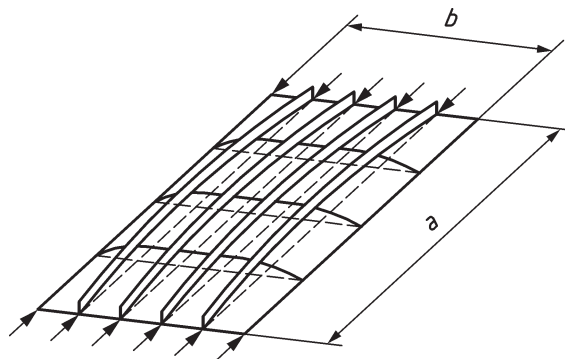


Bild 6.6 — Knickstabähnliches Verhalten eines längs ausgesteiften Beulfeldes

(3) Bei einem ausgesteiften Beulfeld mit identischen Steifen darf $\sigma_{cr,c}$ mithilfe der elastischen kritischen Knickspannung $\sigma_{cr,s\ell}$ der am Druckrand liegenden höchstbelasteten Steife wie folgt ermittelt werden:

$$\sigma_{cr,s\ell} = \frac{\pi^2 E I_{s\ell,1}}{A_{s\ell,1} a^2} \quad (6.19)$$

Dabei ist

- $I_{s\ell,1}$ das Flächenträgheitsmoment unter Ansatz der Bruttoquerschnittsfläche der Steife und der angrenzenden Blechstreifen bezogen auf die Biegung senkrecht zur Blechebene;
- $A_{s\ell,1}$ die Bruttoquerschnittsfläche der Steife und der angrenzenden Blechstreifen entsprechend Bild 6.9.

Der Wert $\sigma_{cr,c}$ darf aus $\sigma_{cr,c} = \sigma_{cr,s\ell} b_c / b_{s\ell,1}$ ermittelt werden, wobei $\sigma_{cr,c}$ für den Druckrand gilt. $b_{s\ell,1}$ und b_c bezeichnen die Abstände aus der Spannungsverteilung, die für die Extrapolation benötigt werden, siehe Bild 6.9.

Sollten auf dem Beulfeld ungleiche Steifen angeordnet sein, sollte das Verfahren für alle Steifen durchgeführt werden.

(4) Der bezogene Knickschlankheitsgrad $\bar{\lambda}_c$ ist wie folgt definiert:

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{\beta_{A,c} f_y}{\sigma_{cr,c}}} \quad (6.20)$$

$$\text{mit } \beta_{A,c} = \frac{A_{s\ell,1,\text{eff}}}{A_{s\ell,1}}$$

$A_{s\ell,1}$ ist in 6.5.3(3) definiert;

$A_{s\ell,1,\text{eff}}$ ist die wirksame Querschnittsfläche der Steife und der angrenzenden Blechstreifen unter Berücksichtigung des Plattenbeulens, siehe Bild 6.9.

(5) Der Abminderungsfaktor χ_c sollte nach prEN 1993-1-1:2020, 8.3.1.3, bestimmt werden. Für ausgesteifte Beulfelder sollte der Wert für α wie folgt vergrößert werden:

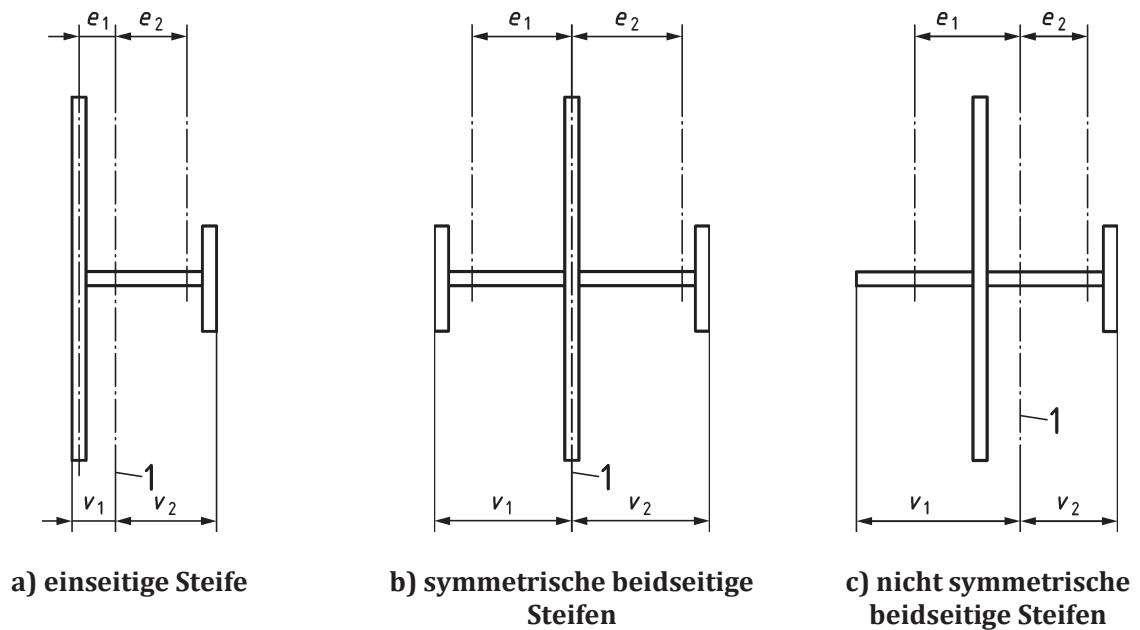
$$\alpha_e = \alpha + \frac{0,09}{i/e} \quad (6.21)$$

mit

$$i = \sqrt{\frac{I_{s\ell,1}}{A_{s\ell,1}}}$$

$e = \max(e_1, e_2)$ der größere der beiden Abstände nach Bild 6.7, d. h. entweder der Abstand zwischen dem Schwerpunkt der vom Blech isoliert betrachteten, einseitig angebrachten Einzelsteifen (bei zweiseitig angebrachten Steifen die Schwerachse jeder der beiden Steifen) zur Schwereachse des ausgesteiften Beulfeldes oder der Abstand der Schwereachse des ausgesteiften Beulfeldes zur Mittelebene des Bleches;

$\alpha = 0,34$ (Linie b) für geschlossene Steifenquerschnitte;
 $= 0,49$ (Linie c) für offene Steifenquerschnitte.



Legende

1 Schwerachse des ausgesteiften Beulfeldes (Ersatzknickstab)

$e = \max(e_1; e_2)$

$v = \max(v_1; v_2)$

Bild 6.7 — Darstellung von Werten für e_1 und e_2

6.6 Interpolation zwischen plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten

6.6.1 Allgemeines

(1) Zwischen dem Abminderungsbeiwert für Plattenbeulen ρ und dem Abminderungsbeiwert für knickstabähnliches Verhalten χ_c sollte interpoliert werden, um den endgültigen Abminderungsfaktor ρ_c nach Gleichung (6.22) zu ermitteln. Die Interpolation sollte, sofern maßgebend, für ausgesteifte Gesamtbeulfelder und für unausgesteifte Einzelbeulfelder getrennt durchgeführt werden. Die Interpolationsgleichung ist in Bild 6.8 dargestellt.

$$\rho_c = (\rho - \chi_c) \xi (2 - \xi) + \chi_c \quad (6.22)$$

Dabei ist

ξ der Wichtungsfaktor für das entsprechende plattenartige und knickstabähnliche Verhalten;

definiert als $\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1$ aber $0 \leq \xi \leq 1$

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

$\sigma_{cr,c}$ die elastische kritische Knickspannung nach 6.4.2(3) für unausgesteifte bzw. nach 6.5.3(2) für ausgesteifte Beulfelder;

χ_c der Abminderungsbeiwert zur Berücksichtigung des knickstabähnlichen Verhaltens nach 6.4.2(6) für unausgesteifte bzw. nach 6.5.3(5) für ausgesteifte Beulfelder;

ρ der Abminderungsbeiwert zur Berücksichtigung des Plattenbeulens nach 6.4.1 für unausgesteifte bzw. nach 6.5.2(2) für ausgesteifte Beulfelder.

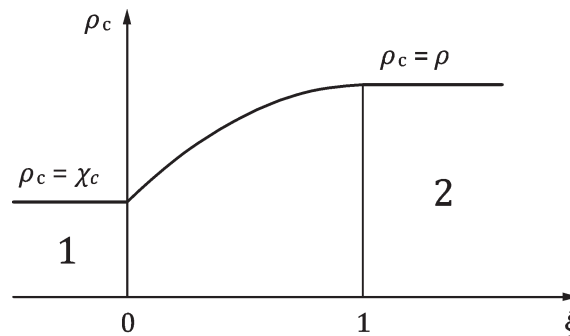


Bild 6.8 — Interpolation zwischen plattenartigem (2) und knickstabähnlichem (1) Verhalten

6.6.2 Alternative Methode zur Berechnung des Wichtungsfaktors ξ

(1) Als Alternative darf für längs ausgesteifte Beulfelder der Wichtungsfaktor ξ direkt aus einer der in 6.6.2(2) und 6.6.2(3) angegebenen Gleichungen ermittelt werden.

(2) Für längs ausgesteifte Beulfelder mit mindestens drei identischen Steifen darf der Wichtungsfaktor ξ wie folgt bestimmt werden:

$$\xi = k_{\sigma,p} \left(\frac{a}{b}\right)^2 \frac{b_{sl,1}}{b_c} \frac{1 + \delta}{\gamma} - 1 \quad \text{für } \psi \neq 1 \quad (6.23)$$

und

$$\xi = \frac{\left(1 + \left(\frac{a}{b}\right)^2\right)^2 - 1}{\gamma} \quad \text{für } \psi = 1; 0,5 \leq \frac{a}{b} \leq \sqrt[4]{\gamma} \quad (6.24)$$

aber $0 \leq \xi \leq 1$

Dabei ist/sind

$$\gamma = \frac{I_{sl}}{I_p}$$

$$\delta = \frac{A_{sl}}{A_p}$$

und

I_{sl} das Flächenträgheitsmoment des gesamten ausgesteiften Beulfeldes;

I_p das Flächenträgheitsmoment für Blechbiegung mit:

$$I_p = \frac{b t^3}{12 (1 - \nu^2)} = \frac{b t^3}{10,92}$$

A_{sl} die Summe der Bruttoquerschnittsflächen der einzelnen Längssteifen;

A_p die Bruttoquerschnittsfläche des Bleches ($= b t$);

σ_1 die größere Randspannung;

σ_2 die kleinere Randspannung;

$a, b, b_c, b_{s\ell,1}$ und t in Bild 6.9 definiert;

$k_{\sigma,p}$ in 6.5.2 definiert.



- | | Breite für
Bruttoquerschnittsfläche | Breite für wirksame Fläche
nach Tabelle 6.1 | Bedingung für ψ_i |
|--------------------|--|--|--|
| $b_{1,\text{inf}}$ | $\frac{3 - \psi_1}{5 - \psi_1} b_1$ | $\frac{3 - \psi_1}{5 - \psi_1} b_{1,\text{eff}}$ | $\psi_1 = \frac{\sigma_{\text{cr},s\ell,1}}{\sigma_{\text{cr},p}} > 0$ |
| $b_{2,\text{sup}}$ | $\frac{2}{5 - \psi_2} b_2$ | $\frac{2}{5 - \psi_2} b_{2,\text{eff}}$ | $\psi_2 = \frac{\sigma_2}{\sigma_{\text{cr},s\ell,1}} > 0$ |
| $b_{2,\text{inf}}$ | $\frac{3 - \psi_2}{5 - \psi_2} b_2$ | $\frac{3 - \psi_2}{5 - \psi_2} b_{2,\text{eff}}$ | $\psi_2 > 0$ |
| $b_{3,\text{sup}}$ | $0,4 b_{3c}$ | $0,4 b_{3c,\text{eff}}$ | $\psi_2 = \frac{\sigma_3}{\sigma_2} < 0$ |

38

(3) Für längs ausgesteifte Beulfelder mit einer oder zwei Steifen darf der Wichtungsfaktor ξ wie folgt ermittelt werden:

$$\xi = k_{\sigma,p} \left(\frac{a}{b}\right)^2 \frac{b_{s\ell,1}}{b_c} \frac{A_{s\ell,1} t^2}{12 (1 - \nu^2) I_{s\ell,1}} - 1 \quad (6.25)$$

Wenn $a \leq a_c$, darf Gleichung (6.25) durch Gleichung (6.26) ersetzt werden.

$$\xi = \frac{a^4 b t^3}{4 \pi^2 (1 - \nu^2) b_1^2 b_2^2 I_{s\ell,1}} \quad (6.26)$$

Dabei ist/sind

$$a_c = 4,33 \left(\frac{b_1^2 b_2^2 I_{s\ell,1}}{b t^3} \right)^{0,25}$$

$a, b, b_c, b_{s\ell,1}$ und t in Bild 6.9 definiert;

b_1, b_2 die Abstände der Steifen zu den Längsrändern der Stege ($b_1 + b_2 = b$);

$A_{s\ell,1}$ die nach 6.6.1(4) und (5) ermittelte Bruttoquerschnittsfläche des Ersatzdruckstabes;

$I_{s\ell,1}$ das Flächenträgheitsmoment der Bruttoquerschnittsfläche des Ersatzdruckstabes nach 6.6.1(4) und (5) um eine Schwerachse und parallel zur Blechebene;

$k_{\sigma,p}$ in 6.5.2 definiert.

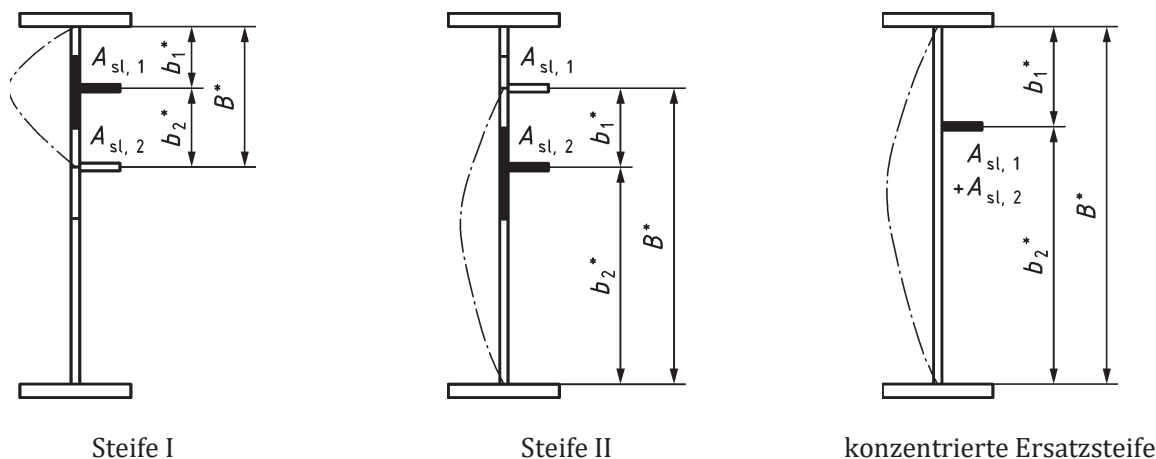
(4) Für die Berechnung von $A_{s\ell,1}$ und $I_{s\ell,1}$ sollte der Bruttoquerschnitt des Ersatzdruckstabes, der sich aus der Steife und den angrenzenden Blechstreifen entsprechend Bild 6.9 zusammensetzt, angenommen werden.

(5) Befinden sich zwei Längssteifen in der Druckzone eines ausgesteiften Beulfeldes, sollte die Berechnung von ξ für die drei in Bild 6.10 dargestellten Fälle durchgeführt werden. Dabei ist zunächst zu berücksichtigen, dass jede der beiden Steifen für sich ausknicken kann, wobei die andere als starr gelagert gilt. Dann wird das gemeinsame Ausknicken beider Steifen durch Betrachtung einer einzelnen Ersatzsteife berücksichtigt, zu der beide Steifen konzentriert sind. Für diese Ersatzsteife gilt:

- a) ihre Querschnittsfläche und ihr Flächenträgheitsmoment $I_{s\ell}$ sind die Summe der entsprechenden Größen für die Einzelsteifen;
- b) ihre Lage entspricht der Lage der Resultierenden der entsprechenden Druckkräfte in den Einzelsteifen.

Für jede der drei in Bild 6.10 dargestellten Fälle werden die relevanten Werte von b_1 und b_2 , die in Gleichung (6.26) zu verwenden sind, als b_1^* und b_2^* bezeichnet.

Der kleinste resultierende Wert von ξ wird dann in Gleichung (6.22) eingesetzt.



Querschnittsfläche	$A_{sl,I}$	$A_{sl,II}$	$A_{sl,I} + A_{sl,II}$
Flächenträgheitsmoment	$I_{sl,I}$	$I_{sl,II}$	$I_{sl,I} + I_{sl,II}$

Bild 6.10 — Bezeichnungen für ein Beulfeld mit zwei Steifen in der Druckzone

6.6.3 Alternatives vereinfachtes Verfahren für längs ausgesteifte Beulfelder unter Biegemoment

(1) Wird das Ausknicken der Steife, die dem Blechrand mit der höchsten Druckspannung am nächsten ist, entsprechend dem Kriterium nach 6.6.3(2) ausgeschlossen, dann darf der Abminderungsbeiwert für Gesamtfeldbeulen vollständig vernachlässigt werden ($\rho_c = 1$).

Diese Regel gilt, wenn die bezogene Biegesteifigkeit der Längssteifen mindestens 25 beträgt, siehe 6.5.1(5), und alle Steifen die gleichen Abmessungen haben.

(2) Der Knicknachweis für die am höchsten druckbeanspruchte Steife darf wie folgt geführt werden:

$$\sigma_{sl,1} \leq \frac{\chi_c f_y}{\gamma_{M1}} \quad (6.27)$$

wobei $\sigma_{sl,1}$ die mittlere Spannung in der betrachteten Längssteife ist, berechnet mit deren wirksamer Querschnittsfläche $A_{sl,1,eff}$, wie in 6.5.3(3) definiert. Die Spannungsverteilung über das gesamte ausgesteifte Beulfeld ergibt sich aus einer Berechnung nach der Elastizitätstheorie unter Verwendung des effektiven Querschnitts des Beulfeldes $A_{c,eff,loc}$ (einschließlich der Wirkung von Schubverzerrung und, wenn erforderlich, einer Berechnung nach Theorie II. Ordnung) unter der Annahme, dass der Beulfeldrand mit der höchsten Druckspannung die Streckgrenze f_y erreicht hat (siehe Bild 6.12).

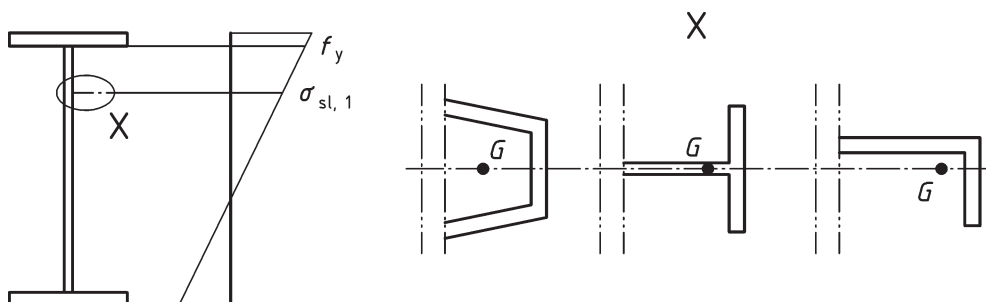


Bild 6.11 — Beispiele für den Schwerpunkt der Steife allein

ANMERKUNG 1 Zur Vereinfachung kann die mittlere Bemessungsspannung $\sigma_{Ed,s\ell,1}$ über die Querschnittsfläche $A_{s\ell,1,eff}$ als konstant und gleich dem Wert der Bemessungsspannung in Höhe des Schwerpunkts G der Steife allein angenommen werden, siehe Bild 6.11.

ANMERKUNG 2 Bei reiner Druckbeanspruchung kann die Bedingung der Gleichung (6.27) niemals erfüllt werden und die Berechnung des Abminderungsbeiwertes für Gesamtfeldbeulen ist in jedem Fall erforderlich. In diesem Fall kann das alternative vereinfachte Verfahren nach 6.6.3 somit nicht angewendet werden.

(3) χ_c wird nach 6.5.3(5) unter Berücksichtigung des Imperfektionsbeiwertes α_e ermittelt und der bezogene Knickschlankheitsgrad $\bar{\lambda}_{s\ell,1}$ wird wie folgt definiert:

$$\bar{\lambda}_{s\ell,1} = \sqrt{\frac{A_{s\ell,1,eff} f_y}{A_{s\ell,1} \sigma_{cr,s\ell}}} \quad (6.28)$$

Dabei ist/sind

$A_{s\ell,1}$ und $A_{s\ell,1,eff}$ wie in 6.5.3(4) definiert;

$\sigma_{cr,s\ell}$ wie in Gleichung (6.19) definiert.

ANMERKUNG Die Rückhaltewirkung durch das Blech wird vernachlässigt und der Ersatzdruckstab kann frei aus der Blechebene knicken.

(4) Wenn das Kriterium nach 6.6.3(2) nicht erfüllt ist, sollte bei der Berechnung von $A_{c,eff}$ nach 6.5.1(4) der Abminderungsfaktor ρ_c für das Gesamtfeldbeulen berücksichtigt werden.

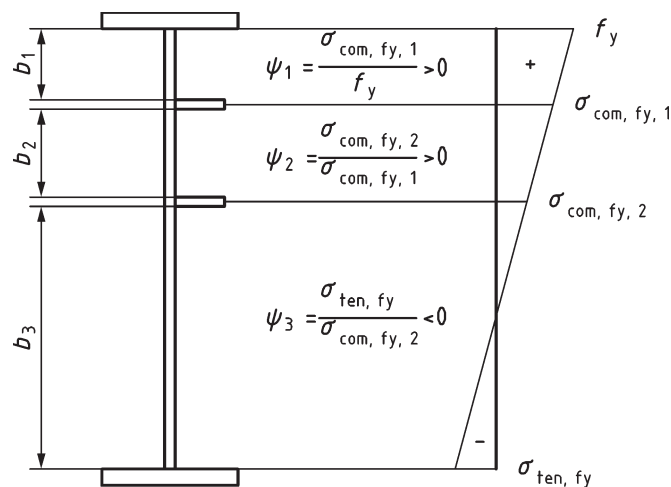


Bild 6.12 — Zu berücksichtigende Spannungsverteilung für die Anwendung des Verfahrens nach 6.6.3

6.7 Nachweis

(1) Der Bauteilnachweis für Normalkraft und einachsige Biegung sollte wie folgt geführt werden:

$$\eta_1 = \frac{\frac{N_{Ed}}{f_y A_{eff}}}{\gamma_{M0}} + \frac{\frac{M_{Ed} + e_N N_{Ed}}{f_y W_{eff}}}{\gamma_{M0}} \leq 1,0 \quad (6.29)$$

Dabei ist

- A_{eff} die wirksame Querschnittsfläche nach 6.3(3);
- e_N die Verschiebung der Lage der Schwerpunkte, siehe 6.3(3);
- M_{Ed} der Bemessungswert des einwirkenden Biegemomentes;
- N_{Ed} der Bemessungswert der einwirkenden Normalkraft;
- W_{eff} das wirksame Widerstandsmoment am betrachteten Nachweispunkt, siehe 6.3(4);
- γ_{M0} der Teilsicherheitsbeiwert, siehe 4.2.

(2) Die vorstehende Gleichung (6.30) darf für Bauteile unter Normalkraft und zweiachsiger Biegung wie folgt modifiziert werden:

$$\eta_1 = \frac{N_{\text{Ed}}}{\frac{f_y A_{\text{eff}}}{\gamma_{M0}}} + \frac{M_{y,\text{Ed}} + e_{y,N} N_{\text{Ed}}}{\frac{f_y W_{\text{eff},y}}{\gamma_{M0}}} + \frac{M_{z,\text{Ed}} + e_{z,N} N_{\text{Ed}}}{\frac{f_y W_{\text{eff},z}}{\gamma_{M0}}} \leq 1,0 \quad (6.30)$$

Dabei ist/sind

- $M_{y,\text{Ed}}, M_{z,\text{Ed}}$ die Bemessungswerte der einwirkenden Biegemomente um die y-y- bzw. die z-z-Achse;
- $e_{y,N}, e_{z,N}$ die Verschiebungen des jeweiligen Schwerlinien;
- $W_{\text{eff},y}, W_{\text{eff},z}$ gleich $I_{\text{eff},y}/z$ und $I_{\text{eff},z}/y$, wobei $I_{\text{eff},y}$ und $I_{\text{eff},z}$ die Flächenträgheitsmomente des wirksamen Querschnitts um die Hauptachsen sind, und y und z die Abstände zwischen dem Schwerpunkt und dem betrachteten Nachweispunkt, jeweils gemessen in Richtung der Hauptachsen.

(3) Die Schnittgrößen M_{Ed} und N_{Ed} sollten gegebenenfalls nach Theorie II. Ordnung berechnet werden.

(4) Der Beulnachweis für ein Beulfeld darf mit den Schnittgrößen in dem Querschnitt geführt werden, der sich im Abstand $0,4 a$ oder $0,5 b$ (der kleinere Wert gilt) vom Beulfeldrand befindet, an dem die größten Spannungen auftreten. In diesem Fall sollte zusätzlich am Beulfeldrand ein Querschnittsnachweis mit dem Bruttoquerschnitt geführt werden.

(5) Der Beulnachweis für nicht rechteckige Beulfelder, die den Bedingungen nach 4.4(3) entsprechen, darf anhand der Schnittgrößen an jedem Beulfeldrand geführt werden:

- In einem Abstand von $0,5 b_1$ vom Ende des Beulfeldes mit der kleineren Breite (siehe Querschnitt 1 in Bild 6.13);
- In einem Abstand von:

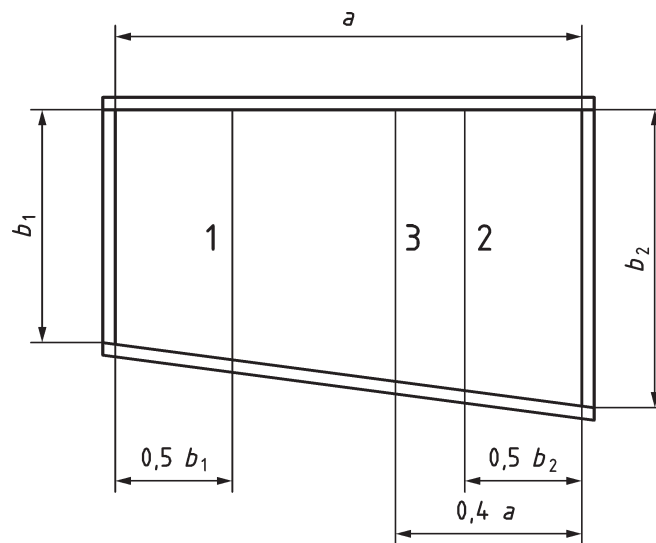
$$0,5 b_2, \text{ wenn } \frac{M_{\text{Ed},2}}{M_{f,\text{Rk},2}} \geq \frac{M_{\text{Ed},3}}{M_{f,\text{Rk},3}}$$

$$0,4 a, \text{ wenn } \frac{M_{\text{Ed},2}}{M_{f,\text{Rk},2}} < \frac{M_{\text{Ed},3}}{M_{f,\text{Rk},3}}$$

vom Ende des Beulfeldes mit der größeren Breite, wobei

- $M_{Ed,2}$ und $M_{Ed,3}$ die Bemessungswerte der einwirkenden Biegemomente in einem Abstand jeweils gleich $0,5 b_2$ und $0,4 a$ vom Ende des Beulfeldes mit der größeren Breite sind (siehe Querschnitte 2 und 3 in Bild 6.13);
- $M_{f,Rk,2}$ oder $M_{f,Rk,3}$ die charakteristische plastische Momententragfähigkeit des Querschnitts ist, der aus der effektiven Querschnittsfläche nur der Flansche besteht, in einem Abstand von jeweils $0,5 b_2$ und $0,4 a$ vom Beulfeldrand mit der größeren Breite (siehe auch 9.1 zur Definition von $M_{f,Rk}$).

In diesem Fall sollte zusätzlich an beiden Beulfeldrändern ein Querschnittsnachweis mit dem Bruttoquerschnitt geführt werden.



- 1 Querschnitt in einem Abstand $0,5 b_1$ vom Ende mit der kleineren Breite b_1
- 2 Querschnitt in einem Abstand $0,5 b_2$ vom Ende mit der größeren Breite b_2
- 3 Querschnitt in einem Abstand $0,4 a$ vom Ende mit der größeren Breite b_2

Bild 6.13 — Querschnittsnachweis bei einem nicht rechteckigen Beulfeld

7 Schubbeulen

7.1 Allgemeines

(1) Die Regeln dieses Abschnitts zur Bestimmung der Schubtragfähigkeit von Beulfeldern im Grenzzustand der Tragfähigkeit unter Berücksichtigung von Schubbeulen gelten unter folgenden Voraussetzungen:

- a) die Beulfelder sind rechteckig oder liegen innerhalb der in 4.4 und Bild 4.1 angegebenen Winkelgrenze (ϕ bis 10°). Zu nicht rechteckigen Beulfeldern in Übereinstimmung mit den Bedingungen nach 4.4(3) siehe 7.1(3);
- b) soweit Steifen vorhanden sind, laufen diese in Längs- und/oder Querrichtung;
- c) alle Löcher und Ausschnitte sind klein (siehe 4.4);
- d) die Bauteile haben einen gleichförmigen Querschnitt;

e) für den Nachweis von Endfeldern sind Auflagersteifen vorgesehen.

ANMERKUNG Zu Endfeldern ohne Auflagersteifen siehe 8.1(2), Typ (c).

(2) Für nicht ausgesteifte Blechfelder mit einem Verhältnis $h_w/t > \frac{72}{\eta} \varepsilon$ und für ausgesteifte Blechfelder mit einem Verhältnis $h_w/t > \frac{31}{\eta} \varepsilon \sqrt{k_\tau}$ sollte ein Schubbeulnachweis geführt werden und sollten Quersteifen an den Lagern vorgesehen werden, wobei $\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$ und f_y in [N/mm²] gilt.

ANMERKUNG 1 h_w : siehe Bild 7.1; k_τ : siehe 7.3(3).

ANMERKUNG 2 Sofern im Nationalen Anhang nicht anders festgelegt, ist der Wert von η gleich 1,20 für Stahlsorten bis einschließlich S460 sowie gleich 1,00 für Stahlsorten höher als S460.

(3) Für nicht rechteckige Beulfelder in Übereinstimmung mit den Bedingungen nach 4.4(3) darf der Nachweis für das Beulfeld unter Schubkrafteinwirkung auf der Grundlage der Bemessungsschnittgrößen an den in 6.7(5) festgelegten Querschnitten geführt werden. Die Schubkräfte sollten unter Berücksichtigung des Beitrages der Spannungen aus dem geneigten Flansch berechnet werden.

7.2 Bemessungswert der Beanspruchbarkeit

(1) Bei nicht ausgesteiften oder ausgesteiften Stegen sollte der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit unter Berücksichtigung des Schubbeulens wie folgt ermittelt werden:

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} \quad (7.1)$$

Der Beitrag des Steges ergibt sich zu:

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} \quad (7.2)$$

Der Beitrag der Flansche $V_{bf,Rd}$ wird nach 7.4 bestimmt.

(2) Steifen sollten den Anforderungen nach 11.3 und Schweißnähte der Anforderung nach 11.3.5 entsprechen.

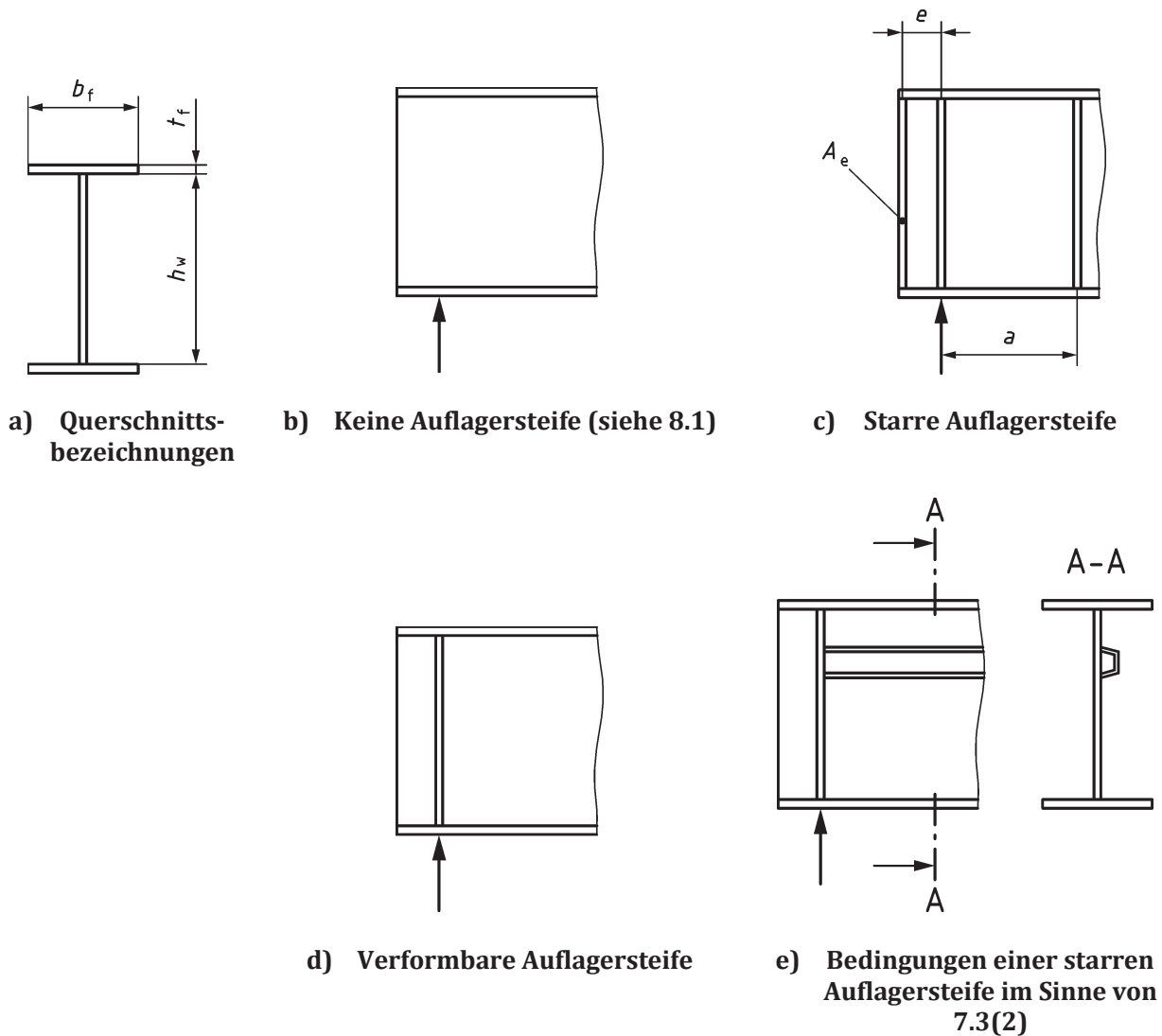


Bild 7.1 — Kriterien für Auflagersteifen

7.3 Beitrag des Steges

(1) Bei Stegen mit Quersteifen nur an den Auflagern (Auflagersteifen) und bei Stegen, die quer und/oder längs ausgesteift sind, sollte der Faktor χ_w für den Stegbeitrag zur Beanspruchbarkeit nach Tabelle 7.1 oder Bild 7.2 bestimmt werden. Der Faktor χ_w nach Tabelle 7.1 gilt ausschließlich für Schlankheitsgrade $\bar{\lambda}_w$, die für Beulfelder unter der Annahme gelenkiger Randlagerung bestimmt werden.

Tabelle 7.1 — Beitrag des Steges χ_w zur Schubbeanspruchbarkeit

	Endfelder mit verformbaren Auflagersteifen	Alle anderen Fälle (Zwischen- und Endfelder mit starren Auflagersteifen)
$\bar{\lambda}_w < 0,83 / \eta$	η	η
$0,83 / \eta \leq \bar{\lambda}_w < 1,08$	$\frac{0,83}{\bar{\lambda}_w}$	$\frac{0,83}{\bar{\lambda}_w}$
$\bar{\lambda}_w \geq 1,08$	$\frac{0,83}{\bar{\lambda}_w}$	$\frac{1,37}{0,7 + \bar{\lambda}_w}$

ANMERKUNG Siehe prEN 1993-1-1:2020, 8.2.6.

(2) Es werden nach Bild 7.1 verschiedene Auflagersituationen unterschieden:

- a) keine Auflagersteifen; siehe 8.1(2), Typ (c);
- b) starre Auflagersteifen, siehe 11.3.1;
- c) verformbare Auflagersteifen, siehe 11.3.2.

Bei mit geschlossenen Längssteifen ausgesteiften Stegen, die mit den Auflagersteifen und Quersteifen verbunden sind, dürfen die Auflagersteifen stets als starr angesehen werden (siehe Bild 7.1 d).

(3) Die modifizierte Schlankheit $\bar{\lambda}_w$ in Tabelle 7.1 und Bild 7.2 sollte angesetzt werden mit:

$$\bar{\lambda}_w = 0,76 \sqrt{\frac{f_{yw}}{\tau_{cr}}} = \frac{h_w}{37,4 t_w \varepsilon \sqrt{k_\tau}} \quad (7.3)$$

Dabei ist

$$\tau_{cr} = k_\tau \sigma_E \quad (7.4)$$

wobei σ_E in Gleichung (6.6) definiert ist.

ANMERKUNG k_τ kann nach Anhang A.5, aus Beultafeln oder mithilfe von numerischen Modellen bestimmt werden.

(4) Werden Quersteifen nur an den Auflagern und keine Längssteifen verwendet, darf die modifizierte Schlankheit $\bar{\lambda}_w$ wie folgt angesetzt werden:

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{86,4 t_w \varepsilon} \quad (7.5)$$

(5) Werden zusätzlich zu starren Quersteifen auch verformbare Quersteifen verwendet, so ist k_τ der kleinste Schubbeulwert aller Stegbeulfelder zwischen jeweils zwei Quersteifen (z. B. $a_2 \times h_w$ und $a_3 \times h_w$) und auch des Stegbeulfeldes zwischen nur starren Quersteifen, zwischen denen sich verformbare Quersteifen befinden (z. B. $a_4 \times h_w$), siehe Bild 7.3. Die Definition von starren und verformbaren Quersteifen ist in 11.3.3 angegeben.

(6) Sind Flansche und starre Quersteifen vorhanden, darf eine starre Randlagerung angenommen werden. In diesem Fall darf die Schubbeuluntersuchung für Beulfelder zwischen zwei benachbarten Quersteifen (z. B. $a_1 \times h_w$ in Bild 7.3) erfolgen.

(7) Bei verformbaren Quersteifen darf der kleinste Wert k_τ durch eine Eigenwertbestimmung für folgende Teilsysteme ermittelt werden:

- zwei benachbarte Stegblechfelder mit einer verformbaren Quersteife;
- drei benachbarte Stegblechfelder mit zwei verformbaren Quersteifen.

(8) Das Flächenträgheitsmoment einer Längssteife mit offenem Querschnitt sollte bei der Berechnung von k_τ auf 1/3 seines wirklichen Wertes reduziert werden.

ANMERKUNG Die Gleichungen für k_τ in A.5 berücksichtigen diese Reduzierung.