

Dr.-Ing. Joachim Kretz

# Stabilitätsnachweise von Bauteilen und Teilsystemen

## Berechnungsmethoden und numerische Analysen nach DIN EN 1993-1-1 und DIN EN 1993-1-3

Stahltragwerke des üblichen Hochbaus wie Hallen oder Überdachungen bestehen in der Regel aus schlanken Bauteilen, die zur Abtragung planmäßiger Horizontallasten und zur Stabilisierung ausgesteift werden. Üblicherweise werden zur Stabilisierung angrenzende Bauteile herangezogen, die häufig ohnehin für die planmäßige Lastabtragung vorhanden sind. DIN EN 1993-1-1, DIN EN 1993-1-3 sowie DIN 18800-2 sehen die Möglichkeit vor, einen Stab bzw. einen Stabzug aus dem Gesamtsystem herauszulösen und an diesem Ersatzsystem die räumliche Stabilitätsuntersuchung durchzuführen. Das aus dem Gesamtsystem herausgelöste Teilsystem ist dabei an dem verbleibenden Restsystem elastisch gelagert. Diese Lagerungsbedingungen müssen hinreichend genau berücksichtigt werden.



Während die Veröffentlichung in der mb-news 1/2013 „Baupraktische Behandlung von Stabilitätsproblemen in räumlichen Stabtragwerken“ die Grundlagen der Berechnungsverfahren für Stabilitätsnachweise in räumlichen Stabtragwerken zum Inhalt hatte, werden in diesem Artikel Berechnungs- und Analysemöglichkeiten von stabilitätsge-

fährdeten Bauteilen eines üblichen Stahlhochbaus vorgestellt. Als Bauteile werden kaltgeformte Z-Pfetten und zweifeldrige Rahmensysteme mit gevouteten Rahmenriegeln auf Stabilität untersucht. In beiden Fällen wird eine realitätsnahe Erfassung der Stabilitäterscheinungen mit Analysen auf Basis der Finite-Elemente-Methode (FEM) vorgestellt.

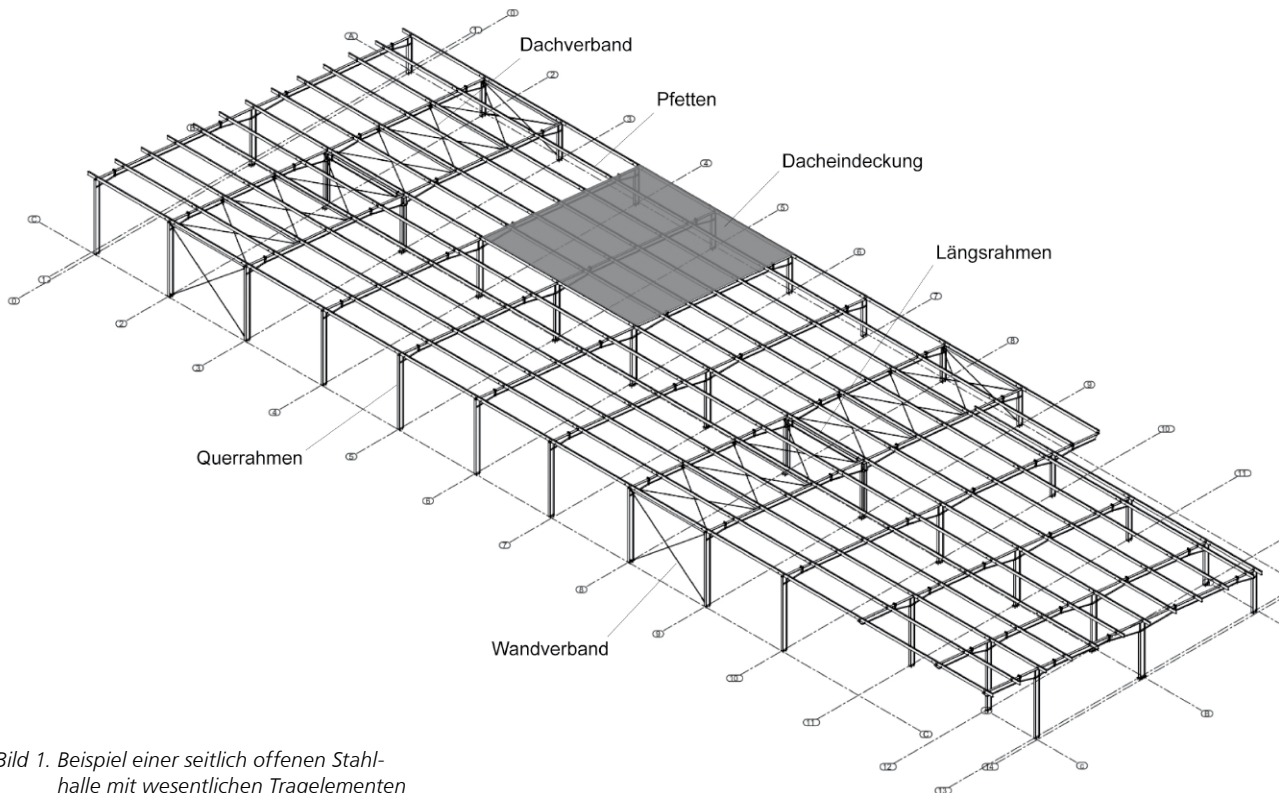


Bild 1. Beispiel einer seitlich offenen Stahlhalle mit wesentlichen Tragelementen

Einführend werden die wesentlichen Tragelemente einer üblichen Hallenkonstruktion und deren Beanspruchung beschrieben. Daran schließen sich Angaben zur möglichen Stabilisierung der Bauteile durch Abstützung, Verhinderung der Verdrehung oder durch konstruktive Details an. Diese Stabilisierungseffekte sind von entscheidender Bedeutung für die genaue Erfassung der Stabilitätseigenschaften der Teilsysteme sowie der Gesamtkonstruktion.

## 1 Wesentliche Tragelemente einer Halle / Überdachung und deren Beanspruchung

Bei einem definierten Lastabtrag ist es bei Stahlkonstruktionen wie Stahlhallen üblich, das Gesamtsystem in Teilsysteme zu zerlegen, die Schnittgrößen mit den maßgebenden Einwirkungskombinationen zu ermitteln und damit die Bauteile nachzuweisen. Die Nachweisführung findet in der Reihenfolge statt, in der die einzelnen Teilsysteme anteilige Lasten an die weiterführende Konstruktion übertragen.

Die grundlegenden Tragelemente sind:

- Dacheindeckung (Tragschale einschl. Befestigung)
- Wandverkleidung (Tragschale einschl. Befestigung)
- Wandriegel
- Pfetten (Normalpfette, Verbandspfette, First- und Traufpfette)
- Rahmen (Querrahmen ggf. Längsrahmen)
- Verbände (Dach- und Wandverbände)
- Giebelwand (Giebelwandstützen, Verband)
- Wechselträger
- Gründung

Je nach Ausführung der Stahlkonstruktion müssen nicht alle Tragelemente vorhanden sein. Nähere Angaben zu den Tragelementen und deren Beanspruchung werden im Rahmen dieses Artikels nur insoweit angegeben, wie sie für die Thematik „Aussteifung und Stabilisierung“ von Belang sind.

**Dacheindeckung:** Die Regelausführung für den Stahlhallenbau sind Dächer mit Stahltrapezprofilen oder Sandwichelementen als tragende Bauteile. Diese Tragelemente leiten einerseits die vertikalen Lasten auf Pfetten bzw. Binder weiter und sind andererseits auch zur Aufnahme und Weiterleitung von Horizontallasten in ihrer Fläche geeignet. Diese Eigenschaft wird als Schubfeldwirkung bezeichnet. Damit die Schubfeldwirkung aktiviert werden kann, müssen die Befestigungsmittel an den Längsrändern und in jeder Profilrippe an den Querrändern angeordnet sein. Die Größe der anzusetzenden Schubsteifigkeit hängt dabei von der konstruktiven Ausführung ab. Nähere Angaben dazu enthält das Kapitel 2 „Schubsteifigkeit“.

**Wandverkleidung:** Die Wandverkleidung dient statisch zur Abtragung der Lasten (Windlasten) auf die Wandriegel bzw. Stützen. Auch hier kann eine stabilisierende Wirkung für die Unterkonstruktion ausgebildet werden.

**Pfetten:** Statisch werden Pfetten als Einfeld- oder Durchlaufträgersysteme ausgebildet. Sie übertragen die Lasten auf die unterstützende Konstruktion. Über die Verbindung mit der tragenden Unterkonstruktion, die in der Regel aus den Rahmenriegeln besteht, können diese seitlich gehalten und damit stabilisiert werden.

Neben I-Profilen der Reihen IPE und HEA werden insbesondere dünnwandige kaltgefertigte Profilquerschnitte des Stahlleichtbaus als Pfettenquerschnitte verwendet. Infolge der Dachneigung werden Pfetten in beiden Hauptachsenrichtungen beansprucht. Entsprechend sind die Biegedrillknicknachweise für zweiachsige Biegung zu führen, wobei die stabilisierende Wirkung der aufliegenden Trapezbleche berücksichtigt werden kann.



Bild 2. Montagezustand  
a) Z-Pfetten  
b) Rahmenkonstruktion

**Rahmen:** Über die Ausbildung biegesteifer Verbindungen in den Rahmenecken können die Rahmentragwerke Horizontallasten übertragen. Rahmen werden überwiegend in der Rahmenebene beansprucht und in den Berechnungen meist als ebene Bauteile behandelt. Zusätzliche Zug- bzw. Druckkräfte erhalten die Rahmen in den Verbandsfeldern. Diese Beanspruchungen müssen mit den Rahmenbeanspruchungen in den zugehörigen Lastkombinationen überlagert werden. Darüber hinaus sind für Rahmensysteme auch die Tragfähigkeit und die Stabilität senkrecht zur Rahmenebene, d. h. die räumliche Stabilität nachzuweisen. Nähere Angaben dazu enthält das Kapitel 6 „Stabilitätsnachweis der Rahmen“.

**Verbände:** Horizontale Dach- und vertikale Wandverbände sind erforderlich, um wirkende äußere Kräfte (Windkräfte: Sog- und Staudruckkräfte, Windreibungskräfte sowie Erdbebenkräfte) und Stabilisierungslasten in den Baugrund abzuleiten. Die Wahl der Anordnung von Verbänden sollte so erfolgen, dass die Durchleitung von Normalkräften möglichst vermieden wird. Die über die gesamte Hallenlänge angreifenden Windreibungs- und Stabilisierungslasten müssen zu den Verbandsfeldern über Pfetten oder andere für die Lastweiterleitung vorgesehene Konstruktionen wie Druck- bzw. Zugrohre durchgeleitet werden. Damit die durchzuleitenden Kräfte nicht zu groß werden, werden bei längeren Hallen zusätzliche Verbandsfelder angeordnet; in der Regel alle 25 bis 35 m.

Im Stahlhallenbau sind die Gurte der Dachverbände üblicherweise die Obergurte der Rahmenriegel. Als Verbandspfosten werden entweder die vorhandenen Pfetten genutzt oder es werden separate Druckrohre angeordnet. Bei der Verwendung der Pfetten als Pfosten ist der Nachweis der größte-

ren Druckkraftdurchleitung zu beachten, insbesondere wenn es sich um dünnwandige kaltgefertigte Pfetten handelt. Zu beachten ist ebenfalls die Anordnung d. h. die Höhenlage der Pfosten in Bezug auf das lastabnehmende Bauteil (Exzentrizität).

Bei Stahlhallen erfolgt die überwiegende Ausführung der Verbände mit druckweichen gekreuzten Verbandsdiagonalen, bestehend aus entweder Winkel-, Flach- oder Rundstählen, bei denen die Stäbe unter der Annahme eines Ausweichens unter Druckbeanspruchung nur mit ihrer Zugtragfähigkeit angesetzt werden. Die Verbandsdiagonalen besitzen meist nachspannbare Befestigungselemente in Form von Spannschlössern oder -gewinden. Vorteilhaft ist diese Ausführung auch während der Montage zur Ausrichtung des Stahltragwerkes.



Bild 3. Dachverband (Ausschnitt: Pfosten als Druckrohr, Kreuzverband aus Rundstählen mit Spannschloss)

## 2 Aussteifung und Stabilisierung

Stabilisierende Bauteile haben einen signifikanten Einfluss auf die räumliche Stabilität und damit auf die Dimensionierung der Profile. Sind abstützende Bauteile vorhanden (Verbände, Trapezprofile, Pfetten, ...), können diese Lagerungsbedingungen in den Nachweisen berücksichtigt werden.

### 2.1 Abstützung durch angrenzende Bauteile

#### Horizontale Halterung am Obergurt durch angrenzende Bauteile

Durch eine angrenzende Konstruktion kann in vielen baupraktischen Fällen eine seitliche Verschiebung wirkungsvoll verhindert oder stark reduziert werden. Dies kann beispielsweise durch Trapezbleche erfolgen, wenn eine ausreichend große Schubsteifigkeit vorhanden ist.

Von Interesse ist diejenige Schubsteifigkeit, bei der die Anschlussebene der auszusteienden Bauteile als unverschieblich angesehen werden kann. Diese Schubsteifigkeit führt

zu einer gebundenen Drehachse. Eine kontinuierliche seitliche Stützung ist nach DIN EN 1993-1-3, Abschnitt 10 (10.1a) gegeben, wenn die vorhandene Schubsteifigkeit  $S$  der folgenden Bedingung genügt:

$$S \geq \left( EI_w \frac{\pi^2}{L^2} + GI_t + EI_z \frac{\pi^2}{L^2} 0,25h^2 \right) \frac{70}{h^2} \quad (10.1a)$$

mit

$S$  die Schubsteifigkeit, die durch die Befestigung des Trapezbleches an jeder Blechrippe mit der Pfette ermöglicht wird. Ist das Blech nur an jeder zweiten Rippe mit der Pfette verbunden, so ist  $S$  durch  $0,2 S$  zu ersetzen.

$I_w$  Wölbwiderstand der Pfette

$I_t$  St. Venant'sches Torsionsträgheitsmoment der Pfette

$I_z$  Flächenmoment des Pfettenquerschnitts um die schwache Hauptachse

$L$  Stützweite der Pfette

$h$  Höhe des Pfettenquerschnitts

Bei Ansatz der nach Gleichung (10.1a) ermittelten Schubfeldsteifigkeit  $S$  ist sicherzustellen, dass die in den Berechnungen getroffenen Annahmen mit der konstruktiven Ausführung übereinstimmen. Eine Annahme bzw. Voraussetzung besteht darin, dass ein Schubfeld auszuführen ist. Um dies zu realisieren, müssen die Trapezbleche rundum an allen Rand-

trägern befestigt werden. Die resultierenden Schubkräfte müssen über die Verbindungsmittel aufgenommen werden. Darüber hinaus sind die Verbindungsmittel in jeder Sicke anzuordnen. Ist die Ausbildung einer vierseitigen Befestigung des Trapezprofils nicht möglich, kann kein Schubfeld ausgebildet werden. In diesem Fall wirken die Profilbleche lediglich wie eine horizontale Feder.

#### Drehbettung am Obergurt durch angrenzende Bauteile

Durch angrenzende Bauteile wird oft auch die freie Verdrehung der biegedrillknickgefährdeten Bauteile behindert. Die Befestigung eines Trapezbleches an dem Obergurt des Pfettenquerschnitts mittels Verbindungsmittel erzeugt eine Drehbehinderung der Pfette und damit eine weitere Stabilisierung. Die resultierende Steifigkeit  $C_D$  der Drehfeder ergibt sich nach DIN EN 1993-1-3 (10.14) zu:

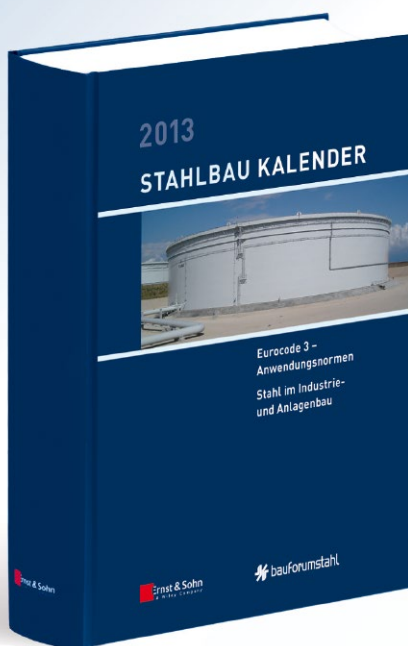
$$C_D = \frac{1}{\left( \frac{1}{C_{D,A}} + \frac{1}{C_{D,C}} \right)} \quad (10.14)$$

mit

$C_{D,A}$  Steifigkeit der Drehbettung der Verbindung zwischen Profilblech und Pfette

$C_{D,C}$  Steifigkeit der Drehbettung entsprechend der Biegesteifigkeit des Profilbleches

Die genaue Ermittlung der Drehfedersteifigkeiten  $C_{D,A}$  und  $C_{D,C}$  ist in Kapitel 10.1 der DIN EN 1993-1-3 beschrieben.



## Stahlbau-Kalender 2013

### Eurocode 3 – Anwendungsnormen, Stahl im Industrie- und Anlagenbau

Der Stahlbau-Kalender ist ein Wegweiser für die richtige Berechnung und Konstruktion im gesamten Stahlbau, er dokumentiert und kommentiert verlässlich den aktuellen Stand der Stahlbau-Regelwerke. Zur bauaufsichtlichen Einführung von Eurocode 3 werden seit der Ausgabe 2011 systematisch alle Teile der Norm mit ihren Nationalen Anhängen kommentiert. In diesem Jahr sind neben der Aktualisierung zum Teil 1-8 „Bemessung von Anschlüssen“ auch praxisnahe Anwendungshinweise für die Nachweisformate und optimalen Bemessungsabläufe zum Teil 1-1 „Allgemeine Bemessungsregeln“ enthalten. Weitere ausführliche Kommentare aus erster Hand werden zu den Teilen 1-3 „Kaltgeformte Bauteile und Bleche“, 2 „Stahlbrücken“ und 5 „Pfähle und Spundwände“ verfasst.

HRSG.: ULRIKE KUHLMANN  
**Stahlbau-Kalender 2013**

2013.

ca. 800 S. ca. 600 Abb.

ca. 50 Tab. Gb.

ca. € 139,-\*

Fortsetzungspreis: ca. € 119,-\*

ISBN 978-3-433-02988-6

Erscheint April 2013

Der Industrie- und Anlagenbau ist ohne den modernen Stahlbau undenkbar. Beiträge über Stahlschornsteine, Maste, Tankbauwerke, Silos und Industrieanlagen stellen aktuelle Entwicklungen vor und berücksichtigen die neuen europäischen Normen für Einwirkungen und Tragwerksbemessung.

Für die baustatische Nachweise und die räumliche Stabilität können bei Pfetten mit einer Profilblechabstützung sowohl seitliche Halterungen als auch eine Drehbettung angesetzt werden. Bild 4 zeigt den Ansatz der Lagerungsbedingungen.

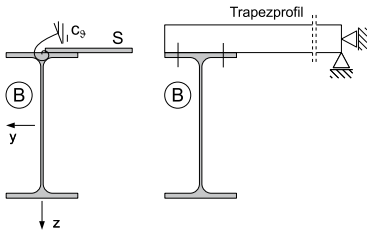


Bild 4. Träger B: kontinuierliche seitliche Abstützung durch Trapezprofilschubfeld. Drehbettung durch Trapezblech

**Weitere idealisierte Lagerungsbedingungen für stahlbauübliche Ausführungen**

Die nachfolgenden idealisierten Lagerungsbedingungen sollen lediglich auszugsweise die Möglichkeiten der Berücksichtigung von gegenseitigen Lagerungen bei der Berechnung von Schnittgrößen oder Verzweigungslasten zeigen.

Beispiele (Auszug) für idealisierte Lagerungsbedingungen:

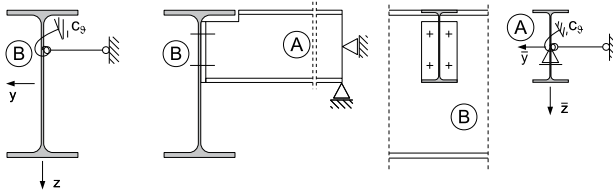


Bild 5. Ausklüpfung: Träger A: Drehfeder wegen Ausklüpfung; Träger B: seitliche Abstützung des Steges durch Träger A und Drehfeder nach [19]

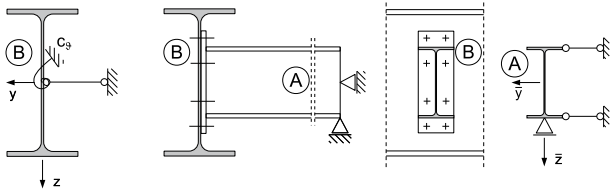


Bild 6. Träger A: Gabellagerung; Träger B: seitliche Abstützung durch Träger A und Drehfeder nach [19]

**Lagerung nur am Untergurt**

Im Allgemeinen wird beim Nachweis von biegedrillknickgefährdeten Bauteilen eine Gabellagerung vorausgesetzt. Durch die Gabellagerung wird gewährleistet, dass eine seitliche Verschiebung und eine Verdrehung des Querschnitts an der Stelle der Gabellagerung verhindert werden. Fehlt diese Drehbehinderung (Bild 7), indem der Träger beispielsweise lediglich am Unterflansch befestigt ist, ist die Querschnittstreue nicht mehr unbedingt gewährleistet. Alle angreifenden Kräfte aus Querlasten und Torsion müssen über Stegbiegung abgetragen werden. Eingeschweißte Steifen können hier Abhilfe schaffen.

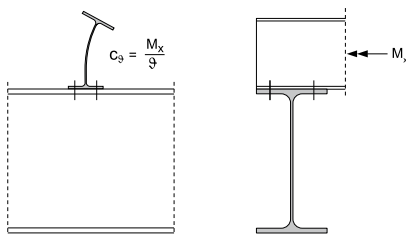


Bild 7. Fehlende Gabellagerung - Stegbiegung

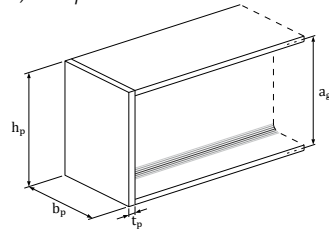
**2.2 Stabilisierung durch konstruktive Details**

**Elastische Wölbbehinderung:**

Die Berechnung des idealen Verzweigungsmomentes  $M_{cr}$  (Biegedrillknickmoment) geht von einem Einfeldträger mit beidseitiger Gabellagerung aus. Die Verwölbung am Ende des Stabes ist bei dieser Lagerung jedoch frei. Eine Behinderung der freien Verwölbung – durch konstruktive Details – erhöht die Torsionssteifigkeit von Bauteilen mit offenen dünnwandigen Querschnitten. Wölbfedern entstehen durch Kopplung der sich gegenseitig verdrehenden Flansche. Eine Wölbfeder muss so beschaffen sein, dass eine gegenseitige Verdrehung behindert wird. Sind in der Konstruktion entsprechende Wölbfedern ausgeführt, können diese bei einer Ermittlung der Schnittgrößen angesetzt und bei der Berechnung des Biegedrillknickmomentes  $M_{cr}$  berücksichtigt werden.

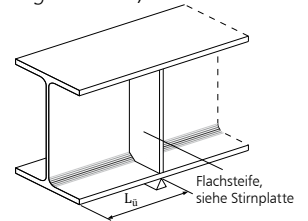
Baupraktische Konstruktionen werden oft so ausgeführt, dass eine Wölbbehinderung rechnerisch berücksichtigt werden kann. Im nachfolgenden Bild sind konstruktive Details aufgeführt, für die eine Berücksichtigung der Wölbbehinderung anzusetzen ist.

a) Stirnplatte



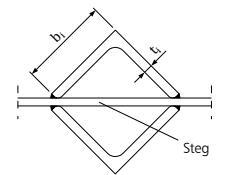
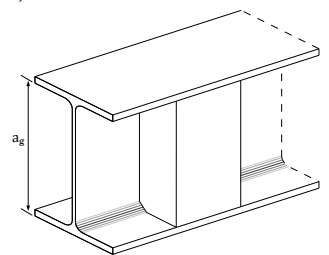
$$I_T = \frac{b_p \cdot t_p^3}{3} \quad C_{\omega} = G I_T \cdot a_g$$

b) Trägerabstand, Flachsteifen



$$C_{\omega} = \lambda \cdot E I_{\omega} \cdot \tanh(\lambda \cdot L_{fl}) \quad \text{mit: } \lambda = \sqrt{\frac{G I_T}{E I_{\omega}}}$$

c) Hohlsteife aus Winkel- oder U-Profilen



$$I_T = \frac{4 \cdot A_i^2}{\sum_i \frac{b_i}{t_i}} \quad C_{\omega} = G I_T \cdot a_g \quad A_u = \text{von der Hohlprofilmittellinie der Hohlsteife umschlossene Fläche}$$

Bild 8. Wölbfedern  $C_{\omega}$  infolge von Kopfplatten, Flachsteifen, Hohlsteifen und Trägerüberständen nach [20]

**3 Versagensformen verschiedener Bauteile**

In einem Gesamttragwerk können die unterschiedlichsten Bauteile definiert und zur gemeinsamen Tragwirkung herangezogen werden. Zur zuverlässigen Beurteilung des Trag- und Verformungsverhaltens des Gesamtsystems müssen dem Anwender die möglichen Versagensformen der einzelnen Bauteile und deren Ursache bekannt sein. Dies ist eine notwendige Voraussetzung für eine der Aufgabenstellung angepasste Modellierung der Querschnitte und des Gesamtsystems.

### 3.1 Versagensformen dünnwandiger, kaltgeformter Querschnitte

Kaltprofile werden aus dünnen, ebenen Blechen durch Kaltumformung erzeugt. Die Kaltprofilierung ermöglicht eine optimale Gestaltung der tragenden Stahlquerschnitte. Infolge der Dünnwandigkeit der Profile können bei diesen Querschnitten unter Druckbeanspruchungen lokale Beulerscheinungen vor Erreichen der Streckgrenze auftreten. Das hat zur Folge, dass die volle Querschnittstragfähigkeit nicht erreicht werden kann. Sofern die dünnwandigen Profile als Stab oder Pfette in einer Stahlkonstruktion verwendet werden, können sich zu dem Stabilitätsfall Beulen auch noch die Stabilitätserscheinungen Biegeknicken und Biegedrillknicken einstellen. Das lokale Beulen kann sich mit den Stabilitätserscheinungen Biegeknicken und Biegedrillknicken überlagern, so dass ein sogenanntes Gesamtstabilitätsproblem entstehen kann.

In DIN EN 1993-1-3 [7, 8] sind die lokalen, globalen und die Gesamtstabilitätsprobleme für kaltgeformte, dünnwandige Kaltprofile geregelt. Dabei werden die Regeln für das lokale Plattenbeulen nach DIN EN 1993-1-5 [9, 10] und die grundlegenden Vorgaben für die Stabilitätsfälle Biegeknicken und Biegedrillknicken nach DIN EN 1993-1-1 [5, 6] verwendet.

Besondere Bemessungsregeln für kaltgeformte Pfetten sind in Abschnitt 10 der DIN EN 1993-1-3 angegeben. Das in Abschnitt 10 angegebene Bemessungsmodell, das durch Versuche verifiziert ist, kann im Rahmen der angegebenen Anwendungsgrenzen zur Bemessung von kaltgeformten, dünnwandigen Pfetten verwendet werden. Profile außerhalb der vorgegebenen Grenzen dürfen mit diesem Bemessungsmodell nicht nachgewiesen werden.

### 3.2 Versagensformen kompakter Querschnitte

Kompakte Querschnitte der Klasse 3 erreichen die elastische Grenztragfähigkeit, Querschnitte der Klassen 1 und 2 erreichen die vollplastische Querschnittstragfähigkeit ohne dass ein vorheriges Stabilitätsversagen infolge von lokalen Beulerscheinungen auftritt.

Für Stabelemente mit kompakten Querschnitten sind die Stabilitätserscheinungen Biegeknicken und Biegedrillknicken zu untersuchen. Für übliche Rahmensysteme mit I-Querschnitten können kompakte Querschnitte vorausgesetzt werden.

Eine wesentliche Aufgabe bei Rahmen ist der Nachweis der räumlichen Stabilität, d. h. die Beurteilung der Biegedrillknicksicherheit. Zur Untersuchung des Biegedrillknickens sind in DIN EN 1993-1-1 und DIN 18800-2 Berechnungsverfahren angegeben, die auf dem Ersatzstabverfahren basieren. Bei diesen Verfahren werden die zu untersuchenden Teilsysteme (hier Riegel und Stützen) aus dem Gesamtsystem herausgelöst und die Biegedrillknickuntersuchung am Ersatzstab durchgeführt. Beim Ersatzstabverfahren werden Gabellager an den Auflagern des Ersatzstabes vorausgesetzt. Diese Annahmen sind beim Biegedrillknicknachweis für die auszuführende Konstruktion zu überprüfen; gegebenenfalls sind die Lagerungsbedingungen zu modifizieren.

### Anmerkung zum Ansatz einer Gabellagerung bei „Rahmen“-Stützen:

An den Fußpunkten von Stützen kann auf der sicheren Seite liegend für eine Nachweisführung nach dem Ersatzstabverfahren eine Gabellagerung unterstellt werden. Die tatsächlich ausgeführte Konstruktion – üblicherweise mit Fußplatten – besitzt in der Regel eine höhere Drehbehinderung. Bei einer statisch gelenkigen Fußpunkt Lagerung wirken die vorhandenen Fußplatten als Wölbfedern. Eine starre Einspannung liefert eine noch höhere Drehbehinderung.

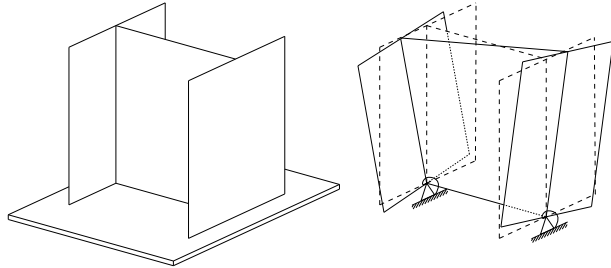


Bild 9. Fußplatte als Wölbfeder

Am Stützenkopf kann je nach ausgeführter Konstruktion eine Gabellagerung nicht in allen Fällen unterstellt werden. Die Steifigkeit am Kopf der Stütze wird durch die Steifigkeiten der angeschlossenen Pfetten und Riegel bestimmt. Dabei können sich sehr kleine Steifigkeiten ergeben, so dass nicht mehr von einer Gabellagerung auszugehen ist. Auch bei einer Ausführung des Anschlusses mittels Querkraftanschluss kann keine Gabellagerung unterstellt werden.

Das tatsächliche Tragverhalten des Gesamtrahmensystems kann über das Ersatzstabverfahren nur bedingt erfasst werden, da die gegenseitige Interaktion von Stütze und Riegel nicht oder nur annähernd erfasst wird. Dies kann zu unsicheren Ergebnissen führen.

## 4 Numerische Analysen für 3D-Faltwerke

Wie aus den Ausführungen im Kapitel 3 zu entnehmen ist, sind vereinfachte Berechnungsmethoden zur realitätsnahen Beurteilung der Stabilitätserscheinungen der einzelnen Bauteile oft nicht ausreichend. Die Problemstellung der räumlichen Stabilität lässt sich mit numerischen Berechnungsverfahren nach der Methode der Finiten Elemente (FEM) lösen. Die dazu erforderlichen Grundlagen und Modellbildungen werden nachfolgend für die Berechnung als 3D-Faltwerk erläutert.

Das komplexe Stabilitätsverhalten unter Berücksichtigung lokaler Beuleinflüsse in Kombination mit globalen Stabilitätseinflüssen wie Biegeknicken und Biegedrillknicken wird mit numerischen Berechnungsverfahren der Verzweigungslastanalyse behandelt. Das Ergebnis einer Verzweigungslastanalyse dokumentiert sich in der Ermittlung der Knickfigur und ggf. der Beulfigur zugehörig zum kritischen Verzweigungslastfaktor  $\alpha_{cr}$ . Diese Ergebnisse bilden die Grundlage zur Beurteilung der räumlichen Stabilitätsgefährdung.

#### 4.1 Modellbildung

Die Abbildung muss den Querschnitt und das System ausreichend genau erfassen.

##### Geometrie

- kaltgeformte, dünnwandige Profile: Die Komponenten kaltgeformter, dünnwandiger Pfetten bestehen i.d.R. aus Steg, Lippen, Sicken und Bördel, die über polygonale Querschnittsdefinitionen festgelegt werden. Die Diskretisierung dieser Komponenten erfolgt mit Schalenelementen als 3D-Faltwerk.
- I-Querschnitte: Die Komponenten der I-Profile eines Rahmens bestehen aus Flanschen (Ober- und Unterflansch) und dem Stegblech. Darüber hinaus sind Platten als Stützenfuß- und Kopfplatten oder Steifen vorhanden. Die Diskretisierung dieser Komponenten erfolgt mit Schalenelementen als 3D-Faltwerk.

##### Elementierung

- kaltgeformte, dünnwandige Profile: Dünnwandige Profile behalten ihre Form nicht bis zum Erreichen der Traglast. Sie beulen unter einer geringeren Last bereits aus. Die Elementierung sollte aus zweidimensionalen Schalenelementen bestehen, die die nicht formtreuen, beuschlanken Querschnitte beschreiben. Die Mittellinie der Schalenelemente entspricht der Mittellinie der Querschnittskomponente.
- I-Querschnitte: Die üblichen Profile eines Rahmens bestehen aus kompakten Querschnitten, die der Klassen 1 bis 3 nach DIN EN 1993-1-1 zuzuordnen sind. Sie sind von gedrungener Geometrie und behalten ihre Form bis zum Erreichen der Traglast, ohne dass sie zuvor aus Stabilitätsgründen ausbeulen. Zur numerischen Beschreibung der einzelnen Elemente werden zweidimensionale Schalenelemente verwendet, die je nach Abbildung eine drei- oder viereckige Form aufweisen. Die Mittellinie der Schalenelemente entspricht der Mittellinie der Querschnittskomponente.

##### Materialeigenschaften

Die Materialeigenschaften des Stahls werden üblicherweise über ein bilineares Werkstoffgesetz nach DIN EN 1993-1-5 für dünnwandige, kaltgeformte Profile und nach DIN EN 1993-1-1 für I-Profile beschrieben. Mit fein diskretisierten Modellen ist ein wirklichkeitsnaher Beanspruchungs- und damit Spannungsverlauf zu ermitteln, so dass lokale Spannungskonzentrationen erfasst werden können.

##### Lagerungsbedingungen

Realitätsnahe Ergebnisse mittels numerischer Berechnungen sind nur zu erzielen, wenn die Lagerungsbedingungen des untersuchten Bauteils wirklichkeitsnah abgebildet werden. Bei der Diskretisierung besteht eine wesentliche Aufgabe darin, die idealen Lagerungsbedingungen eines Stabes in einem Punkt auf die flächenhafte Beschreibung mittels Schalenelementen zu übertragen. Werden die zu untersuchenden Bauteile aus dem Gesamtsystem gedanklich herausgeschnitten, besteht die Schwierigkeit darin, die Steifigkeiten der angrenzenden Bauteile möglichst zutreffend zu erfassen.

##### Lasten

Die Belastung der Schalenelemente erfolgt i.d.R. als Flächenlasten. Der Ansatz der Flächenlasten muss eine zum Stabmodell entsprechende Belastung erzeugen. Bei dünnwandigen Querschnitten ist insbesondere darauf zu achten, dass die modellierte Lasteinleitung eine ausreichende Steifigkeit besitzt, um die Beanspruchung in den Querschnitt einleiten zu können. Ist dies nicht gegeben, treten im Lasteinleitungsbereich lokale Stabilitätserscheinungen in Form von Beulen auf.

## 5 Stabilitätsnachweis der Pfetten

Im Stahlhallenbau werden bevorzugt kaltgeformte, dünnwandige C-, Z- oder  $\Sigma$ -Profile als Dachpfetten eingesetzt. Die Pfetten werden einerseits durch die Dachschale belastet, andererseits aber auch durch diese stabilisiert. Am Beispiel von Z-Pfetten wird nachfolgend die Stabilität dieser Profile untersucht.

### 5.1 Modellbildung

Die Modellbildung erfolgt entsprechend den allgemeinen Angaben zur FE-Modellierung, wie sie im Kapitel 4 beschrieben sind. Sind zu den einzelnen Punkten der Modellbildung wie Materialeigenschaften u. ä. an dieser Stelle keine Angaben gemacht, gelten die Aussagen entsprechend Kapitel 4.

##### Geometrie

Die Geometrie der Z-Profile, d. h. der Stegwinkel ist so gewählt, dass die Hauptachsen der Pfetten unter Berücksichtigung der Neigung der Anschlussplatte lotrecht stehen. Die Wirkungsrichtung der Vertikallasten entspricht der Hauptachse. Die auftretende Querbiegung um die schwache Achse wird durch diese Ausrichtung minimiert. Weiter ist zu beachten, dass die Z-Pfetten immer so ausgerichtet sind, dass die Befestigung mittels firstseitig liegender Anschlussplatte erfolgt.



Bild 10. Geometrie der Z-Pfette mit Befestigung an der Anschlussplatte

##### Elementierung

Die Vernetzung der Komponenten ist so zu wählen, dass die Ergebnisse zutreffend erfasst werden.

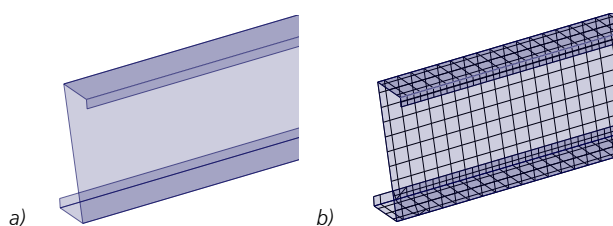


Bild 11. a) Stahlflächen der Z-Pfette  
b) Diskretisierung als 3D-Faltwerk

**Lagerungsbedingungen**

Senkrecht zur Stegfläche ist die Verschiebung durch die starre Anschlussplatte verhindert. Ebenso ist die vertikale Verschiebung infolge der Verschraubung des Bleches mit der Lagerplatte blockiert. Entgegen einer freien Rotation um die Längsachse bei einer Stabdiskretisierung liefert die Berücksichtigung der tatsächlichen Ausführung eine Drehbehinderung. Die seitliche Verschiebung der Pfette ist am Obergurt durch die Verbindung mit dem Trapezblech verhindert bzw. über die Größe der Schubsteifigkeit  $S$  seitlich elastisch gestützt (Bild 10).

**Lasten**

Belastet wird die Pfette durch Flächenlasten, die auf den Obergurt der Pfette infolge von Eigengewicht der Dacheindeckung, Wind und Schnee in das System eingetragen werden. Die Berücksichtigung von Normalkräften aus Wind- und Stabilisierung ist als Linienlast auf die Profilgeometrie in Systemlängsrichtung aufzubringen.

**5.2 Verzweigungsanalysen**

Die Berechnung der Verzweigungslasten auf Basis der Elastizitätstheorie ist eine wesentliche Hilfe für die Beurteilung der Tragfähigkeit eines Bauteils bzw. Teilsystems. Anhand der Knickfigur bzw. Beulfigur können die stabilitätsgefährdeten Bereiche erkannt und falls erforderlich, verstärkt werden.

**Ergebnisse der Verzweigungslastanalysen**

Das Ergebnis einer Verzweigungslastanalyse dokumentiert sich in der Ermittlung der Knick- und der Beulfigur zugehörig zu dem kritischen Verzweigungslastfaktor  $\alpha_{cr}$ . Diese Ergebnisse bilden die Grundlage zur Beurteilung der räumlichen Stabilitätsgefährdung. Unter der Bemessungslastkombination ist ein kritischer Verzweigungslastfaktor von mindestens 1.0 erforderlich. Bild 12 zeigt beispielhaft die räumliche Biegedrillknick- und Beulfigur eine Durchlaufpfette mit dünnwandigem Z-Profil.

Infolge der seitlichen Stützung des Obergurtes der Z-Pfette ist ein seitliches Ausweichen behindert. Der seitlich gehaltene Obergurt kann sich der Druckkraftaufnahme nicht durch seitliches Ausweichen entziehen. Die Dünnwandigkeit des Querschnitts führt unter der Druckbeanspruchung zu lokalem Beulen (Bild 12).

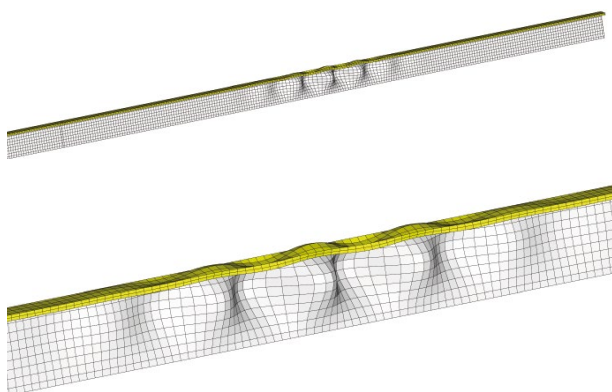


Bild 12. a) Biegedrillknick- und Beulfigur  
b) Ausschnitt der Biegedrillknick- und Beulfigur

**6 Stabilitätsnachweis der Rahmen**

Die Mehrzahl der Stahlrahmen bestehen aus I-Profilen, die aufgrund der Optimierung im Bereich der Rahmenecken gevoutet sind. Die Beschreibung zur Modellierung als 3D-Faltwerk bezieht sich deshalb auf diesen Ausführungstyp. Vom prinzipiellen Vorgehen können aber auch davon abweichende Querschnittsformen nach der gleichen Methode analysiert werden.

**6.1 Modellbildung**

Bezüglich der Modellbildung gelten auch hier die allgemeinen Angaben zur FE-Modellierung, wie sie im Kapitel 4 angegeben sind. Sind zu den einzelnen Punkten der Modellbildung wie Geometrie u. ä. an dieser Stelle keine Angaben gemacht, gelten die Aussagen entsprechend Kapitel 4.

**Elementierung**

Die Vernetzung der Komponenten ist so zu wählen, dass die Ergebnisse zutreffend erfasst werden. In der Regel sind vier Elemente für die Flansche und vier bis acht Elemente über die Steghöhe ausreichend.



Bild 13. a) Ausgeführte Rahmenecke  
b) Diskretisierung als 3D-Faltwerk

**Lagerungsbedingungen**

Um die tatsächliche Tragwirkung eines Bauteils bzw. Teilsystems möglichst zutreffend zu simulieren, ist die wirklichkeitsnahe Abbildung der Lagerungsbedingung außerordentlich wichtig. Auch bei den hier vorhandenen Stahlquerschnitten, die als Bauteile mit flächigen Schalenelementen aufgelöst werden, besteht eine wesentliche Aufgabe darin, die ideale Lagerung eines Stabes wie z. B. die Stützenfußpunktagerung auf Flächenelementen zu übertragen. Beispielsweise erzeugt eine starre Lagerung der Gurte eine Profileinspannung.

Über federnde oder starre Linien- oder Flächenlagerungen kann die tatsächliche Lagerungssituation abgebildet werden.



*Anmerkung: Die sehr häufig ausgeführte Lagerung mittels Stützenfußplatten ist in der Realität deutlich steifer, als dies über eine idealisierte gelenkige Stablagerung angenommen wird.*

Von entscheidender Bedeutung ist, dass Lagerungsbedingungen an beliebiger Stelle des Querschnitts und des Systems definierbar sind. Beispielhaft sind hier federnde bzw. starre Abstützungen und/oder Verdrehungen durch angrenzende Bauteile wie Pfetten am Obergurt des Querschnitts oder Abstützungen an beliebiger Stelle im Stegbe- reich durch Verbandspfosten, zu nennen.



Bild 14. Beispielhafte Lagerung  
a) im Rahmeneck  
b) im Bereich des Verbandanschlusses

## Lasten

Der Lastangriff ist analog der tatsächlichen Lastwirkung zu berücksichtigen. Die Stelle bzw. der Bereich des Lastangriffs haben einen entscheidenden Einfluss auf die sich einstellende Knickfigur und den kritischen Lastverzweigungsfaktor.

## 6.2 Verzweigungsanalysen

Anhand der Knickfigur können die stabilitätsgefährdeten Bereiche erkannt und falls erforderlich verstärkt oder durch Abstützungen stabilisiert werden. Die Stabilitätsuntersuchungen sind für die maßgebenden Lastfallkombinationen durchzuführen. Kriterien für die Auswahl der maßgebenden Lastfallkombinationen sind hohe Druckspannungen in den Gurten, die über weite Strecken nicht gestützt sind.

Nach Mangerig et al [14] kommen hierfür in Frage:

- Stützeninnengurte bei maximalem Rahmeneckmoment
- Riegeluntergurt bei maximalem negativem Rahmeneckmoment
- Riegeluntergurt über der Innenstütze bei maximalem Stützmoment

## Ergebnisse der Verzweigungslastanalysen

Das Ergebnis einer Verzweigungslastanalyse dokumentiert sich in der Ermittlung der Knickfigur zugehörig zu dem kritischen Verzweigungslastfaktor  $\alpha_{cr}$ . Diese Ergebnisse bilden die Grundlage zur Beurteilung der räumlichen Stabilitätsgefährdung. Unter der Bemessungslastkombination ist ein kritischer Verzweigungslastfaktor von mindestens 1.0 erforderlich. Bild 15 zeigt beispielhaft die räumliche Biegedrillknickfigur eines zweifeldrigen Rahmens, der am Obergurt des Riegels an diskreten Punkten durch Pfetten seitlich gestützt ist.



Bild 15. a) Biegedrillknickfigur eines zweifeldrigen Rahmens  
b) Ausschnitt der Knickfigur im Bereich der Mittelstütze

Deutlich zu erkennen ist das antimetrische seitliche Ausweichen des Untersturzes der Riegel bei gleichzeitiger Verdrehung der Mittelstütze. Die Interaktion Riegel-Stütze ist bei Abbildung des Gesamtrahmensystems automatisch gegeben. Die Drehsteifigkeit der Mittelstütze hat auf das Ergebnis des kritischen Lastverzweigungsfaktors einen signifikanten Einfluss. Bei einem Verzweigungslastfaktor  $\alpha_{cr}$  von deutlich größer als 1.0 ist in diesem Beispiel eine ausreichende Stabilität gewährleistet.

*Anmerkung: Die Knickfiguren sind zur besseren Beurteilung stark überhöht dargestellt; Bild 15 a) und b) sind nicht mit dem gleichen Faktor dargestellt.*

Das nachfolgende Bild 16 a) zeigt die kritische Knickfigur im Bereich eines gevouteten Rahmenecks. Die Stütze wird infolge des Ausknickens des hoch druckbeanspruchten Untersturzes aus der Rahmenebene stark tordiert.

Unter der maßgebenden Bemessungslastkombination stellt sich der in Bild 16 b) dargestellte Membranspannungsverlauf ein. Klar zu erkennen ist der Übergang des Druckspannungsverlaufes (blau dargestellte Membranspannungen) vom Oberflansch des Riegels über die Stegfläche in den Untergurt des Rahmenriegels im Eckbereich. Der Innenflansch der Stütze ist ebenfalls druckbeansprucht.

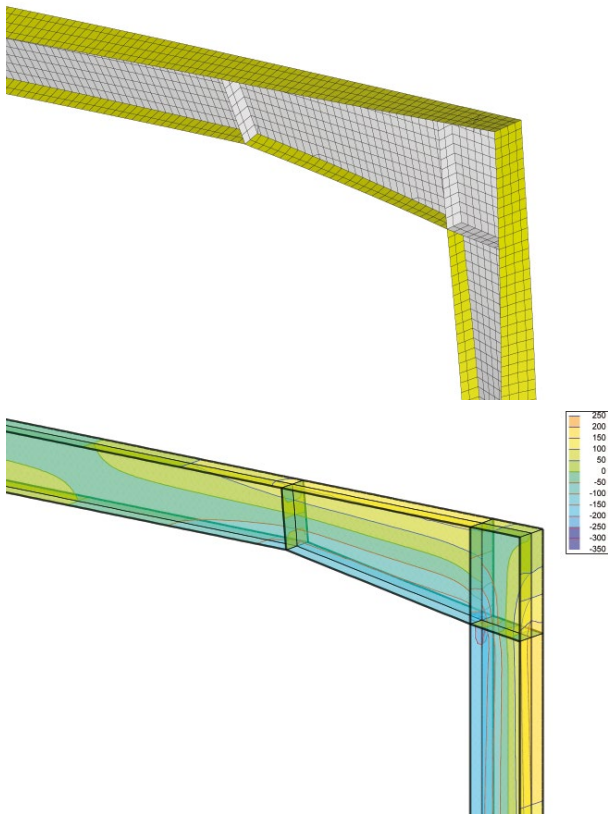


Bild 16. a) Biegedrillknickfigur im Bereich des gewölbten Rahmennecks  
b) Membranspannungen im Bereich des gewölbten Rahmennecks

## 6 Zusammenfassung

Stabilitätserscheinungen, die über eine Abbildung als Stabsystem nicht zutreffend zu berechnen sind, können realitätsnah über eine numerische Analyse als 3D-Faltwerk erfasst werden. Insbesondere für dünnwandige und damit beul- und knickgefährdete Strukturen sind die Stabilitätseffekte wirklichkeitsnah – im Rahmen der Genauigkeit der Diskretisierung und der berücksichtigten Randbedingungen – zu erfassen und die mögliche Stabilitätsgefahr zu analysieren.

Dr.-Ing. Joachim Kretz  
mb AEC Software GmbH  
mb-news@mbaec.de

## Normen und Literatur

- [1] DIN EN 1990:2012-12, Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010.
- [2] DIN EN 1990/ NA:2012-12, Eurocode 0: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Grundlagen der Tragwerksplanung
- [3] DIN EN 1991-1-1:2012-12, Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke, Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau. Deutsche Fassung EN 1991-1:2002 + AC:2009
- [4] DIN EN 1991-1-1/NA:2012-12, Eurocode 1: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke, Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau
- [5] DIN EN 1993-1-1:2010-12, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau.
- [6] DIN EN 1993-1-1/NA:2010-12, Eurocode 3: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter - Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau.
- [7] DIN EN 1993-1-3:2010-12, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-3: Allgemeine Regeln – Ergänzende Regeln für kaltgeformte Bauteile und Bleche
- [8] DIN EN 1993-1-3/NA:2010-12: Eurocode 3: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-3: Allgemeine Regeln – Ergänzende Regeln für kaltgeformte dünnwandige Bauteile und Bleche
- [9] DIN EN 1993-1-5:2010-12, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile
- [10] DIN EN 1993-1-5/NA:2010-12: Eurocode 3: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile
- [11] DIN EN 1993-1-8:2010-12, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen.
- [12] DIN EN 1993-1-8/NA:2010-12: Eurocode 3: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen.
- [13] DIN 18800-2: Stahlbauten – Teil 2: Stabilitätsfälle – Knicken von Stäben und Stabwerken. Ausgabe November 2008. Beuth Verlag. Berlin 2008.
- [14] Mangerig, I., Zapfe, C.: Stahlhallen. Stahlbau Kalender 2003. Ernst & Sohn Verlag. Berlin 2003
- [15] Lindner, J.; Heyde, S.: Schlanke Stabtragwerke. In Stahlbau Kalender 2009. Ernst & Sohn Verlag. Berlin 2009
- [16] Brune, B.; Kalameya, J.: Kaltgeformte, dünnwandige Bauteile und Bleche aus Stahl nach DIN EN 1993-1-3. In Stahlbau Kalender 2009. Ernst & Sohn Verlag. Berlin 2009
- [17] Kretz, J.: Stabilität und Theorie II. Ordnung von Stäben und Stabtragwerken, mb-news Nr. 4/2011, Juni 2011.
- [18] Kretz, J.: Modellbildung und Stabilitätsberechnungen nach EC 3, mb-news Nr. 1/2013, Februar 2013.
- [19] Meister, J.: Nachweispraxis Biegeknicken und Biegedrillknicken, Ernst & Sohn Verlag. Berlin 2002.
- [20] Kindmann, R.: Stahlbau Teil 2: Stabilität und Theorie II. Ordnung, Ernst & Sohn Verlag. Berlin 2008.