

Probekapitel

Stahlbau-Kalender 2009

Schwerpunkte: Stabilität, Membrantragwerke

Herausgeber: Ulrike Kuhlmann

Copyright © 2009 Ernst & Sohn, Berlin

ISBN: 978-3-433-02909-1

2009

STAHLBAU KALENDER



Stabilität
Membrantragwerke

 **Ernst & Sohn**
A Wiley Company



Wilhelm Ernst & Sohn
Verlag für Architektur und
technische Wissenschaften
GmbH & Co. KG
Rotherstraße 21, 10245 Berlin
Deutschland
www.ernst-und-sohn.de

 **Ernst & Sohn**
A Wiley Company

wellenlänge hervorrufen. Dieses Versagensphänomen wird in der DIN EN 1993-1-3 auch als Forminstabilität bezeichnet, da der Querschnitt hier nicht mehr querschnittstreu ist. Das Stabilitätsproblem „Ausknicken der Versteifungen“ ist ebenfalls bei innenliegenden Steifen dünnwandiger Kaltprofile oder Profilbleche zu untersuchen.

Die Versagensarten „Plattenbeulen“ und „distorsional buckling“ bestimmen nach DIN EN 1993-1-3 die Querschnittstragfähigkeit eines Kaltprofils. Treten diese Stabilitätsformen in Kombination mit den globalen Versagensformen „Biegeknicken“ und „Biegedrillknicken“ auf, wird dies i. Allg. als Gesamtstabilitätsproblem bezeichnet.

DIN EN 1993-1-3 regelt die lokalen, die globalen und die Gesamtstabilitätsprobleme für kaltgeformte, dünnwandige Kaltprofile unter Verwendung der bekannten Regelungen der DIN EN 1993-1-5 [9] für das lokale Stabilitätsproblem „Plattenbeulen“ und den grundlegenden Vorgaben der DIN EN 1993-1-1 [8] für die globalen Stabilitätsfälle „Biegeknicken“ und „Biegedrillknicken“.

4 Querschnittstragfähigkeit dünnwandiger Kaltprofile

4.1 Lokales Plattenbeulen

4.1.1 Die Methode der wirksamen Breiten

Mit der Einführung der neuen Europäischen Normengeneration wird zur Bestimmung der Tragfähigkeit beulgefährdeter Stahlquerschnitte nach DIN EN 1993 nahezu ausschließlich die Methode der wirksamen Breiten verwendet.

Nur in DIN EN 1993-1-5 [9] „Plattenförmige Bauteile“ wird neben der allgemein anzuwendenden Methode der wirksamen Breiten alternativ in Abschn. 10 eine gegenüber der DIN 18 800-3 [17] abgewandelte Methode der reduzierten Spannungen angegeben, die jedoch nicht in DIN EN 1993-1-3 eingebunden wurde. Die Berechnung der Beultragfähigkeit von kaltgeformten, dünnwandigen Bauteilen erfolgt nach DIN EN 1993-1-3 somit ausschließlich auf der Grundlage der Methode der wirksamen Breiten.

Dünnwandige, ebene Blechelemente von Kaltprofilen oder Profilblechen, deren Längsränder an den Querschnittseckpunkten gegen Verschieben aus der Ebene gehalten sind, erfahren unter Druckbeanspruchung bei Annäherung an die kritische Beullast starke Verformungen. Die lokal ausgebeulten Bereiche des Bleches entziehen sich der weiteren Beanspruchung, gleichzeitig treten Spannungsumlagerungen zu den gelagerten Längsrändern auf, die eine weitere Lastaufnahme über die kritische Last hinaus ermöglichen. Dieses überkritische Beultragverhalten ist gekennzeichnet durch einen über die Platte nunmehr nichtlinearen Normalspannungsverlauf (Bild 9).

Mithilfe der Methode der wirksamen Breiten kann dieses Beultragverhalten dünnwandiger Bleche näherungsweise realitätsnah bestimmt werden. Es können sowohl die Beultragfähigkeit als auch der reale, nichtlineare Spannungsverlauf ausbeulender Plattenelemente in guter Näherung im Vergleich zu experimentellen und numerischen Untersuchungen erfasst werden (Bild 9). Bei der Methode der wirksamen Breiten werden vereinfacht, entsprechend der realen Spannungsverteilung des dünnwandigen druckbeanspruchten Bleches im überkritischen Zu-

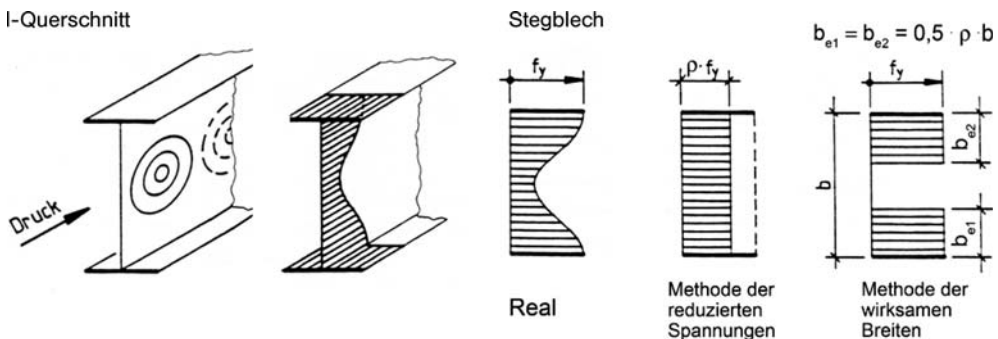


Bild 9. I-Profil unter Druckbeanspruchung – Normalspannungsverteilung im ausgebeulten Stegblech nach verschiedenen Berechnungsmethoden

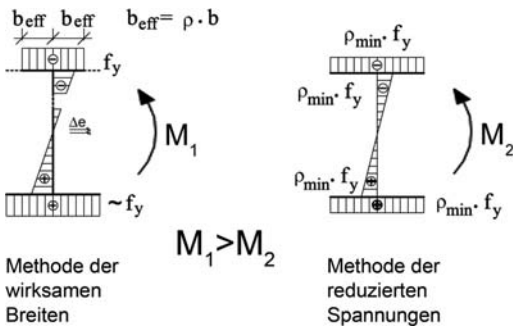


Bild 10. Nachweis der Querschnittstragfähigkeit eines biegebeanspruchten I-Querschnitts mithilfe der Methode der wirksamen Breiten im Vergleich zur Methode der reduzierten Spannungen

stand, die ausbeulenden Teile des Bleches im Querschnitt herausgelöst. Der Querschnittswerteberechnung und den nachfolgenden Spannungsnachweisen wird dann der verbleibende, „wirksame Querschnitt“ zugrunde gelegt, der nunmehr in der Lage ist, die volle Fließspannung aufzunehmen. Bei kaltgeformten Querschnitten sollte bei der Festlegung der Beulfeldbreite b_p die günstige Ausrundung der Ecken berücksichtigt werden, um wirtschaftliche Ergebnisse zu erzielen.

Die Methode der wirksamen Breiten hat im Vergleich zur Methode der reduzierten Spannungen, die bislang im nationalen Regelwerk DIN 18800-3 [17] verwendet wurde, den Vorteil, dass insbesondere bei zusammengesetzten Stahlquerschnitten die real vorhandenen Tragreserven des Querschnitts an den gelagerten Querschnittslängsrändern ausgenutzt werden können, weil nicht mehr das ungünstigste, beulgefährdete Blech und dessen abgeminderte Beultragfähigkeit die Tragfähigkeit des Gesamtquerschnitts – auch im Bereich von Zugspannungen – bestimmen (Bild 10). Die Methode der wirksamen Breiten liefert für übliche Stahlquerschnitte wie I- und Kastenquerschnitte

unter Druck- und Biegebeanspruchung (um die starke Achse) gute und realitätsnahe Ergebnisse.

Die Qualität der Methode der wirksamen Breiten für beulgefährdete Plattenelemente ist abhängig von der Güte der vorgegebenen wirksamen Breiten im Hinblick auf ihre Größe und deren Anordnung über den Querschnitt. Die Vorgaben für die wirksamen Breiten für beidseitig gestützte (vierseitig gelagerte) Platten nach DIN EN 1993-1-5 [9], die Grundlage der DIN EN 1993-1-3 für das lokale Plattenbeulproblem ist, sind durch umfangreiche Forschungsarbeiten bestätigt worden [18, 19].

Die wirksamen Breiten der DIN EN 1993-1-5 [9] für einseitig gestützte (dreiseitig gelagerte) Platten dagegen sind zweifelhaft [19 – 21], wie im Folgenden belegt wird.

Bild 11 zeigt die Verteilung der Normalspannungen einer einseitig gestützten Platte unter konstanter Druckbeanspruchung. Bei einseitig gestützten Platten unter Druck- und/oder Biegebeanspruchung verschiebt sich im ausgebeulten, überkritischen Zustand die Lage der Druckkraftresultierenden N zum gelagerten Längsrand. Es entsteht ein inneres Zusatzmoment der Größe $\Delta M = N \cdot e$. DIN EN 1993-1-5 berücksichtigt dies vereinfacht, in dem die wirksamen Breiten am gelagerten Längsrand der einseitig gestützten Platten angesetzt werden (Bild 12). Die Größe der wirksamen Breiten wird nach DIN EN 1993-1-5 [9] über den Beulabminderungsfaktor ρ nach Gl. (4) bestimmt. Für einseitig gestützte Platten wird mit dieser Beultragfähigkeitskurve eine modifizierte, erhöhte „Winter-Kurve“ eingesetzt, da einseitig gestützte Platten ein größeres überkritisches Tragvermögen aufweisen als beidseitig gestützte Platten, für die die Winter-Kurve in guter Näherung Gültigkeit hat.

Einseitig gestützte Platte:

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\lambda_p^2} \leq 1 \tag{4}$$

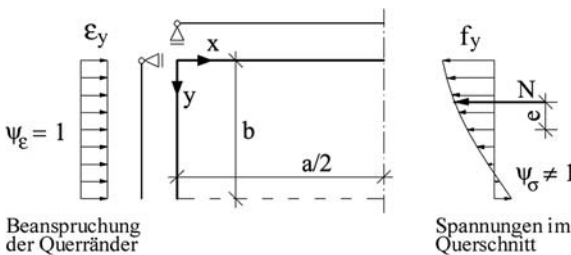


Bild 11. Normalspannungsverteilung einer einseitig gestützten Platte unter konstanter Druckbeanspruchung

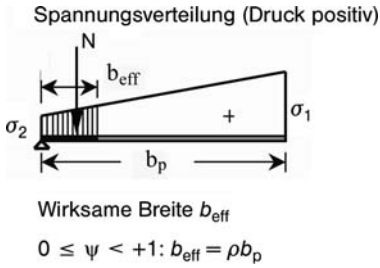


Bild 12. Wirksame Breiten für einseitig gestützte Platten nach DIN EN 1993-1-5 [9]

Die Bilder 13 und 14 vergleichen die inneren Schnittgrößen N und $M = N \cdot e$ im Grenzzustand der Beultragfähigkeit von dünnwandigen, einseitig gestützten Platten unter konstanter Druckbeanspruchung, die sich nach DIN EN 1993-1-5 [9] bzw. DIN EN 1993-1-3

ergeben. Zur Verifizierung werden die Grenztragfähigkeiten der numerischen Berechnungen mit unterschiedlicher Software (NIPL [24], ANSYS [25]), die an experimentellen Untersuchungen [26, 27] kalibriert wurden, ergänzt. Bild 13 verdeutlicht, dass mithilfe der DIN EN 1993-1-5 [9] die aufnehmbare Druckkraft qualitativ in guter Näherung, jedoch mit zu konservativen Werten im Vergleich zu den numerischen Ergebnissen bestimmt wird. Das innere Biegemoment kann dagegen nach DIN EN 1993-1-5 [9], wie in Bild 14 dargestellt, über den gesamten Beulschlankheitsbereich nicht realitätsnah erfasst werden.

Daher wurden Forschungsarbeiten [20, 21] zum Beultragverhalten einseitig gestützter, dünnwandiger Platten durchgeführt, bei denen verbesserte wirksame Breiten für einseitig gestützte Platten erarbeitet wurden. Die Vorschläge aus [21] auf der Grundlage eines in Skandinavien

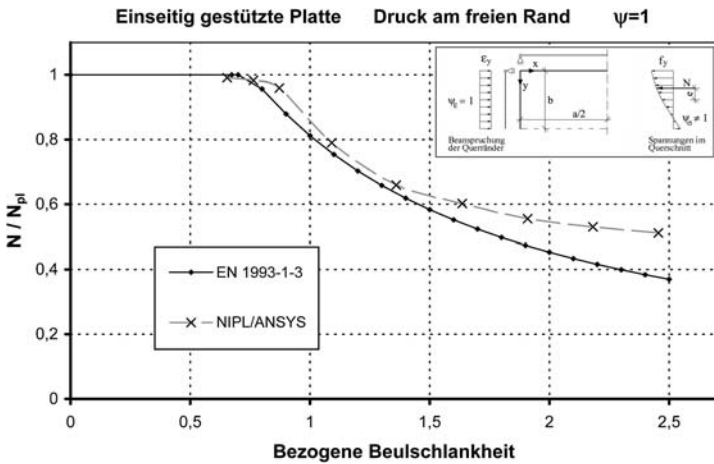


Bild 13. Bezogene innere Normalkraft N/N_{pl} einer einseitig gestützten Platte unter konstanter Druckbeanspruchung im Grenzzustand der Beultragfähigkeit

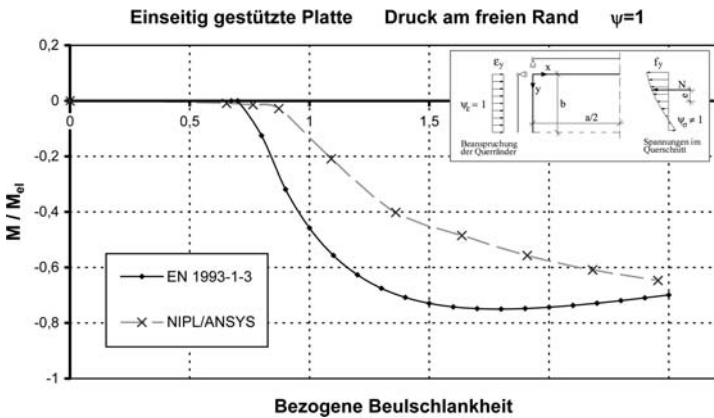
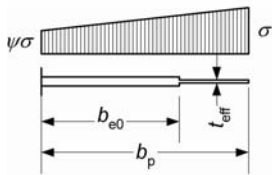


Bild 14. Bezogenes inneres Biegemoment M/M_{el} einer einseitig gestützten Platte unter konstanter Druckbeanspruchung im Grenzzustand der Beultragfähigkeit

Maximale Druckbeanspruchung am freien Längsrand
Spannungsverteilung



Wirksame Breite/Dicke

$$1 \geq \psi \geq 0:$$

$$b_{e0} = 0,42b_p$$

$$t_{eff} = (1,75\rho - 0,75)t$$

Bild 15. Wirksame Breiten/Dicken für einseitig gestützte Platten nach [21] aufgenommen in DIN EN 1993-1-3, Anhang D [7]

etablierten, gemischten Ansatzes für wirksame Breiten/wirksame Dicken wurden in den Anhang D der DIN EN 1993-1-3 aufgenommen (Bild 15). Im originären Ansatz [21] wurde in Übereinstimmung mit den Forschungen in [18] zusätzlich der Beulabminderungsfaktor gemäß Gl. (5) variiert, um die aufnehmbare Normalkraft realitätsnah bestimmen zu können. Gl. (5) wurde jedoch in DIN EN 1993-1-3, Anhang D, nicht aufgenommen; vielmehr wird – in Anlehnung an das Gesamtkonzept der EN 1993 – auf die bekannte, konservative Abminderungskurve für die Beultragfähigkeit einseitig gestützter Plattenelemente nach DIN EN 1993-1-5 [9] (siehe Gl. 4) zurückgegriffen.

Einseitig gestützte Platte nach [21]:

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,22}{\bar{\lambda}_p^2} + 0,05\bar{\lambda}_p \leq 1 \tag{5}$$

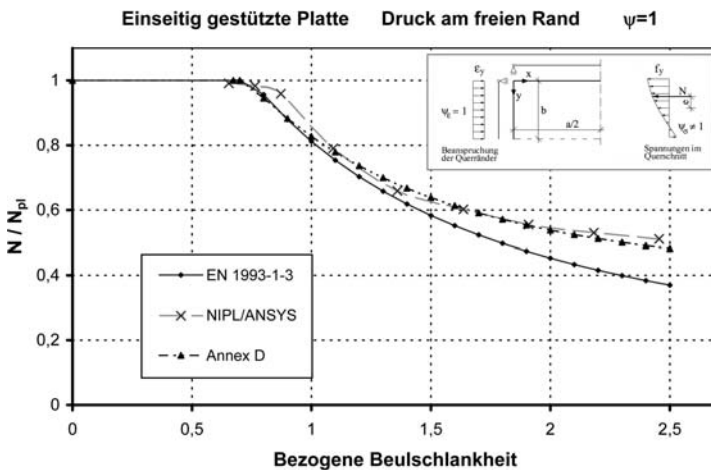


Bild 16. Vergleich der Normalkraft N/N_{pl} einer einseitig gestützten Platte unter konstanter Druckbeanspruchung

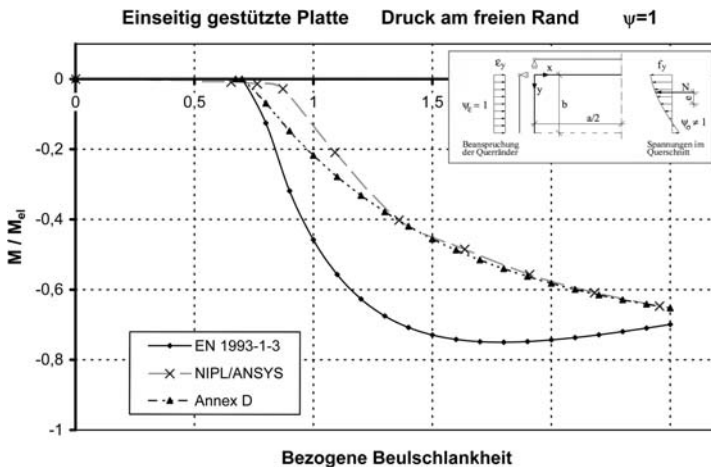


Bild 17. Vergleich des inneren Biegemomentes M/M_{el} einer einseitig gestützten Platte unter konstanter Druckbeanspruchung

Die Güte des Ansatzes aus [21] wird exemplarisch mit einem Vergleich der inneren Schnittgrößen, die sich nach [21], numerischen Berechnungen und DIN EN 1993-1-3 für eine einzelne einseitig gestützte, druckbeanspruchte Platte ergeben, belegt (Bilder 16 und 17). Jüngere Forschungsarbeiten [22, 23, 28] bestätigen ferner den Ansatz [21] der wirksamen Breiten/wirksame Dicken durch einen Vergleich mit experimentellen und numerischen Untersuchungen zur Beultragfähigkeit dünnwandiger U- bzw. C-Profile.

4.1.2 Wirklichkeitsnahe Randbedingungen der Plattenelemente in zusammengesetzten Stahlquerschnitten

Die Lagerungsart der einzelnen Plattenelemente Steg – Gurt – Lippe in einem dünnwandigen, kaltgeformten Stahlprofil hat großen Einfluss auf die Beultragfähigkeit des gesamten Querschnitts. Die Lagerungsart wird bei der Ermittlung der wirksamen Breiten für die aus dem Gesamtquerschnitt herausgelösten Einzelbleche über den Beulwerk k und somit die ideale Beulspannung σ_{cr} erfasst. Bei der Ermittlung des Beulwertes k wird in der Regel, auf der sicheren Seite liegend, von einer gelenkigen Querrandlagerung ausgegangen. Dies entspricht bei baupraktischen Stahlprofilen und Profilblechen in guter Näherung dem realen Tragverhalten. Auch für den Längsrand der einzelnen Bleche wird i. Allg., unabhängig vom Gesamtquerschnitt, die gelenkige Lagerung angenommen. DIN EN 1993-1-5 [9] gibt in den Tabellen zur Ermittlung der wirksamen Breiten daher auch nur Beulwerte für ein- und beidseitig gestützte Plattenelemente mit gelenkiger Längsrandlagerung an. Diese scheinbar stets auf der sicheren Seite liegende Annahme ist jedoch nicht immer wirklichkeitsnah, wie das folgende allgemeine Beispiel zeigt:

Ist ein druck- und biegebeanspruchter Stahlquerschnitt aus unterschiedlich beulgedrungenen und beuschlanken Einzelblechen zusammengesetzt, kann sich eine einzelne dünnwandige Platte des Gesamtquerschnitts nicht frei verformen, sondern spannt sich in die weniger stabilitätsgefährdeten Bleche ein (Bild 18). Der Ansatz der gelenkigen Längsrandlagerung liegt in diesen Fällen insbesondere bei einseitig gestützten Stahlblechen sehr deutlich auf der sicheren Seite. Im Gegensatz dazu erfährt jedoch das beulgedrungenere, stützende Blechelement durch die Teileinspannung der angrenzenden, beuschlanken Platte eine zusätzliche Biegemomentenbeanspruchung entlang seiner Längsränder, sodass die Annahme der gelenkigen Lagerung für das stützende Blech auf der unsicheren Seite liegen kann.

DIN EN 1993-1-3 berücksichtigt nur bei der Ermittlung der Beultragfähigkeit von Randversteifungen kaltgeformter Profile wie Lippen und Bördel die Teileinspannung der Randsteifen in das angrenzende Gurtblech. An dieser einen Stelle werden in DIN EN 1993-1-3 explizit erhöhte Beulwerte für die einseitig gestützten Randelemente zugelassen, die aber im Vergleich zu experimentellen und numerischen Untersuchungen immer noch konservativ sind.

Die Berechnung der idealen Beulspannungen von zusammengesetzten Stahlquerschnitten kann heute einfach und schnell mithilfe von verifizierten Beulwertprogrammen erfolgen. Es stehen dem Anwender inzwischen eine Reihe von frei verfügbaren Software-Tools (z. B. CUFSM [29]) zur Verfügung, die eine zuverlässige Bestimmung des Beulverhaltens nach der linearen Beultheorie erlauben. Die Forschungsarbeiten [18, 21, 23, 24, 28, 30] belegen, dass der Ansatz wirklichkeitsnaher Randbedingungen bei der Beulwertermittlung von dünnwandigen Stahlquerschnitten zu größeren und deutlich realistischeren Beultragfähigkeiten

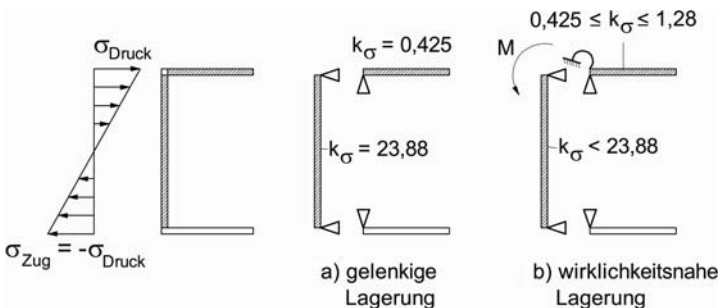


Bild 18. a) Vereinfachte und b) genauere Randlagerung einer einseitig gestützten Platte in einem C-Profil (aus [23])

des Gesamtquerschnitts führt und daher aus Gründen der Wirtschaftlichkeit empfohlen wird. Nähere Informationen zur Anwendung der Beulwertprogramme sind Abschn. 7 zu entnehmen.

4.2 Forminstabilität von Kaltprofilen – Biegeknicken der Rand- oder Zwischensteifen

Bei dünnwandigen, kaltgeformten Stahlquerschnitten mit Rand- oder Zwischensteifen, z. B. lippenverstärkten C-Profilen unter Druckbeanspruchung, unterstützen die Steifen die lokal beulgefährdeten Flansche; die Versteifungen sind jedoch selber – aufgrund ihrer mitunter geringen Biegesteifigkeit – biegeknickgefährdet. Die Steifen können sich in dem Gesamtprofil jedoch nicht frei verformen, sie erhalten vielmehr durch die angrenzenden ebenen Blechelemente sowohl eine Verdreh- als auch eine Verschiebungsbehinderung. Folgerichtig werden die Steifen daher nach DIN EN 1993-1-3 als elastisch gebetteter Stab mit kontinuierlicher Federlagerung der Federsteifigkeit K abgebildet (Bild 19).

Die Federsteifigkeit K von Rand- und Zwischensteifen kann allgemein mithilfe einer statischen Analyse durch Ansatz einer Einheitsstreckenlast u , die im Schwerpunkt der Steife angreift, und der zugehörigen Verformung δ , die sich unter Berücksichtigung der Anbindung an die angrenzenden Blechelemente ergibt, über die bekannte Beziehung gemäß Gl. (6) bestimmt werden.

$$K = u/\delta \tag{6}$$

DIN EN 1993-1-3 enthält für baupraktische Typen von Kaltprofilen wie lippenverstärkte C- und Z-Profile sowie für Kaltprofile mit innenliegende Steifen einfach aufbereitete Bestimmungsgleichungen für die Steifenfedersteifigkeit K , sodass in vielen Fällen auf eine grundlegende statische Querschnitts-Analyse und die Aufbereitung gemäß Gl. (6) verzichtet werden kann.

In Abhängigkeit von der Federsteifigkeit K kann die kritische Beanspruchung der Steife über die Verzweigungslast $\sigma_{cr,s}$ des druckbeanspruchten, elastisch gebetteten Stabes theoretisch hergeleitet werden:

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2\sqrt{KEI_s}}{A_s} \tag{7}$$

Das Nachweisformat für das Biegeknicken der Aussteifungselemente von Kaltprofilen gemäß DIN EN 1993-1-3 folgt zum größten Teil den Vorgaben der DASt-Richtlinie 016 [1]. DIN EN 1993-1-3 führt jedoch die neue Formulierung Gl. (8) für den Biegeknick-Abminderungsfaktor ein, dessen Herkunft und Herleitung den Verfassern nicht bekannt ist. Die neue Abminderungskurve zeichnet sich – abweichend von der der DASt-Ri 016 [1], die die herkömmlichen Knickspannungslinien verwendet – durch eine relativ große Plateaulänge aus, die für die Stabilitätsphänomene Biegeknicken oder Biegedrillknicken eher untypisch ist.

$$\chi_d = \begin{cases} 1,0 & \text{für } \bar{\lambda}_d \leq 0,65 \\ 1,47 - 0,723 \bar{\lambda}_d & \text{für } 0,65 \leq \bar{\lambda}_d \leq 1,38 \\ 0,66/\bar{\lambda}_d & \text{für } \bar{\lambda}_d \geq 1,38 \end{cases} \tag{8}$$

4.3 Ermittlung des wirksamen Querschnitts unter Berücksichtigung des lokalen Beulens und der Forminstabilität

Der wirksame Querschnitt kaltgeformter Bauteile wird nach DIN EN 1993-1-3 unter Berücksichtigung des lokalen Plattenbeulens (mithilfe der Methode der wirksamen Breiten nach Abschn. 4.1) und des Biegeknickens der Steifen (s. Abschn. 4.2) stufenweise bestimmt (Bild 20). In Stufe 1 wird zur Berücksichtigung der Beultragfähigkeit der wirksame Querschnitt des Kaltprofils, getrennt für die Teilflächen Steg, Gurt und Lippe mit Ansatz der vollen Randlagerung an den Querschnittseckpunkten, mithilfe der Methode der wirksamen Breiten ermittelt. Der Einfluss des Biegeknickens der

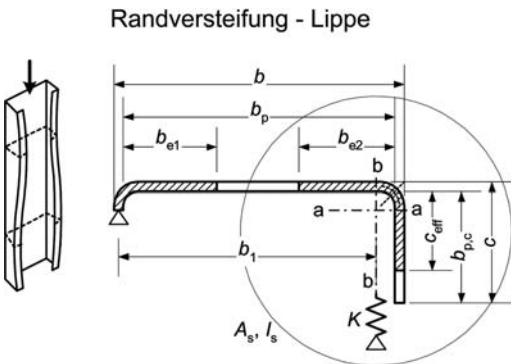


Bild 19. Biegeknicken (Forminstabilität) einer Randsteife am Beispiel eines dünnwandigen, kaltgeformten C-Profils

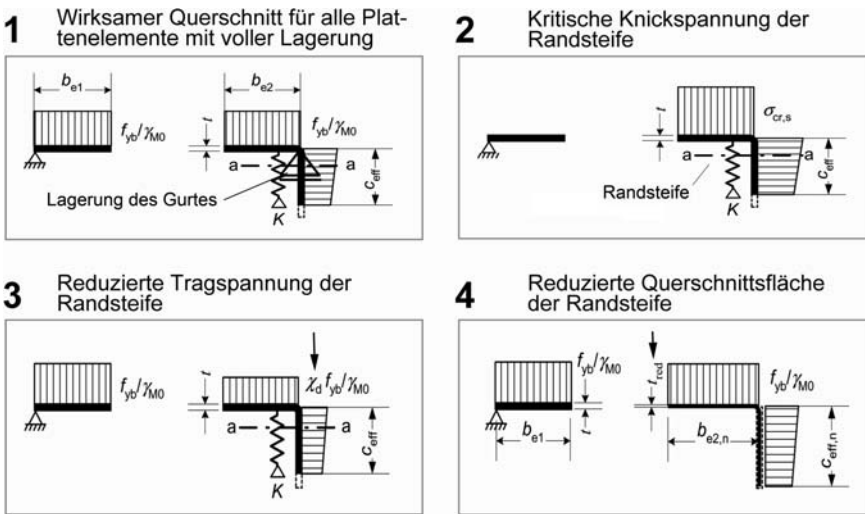


Bild 20. Ablauf zur Berechnung des wirksamen Querschnitts nach DIN EN 1993-1-3 [7]

Steife wird in den Stufen 2 und 3 über die Berechnung der kritischen Knickspannung für die elastisch gebettete Steife (Gl. 7) und der reduzierten Tragspannung der Randsteife gemäß Gl. (8) berücksichtigt. Im Ergebnis erhält man den wirksamen Querschnitt in Stufe 4, bei dem im Bereich der Randsteife die Querschnittsdicke t mithilfe des Abminderungsfaktors für das Biegeknicken der Randsteife nach Gl. (9) reduziert wird. Die Reduktion erfolgt zur Vereinfachung der weiteren Berechnung, da so mit einem wirksamen Querschnitt, der in allen Querschnittspunkten durch die gleiche maximal zulässige Spannung ausgenutzt wird, weiter operiert werden darf.

$$t_{\text{red}} = \chi_d \cdot t \quad (9)$$

Bei der Berechnung der Beultragfähigkeit und der zugehörigen wirksamen Breiten für die dünnwandigen Bleche wurde im Berechnungsschritt 1, auf der sicheren Seite liegend, davon ausgegangen, dass alle Querschnittselemente in der elastischen Berechnung durch die maximal zulässige Grenzspannung, d. h. durch die Fließspannung f_y , ausgenutzt werden. Daher wurde dem Beulschlankheitsgrad bzw. dem Beiwert ε die Streckgrenze f_y als Bezugs- spannung zugrunde gelegt.

Infolge des Ausknickens der Randsteife im Berechnungsschritt 3 (Bild 20) hat sich jedoch die aufnehmbare Grenzspannung für die Blechelemente, die die Randsteife bilden, um den Abminderungsfaktor χ_d im Vergleich zur Fließ-

spannung f_y reduziert. Die Druckbeanspruchung der Bleche nimmt im Bereich der Randsteife ab, somit ist auch die Beulgefährdung für die angrenzenden Blechelemente kleiner. In der Folge erhält man neue, größere wirksame Breiten für die Teilflächen Gurt und Randsteife. Die Berücksichtigung dieses interaktiven Tragverhaltens von lokalem Beulen und Biegeknicken im Bereich der Randsteifen kaltgeformter Bauteile und Bleche kann nach DIN EN 1993-1-3 optional in einer iterativen Berechnung wie folgt berücksichtigt werden:

Der Berechnungsschritt 1 zur Ermittlung der wirksamen Breiten der beulgefährdeten Blechelemente wird für die Teilflächen im Bereich der Randsteife, bestehend aus der Randsteife sowie dem wirksamen Teil des angrenzenden Gurtblechs, wiederholt. Dabei fließt die reduzierte Tragspannung der Randsteife infolge des Biegeknickens der Randsteife in den nunmehr reduzierten Beulschlankheitsgrad nach Gl. (10) ein.

$$\bar{\lambda}_{p,\text{red}} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\chi_d} \quad (10)$$

Anschließend muss auch der Berechnungsschritt 2 wiederholt werden, um den Abminderungsfaktor für das Biegeknicken der Randsteife, die entsprechend den Berechnungsschritten 2 und 3 neu definiert wird, zu korrigieren. Die Iteration kann so lange durchgeführt werden, bis sich keine nennenswerten Änderungen in der Berechnung einstellen, es gilt Gl. (11):

$$\chi_{d,n} \approx \chi_{d,n-1} \quad (11)$$

Das iterative Verfahren, das bereits Bestandteil der DAST-Ri 016 [1] ist und durch Vergleichsrechnungen abgesichert ist, erzeugt wirtschaftliche Ergebnisse, ist aber in der praktischen Anwendung sehr aufwendig. An dieser Stelle eignet sich eine programmtechnische Aufbereitung der normativen Vorgaben.

4.4 Vergleich der Bemessungsansätze nach DIN EN 1993 für dünnwandige, versteifte Querschnittselemente

Sowohl DIN EN 1993-1-3 für dünnwandige, kaltgeformte Bauteile und Bleche als auch DIN EN 1993-1-5 [9] für plattenförmige Bauteile enthalten Regelungen für beulschlanke, versteifte Blechelemente, deren Beultragverhalten grundsätzlich ähnlich ist, die aber in den zitierten Normen unterschiedlich behandelt werden. Während die Regelungen der DIN EN 1993-1-5 [9] für typische Brückenquerschnitte mit großen Blechelementen, die heute in Deutschland zu meist mit trapezförmigen Steifen verstärkt werden, hergeleitet wurden, bezogen sich die Entwicklungen der DIN EN 1993-1-3 auf Stäbe kaltgeformter Stahlprofile, deren dünnwandige Blechelemente in der Regel durch innenliegende Sicken versteift werden. In beiden Fällen werden übereinstimmend – unabhängig von der unterschiedlichen Querschnitts- und Steifenform und unabhängig von den unterschiedlichen Dimensionen der Querschnitte selber – plattenförmige, dünnwandige Blechelemente durch innenliegende Versteifungen verstärkt (Bild 21). Vergleicht man die genannten Regelwerke im Hinblick auf die lokale Beultragfähigkeit für die Blechelemente zwischen den Steifen, stellt man fest, dass diese gemäß DIN EN 1993-1-3 und DIN EN 1993-1-5 [9] gleichermaßen geregelt werden. Beide Normen betrachten die beulschlanke Einzelemente der Breite b im ersten Berechnungsschritt als an den Steifen vollständig gelagert und ermitteln auf dieser Grundlage übereinstimmend die wirksamen Breiten für den Gesamtquerschnitt (Bild 20) gemäß DIN EN 1993-1-5 [9].

Die Berücksichtigung des Versagensphänomens „Ausknicken der Steife“ wird jedoch in DIN EN 1993-1-3 und DIN EN 1993-1-5 unterschiedlich behandelt. Abweichend vom Konzept der DIN EN 1993-1-3 für kaltgeformte Bauteile, das in Abschn. 4.2 und 4.3 erläutert wurde, folgt DIN EN 1993-1-5 [9] dem aus der deutschen Beulnorm DIN 18800-3 [17] bekannten, allgemeinen Konzept, zunächst die Beultragfähigkeit

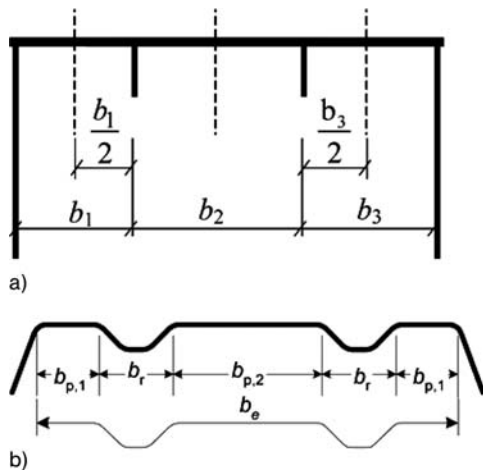


Bild 21. Beulschlanke, versteifte Druckgurte eines Brückenquerschnitts und eines Profilblechs
 a) Druckgurt eines Brückenquerschnitts mit zweifacher Aussteifung
 b) Druckgurt eines Profilblechs mit zweifacher Aussteifung

des versteiften Bleches auf der Grundlage erhöhter Beulwerte k zu bestimmen (DIN EN 1993-1-5 [9], Abschn. 4.5.2), danach das knickstabähnliche Verhalten der versteiften Bleche zu untersuchen (DIN EN 1993-1-5 [9], Abschn. 4.5.3) und abschließend beide Versagensphänomene über eine Interaktionsbedingung (DIN EN 1993-1-5 [9], Abschn. 4.5.4) zusammenzuführen.

Zur Bestimmung der reinen Beultragfähigkeit versteifter Bleche gibt DIN EN 1993-1-5 [9] im Anhang A Hilfen zur Bestimmung der Beulwerte k an: Beulwerte für Blechfelder mit mehr als 3 Steifen, deren Steifen verschmiert werden dürfen, sind entsprechend den Vorgaben von Klöppel/Scheer [31] und Klöppel/Möller [32] zu bestimmen; kritische Beulspannungen für Blechfelder mit einer oder zwei Steifen in der Druckzone sind auf der Basis einer wirksamen, elastisch gebetteten, mittigen Steife – wie in DIN EN 1993-1-3 – zu ermitteln. Im Fall der mittig versteiften Platte können die Bestimmungsgleichungen für die kritische Beulspannung nach DIN EN 1993-1-5 [9], Anhang A, und DIN EN 1993-1-3, Abschn. 5.5.3.3, direkt ineinander überführt werden; die Ansätze sind gleichwertig.

DIN EN 1993-1-3 und DIN EN 1993-1-5 [9] verwenden jedoch im weiteren Berechnungs-

verlauf unterschiedliche Abminderungsfaktoren zur Ermittlung der Grenztragfähigkeit versteifter Platten. Während DIN EN 1993-1-5 [9] auf die bekannte, geringfügig modifizierte „Winter-Kurve“ für beulgefährdete Platten zurückgreift, verwendet DIN EN 1993-1-3 die eigene Gl. (8), die bereits das Biegeknicken der isoliert betrachteten Steife berücksichtigt. Nach DIN EN 1993-1-3 ist bereits an dieser Stelle die Berechnung der Querschnittstragfähigkeit für das Kaltprofil mit innenliegenden Versteifungen beendet.

Nach DIN EN 1993-1-5 [9], Abschn. 4.5.3, muss nachfolgend zunächst das knickstabähnliche Verhalten des versteiften Blechfeldes untersucht werden: Bei einem ausgesteiften Blech darf die kritische Knickspannung der am höchstbelasteten Druckrand liegenden Steife, jedoch *ohne* Anbindung an angrenzende Blechfelder, bestimmt werden. Mithilfe der bekannten europäischen Knickspannungslinien kann der Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung des Biegeknickens der Steife ermittelt werden. Nach DIN EN 1993-1-5 [9], Abschn. 4.5.4, folgt dann erst die Bestimmung des endgültigen Beulabminderungsfaktors für die versteifte Platte über eine Interaktion des Plattenbeulens und des knickstabähnlichen Verhaltens.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass sowohl DIN EN 1993-1-3 als auch DIN EN 1993-1-5 [9] Nachweiskonzepte für Beulfelder mit innenliegenden Versteifungen enthalten, diese aber nicht deckungsgleich sind und zu unterschiedlichen Grenztragfähigkeiten für versteifte Blechelemente führen. Eine Überarbeitung und eine Abstimmung der Konzepte wären wünschenswert, sodass den Anwendern im Rahmen der Europäischen Normengeneration DIN EN 1993 *ein* zweifelsfreies Nachweisverfahren für beuschlanke, versteifte Plattenelemente zur Verfügung steht.

4.5 Querschnittstragfähigkeit

4.5.1 Druckbeanspruchung

Die aufnehmbare Grenznormalkraft eines kaltgeformten, dünnwandigen Profils (Bild 16) unter Druckbeanspruchung wird nach DIN EN 1993-1-3 für den zuvor bestimmten wirksamen Querschnitt, wie in Gl. (12) angegeben, ermittelt.

$$N_{c,Rd} = \begin{cases} A_{\text{eff}} f_{yb} / \gamma_{M0} & \text{für } A_{\text{eff}} < A_g, \text{ sonst} \\ A_g (f_{yb} + (f_{ya} - f_{yb}) \cdot 4 \cdot (1 - \lambda / \lambda_{\text{el}})) / \gamma_{M0} & \leq A_g f_{ya} / \gamma_{M0} \end{cases} \quad (12)$$

Die erhöhte Streckgrenze für das kaltverformte Material darf im Zusammenhang mit dem wirksamen Querschnitt nicht in Ansatz gebracht werden. Sollte der Querschnitt dagegen nicht lokal stabilitätsgefährdet und voll wirksam sein, darf in Abhängigkeit der Beuschlankeit die erhöhte Streckgrenze nach Gl. (12) rechnerisch ausgenutzt werden.

Wie in Bild 22 dargestellt, kann sich beim wirksamen Querschnitt der Schwerpunkt im Vergleich zum Bruttoquerschnitt verschieben, sodass am wirksamen Querschnitt die Druckkraft nunmehr außermittig angreift und ein zusätzliches Biegemoment entsteht. Dieses Phänomen tritt bei allen druckbeanspruchten, nicht doppelt-symmetrischen Stahlprofilen auf. Nach DIN EN 1993-1-3 muss daher – in Übereinstimmung mit den Regelungen der DIN EN 1993-1-1 [8] für Klasse 4-Querschnitte und DIN EN 1993-1-5 [9] für plattenförmige Bauteile – neben der Grenzdruckkraft nach Gl. (12) auch stets die Schwerpunktverschiebung e rechnerisch bestimmt werden. Die Schwerpunktverschiebung ist im Interaktionsnachweis für wirksame Querschnitte unter Druck- und Biegebeanspruchung (s. Abschn. 4.5.3) zu berücksichtigen.

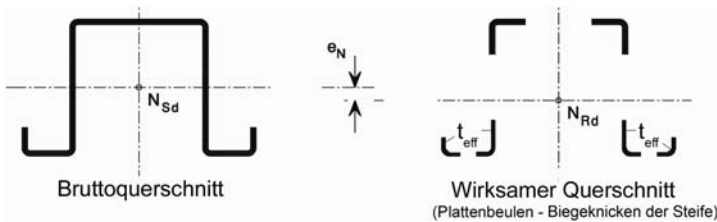


Bild 22. Beispiel eines kaltgeformten, dünnwandigen Hutprofils unter Druckbeanspruchung

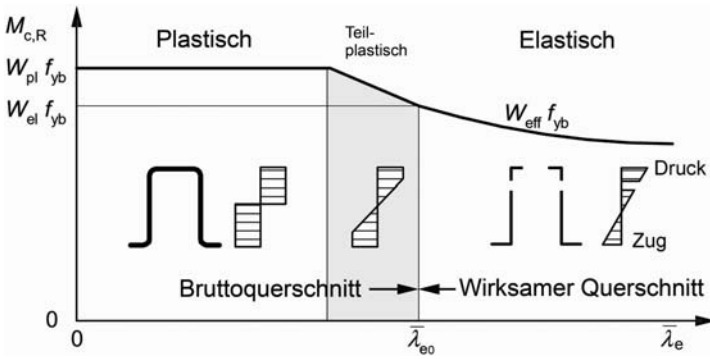


Bild 23. Aufnehmbares Grenzbiegemoment eines kaltgeformten Profils in Abhängigkeit der Beulschlankeit

4.5.2 Biegebeanspruchung

Das aufnehmbare Grenzbiegemoment eines kaltgeformten, dünnwandigen Profils unter Biegebeanspruchung wird nach DIN EN 1993-1-3, Abschn. 6.1.4, mithilfe des zuvor bestimmten

$$M_{c,Rd} = \begin{cases} W_{eff} f_{yb} / \gamma_{M0} & \text{für } W_{eff} < W_{el}, \text{ sonst} \\ f_{yb} (W_{el} + (W_{pl} - W_{el}) \cdot 4 \cdot (1 - \bar{\lambda}_{c,max} / \bar{\lambda}_{el}, 0)) / \gamma_{M0} & \leq W_{pl} f_{yb} / \gamma_{M0} \end{cases} \quad (13)$$

DIN EN 1993-1-3 lässt bei biegebeanspruchten Querschnitten die Ausnutzung (teil)plastischer Reserven zu, wenn der Querschnitt nicht lokal stabilitätsgefährdet und voll wirksam ist oder wenn in der Zugzone plastische Reserven ausgenutzt werden können, ohne dass die Spannungen in der Druckzone die maximal zulässigen Grenzspannungen erreicht haben (Bild 23). In Abhängigkeit der Beulschlankeit des ungünstigsten, beuschlanken Plattenelements kann das elastische Grenzbiegemoment auf das vollplastische Biegemoment angehoben werden. Die Möglichkeit der *teil*plastischen Ausnutzung des Querschnitts nach DIN EN 1993-1-3 ist in DIN EN 1993-1-1 [8], die eine strenge Einteilung in Querschnittsklassen vornimmt, und in DIN EN 1993-1-5 [9] nicht enthalten und gilt daher nur für kaltgeformte Querschnitte im Sinne der DIN EN 1993-1-3.

4.5.3 Kombinierte Druck- und Biegebeanspruchung

Der Interaktionsnachweis Gl. (14) für kaltgeformte, dünnwandige Profile unter Druck- und Biegebeanspruchung nach DIN EN 1993-1-3 erfolgt – wie auch in der Grundnorm DIN EN 1993-1-1 [8] und der DIN EN 1993-1-5 [9] –

wirksamen Querschnitts, wie in Gl. (13) angegeben, ermittelt. Die erhöhte Streckgrenze für das kaltverformte Material darf nicht in Ansatz gebracht werden.

mithilfe von zwei unterschiedlichen wirksamen Querschnitten: Die äußere Druckkraft N_{Ed} ist auf den zugehörigen wirksamen Querschnitt für reine Druckbeanspruchung gemäß Abschn. 4.5.1 zu beziehen, das äußere Biegemoment $M_{z,Ed}$ ist auf den wirksamen Querschnitt für reine Biegebeanspruchung nach Abschn. 4.5.2 anzusetzen.

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{cz,Rd,com}} \leq 1 \quad (14)$$

mit

- N_{Ed} äußere Druckkraft
- $M_{z,Ed}$ äußeres Biegemoment
- $N_{c,Rd}$ Grenzdrukraft für den wirksamen Querschnitt unter reiner Druckbeanspruchung
- $M_{cz,Rd,com}$ Grenzbiegemoment für den wirksamen Querschnitt unter reiner Biegung \perp z-z-Achse

Zusätzlich zu dem planmäßigen, äußeren Biegemoment $M_{z,Ed}$ ist das Zusatzmoment $\Delta M_{z,Ed}$ nach Gl. (15) zu berücksichtigen, das sich aus der Schwerpunktverschiebung des druckbeanspruchten wirksamen Querschnitts im Vergleich zum Vollquerschnitt ergibt (Bild 22).

$$\Delta M_{z,Ed} = N_{Ed} \cdot e_{Nz} \quad (15)$$

4.5.4 Schubbeanspruchung

Das Vorgehen der europäischen Normung beim Nachweis von dünnwandigen Stahlquerschnitten unter Schubbeanspruchung unterscheidet sich grundlegend von dem Verfahren für druck- und biegebeanspruchte Querschnitte, bei denen ausschließlich die Methode der wirksamen Breiten verwendet wird. Die Schubbeanspruchbarkeit dünnwandiger Querschnitte wird in DIN EN 1993-1-3 wie auch in DIN EN 1993-1-5 [9] mit der „alten“ Methode der reduzierten Spannungen bestimmt, bei der die aufnehmbare Schubbeulfestigkeit f_{bv} in Abhängigkeit des Beulschlankheitsgrades bestimmt und konstant über den Querschnitt wirkend angenommen wird. Die Werte der Schubbeanspruchbarkeit für Kaltprofile gemäß DIN EN 1993-1-3 werden für den Fall des am Auflager ausgesteiften oder nicht ausgesteiften Steges angegeben. Im Fall des ausgesteiften Steges verwendet DIN EN 1993-1-3 die Werte der Schubbeanspruchbarkeit gemäß DIN EN 1993-1-5 [9] für verformbare Auflagersteifen, für die nicht ausgesteiften Auflagerstege wird eine im Bereich höherer Beulschlankheiten konservative Schubbeulkurve eingeführt. Im Ergebnis erhält man die Querkrafttragfähigkeit für das Kaltprofil in Abhängigkeit der Grenzs Schubspannung f_{bv} bezogen auf die Höhe h_w und die Dicke des Steges t entsprechend der Gl. (16).

$$V_{b,Rd} = \frac{\frac{h_w}{\sin \phi} t f_{bv}}{\gamma_{M0}} \quad (16)$$

4.5.5 Kombinierte Druck-, Biege- und Schubbeanspruchung

Die Interaktionsbedingung (siehe Gl. 17) für kaltgeformte, dünnwandige Querschnitte unter kombinierter Druck-, Biege- und Schubbeanspruchung gemäß DIN EN 1993-1-3 ist eine Erweiterung der Interaktionsbedingung für Druck- und Biegebeanspruchung nach Abschn. 4.5.3, der der wirksame Querschnitt zugrunde liegt. Der Nachweis der Interaktion kann bei geringer Schubbeanspruchung $V_{ed} \leq 0,5 V_{w,Rd}$ entfallen.

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{cz,Rd,com}} + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) \left(\frac{2V_{Ed}}{V_{w,Rd}} - 1\right)^2 \leq 1 \quad (17)$$

Das Nachweisformat der Interaktion wurde DIN EN 1993-1-5 [9] entnommen. Weitergehende Informationen können [12] entnommen werden.

5 Stabtragfähigkeit dünnwandiger kaltgeformter Bauteile

Der Nachweis der Stabtragfähigkeit für die Gesamtstabilitätsprobleme „Beul-Biegeknicken“ und „Beul-Biegedrillknicken“ erfolgt nach DIN EN 1993-1-3 in zwei Stufen und methodisch gleich. In Stufe 1 wird zunächst die reine Querschnittstragfähigkeit unter Berücksichtigung der lokalen Stabilitätsprobleme „Plattenbeulen“ und „Biegeknicken der Aussteifungen“ behandelt und ein wirksamer Querschnitt, wie in Abschn. 4 dargestellt, bestimmt. In Stufe 2 wird nachfolgend das jeweilige Gesamtstabilitätsproblem erfasst, indem auf der Grundlage der wirksamen Querschnitte die Stabschlankheit für das „Biege(drill)knicken“ und nachfolgend mithilfe der etablierten europäischen Knickspannungslinien die Beanspruchbarkeit des Stabes für das Gesamtstabilitätsproblem ermittelt wird.

5.1 Beul-Biegeknicken eines Stabes unter Druckbeanspruchung

DIN EN 1993-1-3 orientiert sich beim Nachweis des Gesamtstabilitätsproblems „Beul-Biegeknicken“ (Bild 24) von kaltgeformten Stäben mit dünnwandigem Querschnitt an den Vorgaben der DIN EN 1993-1-1 [8], nur die Zuordnung der Knickspannungslinien erfolgt speziell für kaltgeformte Querschnitte in Tabelle 6.3 der DIN EN 1993-1-3. Das Nachweisformat

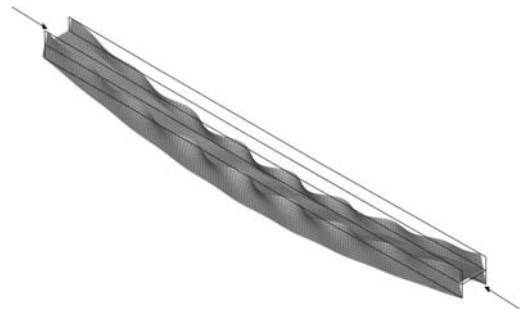
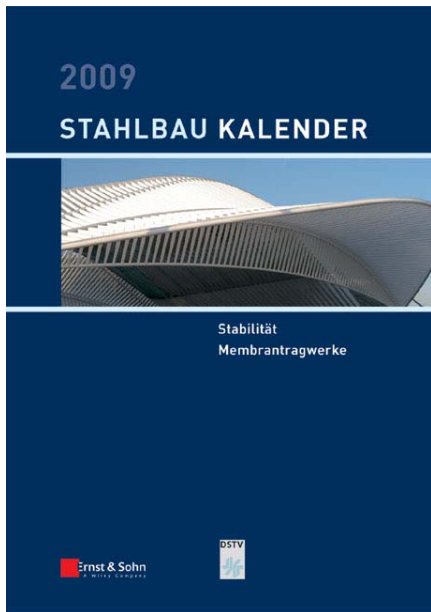


Bild 24. Beul-Biegeknicken eines dünnwandigen I-Querschnitts unter Druckbeanspruchung (Versagensform nach einer numerischen Analyse mit ANSYS 11.x [25])



Kuhlmann, U. (Hrsg.)

Stahlbau-Kalender 2009

Schwerpunkt: Stabilität

Im Stahlbau hat die Stabilitätslehre wegen der Gefährdung, die bei druckbeanspruchten schlanken Konstruktionen infolge Instabilität auftreten kann, zentrale Bedeutung. Die erreichbare Traglast wird nicht durch die Materialfestigkeit bestimmt, sondern durch den Grad der Abweichung vom geometrisch idealen Zustand. Dies trifft ebenso auf schlanke Stabtragglieder wie auch auf dünnwandige Flächenelemente - Schalen und Platten - zu.

Die Berechnung für diese Beanspruchungen wird mit ihrem theoretischen Hintergrund ausführlich dargestellt. Darüber hinaus werden praktische Anwendungen, wie Silos, Dach- und Wandflächen aus Trapezprofilen, Hochregallager und Arbeitsgerüste behandelt.

(XIII, 1024 Seiten, 817 Abb., 149 Tab.. Gebunden. Erschienen)

Aus dem Inhalt:

- Stahlbaunormen - Kommentierte Stahlbauregelwerke (Sascha Hothan)
- Schlanke Stabtragwerke (Joachim Lindner, Stefan Heyde)
- Bemessung und Konstruktion von aus Blechen zusammengesetzten Bauteilen nach DIN EN 1993-1-5 (Ulrike Kuhlmann, Benjamin Braun)
- Kaltgeformte, dünnwandige Bauteile und Bleche aus Stahl nach DIN EN 1993-1-3 - Hintergründe, Bemessung und Beispiele (Bettina Brune, Jens Kalameya)
- Stabilität stählerner Schalentragwerke (Herbert Schmidt)
- Einwirkungen auf Silos aus Metallwerkstoffen (Cornelius Ruckenbrod, Martin Kaldenhoff)
- Membrantragwerke (Knut Göppert, Markus Balz)
- Stahlprofiltafeln für Dächer und Wände (Knut Schwarze, Oliver Raabe)
- Gerüstbau - Stabilität und statisch-konstruktive Aspekte (Robert Hertle)
- Dynamisches Verhalten von Lamellen-Dehnfugen (Joachim Braun, Johan Sebastian Leendertz, Bernard Volk, Bernd Urich, Tobias Schulze)
- Stahlpreise, Stand: 01.01.2009 (Karl Heinz Gützer, Peter Hammacher)

Link Online-Bestellung **per Fax bestellen +49(0)30 47031 240**

Anzahl	Bestell-Nr.	Titel	Einzelpreis
	978-3-433-02909-1	Stahlbau-Kalender 2009	<input type="checkbox"/> € 135,- / sFr 213,- (Einmalbezugspreis) <input type="checkbox"/> € 115,- / sFr 182,- (Liefen Sie den Stahlbau-Kalender jährlich nach Erscheinen zum Fortsetzungsbezugpreis**)
	904852	Gesamtverzeichnis Verlag Ernst & Sohn	kostenlos
	2092	1 Probeheft Zeitschrift STAHLBAU	kostenlos

Liefer- und Rechnungsanschrift: privat geschäftlich Bestell-Code: 100 773

Firma			
Ansprechpartner		Telefon	
UST-ID Nr./VAT-ID No.		Fax	
Straße//Nr.		E-Mail	
Land	-	PLZ	Ort

Wilhelm Ernst & Sohn
 Verlag für Architektur und
 technische Wissenschaften GmbH & Co. KG
 Rotherstraße 21
 10245 Berlin
 Deutschland
 www.ernst-und-sohn.de



Datum/Unterschrift

**Fortsetzungsbezug: Sie sparen € 20,- / sFr 31,-. Beim Fortsetzungsbezug erhalten Sie die jährliche Ausgabe direkt nach Erscheinen (April) zum günstigeren Fortsetzungspreis zugesandt. Die automatische Belieferung können Sie jederzeit jährlich bis zum 30. Januar für die folgende Ausgabe stoppen.

*€-Preise gelten ausschließlich in Deutschland. Alle Preise enthalten die gesetzliche Mehrwertsteuer. Die Lieferung erfolgt zuzüglich Versandkosten. Es gelten die Lieferungs- und Zahlungsbedingungen des Verlages. Irrtum und Änderungen vorbehalten. Stand: März 2008 (homepage_Leseprobe)