



Bundesministerium für Digitales und Verkehr • Postfach 20 01 00, 53170 Bonn

Ausschließlich per E-Mail

Brückenreferenten/-innen der Länder

Vertreter der Autobahn GmbH des Bundes

nachrichtlich:

Vertreterin des Fernstraßen-Bundesamtes

Abteilungsleiter I der BAST

Leiter OM-KI der DEGES

Vertreterin des Bundesrechnungshofes

**Betreff: Beulverhalten älterer Stahl- und Stahlverbundbrücken;
- Vereinfachungen und Reduzierung des Nachweisumfanges**

Bezug: Obmannschreiben 2022-02 vom 24.01.2022

- StB 24/7192.70/11-3609514 -

Obmannschreiben 2023-01 vom 03.03.2023

- StB 24/7192.70/11-3756521 -

Aktenzeichen: StB 24/7192.70/11-3850792

Datum: Bonn, 05.12.2023

Seite 1 von 6

2023-19

Sehr geehrte Damen und Herren,

mit dem Obmann-Schreiben 2022-02 wurden die Länder und die Autobahn GmbH des Bundes aufgefordert, bei älteren Stahl- und Stahlverbundbrücken mit Baujahr vor 1980 Stegverformungen messtechnisch aufzunehmen, ingenieurmäßig auszuwerten und Rückschlüsse auf evtl. Tragfähigkeitseinbußen in Bezug auf das Beulverhalten zu ziehen.

Prof. Dr.-Ing. Gero Marzahn
Leiter des Referates StB 24

Robert-Schuman-Platz 1
53175 Bonn

Postanschrift:
Postfach 20 01 00
53170 Bonn

Tel. +49 228 99-300-5240
Fax +49 228 99-300-807-5240

ref-stb24@bmdv.bund.de

www.bmdv.bund.de





Seite 2 von 6

Vermehrte Rückfragen seitens der Anwender führten in Abstimmung mit dem DIN AA Stahlbrücken (NA 005-08-23 AA) zu einer Eingrenzung und Konkretisierung des Untersuchungsgegenstands sowie der Möglichkeit der Anwendung eines vereinfachten Nachweisverfahrens am verformten System, veröffentlicht im Obmannschreiben 2023-01.

Mit der praktischen Erfahrung von realen Bauwerken, dass die größte gemessene Imperfektion nicht unbedingt bei der maximal beanspruchten Längssteife auftritt, wurde das vereinfachte Nachweisverfahren um eine rechnerische Erfassung zugehöriger Last- und Verformungsgrößen erweitert und im vorliegenden Obmannschreiben 2023-19 aufgenommen.

Hierbei wurden alle Regelungen des Obmannschreibens 2023-01 übernommen und an den entsprechenden Stellen erweitert, so dass der Regelungsinhalt für eine praktikable Anwendung zusammengefasst und komplettiert wurde. Das Obmannschreiben 2023-01 inkl. seiner Anlagen ist daher nicht mehr anzuwenden.

Auf folgende Aspekte möchte ich insbesondere hinweisen:

1. Untersuchungsgegenstand

Von der beschriebenen Beulproblematik sind primär Brücken bzw. Bauteile betroffen, bei denen in Längsrichtung ausgesteifte Teil- bzw. Gesamtfelder mit einem überwiegend knickstabähnlichen Verhalten vorhanden sind. Dies gilt insbesondere für

- a) druckbeanspruchte Stegbereiche von längsausgesteiften Durchlaufträgern in Stahl- bzw. Stahlverbundbauweise,
- b) im Druckbereich liegende Bodenbleche von Kastenträgern,
- c) überwiegend durch Druckkräfte beanspruchte Bauteile mit kastenförmigen Querschnitten (Bögen von Stabbögen, Pylone älterer Seilbrücken).

Versteifungsträger von Stabbögen oder einfeldrige Biegeträger (auch in Verbundbauweise) mit kleineren Stützweiten sind im Regelfall nicht so stark gefährdet und können im Rahmen einer ersten Priorisierung zunächst unberücksichtigt bleiben.





Seite 3 von 6

2. Aufmaße von Imperfektionen

Es wird aus fachlicher Sicht als ausreichend angesehen, sich bei den Messungen der Imperfektionen auf

- a) rechnerisch hoch ausgenutzte Beulfelder und
- b) hierbei auf längsausgesteifte Stegbereiche und auf die Längs- und Quersteifen in den gedrückten Bereichen der Bodenbleche von Kastenträgern,

zu konzentrieren.

Flächenhafte bildgebende Aufnahmen der Steg- und Bodenblechbereiche (Laserscan, Photogrammetrie) erlauben zunächst eine qualitative Bewertung, anhand derer die Bereiche mit übermäßigen Beulverformungen identifiziert werden können, z. B. druckbeanspruchte Beulfelder zwischen Längssteifen oder Bauteilbereiche mit stark verformten Längs- und/oder Quersteifen. Hierbei sind vorhandene Kenntnisse über statisch relevante Bereiche, z. B. rechnerisch hochbeanspruchte Bauteile oder Bauteilbereiche, mit zu verwerthen. Vernachlässigbar sind jene Bauteile oder Bauteilbereiche, die rechnerisch nicht beulgefährdet sind, wie z. B. Bauteile oder Bauteilbereiche unter Zugbeanspruchung.

In den ausgewählten Trägerbereichen sollten die Messungen in horizontaler Richtung verdichtet und quantitativ ausgewertet, in horizontalen Schnitten in Brückenlängsrichtung (Längsschnitt) auf einer zuvor definierten Bezugsebene für die horizontalen Verformungen dargestellt und ausgewertet sowie ggf. mittels händischer Kontrollmessungen validiert werden. Aus den Messergebnissen muss die für die Nachrechnung der Beulfelder maßgebende Imperfektion w_B nach Anhang A, Abb. 1, bzw. w_{mB} nach Anhang A, Abb. 3, ermittelt werden können.

Bei Kastenträgern oder Bauteilen mit kastenförmigen Querschnitten unter hoher Druckbeanspruchung (Pylone, Bögen von Stabbögen) sind zusätzlich die vorhandenen Quersteifen in die Untersuchungen mit einzubeziehen.

Grundsätzlich sind Art und Vorgehensweise der Aufmaße mit dem die Beulsicherheit bewertenden Ingenieur/Tragwerksplaner abzustimmen. Die Aufmaße sind ingenieurmäßig zu interpretieren.





Seite 4 von 6

3. Auswertung der Aufmaße (z. T. Auszug Obmann-Schreiben 2022-02)

An die Auswertung der gemessenen Imperfektionen werden wegen der Bedeutung hohe Anforderungen gestellt, siehe auch Obmann-Schreiben 2022-02 vom 24.01.2022.

Die ermittelten Beulverformungen senkrecht zur Blechebene sind unter Berücksichtigung der zulässigen Grenzwerte für die Herstelltoleranzen nach DIN EN 1090-2:2018-09 zu bewerten und hinsichtlich ihrer statischen Auswirkungen nach Anlage A zu beurteilen. Eine genauere Untersuchung im Rahmen einer objektbezogenen Schadensanalyse (OSA) wird erforderlich, wenn

- a) im Rahmen einer üblichen Nachrechnung der Brücken nach Nachrechnungsrichtlinie beim Beulnachweis der Ausnutzungsgrad größer als 1,15 ist,
- b) Beulverformungen festgestellt werden, die bei Längs- und Quersteifen die grundlegenden Toleranzen nach DIN EN 1090-2:2018-09, Tabelle B7, um mehr als 10 % und bei unausgesteiften Einzelblechfeldern die grundlegenden Werte nach DIN EN 1090-2:2018-09, Tabelle B4, Zeilen 3 und 4, um mehr als 15 % übersteigen,
- c) bei Beulfeldern die Längs- und Quersteifen aus der Materialgüte S235 und die Stegbleche bzw. die Untergurtbleche aus S355 bestehen.

4. Nachweise für längsausgesteifte Beulfelder

Wenn die Bedingungen nach Abschnitt 3 nicht eingehalten sind, sollte eine ausreichende Tragfähigkeit der beulgefährdeten Teil- und Gesamtfelder in einem zweistufigen Verfahren nachgewiesen werden.

In der Stufe 1 darf ein vereinfachtes Nachweisverfahren angewendet werden, bei dem der Einfluss der vergrößerten Verformungen auf die Beulsicherheit mit Hilfe eines modifizierten Abminderungsbeiwertes für die Abminderungsfaktoren ρ_c und χ_w nach DIN EN 1993-1-5 berücksichtigt wird. Nach Berechnung der modifizierten Abminderungsbeiwerte können dann die normativen Verfahren nach DIN EN 1993-1-5 (Verfahren der wirksamen Breiten oder Verfahren der reduzierten Spannungen) angewendet werden. In der Stufe 2 kann der Tragsicherheitsnachweis unter Beachtung der nachfolgend genannten Ergänzungen mit Hilfe einer geometrisch und





Seite 5 von 6

physikalisch nichtlinearen Berechnung geführt werden. Für diese Nachweisführung ist die Zustimmung des Baulastträgers erforderlich.

Nachweisverfahren der Stufe 1

Die am höchsten beanspruchten Längssteifen und die Längssteifen mit der größten Imperfektion werden als Knickstab mit dem effektiven Querschnitt nach DIN EN 1993-1-5 betrachtet. Besitzt das Beulfeld mehrere Längssteifen sind die jeweils zugehörigen Last- und Verformungsgrößen mit zu betrachten: Die gemessene Imperfektion unter den ständigen Einwirkungen wird unter Berücksichtigung der Einflüsse aus der Theorie II. Ordnung in eine spannungslose Vorverformung $e_{oB,geom}$ rückgerechnet. Dieser Verformungsanteil stellt die geometrische Vorverformung dar. Diese wird um den strukturellen Anteil vergrößert und es wird die Traglast des Knickstabes unter dieser vergrößerten geometrischen Ersatzimperfektion berechnet. Der Quotient aus dem charakteristischen Wert der reduzierten aufnehmbaren Normalkraft $N_{Rk,B,St}$ der Steife, unter Berücksichtigung der gemessenen Bauteilverformungen und des charakteristischen Wertes der normativen Traglast $N_{Rk,o,St}$ der Steife, ist der zusätzlich zu berücksichtigende Abminderungsbeiwert beim Beulnachweis nach DIN EN 1993-1-5. Bei Beulfeldern mit unterschiedlichen Materialgüten der Bleche und Steifen, werden die modifizierten Abminderungsbeiwerte zusätzlich unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Streckgrenzen der Steifen und Bleche ermittelt. Die Vorgehensweise ist im Anhang A erläutert. Im Anhang B wird eine verbesserte Interaktionsbedingung bei Biegung und Querkraft bei Anwendung der Methode der wirksamen Breiten beschrieben, die bei der Nachrechnung anstelle der Interaktionsbedingung nach DIN EN 1993-1-5, 7.1 zugrunde zu legen ist. Der Anhang C zeigt exemplarisch die Ermittlung des modifizierten Abminderungsbeiwertes für typische Beulfelder.

Nachweisverfahren der Stufe 2

Für die kritischen Beulfelder ist die Tragsicherheit mit Hilfe einer geometrisch und physikalisch nichtlinearen Berechnung des Beulfeldes nach DIN EN 1993-1-5, Anhang C zu führen. Die Rückrechnung der am Bauwerk gemessenen Verformungen auf die spannungslose Werkstattform muss mit dem gewählten FE-Modell erfolgen. Hierzu ist zunächst die Amplitude der spannungslosen Werkstattform zu schätzen und anschließend mit Hilfe des FE-Modells die Auslenkung der maßgebenden Steife unter dem bei der Messung am Bauwerk vorhandenen Beanspruchungsniveau zu ermitteln. Stimmt die





Seite 6 von 6

Schätzung der Amplitude mit dem Messwert ausreichend genau überein, so darf der geschätzte Wert als spannungslose Werkstattform zugrunde gelegt werden. Andernfalls ist die Berechnung solange zu wiederholen, bis eine ausreichende Übereinstimmung zwischen Messung und der am FE-Modell berechneten Verformung vorhanden ist. Bei der Berechnung sind die strukturellen Imperfektionen in Abhängigkeit vom Steifentyp durch realistische Eigenspannungsverteilungen infolge des Walzens und Schweißens zu berücksichtigen. In den Blechen vorhandene Eigenspannungen aus geschweißten Längsstößen sind ebenfalls zu berücksichtigen.

Die geometrischen Ersatzimperfektionen sind in Abhängigkeit von den gemessenen Beulverformungen in Anlehnung an das Verfahren der Stufe 1 zu vergrößern.

Mit freundlichen Grüßen
Im Auftrag
Prof. Dr.-Ing. Gero Marzahn



Beglaubigt:

S. Scheele

Tarifbeschäftigte

Anlagen: 3



Nachweis der Beulsicherheit von in Längsrichtung ausgesteiften Beulfeldern unter Berücksichtigung von gemessenen Beulverformungen (inkl. Ergänzung von September 2023)

1 Vorbemerkungen

Es wird ein in Längsrichtung ausgesteiftes Beulfeld als Teilfeld unter Längsdruck infolge von Momenten- und/oder Normalkraftbeanspruchung sowie unter Schubbeanspruchung betrachtet, bei dem der Anschluss zwischen den Längs- und Quersteifen als gelenkig idealisiert wird. Es wird vorausgesetzt, dass die Beulfelder ohne Berücksichtigung der am Bauwerk gemessenen Verformungen eine ausreichende Beulsicherheit nach DIN EN 1993-1-5 aufweisen. Am Bauwerk wurden für die Steifen die senkrecht zur Blechebene aufgetretenen größten Verformungen w_B unter ständigen Einwirkungen gemessen. Dabei ist w_B die zwischen den beiden Quersteifen gemessene maximale Verformung der Längssteifen aus der Steifenkrümmung.

Die nachfolgenden Untersuchungen sind für die am ungünstigsten beanspruchte Längssteife und bei mehreren Längssteifen für den Fall, dass die größte Imperfektion nicht bei der maximal beanspruchten Längssteife gemessen wurde, auch für die Längssteife mit der größten Imperfektion durchzuführen.

Abschnitt 2 regelt zunächst den Standardfall, bei dem das Blech und die Steifen die gleiche Materialgüte aufweisen. Wenn diese Voraussetzung nicht erfüllt ist, sind die ergänzenden Regelungen nach Abschnitt 5 zu beachten.

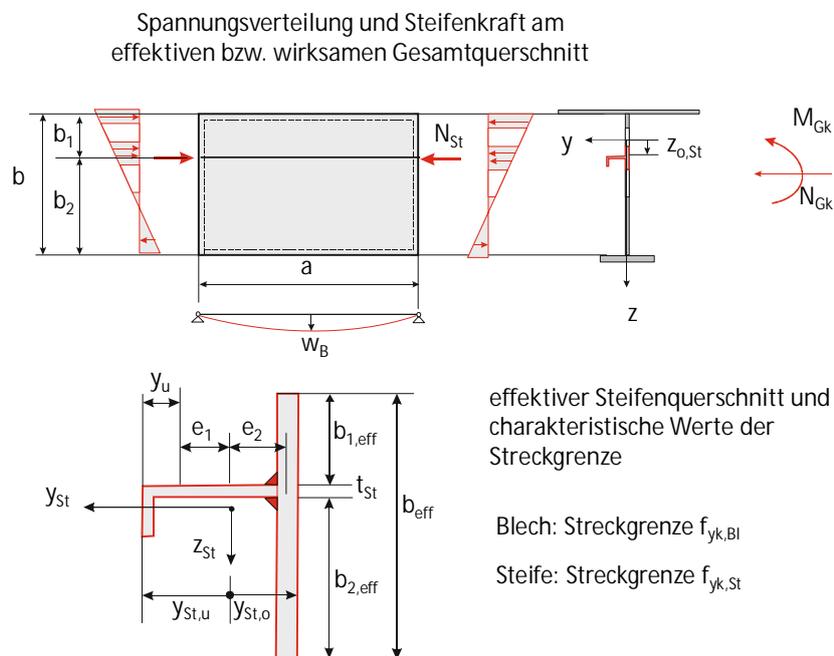


Abb. 1: Effektiver/wirksamer Gesamtquerschnitt zur Ermittlung der Steifenlängskraft und effektiver Steifenquerschnitt nach DIN EN 1993-1-5

2 Beulen infolge Längsspannungen für ausgesteifte Blechfelder mit $f_{yk,Bl} = f_{yk,St} = f_{yk}$

(2.1) Im ersten Schritt wird die gemessene Verformung w_B unter Berücksichtigung der Steifenlängskraft aus ständigen Einwirkungen auf die zugehörige spannungslose Vorverformung $e_{oB,geom}$ entsprechend der Punkte A und B in Abb. 2 mit Gl. (1) zurückgerechnet.

$$e_{oB,geom} = w_B \left[1 - \frac{N_{Gk,St}}{N_{cr,St}} \right] \quad N_{cr,St} = \frac{\pi^2 E I_{z,St,eff}}{a^2} \quad (1)$$

Dabei ist $N_{Gk,St}$ die am wirksamen Querschnitt nach Abb. 1 ermittelte Längskraft der Steife aus den auf den Gesamtquerschnitt wirkenden Schnittgrößen M_{Gk} und N_{Gk} infolge der charakteristischen Werte der ständigen Einwirkungen. Als ständige Einwirkungen sind hier das Eigengewicht und die Ausbaulasten, die Beanspruchungen aus wahrscheinlichen Baugrundbewegungen und bei Verbundbrücken zusätzlich die primären und sekundären Beanspruchungen aus dem Kriechen und Schwinden sowie Beanspruchungen aus Vorspannmaßnahmen mit Hilfe von Spanngliedern und/oder planmäßig eingepprägten Deformationen zu berücksichtigen. Wenn die Messungen der Imperfektionen bei ausgeglichenen Temperaturverhältnissen durchgeführt wurden, dürfen die Zwangbeanspruchungen aus Temperatur vernachlässigt werden. Andernfalls sollte der quasi-ständige Anteil der klimatischen Temperatureinwirkungen ($\psi_2 T_k$) berücksichtigt werden.

$$N_{Gk,St} = M_{Gk} \frac{A_{St,eff} z_{o,St}}{I_{eff}} + N_{Gk} \frac{A_{St,eff}}{A_{eff}} \quad (2)$$

In Gl. (2) ist $A_{St,eff}$ der effektive Steifenquerschnitt nach Abb. 1, I_{eff} das Flächenmoment zweiten Grades und A_{eff} die Querschnittsfläche des effektiven Gesamtquerschnittes. Der Abstand zwischen dem Schwerpunkt der Steife und dem Schwerpunkt des effektiven Gesamtquerschnittes wird mit $z_{o,St}$ bezeichnet

$N_{cr,St}$ ist die ideale Verzweigungslast der Steife, berechnet mit dem wirksamen Steifenquerschnitt $A_{St,eff}$ und dem zugehörigen Flächenmoment zweiten Grades der Steife $I_{St,eff}$. Die Berechnung der Imperfektion nach Gl. (1) liefert den geometrischen Anteil der spannungslosen Vorverformung (geometrische Imperfektion $e_{oB,geom}$) der betrachteten Steife (siehe Abb. 1).

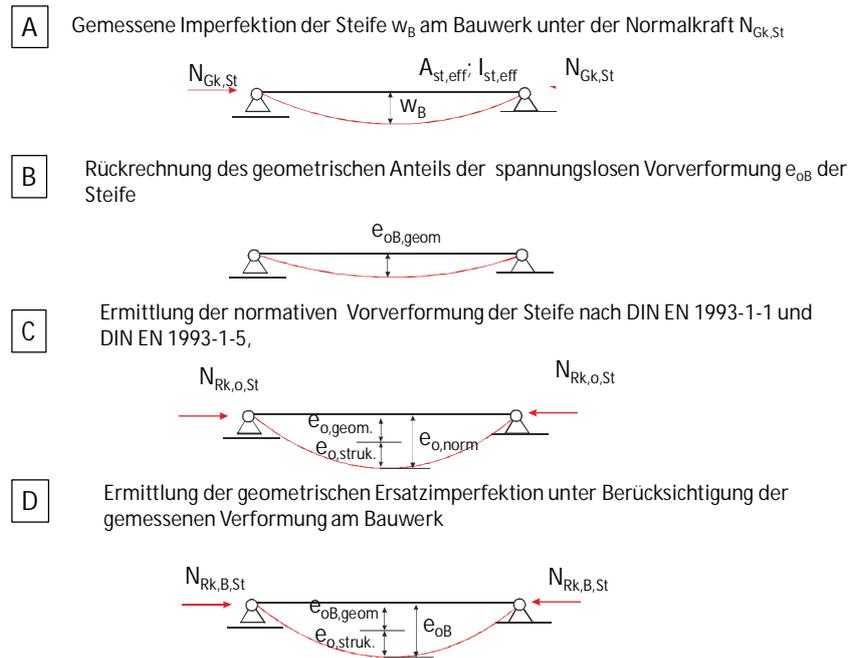


Abb. 2: Ermittlung der Imperfektionen unter Berücksichtigung der Messungen am Bauwerk

(2.2) Im nächsten Schritt (Punkt C nach Abb. 2) wird die normativ geregelte geometrische Ersatzimperfektion der Steife $e_{o,norm}$ in Anlehnung an DIN EN 1993-1-1, 5.3.2 (11) ermittelt.

$$e_{o,norm} = \alpha (\bar{\lambda} - 0,2) \frac{M_{Rk,St}}{N_{Rk,St}} \quad \text{für } \lambda > 0,2 \quad (3)$$

Für die bezogene Schlankheit gilt:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{Rk,St}}{N_{cr,St}}} \quad (4)$$

In Gl. (3) sind $N_{Rk,St}$ die elastische Normalkrafttragfähigkeit und $M_{Rk,St}$ die elastische Momenten­tragfähigkeit des effektiven Steifenquerschnittes. Bei der Ermittlung der Momenten­tragfähigkeit nach Gl. (6) ist für y_{St} der größere der beiden Werte $y_{St,o}$ oder $y_{St,u}$ nach Abb. 1 zugrunde zu legen.

$$N_{Rk,St} = f_{yk} A_{St,eff} \quad (5)$$

$$M_{Rk,St} = f_{yk} I_{z,St,eff} / y_{St} \quad (6)$$

Der Imperfektionsbeiwert α in Gl. (3) ist nach DIN EN 1993-1-5 in Abhängigkeit vom Steifentyp nach den Gleichungen (7) und (8) zu ermitteln:

- offene Steifenquerschnitte (Flachsteifen, Winkelsteifen, halbierte I-Profile):

$$\alpha = 0,49 + \frac{0,09}{i/e} \quad (7)$$

- geschlossene Beulsteifen (Trapezsteifen, Kelchprofile)

$$\alpha = 0,34 + \frac{0,09}{i/e} \quad (8)$$

In den Gleichungen (7) und (8) ist i der Trägheitsradius der Steife

$$i = \sqrt{\frac{I_{z,St,eff}}{A_{St,eff}}} \quad (9)$$

und e der größere der Abstände e_1 bzw. e_2 nach Abb. 1.

- (2.3) Mit der Vorverformung $e_{0,norm}$ nach Gl. (3) wird aus der Bedingung (10) die zugehörige Normalkrafttragfähigkeit $N_{Rk,o,St}$ ohne Berücksichtigung von Teilsicherheitsbeiwerten nach Theorie II. Ordnung berechnet.

$$\frac{N_{Rk,o,St}}{f_{yk} \cdot A_{St,eff}} + \frac{N_{Rk,o,St} e_{0,norm}}{f_{yk} \cdot I_{z,St,eff}} \gamma_{St} \frac{1}{1 - \frac{N_{Rk,o,St}}{N_{cr,St}}} \leq 1,0 \quad (10)$$

Die Normalkrafttragfähigkeit $N_{Rk,o,St}$ ist der charakteristische Wert der aufnehmbaren Normalkraft der Steife bei planmäßiger Herstellung unter Berücksichtigung der zulässigen Herstellungstoleranzen.

- (2.4) Aus der geometrischen Ersatzimperfektion $e_{0,norm}$ nach Gl. (3) wird der geometrische Anteil der Imperfektion herausgerechnet und es wird der reine strukturelle Imperfektionsanteil $e_{o,struk}$ bestimmt.

$$e_{o,struk} = \alpha_e e_{0,norm} \quad (11)$$

Der Wert α_e darf für offene Steifenquerschnitte mit $\alpha_e = 0,5$ und für geschlossene Steifenquerschnitte mit $\alpha_e = 0,4$ angenommen werden.

- (2.5) Mit dem strukturellen Imperfektionsanteil nach Gl. (11) und dem geometrischen Anteil $e_{oB,geom}$ nach Gl. (1) wird nun die geometrische Ersatzimperfektion e_{oB} für die Längssteife unter Berücksichtigung der gemessenen Verformungen am Bauwerk berechnet.

$$e_{oB} = e_{oB,geom} + e_{o,struk} \quad (12)$$

- (2.6) Mit der geometrischen Ersatzimperfektion e_{oB} nach Gl. (12) wird anschließend der charakteristische Wert der reduzierten aufnehmbaren Normalkraft $N_{Rk,B,St}$ der Steife nach Theorie II. Ordnung unter Berücksichtigung der am Bauwerk gemessenen vergrößerten Verformung aus der Bedingung (13) berechnet.

$$\frac{N_{Rk,B,St}}{f_{yk} \cdot A_{St,eff}} + \frac{N_{Rk,B,St} e_{oB}}{f_{yk} \cdot I_{z,St,eff}} \gamma_{St} \frac{1}{1 - \frac{N_{Rk,B,St}}{N_{cr,St}}} \leq 1,0 \quad (13)$$

- (2.7) Das Verhältnis η_B der beiden Normalkrafttragfähigkeiten $N_{Rk,B,St}$ und $N_{Rk,o,St}$ beschreibt den tragfähigkeitsmindernden Einfluss infolge der größeren gemessenen geometrischen Beulverformung w_B für das Beulfeld mit einer Längssteife nach Abb. 1.

$$\eta_B = N_{Rk,B,St} / N_{Rk,o,St} \quad (14)$$

- (2.8) Besitzt das Beulfeld mehrere Längssteifen (siehe Abb. 3), so ist der Faktor $\eta_B = \eta_{B,1}$ für die Steife mit der größten Normalkraft $N_{St} = N_{St,1}$ und der zugehörigen gemessenen Beulverformungen $w_B = w_{B,1}$ nach (2.1) bis (2.7) zu ermitteln. Wurde bei der Steife 1 auch die größte Beulverformung gemessen, so kann der Nachweis der Beulsicherheit direkt mit $\eta_B = \eta_{B,1}$ nach (2.9) sowie den Kapiteln 3, 4 und 5 geführt werden. Wenn die Steifen i mit geringeren Steifennormalkräften $N_{St,i}$ dagegen Beulverformungen $w_{B,i}$ aufweisen, die größer als die Beulverformung $w_{B,1}$ sind, darf bei der Berechnung des Faktors $\eta_{B,i}$ der betreffenden Steife die geringere zugehörige Normalkraftbeanspruchung $N_{St,i}$ berücksichtigt werden.

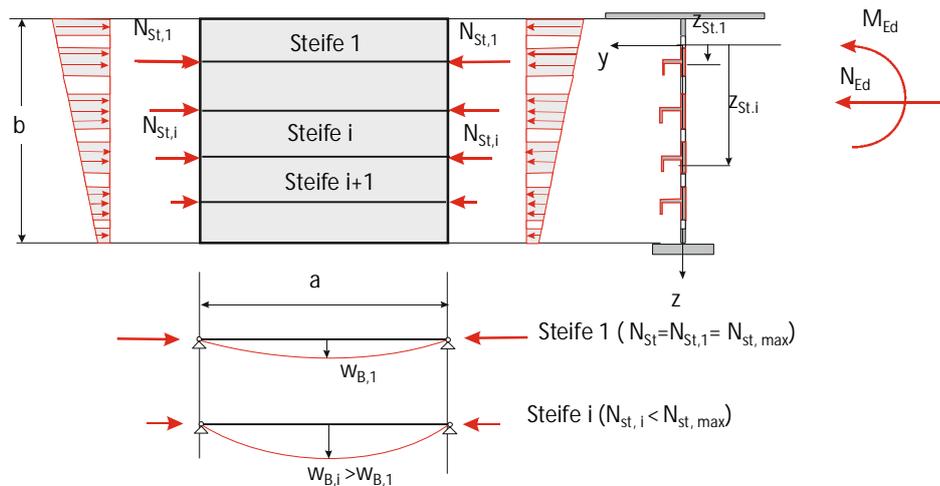


Abb. 3: Beulfeld mit mehreren Längssteifen und unterschiedlichen gemessenen Beulverformungen

Hierzu sind die Normalkräfte $N_{St,i}$ der jeweiligen Steifen i infolge der Bemessungsschnittgrößen N_{Ed} und M_{Ed} im Grenzzustand der Tragfähigkeit am wirksamen Gesamtquerschnitt zu ermitteln. Das Verhältnis von Steifenkraft $N_{St,i}$ zu maximaler Steifenkraft $N_{St,1}$ wird mit $\psi_{St,i}$ bezeichnet. Für die jeweils zu betrachtende Steife i mit der im Vergleich zu Steife 1 geringeren Normalkraft, aber größeren Beulverformung $W_{B,i} > W_{B,1}$ wird die Tragfähigkeit der Steife $N_{Rk,B,St,i}$ nach (2.1) bis (2.6) ermittelt. Der Faktor $\eta_B = \eta_{B,i}$ ergibt sich dann für die betrachtete Steife i zu:

$$\eta_{Bi} = \frac{N_{Rk,B,St,i}}{N_{Rk,o,St,i}} \frac{1}{\psi_{St,i}} \quad (15)$$

- (2.9) Es wird die Beultragfähigkeit für Längsspannungen für das betrachtete Teilfeld nach DIN EN 1993-1-5 entweder mit der Methode der reduzierten Spannungen nach DIN EN 1993-1-5, Abschnitt 10 oder mit der Methode der wirksamen Querschnitte nach DIN EN 1993-1-5, Abschnitt 4 ermittelt. Dabei ist für den Abminderungsbeiwert anstelle des Abminderungsfaktors ρ_c nach DIN EN 1993-1-5, 4.5.4 Gl. (4.13) der modifizierte Wert $\rho_{B,c}$ nach Gl. (16) zu berücksichtigen, wobei bei mehreren Längssteifen der Wert $\eta_{B,i}$ für die Steife mit dem kleinsten Wert $\eta_{B,i}$ zugrunde zu legen ist.

$$\rho_{B,c} = \eta_{B,i} \rho_c \quad \text{mit} \quad \eta_{B,i} = \frac{N_{Rk,B,St,i}}{N_{Rk,o,St,i}} \frac{1}{\psi_{St,i}} \leq 1,0 \quad (16)$$

3 Schubbeulen

Die vergrößerten Vorverformungen der Steifen in Kombination mit einem knickstabähnlichen Verhalten der Längssteifen führen bei Schubbeanspruchung dazu, dass die wirksame Steifigkeit der Längssteifen für das Schubbeulen verringert wird und die Längssteifen bei Ausbildung von Zugfeldern durch zusätzliche Längskräfte beansprucht werden. Wenn keine genaueren Untersuchungen durchgeführt werden, dürfen diese Einflüsse vereinfacht dadurch berücksichtigt werden, dass anstelle des Abminderungsbeiwertes für Schubbeulen χ_w nach DIN EN 1993-1-5, Abschnitt 5 der modifizierte Abminderungsbeiwert χ_{wB} nach Gl. (17) zugrunde gelegt wird.

$$\chi_{wB} = \eta_B \chi_w \quad \text{mit} \quad \eta_B = \frac{N_{Rk,B,St}}{N_{Rk,o,St}} \leq 1,0 \quad (17)$$

4 Interaktion

Der Nachweis der M-N-V-Interaktion erfolgt in Übereinstimmung mit DIN EN 1993-1-5 in Abhängigkeit vom gewählten Nachweisverfahren (Verfahren der wirksamen Breiten oder Verfahren der reduzierten Spannungen) mit den modifizierten Abminderungsbeiwerten nach den Abschnitten 2 und 3. Bei der Anwendung der Methode der wirksamen Breiten ist anstelle der Interaktionsbedingung nach DIN EN 1993-1-5, 4.6 die Interaktionsbedingung nach Anhang B zu verwenden.

5 Ergänzende Regelungen für Beulfelder mit unterschiedlichen Materialgüten bei den Steifen und Blechen

(5.1) Die Regelungen in DIN EN 1993-1-5 setzen voraus, dass bei ausgesteiften Blechen das Blech und die Längs- und Quersteifen die gleiche Materialgüte besitzen. Bei älteren Stahl- und Verbundbrücken wurden teilweise die Bleche in der Materialgüte S355 und die Längs- bzw. Quersteifen in der Materialgüte S235 ausgeführt. Die Streckgrenze des Bleches wird nachfolgend mit f_{yk} und die Streckgrenze der Steife mit $f_{yk,St}$ bezeichnet. Der Einfluss der kleineren Streckgrenze der Steife auf die Tragfähigkeit darf vereinfacht mit den nachfolgenden Regelungen berücksichtigt werden. Dabei ist im ersten Schritt nach (5.2) und (5.3) zu überprüfen, ob die Beulsicherheit des Beulfeldes bei Einhaltung der Herstellungstoleranzen nach DIN EN 1990 erfüllt ist. In einem zweiten Schritt wird dann nach (5.4) und (5.5) überprüft, ob bei einer Überschreitung der Herstellungstoleranzen noch eine ausreichende Beulsicherheit gegeben ist. Bei den nachfolgenden Regelungen wird das Beulfeld, bei dem das Blech und die Steifen die Materialgüte des Stegbleches aufweisen, als Bezugsgröße verwendet.

(5.2) Bei dem Nachweis der Beulfelder nach den Abschnitten 2 bis 4 ist der Einfluss der kleineren Streckgrenze der Längssteife auf die Normalkrafttragfähigkeit mit der nachfolgenden Bedingung (18) zu ermitteln

$$\frac{N_{Rk,o,St}^*}{f_{yk,St} \cdot A_{St,eff}} + \frac{N_{Rk,o,St}^* e_{0,norm}}{f_{yk,St} \cdot I_{z,St,eff}} \gamma_{St,u} \frac{1}{1 - \frac{N_{Rk,o,St}^*}{N_{cr,St}}} \leq 1,0 \quad (18)$$

Auflösen der Bedingung (18) ergibt die infolge der kleineren Streckgrenze der Steife reduzierte Normalkrafttragfähigkeit $N_{Rk,o,St}^*$. Das Verhältnis der Normalkrafttragfähigkeit $N_{Rk,o,St}^*/N_{Rk,o,St}$ mit $N_{Rk,o,St}$ nach Gl. (10) erfasst den tragfähigkeitsmindernden Einfluss der kleineren Streckgrenze der Längssteife.

(5.3) Es wird der Beulnachweis für das betrachtete Teilfeld nach DIN EN 1993-1-5 entweder mit der Methode der reduzierten Spannungen nach DIN EN 1993-1-5, Abschnitt 10 oder mit der Methode der wirksamen Querschnitte nach DIN EN 1993-1-5, Abschnitt 4 und Abschnitt 7 geführt. Dabei ist für den Abminderungsbeiwert für Längsspannungen anstelle des Abminderungsfaktors ρ_c nach DIN EN 1993-1-5, 4.5.4 Gl. (4.13) der modifizierte Wert ρ_{c,f_y} nach Gl. (19) und für den Abminderungsbeiwert für Schubbeulen der modifizierte Wert nach Gl. (20) zu verwenden. Bei Anwendung der Methode der wirksamen Breiten ist anstelle der Interaktion nach DIN EN 1993-1-5, Abschnitt 7 die Interaktionsbedingung nach Anhang B zu verwenden.

$$\rho_{c,f_y} = \eta_{f_y} \rho_c \quad \text{mit} \quad \eta_{f_y} = \frac{N_{Rk,o,St}^*}{N_{Rk,o,St}} \leq 1,0 \quad (19)$$

$$\chi_{w,f_y} = \eta_{f_y} \chi_w \quad \text{mit} \quad \eta_{f_y} = \frac{N_{Rk,o,St}^*}{N_{Rk,o,St}} \leq 1,0 \quad (20)$$

Wenn der Beulnachweis mit den modifizierten Abminderungsbeiwerten nach den Gleichungen (19) und (20) geführt werden kann, weist das Beulfeld unter der Voraussetzung, dass die Herstellungstoleranzen nach DIN EN 1990 eingehalten werden, auch bei abweichenden Streckgrenzen von Steifen und Blechen eine ausreichende Tragfähigkeit auf. Es kann dann in einem zweiten Schritt überprüft werden, ob das Beulfeld unter Berücksichtigung der am Bauwerk gemessenen Beulverformungen und der daraus ermittelten vergrößerten Imperfektion mit den Nachweisen nach (5.4) und (5.5) eine ausreichende Beulsicherheit aufweist.

- (5.4) Der Einfluss der vergrößerten Imperfektionen aus den gemessenen Verformungen am Bauwerk wird in Übereinstimmung mit Abschnitt 2 ermittelt. Anstelle der Bedingung (13) wird jedoch die nachfolgende Bedingung (21) verwendet.

$$\frac{N_{Rk,B,St}^*}{f_{yk,St} \cdot A_{St,eff}} + \frac{N_{Rk,B,St}^* e_{oB}}{f_{yk,St} \cdot I_{z,St,eff}} y_{St,u} \frac{1}{1 - \frac{N_{Rk,B,St}^*}{N_{cr,St}}} \leq 1,0 \quad (21)$$

Die Bedingung (21) liefert die Normalkrafttragfähigkeit der Steife $N_{Rk,B,St}^*$ unter Berücksichtigung der am Bauwerk gemessenen Beulverformung und der gegenüber dem Blech kleineren Streckgrenze der Längssteife. Das Verhältnis der Normalkrafttragfähigkeit $N_{Rk,B,St}^*/N_{Rk,o,St}$ mit $N_{Rk,o,St}$ nach Gl. (10) erfasst den tragfähigkeitsmindernden Einfluss der kleineren Streckgrenze und der vergrößerten Imperfektion der Längssteife an.

- (5.5) Es wird der Beulnachweis für das betrachtete Teilfeld nach DIN EN 1993-1-5 entweder mit der Methode der reduzierten Spannungen nach DIN EN 1993-1-5, Abschnitt 10 oder mit der Methode der wirksamen Querschnitte nach DIN EN 1993-1-5, Abschnitt 4 und Abschnitt 7 geführt. Dabei ist für den Abminderungsbeiwert für Längsspannungen anstelle des Abminderungsfaktors ρ_c nach DIN EN 1993-1-5, 4.5.4 Gl. (4.13) der modifizierte Wert ρ_{c,f_y}^* nach Gl. (22) und für den Abminderungsbeiwert für Schubbeulen χ_w nach DIN EN 1993-1-5, Abschnitt 5 der modifizierte Wert χ_{w,f_y}^* nach Gl. (23) zu verwenden. Bei Anwendung der Methode der wirksamen Breiten ist anstelle der Interaktion nach DIN EN 1993-1-5, Abschnitt 7 die Interaktionsbedingung nach Anhang B zu verwenden.

$$\rho_{c,f_y}^* = \eta_{f_y}^* \rho_c \quad \text{mit} \quad \eta_{f_y}^* = \frac{N_{Rk,B,St}^*}{N_{Rk,o,St}} \leq 1,0 \quad (22)$$

$$\chi_{w,f_y}^* = \eta_{f_y}^* \chi_w \quad \text{mit} \quad \eta_{f_y}^* = \frac{N_{Rk,B,St}^*}{N_{Rk,o,St}} \leq 1,0 \quad (23)$$

- (5.6) Bei mehreren Längssteifen mit unterschiedlichen Steifennormalkräften und unterschiedlichen gemessenen Beulverformungen erfolgt die Berechnung zur Erfassung der unterschiedlichen Normalkraftbeanspruchungen in den Steifen analog zu (2.8).

6 Nachweis der Quersteifen

- (6.1) Bei Kastenquerschnitten ist für gedrückte Gurtbereiche für die Quersteifen von in Längsrichtung ausgesteiften Beulfeldern nach DIN EN 1993-1-5, 9.2.1 ein Tragfähigkeitsnachweis nach Elastizitätstheorie II. Ordnung unter Berücksichtigung einer geometrischen Ersatzimperfektion der Quersteife und unter Berücksichtigung der aus den druckbean-

spruchten Längssteifen resultierenden Abtriebskräfte erforderlich. Der Berechnung liegen die in Abb. 4 dargestellten Systemannahmen zugrunde. Die am Bauwerk gemessene Imperfektion ist der aus der Steifenkrümmung resultierende maximale Stich $w_{m,B}$ in Quersteifenmitte. In DIN EN 1993-1-5 wird bei planmäßiger Ausführung von einer geometrischen Ersatzimperfektion $e_{o,norm} = s/300$ ausgegangen, wobei s der kleinste Wert von b_G oder a_1 bzw. a_2 ist (siehe Abb. 4).

$$e_{o,norm} = e_{o,geom} + e_{o,struk} \quad (24)$$

Mit der Herstellungstoleranz $e_{o,geom} = s/400$ nach DIN EN 1990 ergibt sich der strukturelle Imperfektionsanteil zu $e_{o,strukt} = 0,33 e_{o,norm}$.

- (6.2) Die gemessenen Verformung $w_{m,B}$ des Querträgers nach Abb. 4 wird mit Hilfe der Gl. (25) auf die spannungslose geometrische Vorverformung $e_{oB,geom}$ zurückgerechnet. Wenn die rückgerechnete Imperfektion $e_{oB,geom}$ kleiner als $s/400$ ist, kann auf weitere Nachweise verzichtet werden.

$$e_{oB,geom} = w_{m,B} \left[1 - \frac{1}{\eta_{cr}} \right] \quad (25)$$

- (6.3) Die für den rechnerischen Nachweis der Quersteife maßgebende geometrische Ersatzimperfektion e_{oB} unter Berücksichtigung der am Bauwerk gemessenen Verformungen ergibt sich mit Abb.4 nach Gl. (26).

$$e_{oB} = e_{oB,geom} + 0,33 e_{o,norm} \quad (26)$$

- (6.4) Für die Quersteife ist dann ein Tragfähigkeitsnachweis nach Elastizitätstheorie II. Ordnung mit der geometrischen Ersatzimperfektion e_{oB} nach Gl. (26) zu führen. Weisen die Quersteifen und die Bleche unterschiedliche Streckgrenzen auf, so sind beim Nachweis der Grenzspannungen die unterschiedlichen Bemessungswerte der Streckgrenze von Quersteife und Blech zu berücksichtigen.

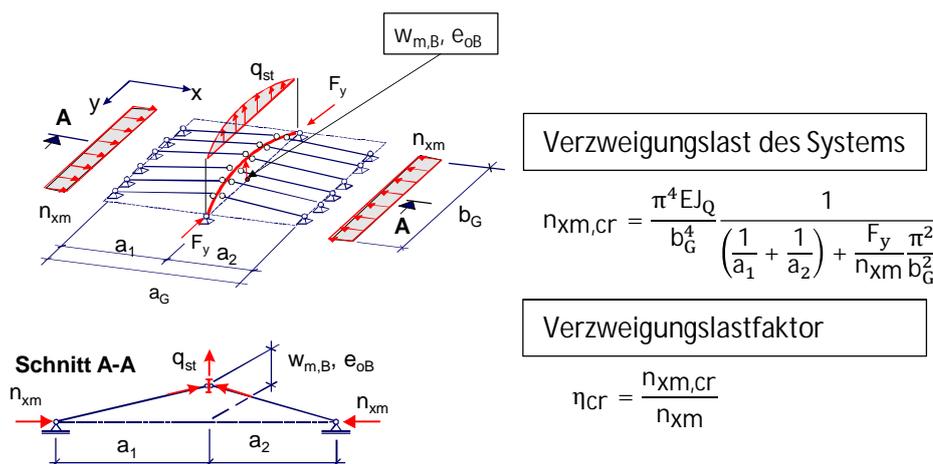


Abb. 4: Berechnung der Quersteifen in den Bodenblechen von Kastenträgern

Verwendete Begriffe und Abkürzungen

w_B	am Bauwerk zwischen zwei Quersteifen unter Last gemessene größte Verformung der Längssteife aus der Steifenkrümmung senkrecht zur Blechebene (siehe Abb. 1)
$w_{m,B}$	die bei Kastenquerschnitten im Bereich gedrückter Gurte am Bauwerk gemessene größte Verformung einer Quersteife senkrecht zur Blechebene des Untergurtes (siehe Abb. 4)
$e_{oB,geom}$	für den Tragfähigkeitsnachweis der Steifen zu berücksichtigende geometrische Imperfektion ermittelt durch Rückrechnung aus den Messungen der Verformungen am Bauwerk
$e_{o,struk}$	für den Tragfähigkeitsnachweis zu berücksichtigende strukturelle Imperfektion zur Erfassung des Einflusses von Eigenspannungen aus dem Schweißen oder Walzen
e_{oB}	für den Tragfähigkeitsnachweis zu berücksichtigende geometrische Ersatzimperfektion, die den Einfluss der gemessenen Verformungen berücksichtigt $(e_{oB} = e_{oB,geom} + e_{o,struk})$.
$e_{o,geom}$	der normativ vorgegebene geometrische Anteil der normativen geometrischen Ersatzimperfektion
$e_{o,norm}$	die normativ vorgegebene geometrische Ersatzimperfektion $(e_{o,norm} = e_{o,geom} + e_{o,struk})$
$N_{Rk,o,St}$	Normalkrafttragfähigkeit der Längssteife, berechnet mit dem wirksamen Querschnitt und der normativen geometrischen Ersatzimperfektion $e_{o,norm}$. Das Blech des Beulfeldes und die Längssteifen besitzen die gleiche Streckgrenze.
$N_{Rk,B,St}$	Charakteristischer Wert der Normalkrafttragfähigkeit der Längssteife, berechnet mit dem wirksamen Querschnitt und der aus den gemessenen Beulverformungen am Bauwerk rückgerechneten geometrischen Ersatzimperfektion e_{oB} . Das Blech des Beulfeldes und Längssteifen besitzen die gleiche Streckgrenze.
$N_{Rk,o,St}^*$	Charakteristischer Wert der Normalkrafttragfähigkeit der Längssteife, berechnet mit dem wirksamen Querschnitt und der normativen geometrischen Ersatzimperfektion $e_{o,norm}$. Das Blech des Beulfeldes hat die Streckgrenze f_{yk} und die Längssteifen die Streckgrenze $f_{yk,St} \leq f_{yk}$
$N_{Rk,B,St}^*$	Charakteristischer Wert der Normalkrafttragfähigkeit der Längssteife, berechnet mit dem wirksamen Querschnitt und der aus den gemessenen Beulverformungen am Bauwerk rückgerechneten geometrischen Ersatzimperfektion e_{oB} . Das Blech des Beulfeldes hat die Streckgrenze f_{yk} und die Längssteifen die Streckgrenze $f_{yk,St} \leq f_{yk}$

Ergänzungen und Hinweise zum Beulnachweis nach der Methode der wirksamen
Querschnitte von in Längsrichtung ausgesteiften Beulfeldern
unter Berücksichtigung von gemessenen Beulverformungen

1 Beulen infolge Längsspannungen

Zum Nachweis der Längsspannungen gelten die Regelungen von DIN EN 1993-1-5:2019. Nur wenn die gemessene Imperfektion größer als die im Obmannschreiben 2022-02 genannten vergrößerten Toleranzwerte nach DIN EN 1090-2 bzw. ZTV-ING sind, muss für den Gesamtfeldnachweis das modifizierte $\rho_{B,c}$ nach Gl. (16) im Anhang A angewendet werden. D. h. die Abminderungsbeiwerte für plattenartiges (ρ_p) und knickstabähnliches Verhalten (χ_c) sind zu ermitteln und anschließend ist anstelle des endgültigen Abminderungsbeiwertes ρ_c der modifizierte Abminderungsbeiwert $\rho_{B,c}$ nach Anhang A, Gl. (16) für den Nachweis zugrunde zu legen. Der wirksame Querschnitt ist dann mit dem modifizierten Abminderungsbeiwert $\rho_{B,c}$ zu bestimmen. Der Nachweis ist unter Berücksichtigung des ermittelten wirksamen Querschnitts nach DIN EN 1993-1-5:2019 Abschnitt 4.6 zu führen.

Bei Beulfeldern mit unterschiedlichen Streckgrenzen der Bleche und Steifen sind die Abminderungsbeiwerte nach Anhang A, Abschnitt 5 zu ermitteln.

2 Beulen infolge Schubspannungen

Der Schubbeulnachweis ist nach DIN 1993-1-5:2019, Abschnitt 5 zu führen. Ist die Imperfektion größer als die im Obmannschreiben 2022-02 genannten vergrößerten Toleranzwerte nach DIN EN 1990-2 bzw. ZTV-Ing, ist für den Schubbeulnachweis der Abminderungsbeiwert χ_{wB} nach Anhang A, Gl. (17) anzuwenden.

3 Beulen infolge Interaktion zwischen Schub, Biegemoment und Normalkraft (N-M-V)

Die Interaktion zwischen Schubkraft, Biegemoment und Normalkraft muss nach den folgenden Regeln nachgewiesen werden, die die Regelungen von DIN EN 1993-1-5 Abschnitt 7.1 ersetzen. Der Nachweis ist unter Berücksichtigung des ermittelten wirksamen Querschnitts und gegebenenfalls des modifizierten Abminderungsfaktors χ_{wB} zu führen.

(3.1) Vorausgesetzt, dass $\bar{\eta}_3$ nach Gl. (3) kleiner als 0,5 ist, darf der Einfluss der Schubkräfte auf die Beanspruchbarkeit für Biegemoment und Normalkraft vernachlässigt werden. Falls $\bar{\eta}_3$ größer als 0,5 ist, ist in der Regel für die gemeinsame Wirkung von Biegung und Schub im Steg von I-Trägern oder von Kastenträgern die folgende Bedingung zu erfüllen:

$$\eta_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rk}}{M_{eff,Rk}}\right) \cdot (2 \cdot \bar{\eta}_3 - 1)^\mu \leq 1,0 \quad \text{für } \eta_1 \geq \frac{M_{f,Rk}}{M_{eff,Rk}} \quad (1)$$

Dabei ist:

$M_{f,Rk}$ der charakteristische Wert der plastischen Biegemomentenbeanspruchbarkeit des Querschnitts, der nur aus der effektiven Querschnittsflächen der Flansche besteht;

$$M_{eff,Rk} = W_{y,eff} \cdot f_y \quad (2)$$

η_1 siehe DIN EN 1993-1-5, Abschnitt 4.6

$$\bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}} \quad \text{für } V_{bw,Rd} \text{ siehe Gl. (5.2) in DIN EN 1993-1-5} \quad (3)$$

$$\mu = \left(\frac{M_{f,Rk}}{M_{eff,Rk}} + 0,2 \right)^{15} + 1 \quad (4)$$

- (3.2) Die Schnittgrößen sollten gegebenenfalls nach Theorie II. Ordnung ermittelt werden.
- (3.3) Das Kriterium nach (3.1) sollte an allen Querschnitten nachgewiesen werden, es braucht jedoch nur im Bereich außerhalb des Abstandes $0,5 \cdot h_w$ von einem Auflager mit Quersteifen erfüllt zu werden.
- (3.4) Der charakteristische Wert $M_{f,Rk}$ der plastischen Biegemomentenbeanspruchbarkeit des Querschnitts, der aus der effektiven Querschnittsfläche nur der Flansche besteht, darf als Produkt der effektiven Fläche des Flansches und der Streckgrenze mit dem kleineren Wert von $(A_f \cdot f_y)$ multipliziert mit dem Abstand zwischen den Schwerelinien der Flansche bestimmt werden.
- (3.5) Wirkt zusätzlich eine Normalkraft N_{Ed} ein, sollte $M_{eff,Rk}$ nach DIN EN 1993-1-1, 6.2.9 und $M_{f,Rk}$ nach DIN EN 1993-1-5, 5.4(2) reduziert werden. Ist die Normalkraft so groß, dass sich der gesamte Steg unter Druckbeanspruchung befindet, sollte Anhang B.3 (6) angewendet werden.
- (3.6) Der Flansch eines Kastenträgers sollte nach Anhang B.3 (1) nachgewiesen werden, wobei $M_{f,Rk} = 0$ und τ_{Ed} als Mittelwert der Schubspannung im Flansch mit mindestens der Hälfte der maximalen Schubspannung im Flansch angesetzt werden sollten. Schubspannungen sollten sich aus den Anteilen aus Querkräften und Torsion zusammensetzen. Zusätzlich sollten die Einzelfelder mit dem Mittelwert der Schubspannung in den Einzelfeldern und dem für Schubbeulen des Einzelfeldes nach DIN EN 1993-1-5 Abschnitt 5.3 ermittelten Abminderungsfaktor χ_w (ggf. χ_{wB}) nachgewiesen werden, wobei starre Randlagerung an den Längssteifen angenommen wird.

Beispiel für die Anwendung des Anhang A

geometrische Angaben

Blechedicke	t = 20 mm
Beulfeldlänge	a = 250 cm
Beulfeldbreite	b = 509 cm
Einzelfeldbreite	b ₁ = 740 mm
Einzelfeldbreite	b ₂ = 1060 mm
Steißenquerschnitt	L 135x65x8 mm
Steißenquerschnitt	Steiße offen od. geschlossen? offen (auswählen)
Höhe Steife	h _{St} = 135 mm
Breite Steife	b _{St} = 65 mm
Stegdicke Steife	t _{St} = 8 mm
Schwerpunkt Steife	Y _u = 4,78 cm

Materialangaben

Stahlgüte Blech	S 355 (auswählen)
Streckgrenze Blech	f _{yk,Bl} = 35,5 kN/cm ²
Stahlgüte Steife	S 355 (auswählen)
Streckgrenze Steife	f _{yk,st} = 35,5 kN/cm ²

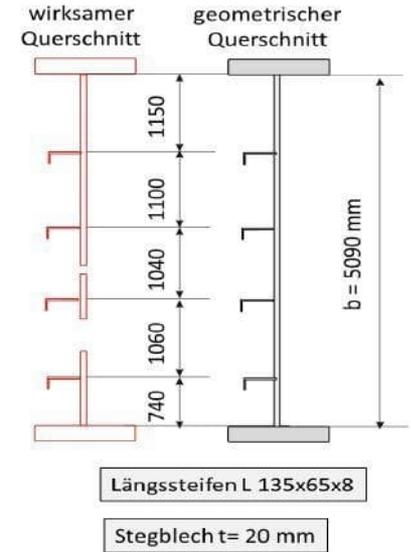
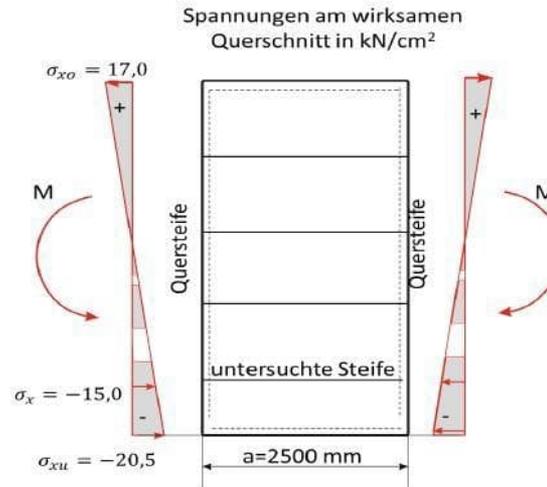
Beanspruchung

Normalspannung	σ _{x,ständig,k} = 15,0 kN/cm ²
----------------	--

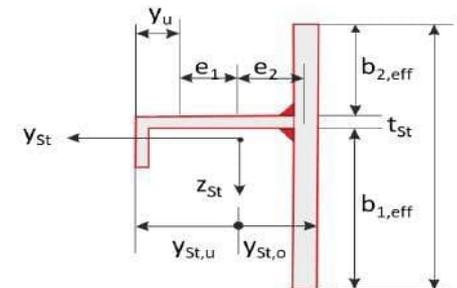
effektive Querschnittswerte der Steife inkl. Blechstreifen

effektive Breite des Bleches	b _{1,eff} = 366,0 mm
effektive Breite des Bleches	b _{2,eff} = 377,9 mm
effektive Gesamtbreite des Bleches	b _{eff} = 751,9 mm
Querschnittsfläche	A _{St,eff} = 165,7 cm ²
Flächenträgheitsmoment	I _{z,St,eff} = 1637,5 cm ⁴
Schwerpunkt eff. Beulsteife	Y _{St,o} = 1,9 cm
Schwerpunkt eff. Beulsteife	Y _{St,u} = 13,6 cm
Schwerpunktsabstand nach Abb.1	e ₁ = 8,8 cm
Schwerpunktsabstand nach Abb.1	e ₂ = 0,9 cm

Verzweigungslast	N _{cr,st} = 5430 kN
einwirkende Drucknormalkraft in der Steife	N _{Gk,st} = 2486 kN



$< 0,5 \cdot b_1 - 0,5 \cdot t_{St}$
 $< 0,5 \cdot b_2 - 0,5 \cdot t_{St}$
 $= b_{1,eff} + b_{2,eff} + t_{St}$
 Wert aus Nebenrechnung ermittelt
 Wert aus Nebenrechnung ermittelt
 von OK Blech
 von UK Steife
 von Schwerpunkt eff. Steife bis Schwerpunkt L-Winkel
 von Schwerpunkt eff. Steife bis Schwerpunkt Blech



Gleichung (1 rechts)
 $= \sigma_{x,ständig,k} \cdot A_{St,eff}$

Schritt 1 (Punkt B nach Abb.2): Rückrechnung der gemessenen Verformung auf geometrischen Anteil der spannungslosen Vorverformung

gemessene Verformung am Bauwerk

$w_B = 10 \text{ mm}$

rückgerechnete Vorverformung der spannungslosen Werkstattform

$e_{0B,geom} = 5,4 \text{ mm}$

$$= w_B \cdot \left[1 - \frac{N_{Gk,St}}{N_{cr,St}} \right] \quad \text{Gleichung (1 links)}$$

Schritt 2 (Punkt C nach Abb.2): Ermittlung der normativen Ersatzimperfektion nach DIN EN 1993-1-1 und DIN EN 1993-1-5

elast. Normalkrafttragfähigkeit

$N_{Rk,St} = 5884 \text{ kN}$

$= f_{yk} \cdot A_{St,eff} \quad \text{Gleichung (5)}$

elast. Momententragfähigkeit

$M_{Rk,St} = 4272 \text{ kNcm}$

$= f_{yk} \cdot I_{z,St,eff} / y_{St,u} \quad \text{Gleichung (6)}$

bezogener Schlankheitsgrad

$\bar{\lambda} = 1,04$

$\quad \text{Gleichung (4)}$

Trägheitsradius der Steife

$i = 3,14 \text{ cm}$

$\quad \text{Gleichung (9)}$

Imperfektionsbeiwert

$\alpha = 0,74$

$\quad \text{Gleichung (7 bzw. 8)}$

normative Ersatzimperfektion

$e_{0,norm} = 4,5 \text{ mm}$

$$= \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) \cdot \frac{M_{Rk,St}}{N_{Rk,St}} \quad \text{Gleichung (3)}$$

Schritt 3 (Punkt C nach Abb.2): Bestimmung der Normalkrafttragfähigkeit nach Theorie II. OrdnungNormalkrafttragfähigkeit unter Berücks. e_0

$N_{Rk,0,St} = 2650 \text{ kN}$

$$\frac{N_{Rk,0,St}}{f_{yk} \cdot A_{St,eff}} + \frac{N_{Rk,0,St} e_{0,norm}}{f_{yk} \cdot I_{z,St,eff}} y_{St,u} \frac{1}{1 - \frac{N_{Rk,0,St}}{N_{cr,St}}} \leq 1,0$$

Schritt 4 (Punkt C nach Abb.2): Bestimmung des strukturellen Imperfektionsanteils

struktureller Imperfektionsanteil

$e_{0,struk} = 2,3 \text{ mm}$

$= \alpha_e \cdot e_{0,norm} \quad \text{Gleichung (11)}$

$\alpha_e = 0,5$

$= \alpha_e = 0,5 \text{ (offene Steifen); } \alpha_e = 0,4 \text{ (geschlossene Steifen)}$

Schritt 5 (Punkt D nach Abb.2): Bestimmung der Ersatzimperfektion unter Berücksichtigung der gemessenen Verformung

Ersatzimperfektion

$e_{0,B} = 7,7 \text{ mm}$

$= e_{0B,geom} + e_{0,struk} \quad \text{Gleichung (12)}$

Schritt 6 (Punkt D nach Abb.2): Bestimmung der reduzierten Normalkrafttragfähigkeit unter Berücksichtigung der gemessenen VerformungNormalkrafttragfähigkeit unter Berücks. $e_{0,B}$

$N_{Rk,B,St} = 2140 \text{ kN}$

$$\frac{N_{Rk,B,St}}{f_{yk} \cdot A_{St,eff}} + \frac{N_{Rk,B,St} e_{0B}}{f_{yk} \cdot I_{z,St,eff}} y_{St,u} \frac{1}{1 - \frac{N_{Rk,B,St}}{N_{cr,St}}} \leq 1,0$$

Schritt 7: Bildung des Verhältnisses der Normalkrafttragfähigkeiten

$\eta_B = 0,81$

$= N_{Rk,B,St} / N_{Rk,0,St} \quad \text{Gleichung (14)}$