

Untersuchungen zum Beulnachweis nach DIN EN 1993-1-5

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 140

bast

Untersuchungen zum Beulnachweis nach DIN EN 1993-1-5

von

Ulrike Kuhlmann
Christina Schmidt-Rasche

Ingenieurbüro Prof. Dr.-Ing. U. Kuhlmann
Ostfildern-Nellingen

Jörg Frickel

Meyer+Schubart Partnerschaft Beratender Ingenieure VBI
Wunstorf

Vahid Pourostad

Institut für Konstruktion und Entwurf
Universität Stuttgart

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 140

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M - Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Schünemann Verlag GmbH, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 89.0313/2015:
Untersuchungen zum Beulnachweis nach DIN EN 1993-1-5

Fachbetreuung:
Heinz Friedrich

Herausgeber
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

Redaktion
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag
Fachverlag NW in der
Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9293
ISBN 978-3-95606-354-1

Bergisch Gladbach, Oktober 2017

Kurzfassung · Abstract

Untersuchungen zum Beulnachweis nach DIN EN 1993-1-5

Die Bemessung schlanker plattenförmiger Bauteile, die sich aus ebenen, unversteiften oder versteiften Blechen zusammensetzen und die in ihrer Ebene beansprucht sind, erfolgt nach DIN EN 1993-1-5:2010.

Diese Beulnachweise können nach DIN EN 1993-1-5 mittels zweier Nachweiskonzepte, die Methode der wirksamen Breiten in Abschnitt 4-7 und die Methode der reduzierten Spannungen in Abschnitt 10, durchgeführt werden.

Die Methode der reduzierten Spannungen ist im Eurocode sehr kurz dargestellt und mit vielen Querverweisen auf andere Abschnitte beschrieben, so dass die Gefahr besteht, diese falsch zu interpretieren. Deshalb ist es notwendig, Abs. 10 deutlicher und klarer zu strukturieren.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Beispiele mit beiden Methoden untersucht und die Ergebnisse verglichen. Aus der Vergleichsuntersuchung wurden Empfehlungen für die Auswahl des geeigneten Berechnungsverfahrens zusammengestellt. Zu allen wesentlichen Punkten der Nachweisführung wurden Hinweise und Klarstellungen gegeben, die den aktuellen Stand der Technik wiedergeben.

Außerdem wurde eine verbesserte Version von DIN EN 1993-1-5 Abs. 10 so ausgearbeitet, dass dieser anwendungsfreundlicher und klarer wird. Mit den Ergebnissen wurden Handlungsempfehlungen in Form eines Flussdiagramms für die Praxis entwickelt und ein Vorschlag für die aktuell stattfindende Weiterentwicklung des EC 3 in Englisch.

Investigations on the plate buckling verification according to DIN EN 1993-1-5

Slender plated structures, which are composed of flat, unstiffened or stiffened plates subjected to in-plane forces are designed according to DIN EN 1993-1-5:2010.

The design for plate buckling according to DIN EN 1993-1-5 can be done using two design methods: Method of effective widths, section 4-7 and the reduced stress method, section 10.

The reduced stress method is shown very briefly in the Eurocode and with many cross references to other sections, so that there is a danger to misinterpret this method. Therefore, it is necessary to structure section 10 more clearly and distinctly.

In the framework of the research project, examples were investigated with both methods and the results have been compared. From these comparative studies, recommendations for the selection of the appropriate design method were compiled. For all essential aspects of the verification method, guidance notes and clarifications were given which reflect the current state of art.

In addition, an improved version of DIN EN 1993-1-5 section 10 was worked out that it is more user-friendly and clearer. With the results, recommended actions were developed in the form of a flow-chart for practice and a proposal for the ongoing enhancements of the EC 3 in English.

Summary

Investigations on the plate buckling verification according to DIN EN 1993-1-5

1 Task

The design of slender plate structures is carried out according to DIN EN 1993-1-5:2010, which basically provides two different concepts for the analysis in the ultimate limit state to structural engineer to choose from. The "Effective widths method" verifies the individual acting loads and allows using the strength reserves. In the next step, the interaction between the various acting forces should be considered. The second concept for the analysis is the "reduced stresses method" a classical concept, which limits the allowable stresses in the plate and uses a kind of von-Mises-criterion to check the stresses, where the reduction is a function of the slenderness which is applied to each subpanel as well as the whole cross-section. This calculation method prevails from within history as in Germany the one traditionally applied.

However, the stress redistribution is not considered in less utilized part of section, opposed to the effective widths method, which leads to conservative results. On the other hand, the reduced stress method is known as a "general method", it can theoretically be applied to any geometry and it allows the analysis of the plate under complex multiaxial stress states.

In DIN EN 1993-2/NA:2012 is explicitly noted that the reduced stresses method has to apply for longitudinally stiffened plates. In contrast, for example in France using the reduced stresses method in bridge design is not allowed and instead the effective width method has to be used. This shows the problem of the acceptance of reduced stresses method in Europe. The potential misinterpretation of section 10 in DIN EN 1993-1-5:2010 may arise due to the very brevity and numerous cross-references to other sections.

In addition, due to the requests to the mirror committee and several current research results, some clarification and changes in the content of DIN EN 1993-1-5:2010 is needed. That has been reflected substantially in the National Annex of DIN EN 1993-1-5:2010 but its readability did not improve and European know only partly about this development.

In order to avoid incorrect use and to promote the acceptance of this method in other countries, section 10 should be explained clearly and be revised

textually. Aim of this project is to compare two design methods that mentioned above by means of analyzing the examples and to show their analyzing processes in detail.

Differences in the utilizations and the amount of calculation in both methods should be investigated. To choose the correct method for specific cases recommendations should be given and possible deficiencies or (mis-) interpretations should be identified.

Within the frame of this research project the concept should be described and be developed to ensure the user-friendliness, safety, and clarity of section 10 of DIN EN 1993-1-5:2010.

For this, a proposal for an improved version of this section will be elaborated, which can be integrated in the next generation of DIN EN 1993-1-5:2010 in the context of the review of the Eurocodes.

2 Examination methods

Within the framework of this research project emphases were divided into the section A) Current state of standardization and technology, B) Selected examples and conclusions and in section C) was carried out the development of an improved version of DIN EN 1993-1-5:2010 section 10.

In the first section, the current state of standardization and technology has been given and described. Then the similarities and differences between effective width method and reduced stresses method were discussed.

In addition the new developments in the section 4-7 and 10 of DIN EN 1993-1-5:2010 that have been decided by TC250/SC3 ((NA005-08-23AA) Stahlbrücken N0604 (2015)), considered as well as the rules of national Annex to DIN EN 1993-1-5:2010.

This new developments or changes to DIN EN 1993-1-5:2010 have been discussed and decided in the working group TC250/SC3/WG5 in the Eurocode 3 responsible committee TC250/SC3. These changes are summarized in this research project and demonstrated their application in the calculated examples. In the following a development or change is shown as an example:

Contribution for section 10, (equation 10.5) V-Factor Biaxial compression TC250/SC3/N2128 (AM-1-5-2015-02)

In (BRAUN, B., 2010) the interaction behavior of unstiffened plates under biaxial compression has been investigated by using the reduced stresses method. It has been shown that Eq. (10.5) may lead to unsafe results for plates under biaxial com-

pression. A V-factor as a modification factor of Eq. (10.5) has been proposed.

To modify the interaction curve for multiaxial stresses, an interaction equation similar to that in DIN 18800-3:2008 was proposed in the dissertation (BRAUN, B., 2010) for unstiffened plates in the case of pressure / pressure. Thus, the interaction equation was modified by the factor V:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\rho_x \cdot f_y / \gamma_{M_1}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{\rho_z \cdot f_y / \gamma_{M_1}}\right)^2 - V \cdot \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\rho_x \cdot f_y / \gamma_{M_1}}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{\rho_z \cdot f_y / \gamma_{M_1}}\right) + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{Ed}}{\chi \cdot f_y / \gamma_{M_1}}\right)^2 < 1$$

$V = \rho_x \cdot \rho_z$, when or plates under biaxial compression, else $V = 1$

In recent years, relevant examples have been published in a wide range. They contain the verification with effective width method and reduced stresses method according to DIN EN 1993-1-5:2010.

These can be found in: ECCS Design Manual (BEG, D., et al., 2010) the handbook of the European research project COMBRI+ (KUHLMANN, U., et al., 2008) the final report of the DAST Aif project (SEDLACEK, G., et al., 2008) and various article of Stahlbaukalender (TIMMERS, R., et al. 2015) and (BRAUN, B., KUHLMANN, U., 2009) an ongoing RFCS research project OPTBri (REIS, A., PEDRO, J.O. et al.). The examples mentioned above were compiled and their results summarized.

In addition, examples of (SCHEER, J, GENTZ, E, 1994) are of interest, because these are standard examples of the former standard generations and the results and verifications based on DAST Richtlinie 012 (SCHEER, J., NÖLKE, H., und GENTZ, E., 1979) and DIN 18800-3:2008. Thus, a comparison with the previous rules is possible. In this context, the bottom flange and web plates were verified with both methods, see Figure. 1 to 3. These include all significant issues related to the interpretation and application of the current rules and worth to be discussed. While investigating the examples both analysis concepts (effective width method and reduced stresses method) were demonstrated in detail and assumptions for proof of critical points discussed in detail.

3 Research results

3.1 Notifications and clarifications of the verification

Within the framework of this research project, to all essential points of the verification hints and clarifications were given

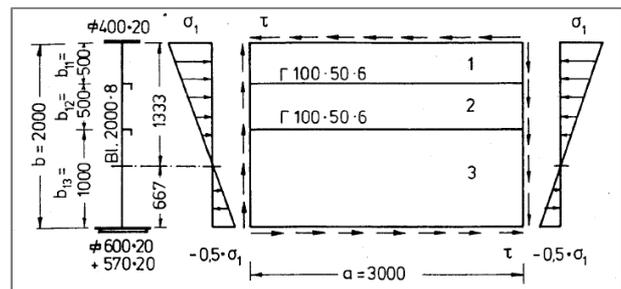


Figure 1: Example 1 – web plate – geometry and acting forces (SCHEER, J, GENTZ, E, 1994)

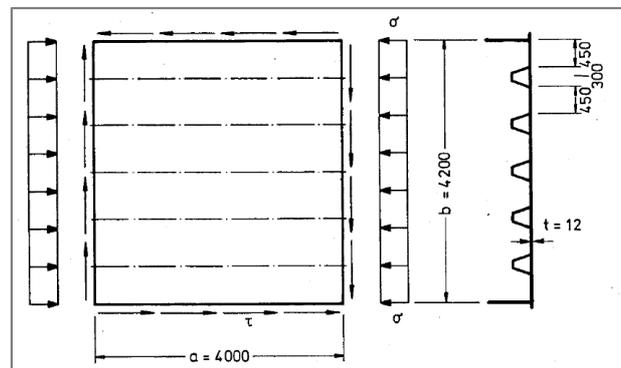


Figure 2: Example 2 – bottom flange – geometry and acting forces (SCHEER, J, GENTZ, E, 1994)

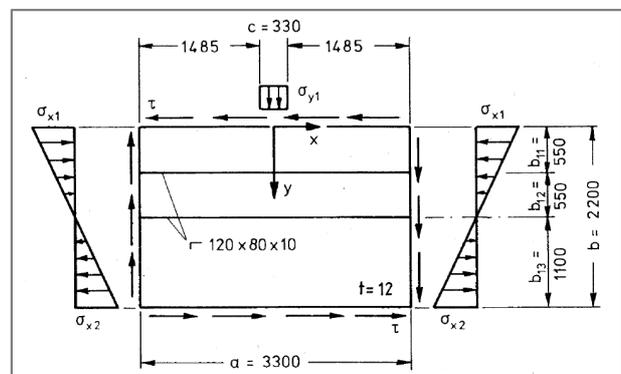


Figure 3: Example 3 – web plates – geometry and acting forces (SCHEER, J, GENTZ, E, 1994)

This condition (2016 May) is defined by DIN EN 1993-1-5:2010 and already at the time of preparation of this research report in the standards committees adopted amendments.

The explanations mainly refer to the rules of reduced stresses method (DIN EN 1993-1-5:2010 section 10).

At this point, some of these clarifications will be mentioned:

- Local and global verification
- Modified slenderness and reductions factors
- Minimum requirements for stiffeners
- Column like behavior of plate
- Stiffness of longitudinal open stiffener for shear buckling
- Transverse stresses of panel under patch loading
- Global analysis for plate under biaxial stresses
- Considering the tension stresses

3.2 Recommendations for the calculation acc. section 10

The analysis acc. section 10 divided in to two steps:

- A) Local buckling analysis of all subpanels
- B) Global buckling analysis of stiffened panel or rather buckling the stiffening elements

A) Local buckling analysis of all subpanels

Basically, there are two alternatives to verify the subpanels. In the variant a1), all subpanels are removed with their corresponding stresses from the whole panel. Their edge (limited by stiffeners, transverse frames, etc.) are hinged supported. If column-like behavior has to be considered, then the buckling curve a ($\alpha = 0,21$) should be used. The determination of the boundary stresses in the transverse direction can be carried out by means of the theory of panel.

This approach has the advantage to be able in many cases to eliminate finite element analysis, because the buckling values for each component can be determined by formulas of DIN EN 1993-1-5:2010 Tables 4.1 and 4.2, Annex A.3 or from literature. With the help of DIN EN 1993-1-5: 2010 eq. (10.6) α_{cr} can be determined under combined acting stresses. For such cases, Eq. (10.6) often provides a good approximation also some programs, such as EBPlate 2.01 may provide the possibility of determining more accurate α_{cr} . In such cases, always the smallest α_{cr} is authoritative and the determination of the column-like behavior can be done simply. The procedure described has the advantage of efficient processing by spreadsheet programs for practical construction applications with many different buckling field and stresses.

As an alternative to this procedure, local buckling can also take place in the whole plate. In this way, for example, the beneficial effect of different sub-

panels on each other are considered. It should be ensured that the elected eigenforms represent a local buckling of the subpanel. If column-like behavior has to be considered, then the buckling curve b ($\alpha = 0,34$ for closed section stiffeners) or buckling curve c ($\alpha = 0,49$ for open section stiffeners) should be used. The proportion of the stiffeners (0.09 e/i) is not used because of the subpanel verification. Furthermore, for column-like behavior it is important that in the considered direction (for example, z-direction) corresponding edges should be removed, to eliminate the load-carrying effect of plate in the calculation. Although the longitudinal stiffeners should not be removed. Because plate-like and column like behavior should be determined in similar systems with identical boundary conditions and the flexibility of the stiffeners should be included.

B) Global buckling analysis

If at least three similar stiffeners are available in the compression zone, the calculation should be performed as an equivalent orthotropic plate, e.g. according to DIN EN 1993-1-5: 2010 Annex A.1 or by means of a FEM calculation (without local buckling). For the selection of the relevant buckling should be ensured that it is an eigenform and local buckling cannot be included. In all other cases, i.e., the plate with only one or two stiffeners in the compression zone, a suitable discrete model must be used. For modeling and computing of longitudinal stiffeners in compression (without transverse stresses) DIN EN 1993-1-5: 2010 has a recommendation in annex A.2. For shear stresses information is given in EN 1993-1-5: 2010 Annex A.3.

For the special case of the global analysis of longitudinally stiffened panels under biaxial stress and possibly shear, the critical buckling stress can be determined in the z direction by framework model.

4 Proposal for section 10 of DIN EN1993-1-5

10. General method

General

(1) This method is an alternative to the effective width method specified in section 4 to 7. It can be used for unstiffened or stiffened panels.

(2) Stiffeners and detailing of plate panels should be designed according to section 9.

(3) The resistance of the plate is determined under the corresponding complete stress field, which means that $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{z,Ed}$ and τ_{Ed} are considered as acting together. It can be used for all kinds of cross section with stiffened and unstiffened plates by determining the stress limits, see 10.2.

NOTE: Applying this method, the stress limits of the weakest part of the cross section may govern the resistance of the full cross section.

(4) For plates with stiffeners the global buckling of the stiffened panel and the local buckling of the various subpanels between the stiffeners should be verified, see 10.2

NOTE: Global buckling also involve the buckling of the stiffeners and panel.

Buckling verification

(1) The buckling verification of unstiffened and stiffened panels should be satisfied by the following equation:

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\rho_{c,x}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{\rho_{c,z}}\right)^2 - V \cdot \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\rho_{c,x}}\right)\left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{\rho_{c,z}}\right) + 3\left(\frac{\tau_{Ed}}{\chi_w}\right)^2} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (10.1)$$

where

$V = \rho_{c,x} \cdot \rho_{c,z}$ when $\sigma_{x,Ed}$ and $\sigma_{z,Ed}$ are both compression, else $V=1$

γ_{M1} the partial factor applied to this method.

$\rho_{c,x}, \rho_{c,z}, \chi_w$ reduction factors based on the relevant plate slenderness $\bar{\lambda}_p$, see 10.4.

(2) In case of panels with tension the effect should be neglected for determining α_{cr} and α_{ult} . However, it should be considered in the verification equation (10.1), if not a more detailed verification is done.

NOTE: The National Annex may give further information on how to consider tension effects.

Drafting note: new rules have been developed for considering tension. These might be included if accepted by WG5 and SC3.

Plate slenderness

(1) The plate slenderness $\bar{\lambda}_p$ should be taken for the global or respective local buckling from:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}} \quad (10.2)$$

where

$\alpha_{ult,k}$ minimum load amplifier for the design loads to reach the characteristic value of resistance of the most critical point, see 10.3(2).

α_{cr} load amplifier for the design loads to reach the relevant elastic critical load under the corresponding complete stress field, see 10.3(3).

(2) In determining $\alpha_{ult,k}$ the yield criterion may be used for resistance:

$$\alpha_{ult,k} = \frac{f_y}{\sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + \sigma_{z,Ed}^2 - \sigma_{x,Ed} \cdot \sigma_{z,Ed} + 3 \cdot \tau_{Ed}^2}} \quad (10.3)$$

where

$\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{z,Ed}$ and τ_{Ed} are the components of the stress field in the ultimate limit state.

NOTE: By using the equation (10.3), it is assumed that the resistance is reached when yielding occurs without plate buckling.

NOTE: if $\sigma_{x,Ed}$ and $\sigma_{z,Ed}$ are compression stresses, they should be calculated with positive sign. For considering the tension stresses, see 10.2(2).

(3) The critical load amplifier α_{cr} can be obtained from appropriate buckling charts or relevant computer simulations.

Where α_{cr} values for the complete stress field are not available and only $\alpha_{cr,i}$ values for the various components of the stress field $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{z,Ed}$ and τ_{Ed} can be used, the α_{cr} value may be determined from:

$$\alpha_{cr} = \frac{1}{\frac{1+\psi_x}{4\alpha_{cr,x}} + \frac{1+\psi_z}{4\alpha_{cr,z}} + \sqrt{\left(\frac{1+\psi_x}{4\alpha_{cr,x}} + \frac{1+\psi_z}{4\alpha_{cr,z}}\right)^2} + \frac{1-\psi_x}{2\alpha_{cr,x}^2} + \frac{1-\psi_z}{2\alpha_{cr,z}^2} + \frac{1}{\alpha_{cr,\tau}^2}} \quad (10.4)$$

where

$$\alpha_{cr,x} = \frac{\sigma_{cr,x}}{\sigma_{x,Ed}}$$

$$\alpha_{cr,z} = \frac{\sigma_{cr,z}}{\sigma_{z,Ed}}$$

$$\alpha_{cr,\tau} = \frac{\tau_{cr}}{\tau_{\tau,Ed}}$$

For definition of critical stresses $\sigma_{cr,x}$, $\sigma_{cr,z}$, τ_{cr} and stress ratio ψ_x , ψ_z see section 4 and 5.

NOTE: For calculating α_{cr} for the complete stress field, the stiffened plate may be modelled without reduction of the second moment of area of longitudinal stiffeners as specified in 5.3(4).

(4) For unstiffened panels only one plate slenderness has to be determined. In this case, the used load amplifier α_{cr} corresponds to the first eigenmode of the plate. For stiffened panels at least the first local $\alpha_{cr,local}$ for the subpanels and the first global eigenmode $\alpha_{cr,global}$ for the whole panel have to be calculated.

Reduction factors

- (1) The relevant reduction factors should be obtained using the same slenderness $\bar{\lambda}_p$ for the determination of the individual reduction factors for each component

$\rho_{c,x}$	reduction value for longitudinal stresses taking into account column-like behaviour where relevant, see 10.4(2).
$\rho_{c,z}$	reduction value for transverse stresses taking into account column-like behaviour where relevant, see 10.4(3).
χ_w	reduction value for shear stresses, see 10.4(4).

- (2) The reduction value $\rho_{c,x}$ for buckling for longitudinal stresses may be determined according to 4.4(2). Column-like behaviour has to be considered according to 4.4(6) for unstiffened panels or subpanel and 4.5.4 for the interaction between plate and column buckling in general, see 10.4(5).

NOTE: Instead of the buckling curves given in 4.4(2), the general buckling curve in Annex B.1 can be used.

- (3) The reduction value $\rho_{c,z}$ for transverse stresses should be determined from B.1(3). Column-like behavior has to be considered according to 4.4(6) for unstiffened panels or subpanel and 4.5.4 for the interaction between plate and column buckling in general, see 10.4(5).

NOTE: For consistency, section 6 should not be applied.

- (4) The reduction value χ_w for buckling for shear stresses may be determined according to 5.2(1).

NOTE: Instead of the buckling curves given in 5.2(1), the general buckling curve in Annex B.1 can be used.

- (5) For the determination of the reduction factor $\rho_{c,x}$ and $\rho_{c,z}$ acc. to 4.5.4(1) the value for χ_c of column like buckling behaviour should be calculated according to 4.5.3 under the complete corresponding stress field using the same plate slenderness $\bar{\lambda}_p$ acc. to formula (10.2) as taken for determination of ρ_x and ρ_z . The weighting factor ξ has then to be calculated via $\sigma_{cr,p}$ and $\sigma_{cr,c}$ obtained from the particular static sub-system of the panel under unidirectional loading (only $\sigma_{x,Ed}$ or $\sigma_{z,Ed}$, resp.).

NOTE: For global buckling of stiffened panel under biaxial compression for calculation of $\sigma_{cr,c}$ in the transverse direction the support of longitudinal stiffeners should not be set free as mentioned in 4.5.3 (1).

- (6) For local buckling of subpanels the same column buckling curve may be used as in unstiffened panels ($\alpha=0,21$ (curve a)).

- (7) In calculation of $\chi_{c,z}$ in transverse direction for local buckling under considering of the stiffeners, the corresponding column buckling curve b or c ($\alpha=0,34$ (curve b) for closed and $\alpha=0,49$ (curve c) for open section stiffeners) should be used.

5 Consequences for practice

In the framework of this research project the two analysis methods, the effective width method and reduced stresses method were investigated by analyzing and comparing the relevant examples. From the comparative study, recommendations for the selection of the appropriate calculation method have been compiled. All essential information for verification and clarifications, which reflect the state of technology at this time, were given. The results and recommendations have been developed as a flowchart that can be used in practice. This result is a proposal, in the ongoing development of EC3. In addition, an improved version of DIN EN 1993-1-5:2010 section 10 was worked out so that it is more user-friendly and clear. Which is a concrete Guidelines to use it in practice, to know how to deal with sophisticated situations according to DIN EN 1993-1-5:2010.

6 Acknowledgement

This research project „ Investigations on the buckling analysis according to DIN EN 1993-1-5:2010“(FE 89.0313 / 2015) was realized on behalf of the Federal Ministry of Transport, Building and Urban Affairs (BMVBS), represented by the Federal Highway Research Institute (BASt). Special thanks are given to the BASt and the BMVBS for the financial support.

7 Literature

DIN EN 1993-1-5:2010: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile; Deutsche Fassung EN 1993-1-5:2006+AC:2009

DIN 18800-3:2008: Stahlbauten –Teil 3: Stabilitätsfälle – Plattenbeulen.

DIN EN 1993-2:2010: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 2: Stahlbrücken; Deutsche Fassung EN 1993-2:2006+AC:2009.

DIN EN 1993-2/NA:2012: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 2: Stahlbrücken, Nationaler Anhang

(BEG, D., et al., 2010): Design of plated structures. Eurocode 3: design of steel structures, part 1 - 5: design of plated structures. 1st ed. Berlin, Brüssel: Ernst; ECCS European Convention for Constructional Steelwork. ECCS eurocode design manuals. ISBN 3433029806.

(BRAUN, B., 2010): Stability of steel plates under combined loading. Mitteilung des Instituts für Konstruktion und Entwurf Nr. 2010-3, Dissertation Universität Stuttgart, 2010.

(BRAUN, B., KUHLMANN, U., 2009): Braun, B.; Kuhlmann, U.: Bemessung und Konstruktion von aus Blechen zusammengesetzten Bauteilen. In: Kuhlmann U. (Hrsg.): Stahlbau-Kalender 2009, Ernst & Sohn, 2009.

(KUHLMANN, U., et al., 2008): COMBRIBUCH BRÜCKEN. Teil I: Anwendung von Eurocode-Regelungen. 1st ed.

(Reis, Pedro, et al.): Projekt in Bearbeitung: OPTI-Bri - Optimal use of High Strength Steel grades within bridges. Grand agreement n° RFSR-CT-2014-00026.

(SEITZ, M., 2005): Tragverhalten längsversteifter Blechträger unter quergerichteter Krafteinleitung. Mitteilung des Instituts für Konstruktion und Entwurf Nr. 2005-2, Dissertation Universität Stuttgart, 2005.

(SEDLACEK, G., et al., 2008): Entwicklung und Aufbereitung wirtschaftlicher Bemessungsregeln für Stahl- und Verbundträger mit schlanken Stegblech im Hoch- und Brückenbau.

(SCHEER, J, GENTZ, E, 1994): Erläuterung zu DIN 18800 Teil 3. In LINDNER, J (ed.): Stahlbauten. Erläuterungen zu DIN 18800 Teil 1 bis Teil 4. Berlin, Wien, Zürich, Berlin: Beuth; Ernst. ISBN 3-410-13024-1.

(SCHEER, J., NÖLKE, H., GENTZ, E., 1979): DAST-Richtlinie 012, Beulsicherheitsnachweise für Platten. Grundlagen, Erläuterungen, Beispiele. Köln: Stahlbau Verlags-GmbH.

(TIMMERS, R., et al. 2015) Stabilitätsnachweise nach EN 1993-1-5 – Theorie und Beispiele. In KUHLMANN, U (ed.): Stahlbau-Kalender 2015. Berlin: Ernst, Wilhelm & Sohn. ISBN 3433031045

(CEN/TC 250/SC 3; N 2128 (2015)): AM-1-5-2015-02 -Amendment for EN 1993-1-5_Chapter 10 Biaxial Compression incl background.

Dokument aus NABau Spiegelausschuss (NA005-08-23AA) Stahlbrücken N0604 (2015): Beschlossene Amendments für 1993-1-5. CEN/TC 250/SC 3.

EBPlate 2.01: Software zur Ermittlung der elastischen kritischen Spannungen in Platten. EBPlate steht unter der Internetadresse von CTICM als kostenloser Download zur Verfügung: www.cticm.com. CTICM, 2013.

Inhalt

1	Stand der Normung und Technik	13
1.1	Einleitung	13
1.2	Methode der wirksamen Breiten	13
1.3	Methode der reduzierten Spannungen	14
1.4	Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den Methoden	15
1.5	Neue Entwicklungen in DIN EN 1993-1-5:2010	16
2	Ausgewählte Beispiele	24
2.1	Einleitung	24
2.2	Beispiel 1: Vollwandträgersteg mit Längssteifen (Methode der reduzierten Spannungen)	25
2.2.1	Einleitung	25
2.2.2	Einzelfeldnachweise	25
2.2.3	Gesamtfeldnachweis	30
2.3	Beispiel 1: Vollwandträgersteg mit Längssteifen (Methode der wirksamen Breiten)	46
2.3.1	Einleitung	46
2.3.2	Querschnittstragfähigkeit bei Längsspannungen	46
2.3.3	Querschnittstragfähigkeit bei Schubspannungen	56
2.3.4	Querschnittstragfähigkeit bei Längs- und Schubspannungen	58
2.4	Beispiel 1: Vollwandträgersteg mit Längssteifen Vergleich	59
2.5	Beispiel 2: Orthotrope Platte mit Trapezsteifen (Methode der reduzierten Spannungen)	60
2.5.1	Einleitung	60
2.5.2	Einzelfeldnachweis	60
2.5.3	Gesamtfeldnachweis	61
2.6	Beispiel 2: Orthotrope Platte mit Trapezsteife (Methode der wirksamen Breiten)	65
2.6.1	Einleitung	65
2.6.2	Querschnittstragfähigkeit bei Längsspannungen	65
2.6.3	Querschnittstragfähigkeit bei Schubspannungen	69
2.7	Beispiel 2: Orthotrope Platte mit Trapezsteife (Vergleich)	70
2.8	Beispiel 3: Vollwandträgersteg mit örtlicher Lasteinleitung (Methode der reduzierten Spannungen)	71
2.8.1	Einzelfeldnachweise	72
2.8.2	Gesamtfeldnachweis	83
2.9	Beispiel 3: Vollwandträgersteg mit örtlicher Lasteinleitung (Methode der wirksamen Breiten)	92
2.9.1	Einleitung	92
2.9.2	Querschnittstragfähigkeit bei Längsspannungen	92
2.9.3	Querschnittstragfähigkeit bei Schubspannungen	100
2.9.4	Querschnittstragfähigkeit bei Längs- und Schubspannungen	102
2.9.5	Querschnittstragfähigkeit bei Querbelastrung	103
2.9.6	Querschnittstragfähigkeit bei Querbelastrung und Biegemoment und Normalkraft	104
2.9.7	Querschnittstragfähigkeit bei Querbelastrung und Biegemoment und Querkraft	104
2.10	Beispiel 3: Vollwandträgersteg mit örtlicher Lasteinleitung Vergleich	104
2.11	Beispiel 4: Steg mit Längssteife (Methode der reduzierten Spannungen)	105
2.11.1	Einleitung	105
2.11.2	Einzelfeldnachweis	106
2.11.3	Gesamtfeldnachweis	109
2.12	Beispiel 4: Steg mit Längssteife (Methode der wirksamen Breiten)	111
2.12.1	Einleitung	111
2.12.2	Querschnittstragfähigkeit bei Längsspannungen	112
2.12.3	Querschnittstragfähigkeit bei Schubspannungen	117
2.12.4	Querschnittstragfähigkeit bei Längs- und Schubspannungen	119
2.13	Beispiel 4: Steg mit Längssteife Vergleich	120
2.14	Anwendung auf Beispiele aus der Literatur	120
2.14.1	Einleitung	120
2.14.2	Beispiel aus Stahlbaukalender 2009 (BRAUN, B., KUHLMANN, U., 2009)	122
2.14.3	Beispiele aus Stahlbaukalender 2015 (TIMMERS, R., et al. 2015)	123
2.14.4	Beispiele aus AIF-Forschungsprojekt (SEDLACEK, G., et al., 2008)	126
2.14.5	Beispiel aus COMBRI I-Profil ohne Steife unter Längs- und Querdruck (KUHLMANN, U., et al., 2008)	128
2.14.6	Beispiel aus Design of plated Structures (BEG, D., et al., 2010)	129
2.14.7	Beispiele aus OPTIBRI Forschungsprojekt – I Profil ohne Steife S690 (REIS, A., PEDRO, J.O. et al.)	131
3	Schlussfolgerungen	132
3.1	Vorbemerkungen	132
3.2	Methode der reduzierten Spannungen MRS gemäß DIN EN 1993-1-5:2010 Abschnitt 10	132
3.2.1	Einzelfeld- und Gesamtfeldnachweis	132

3.2.2	Bezogener Schlankheitsgrad und Abminderungsbeiwerte.....	133
3.2.3	Mindeststeifigkeit von Steifen.....	133
3.2.4	Knickstabähnliches Verhalten	133
3.2.5	Steifigkeit von Steifenquerschnitten bei Schubbeanspruchung	136
3.2.6	Scheibenspannungen unter Querdruck... ..	136
3.2.7	Gesamtfeldnachweis unter biaxialer Beanspruchung	137
3.2.8	Zugbeanspruchung/Vorzeichen	138
3.2.9	Empfehlungen zur Berechnung.....	139
3.2.10	Symbol ρ_x in Nachweisformat Kapital 10	140
3.3	Methode der wirksamen Breiten.....	140
3.3.1	Beulwerte aus Tabellen 4.1 und 4.2.....	140
3.3.2	Symbol $\sigma_{cr,sl}$	141
3.3.3	γ_{M0} und γ_{M1} in Abschnitt 4	141
3.3.4	Interaktion zwischen Schubkraft, Biegemoment und Axialkraft. TWG8.3 2014-052 (AM-1-5-2013-15)	141
3.4	Flussdiagramm für die Anwendung von DIN EN 1993-1-5 Abschnitt 10	143
4	Ausarbeitung einer verbesserten Version von DIN EN 1993-1-5 Abschnitt 10.....	144
4.1	Einleitung.....	144
4.2	Normenvorschlag (englisch).....	145
4.3	Vorschläge für Amendments CEN TC250/SC3.....	148
5	Zusammenfassung.....	150
6	Danksagung	151
7	Literatur	152
7.1	Normen.....	152
7.2	Bücher, Beiträge etc.....	152
7.3	Sonstige Veröffentlichungen	153
7.4	Amendments CEN TC250/SC3.....	153
8	Abbildungsverzeichnis	155
9	Tabellenverzeichnis	156

1 Stand der Normung und Technik

1.1 Einleitung

Aus Blechen zusammengesetzte Bauteile sind ein fester Bestandteil des Brücken- und Hochbaus, wenn es darum geht, für große Stützweiten und/oder hohe Lasten einen Querschnitt bereitzustellen, der durch ein Minimum an Materialeinsatz und ein Maximum an Materialausnutzung gekennzeichnet ist. In der Regel handelt es sich bei diesen Querschnitten um Blech- oder Kastenträger. Die einzelnen Blechfelder dieser hochtragfähigen, leichten Querschnitte erreichen oftmals so hohe Schlankheiten, dass sie stabilitätsgefährdet sind.

Die Bemessung schlanker plattenförmiger Bauteile, die sich aus ebenen, unversteiften oder versteiften Blechen zusammensetzen und die in ihrer Ebene beansprucht sind erfolgt nach DIN EN 1993-1-5:2010.

Die Regelungen in DIN EN 1993-1-5:2010 ergänzen die Regelungen in DIN EN 1993-1-1:2010 für schlanke, beulgefährdete Bleche, die häufig im Brückenbau eingesetzt werden. Somit steht DIN EN 1993-1-5:2010 in einem engen Zusammenhang mit der Anwendungsnorm DIN EN 1993-2:2010 für Stahlbrücken. Obwohl in DIN EN 1993-1-5:2010 die Regelungen zur Ermittlung der mittragenden Breite für schubweiche Gurte im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit und Ermüdung angegeben sind, enthält DIN EN 1993-1-5:2010 jedoch hauptsächlich Regelungen für den Grenzzustand der Tragfähigkeit. In DIN EN 1993-1-9:2010 sind die Regelungen für Grenzzustand der Ermüdung zu entnehmen. Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist für Stahlbrücken in DIN EN 1993-2:2010 und für Kranbahnen in DIN EN 1993-6:2010 geregelt (BRAUN, B., KUHLMANN, U., 2009).

DIN EN 1993-1-5:2010 ist wie folgt aufgebaut: Abschnitt 1 enthält Hinweise zum Anwendungsbereich, Normative Verweisungen, Definition der Begriffe und Formelzeichen. In Abschnitt 2 sind Grundlagen für die Tragwerksplanung und Verfahren angegeben. Abschnitt 3 fasst die Hinweise zur Festlegung mittragende Breiten zur Berücksichtigung der Schubverzerrungen bei der Bemessung von Bauteilen zusammen.

Hauptteilbestandteil von DIN EN 1993-1-5:2010 sind die Nachweisverfahren für beulgefährdete Bleche. DIN EN 1993-1-5:2010 stellt dem Tragwerksplaner grundsätzlich drei unterschiedliche Nachweiskonzepte für die Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit zur Auswahl.

1. Methode der wirksamen Breiten (Abschnitt 4 bis 7)
2. Methode der reduzierten Spannungen (Abschnitt 10)
3. Nachweis auf der Basis der Finite-Elemente-Methode (Anhang C)

Die Abschnitte 4 bis 7 enthalten die Methode der wirksamen Breiten und Abschnitt 10 beschreibt die Methode der reduzierten Spannungen. In Anhang C sind die Informationen für den Nachweis auf der Basis der Finite-Elemente-Methode angegeben.

Die Regelungen zum Flanschinduzierten Stegblechbeulen sind in Abschnitt 8, sowie zu Steifen und Detailausbildung in Abschnitt 9. Außerdem enthält DIN EN 1993-1-5:2010 zusätzlich Anhänge. Die Anhänge sind zum großen Teil informativ. Beispielweise kann man mit Hilfe von Anhang A die elastische kritische Spannung bestimmen. In Anhang C sind die Regeln für FEM Nachweise erläutert. Die Berechnung von Bauteilen mit trapezförmig oder sinusförmig profilierten Stegblechen und Blechgurten ist im Anhang D geregelt.

1.2 Methode der wirksamen Breiten

Die Methode der wirksamen Breiten (nach Abschnitt 4 bis 7) beruht auf der Reduzierung der druckbeanspruchten Querschnittsteile, die sowohl das lokale Ausbeulen der Bleche zwischen den einzelnen Steifen, als auch das globale Beulverhalten berücksichtigt.

Die Anwendung der Methode der wirksamen Breiten ist für die Standardausführung I- und den Kastenquerschnitt an folgende Voraussetzungen gebunden:

- Die Blechfelder sind quasi rechteckig und die Flansche verlaufen näherungsweise parallel. Ein Winkel vom $\alpha_{\text{limit}} \leq 10^\circ$ ist nach 2.3 (1) Anmerkung zulässig.
- Die Durchmesser nicht ausgeseifter Löcher oder Ausschnitte sind kleiner als das 0,05-fache der Beulfeldbreite.
- Steifen, sofern vorhanden, verlaufen in Längs- und/ oder Querrichtung.
- Bauteile sind gleichförmig, wie z.B. konstante Blechdicken in Längsrichtung, homogene Streckgrenzen oder kein Stegausschnitt.
- Flanschinduziertes Stegblechbeulen ist ausgeschlossen.

Obwohl die Methode der wirksamen Breiten (Abschnitt 4 bis 7) für die Standardausführungen I- und Kastenquerschnitte geschrieben wurde, sind die

Regelungen auch für andere vergleichbare Geometrien anwendbar.

Für eine längs des Beulfeldes veränderliche Normalspannung ist in der Regel der Beulnachweis für die Schnittgrößen an der Querschnittsstelle zu führen, die sich im Abstand $0,4 a$ oder $0,5 b$ (kleinster Wert) von dem Beulfeldrand befindet, an dem die größten Spannungen auftreten, siehe 4.6 (3). In diesem Fall muss am Beulfeldrand zusätzlich ein Querschnittsnachweis geführt werden. Diese verringerte Schnittgröße sollte jedoch nicht kleiner als der Mittelwert der, über die Beulfeldlänge veränderlichen, Schnittgröße sein.

Nicht nur die geometrischen und strukturellen Imperfektionen haben Einfluss auf das Tragverhalten eines Blechfeldes sondern auch die überkritische Tragreserve.

Knickstäbe (mit einer Ausmitte e_0) sind maximal bis zum Erreichen der kritischen Knicklast belastbar. Im Gegensatz zu den Knickstäben können schlanke, beulgefährdete Blechfelder über die elastische Beulspannung hinaus beansprucht werden. Obgleich im Bereich der kritischen Beullast die Beulverformungen stark zunehmen, versagt das Blech jedoch erst bei erheblich größeren Beanspruchungen. Bei zunehmender Beanspruchung eines ausgebeulten Zustands wird die Stützwirkung der Ränder durch eine doppelte Krümmung und versteifende Wirkung im Randbereich aktiviert. Aus diesem Grund entsteht ein nichtlinearer Spannungsverlauf über die Breite, sodass die Spannungen von der Mitte in die Ränder umgelagert werden und eine Spannungskonzentration an den Rändern entsteht.

Die Methode der wirksamen Breiten nutzt diese überkritische Tragreserve für Blechfelder unter Längsspannung aus. Aber auch bei der Ermittlung der Schubbeanspruchbarkeit nach Abs. 5 wird die erhebliche überkritische Tragreserve berücksichtigt.

Die Idee besteht für Längsspannungen darin, den beulgefährdeten Bereich gedanklich aus dem Blechfeld herauszuschneiden und mit dem Restquerschnitt (wirksamer Querschnitt) einen elastischen Querschnittsnachweis zu führen.

Bei dieser Methode ändern die Querschnittswerte sich aufgrund der Reduzierung der Blechbreiten. Die wirksame Querschnittsfläche A_{eff} wird in der Regel unter der Annahme reiner Druckspannungen infolge der Druckkraft N_{Ed} berechnet. Bei unsymmetrischen Querschnitten erzeugt die Verschiebung der Schwerelinie e_N der wirksamen Querschnittsfläche A_{eff} gegenüber der Schwerelinie des Bruttoquerschnitts ein zusätzliches Moment, das in der

Regel beim Querschnittsnachweis zu berücksichtigen ist. Das wirksame Widerstandsmoment W_{eff} ist in der Regel unter der Annahme reiner Biegelängsspannungen infolge dem Biegemoment M_{Ed} zu bestimmen. Alternativ dürfen die wirksamen Querschnittswerte mit der resultierenden Verteilung der Längsspannungen aus gleichzeitiger Wirkung von N_{Ed} und M_{Ed} bestimmt werden. Das beschreibt in der Regel ein iteratives Vorgehen und führt zur Berücksichtigung der Spannungsumlagerung zwischen den einzelnen Bauteilen. Außerdem muss für breite Gurte ggf. die Wirkung der Schubverzerrungen (mittragende Breite) berücksichtigt werden.

Für die weiteren Beanspruchungen, z. B. aus Schub oder lokaler Lasteinleitung, werden ebenfalls Ausnutzungsgrade bestimmt und anschließend mittels Interaktionsbeziehungen in Zusammenhang gesetzt. Je nach Art der Beanspruchung bzw. erforderlicher Interaktion sind hierfür in den Abschnitten 4 bis 7 der Norm die entsprechenden Reduktionsbeiwerte und Interaktionsformeln angegeben.

Je nach Art der Beanspruchung sind in DIN EN 1993-1-5:2010 die entsprechenden Abschnitte 4 bis 7 zu verwenden. Die Norm unterscheidet hinsichtlich der Belastung zwischen:

- Abschnitt 4: Plattenbeulen bei Längsspannungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit (nicht ausgesteifte und längs ausgesteifte Beulfelder),
- Abschnitt 5: Schubbeulen,
- Abschnitt 6: Beanspruchbarkeit bei Querbelaugung,
- Abschnitt 7: Interaktion.

Dabei wird das einwirkende Spannungsfeld in die einzelnen Spannungskomponenten zerlegt

Ein Nachweisformat weist die Einzelbeanspruchungen nach, wobei es für die Einzelbeanspruchungen, die Ausnutzung überkritischer Tragreserven zulässt, und unterwirft dann die Ausnutzungsgrade in einem zweiten Schritt einem Interaktionskriterium zur Berücksichtigung verschiedener Beanspruchungen.

1.3 Methode der reduzierten Spannungen

Die Methode der reduzierten Spannungen ist ein klassisches Konzept, das die Spannungen im Blech begrenzt und diese nach neueren Regelwerken wieder einer Art von-Mises Vergleichsspannung gegenüberstellt. Dieses Berechnungsverfahren gilt aus der Entstehungsgeschichte heraus als

das in Deutschland traditionell angewendete. Dieses Kriterium wurde erstmals in (SCHEER, J., NÖLKE, H., 2001a) und (SCHEER, J., NÖLKE, H., 2001b) als Weiterentwicklung von DASt Ri012 (SCHEER, J., NÖLKE, H., und GENTZ, E., 1979) bzw. DIN 18800-3:2008 vorgeschlagen. Neuere Untersuchungen (MÜLLER, C., 2003) zielen auf die harmonisierte Formulierung sogenannter „allgemeiner Beulkurven“ ab, um die Anzahl der anzuwendenden Beulkurven zu reduzieren. Die Anwendung der Methode der reduzierten Spannung entspricht für Einzelbeulfelder der Methode der wirksamen Breiten, Allerdings ist zu beachten, dass bei der Methode der reduzierten Spannungen Lastumlagerungen zwischen den Einzelblechen eines Bauteils nicht berücksichtigt werden. Es handelt sich bei der Methode der reduzierten Spannungen um ein „allgemeines Verfahren“, das es z.B. auch für veränderliche Querschnitte oder Träger mit Steganschnitten anwendbar macht, vgl. Anhang B der Norm und (SEDLACEK, G. et al.). Auch ist die Überlagerung komplexer mehraxialer Spannungszustände erlaubt. Allerdings wird die Spannungsumlagerung in weniger ausgenutzten Querschnittsteilen im Gegensatz zur Methode der wirksamen Breiten nicht berücksichtigt, was tendenziell zu konservativeren Ergebnissen führt. Die Tragbeulspannung des schwächsten Querschnitts ist somit maßgebend für die Tragfähigkeit des Gesamtquerschnitts. Eine Handrechnung ist für Standardbeulfälle möglich (BRAUN, B., KUHLMANN, U., 2009).

Die Methode der reduzierten Spannungen wurde auf Basis von DASt Ri 012 (SCHEER, J., NÖLKE, H., und GENTZ, E., 1979) bzw. DIN 18800-3:2008:2008 entwickelt. Der Unterschied des Verfahrens in DIN EN 1993-1-5:2010 zur früheren Vorgehensweise besteht darin, dass in DIN EN 1993-1-5:2010 die Abminderungsfaktoren durch eine einzige Systemschlankheit auf Grundlage des gesamten einwirkenden Spannungsfeldes ermittelt werden. Die Lastfaktoren können mit Hilfe von numerischen Verfahren in einem Schritt und auch für komplexe Geometrie und Randbedingungen bestimmt werden. Der Vorteil dieses Verfahrens sind numerisch gestützte Nachweise. Es wird empfohlen, diesen Verzweigungslastfaktor mit Hilfe numerischer Methoden, wie EBPlate 2.01 oder einer FEM Software, für das gesamte Spannungsfeld in einem Schritt zu bestimmen. Wenn dies nicht gelingt oder eine Handrechnung durchgeführt werden soll, kann der Lastfaktor α_{cr} durch eine Handformel ermittelt werden. Diese Handformel kann aber teilweise zu konservativen Ergebnissen führen.

Bei der Methode der wirksamen Breiten wird in der Regel die Abminderungskurve in Bezug auf die Beanspruchungsart für die jeweiligen einwirkenden Spannungskomponenten mit dazugehörigem

Schlankheitsgrad ermittelt. Bei der Methode der reduzierten Spannungen dürfen die Spannungen unter Verwendung eines einzigen Schlankheitsgrades $\bar{\lambda}_p$ durch die Abminderungskurve bzw. Abminderungsfunktionen aus Abschnitt 4 oder 5 oder aus Anhang B abgemindert werden. Der endgültige Abminderungsfaktor ρ_c wird in der Regel bei beiden Methoden mit Hilfe der Interaktionsgleichung zwischen plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten ermittelt (BRAUN, B., KUHLMANN, U., 2009).

Für plattenartiges Verhalten können die einwirkenden Normalspannungen nach DIN EN 1993-1-5:2010 Abschnitt 4.5.4 (Winterkurve) oder Anhang B abgemindert werden. In (SEITZ, M., 2005) und (BRAUN, B., 2010) wurde gezeigt, dass für Fälle unter Querbelastung die Anwendung der Abminderungsfaktoren gemäß Abschnitt 4.5.4 (Winterkurve) für die Normalspannung σ_z zu unzutreffenden Ergebnissen führt. Der Abminderungsbeiwert gemäß Abschnitt 6 kann aus Kompatibilitätsgründen nicht in Zusammenhang mit Abschnitt 10 verwendet werden, da die Abminderungsfunktion an eine spezielle Formulierung des Schlankheitsgrades in Abhängigkeit der kritischen Last F_c und der plastischen Last F_y gebunden ist. Im Fall einer Querbelastung des Längsrandes, die nicht über die gesamte Länge des Längsrandes wirkt, sollte daher die Normalspannung σ_z mit ρ_z gemäß Anhang B abgemindert werden.

Im Falle von Schubspannung erfolgt im Rahmen der Methode der reduzierten Spannungen die Bestimmung des Abminderungsbeiwertes χ_w durch DIN EN 1993-1-5:2010 Abschnitt 5.3. nur unter Berücksichtigung des Beitrags des Stegs.

1.4 Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den Methoden

Die wesentlichen Unterschiede zwischen der Methode der wirksamen Breiten und der Methode der reduzierten Spannungen sind die Ermittlungen der Schlankheitsgrade und die Spannungsumlagerung.

Bei der Methode der wirksamen Breiten wird die Spannungsumlagerung zwischen den einzelnen Bauteilen berücksichtigt. Die Methode der reduzierten Spannungen berücksichtigt diese Spannungsumlagerungen nicht. Dadurch ist das schwächste Bauteil für den Beulnachweis maßgebend. Aus diesem Grund liefert die Methode der wirksamen Breiten tendenziell wirtschaftlichere Ergebnisse als die Methode der reduzierten Spannungen.

Bei der Methode der wirksamen Breiten müssen die einwirkenden Spannungen in die einzelnen Span-

nungskomponenten aufgeteilt werden und entsprechende Schlankheitsgrade berechnet werden. Diese Methode ist vor allem für Handrechnungen gedacht, bei denen Beulwerte für bestimmte standardisierte Spannungszustände aus Handbüchern oder Formeln entnommen werden können.

Bei der Methode der reduzierten Spannungen ist eine Aufteilung nicht erforderlich. Eher wird ein Schlankheitsgrad am Gesamtspannungsfeld unter gleichzeitiger Wirkung aller Spannungskomponenten berechnet und alle Abminderungsfaktoren werden durch den Gesamtschlankheitsgrad ermittelt. Ein Vorteil der Methode der reduzierten Spannungen ist die theoretisch allgemeine Anwendbarkeit auf beliebige Beulfelder mit beliebigen Beanspruchungszuständen. Zudem lassen sich mit Hilfe geeigneter Softwaretools wie z.B. EBPlate die hierfür benötigten Werte berechnen, was zu einer Zeiterparnis führen kann. Außerdem ist die Methode der reduzierten Spannungen verwendbar, wenn α_{cr} mittels Handformel, durch eine Interaktionsformel für die einzelnen Spannungskomponenten berechnet wird.

Die beiden Methoden unterscheiden sich auch in der Nachweisform, die Methode der wirksamen Breite betrachtet Grenzschnittgrößen im Querschnitt, während die Methode der reduzierten Spannungen nur Spannungsnachweise führt.

Bei dem Querschnittsnachweis für N und $M_{y,Ed}$ wird eine Spannungsumlagerung im Querschnitt vorgenommen, indem mit „wirksamen Querschnitten“, d.h. zum Beispiel bei Stegbeulen mit reduzierten Stegflächen gerechnet wird. Damit werden die Gurte voll ausgenutzt, obwohl die Beanspruchbarkeit der Stege begrenzt ist. Außerdem wird bei der Interaktion der Schnittgrößen M , V und F eine Interaktion in Anlehnung an die plastische Interaktion verwendet, bei der z.B. vorausgesetzt wird, dass der Steg nur für die Querkraft bis zur Stegbeulkraft und die Gurte gleichzeitig nur für die Biegemomente bis zur plastischen Grenze belastbar sind. Die Methode der reduzierten Spannungen hingegen lässt eine Ausnutzung der einzelnen Bauteile nur bis zur Fließgrenze zu, die Querschnittsteile sind also nur bis zum Fließkriterium ausnutzbar

Die Methode der wirksamen Breiten ist also tragfähigkeitsorientiert und wurde besonders für die Bedingungen des Hochbaus in Anlehnung an die Regeln für die plastische Bemessung, entwickelt. Im überwiegenden Teil des europäischen Auslands (Frankreich, Belgien, Schweiz, Schweden, Großbritannien, Portugal usw.) wird die Methode aber auch im Brückenbau angewandt.

Die Methode der reduzierten Spannungen hat dagegen ihre Tradition im deutschen Brückenbau, wo neben der Tragfähigkeit auch die Gebrauchstauglichkeit berücksichtigt werden muss. Der Anspruch

ist, dass die Spannungen und Vergleichsspannungen infolge der charakteristischen Lastkombination die Streckgrenze nicht überschreiten dürfen, siehe DIN EN 1993-2:2010 Abschnitt 7.3. Diese Methode liefert also eine Möglichkeit, diesen Gebrauchstauglichkeits- und Tragfähigkeitsnachweis gleichzeitig, unter Berücksichtigung des Plattenbeulens durchzuführen. Im deutschen Nationalen Anhang zur Brückennorm, DIN EN 1993-2/NA:2012, wird gefordert, für längsausgesteifte Brückenquerschnitte die Methode der reduzierten Spannungen anzuwenden.

Im Nachweiskonzept nach der Methode der wirksamen Breiten werden zurzeit auf europäischer Ebene unterschiedliche Teilsicherheitsbeiwerte ($\gamma_{M0} = 1,0$ und $\gamma_{M1} = 1,1$) verwendet (in Deutschland wird für beide Werte im Brückenbau 1,1 angesetzt). Im Gegensatz dazu wird bei der Methode reduzierten Spannungen nur ein Teilsicherheitsbeiwert und $\gamma_{M1} = 1,1$ verwendet.

Die Methode der reduzierten Spannungen gilt als allgemeines Verfahren für den Beulnachweis. Für bestimmte Beanspruchungsfälle, wie biaxialer Druck-Druck oder biaxialer Druck-Zug enthält die auf Schnittgrößen bezogene Methode der wirksamen Breiten keine adäquate Lösung, so dass nur ein Nachweis nach der Methode der reduzierten Spannungen möglich ist.

Auch setzen die Regeln zur Bemessung nach der Methode der wirksamen Breiten rechteckige Blechfelder und parallel verlaufende Flansche voraus. Ein Vorteil der Methode der reduzierten Spannungen hingegen ist, dass diese theoretisch für beliebige Geometrien angewendet werden kann.

Somit haben beide Methoden jeweils ihre Vorteile und sollten auch weiterhin parallel angewendet werden dürfen. Eine Abschaffung eines der beiden Verfahren sollte nicht angestrebt werden, sondern eher eine klare Abgrenzung voneinander, um Fehlanwendungen zu vermeiden.

1.5 Neue Entwicklungen in DIN EN 1993-1-5:2010

Folgende Änderungen zu EN 1993-1-5, vgl. Tab. 1 wurden in der Arbeitsgruppe TC250/SC3/WG5 ausführlich diskutiert und in dem für Eurocode 3 zuständigen Gremium TC250/SC3 beschlossen. Das bedeutet, dass diese Änderungen vom Project Team das mit der Überarbeitung von EN 1993-1-5 beauftragt wird, in die neue Fassung des EN 1993-1-5 übernommen werden wird, ohne eine erneute Diskussion im TC250/SC3 zu durchlaufen. Einige dieser Änderungen sind auch jetzt schon im deutschen Nationalen Anhang zu EN 1993-1-5 implementiert

und damit auch jetzt schon in Kraft. Die Nummerierung der Dokumente bezieht sich auf die TC250/SC3 Dokumente. Auch ist der Zeitpunkt der Entscheidung im TC260/SC3 dokumentiert.

Tab. 1: Beschlossene Amendments für EN 1993-1-5, Stand Oktober 2015

SC3—Dokument Nr. Decision Amendment-Nr.	Relevant clause	Thema
N1881 Beschluss 06/2013 AM-1-5-2011-02	4.5.4	Interaktion zwischen plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten
N1824 Beschluss 04/2012 AM-1-5-2011-03a	5.3 (1)	Schubbeulen bei ausgesteiften und nicht ausgesteiften Blechen
N1881 Beschluss 06/2013 AM-1-5-2011-03b	5.3 (2)	Schubbeulen bei ausgesteiften und nicht ausgesteiften Blechen
N1950 Beschluss 06/2013 AM-1-5-2011-03c	5.3 (4)	Schubbeulen bei ausgesteiften und nicht ausgesteiften Blechen
N1824 Beschluss 04/2012 AM-1-5-2011-04	4.5.1 (4)	Mindeststeifigkeit der Steifen
N1824 Beschluss 04/2012 AM-1-5-2011-06	6.4.6.5	Beanspruchbarkeit der Bleche bei Querbelastrung
N1881 Beschluss 06/2013 AM-1-5-2011-08	1.1 (2), Anmerkung 4	Die maximal zulässige Krümmung Panel
N1881 Beschluss 06/2013 AM-1-5-2011-09	1.4 (1)	Definition der Querschnittsfläche der Längssteife Asl
N1881 Beschluss 06/2013 AM-1-5-2012-13	Anhang D.2.4	Bauteile mit profilierten Stegblechen und Beanspruchbarkeit unter Querbelastrung
N1933 Beschluss 06/2013 AM-1-5-2013-16	Abschnitt 7	Zusätzliche Gleichung für die Interaktion zwischen Querbelastrung, Biegemoment und Schubspannung
N2040 Beschluss 05/2015 AM-1-5-2011-07	Anhang D.2.1	Bauteile mit profilierten Stegblechen und Querbiegemoment
N2040 Beschluss 05/2015 AM-1-5-2013-14	9.1 (2), 9.2.1 (5), 9.2.1 (6), 9.2.4 (5) und Abbildung 9.5	Definition der Steifenquerschnitte in Kapitel 9
N2040 Beschluss 05/2015 AM-1-5-2014-01	Anhang A.3	Koeffizienten des Schubbeulens
N2040 Beschluss 05/2015 AM-1-5-2014-02	E.1	Bestimmung wirksamer Querschnitte für Spannung unterhalb der Streckgrenze
N2040 Beschluss 05/2015 AM-1-5-2014-03	9.2.2	Schweißen der Längssteifen
N2127 Beschluss 06/2015 AM-1-5-2015-01	6.5 (3)	Effektive Lasteinleitung bei der Querbelastrung Typ c
N2128 Beschluss durch schriftliche Umfrage AM-1-5-2015-02	Abschnitt 10 (5b) Anmerkung, Gleichung (10.5)	V-Faktor Biaxialer Druck
N2252/N2256 Vor. Beschluss 10/2016 AM-1-5-2015-02	Abschnitt A.2.1 (3) bis (6)	Alternative Nachweisverfahren für Gesamtfeldbeulen ausgesteifter Bleche

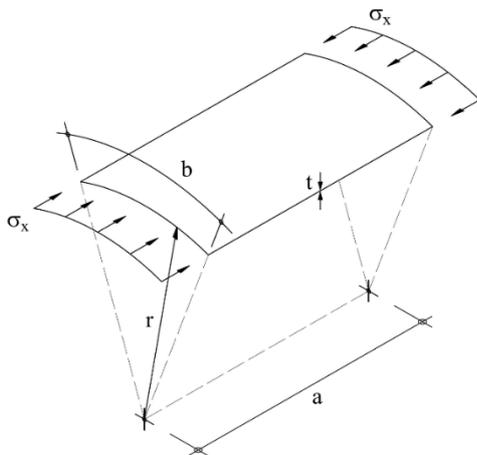


Figure 1.1: Definition of plate curvature

Bild 1: Definition der Blechkrümmung

Bezug Abschnitt 1.1(2) Note 4 - Die maximal zulässige Krümmung Panel CEN/TC 250/SC 3; N 1881: (AM-1-5-2011-08)

Die Effekte der Blechkrümmung hängen von der Richtung der Längsspannungen ab. Die derzeitige Formulierung entspricht nicht dieser Tatsache. Deswegen muss wie folgt korrigiert werden:

Einzelne Blechfelder dürfen als eben angesehen werden, wenn für den Krümmungsradius r in der Richtung senkrecht zu Druckspannung gilt:

$$r \geq \frac{b^2}{t}$$

Dabei ist

b die Blechfeldbreite;

t die Blechdicke

Bezug Abschnitt 1.4(1) – Definition der Querschnittsfläche von Längssteife A_{sl} CEN/TC 250/SC 3; N 1881: (AM-1-5-2011-09)

Bei der Definition von A_{sl} in DIN EN 1993-1-5:2010 Abschnitt 1.4(1) ist nicht klar, ob mit A_{sl} die Summe der Bruttoquerschnittsfläche oder der wirksamen Querschnittsfläche der Längssteifen gemeint ist. Aus dem Fehlenden des Index "eff" und der Zusammenhang mit der Verwendung des Symbols in der Norm ist ersichtlich, dass an dieser Stelle die Bruttoquerschnittsfläche gemeint ist. Aus diesem Grund soll die Definition von A_{sl} so korrigiert werden:

A_{sl} die gesamte Bruttoquerschnittsfläche aller Längssteifen in einer ausgesteiften Platte

Bezug Abschnitt 4.5.4 Interaktion plattenartiges und Knickstabähnliches Verhalten CEN/TC 250/SC 3; N 1881: (AM-1-5-2011-02)

Verhältniswert $\xi = \sigma_{cr,p} / \sigma_{cr,c} - 1$

Die Interpolation zwischen plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten erfolgt durch den sogenannten Wichtungsfaktor ξ . Die Berechnung des Wichtungsfaktors ξ erfordert die Verwendung mehrerer verschiedener Abschnitte aus DIN EN 1993-1-5:2010, nämlich Abschnitt 4.5.3, Anhang A.1, Anhang A.2.1 und Anhang 2.2. Aus diesem Grund wurde die Formel vereinfacht und zusammengefasst, damit der Wichtungsfaktor ξ direkt durch eine Formel bestimmt werden kann. Folglich wurden folgende Verbesserungen vorgeschlagen:

Für längsausgesteifte Blechfelder darf der Wichtungsfaktor direkt aus der folgenden Gleichung bestimmt werden:

Für ausgesteifte Bleche mit mindestens drei Längssteifen darf der Wichtungsfaktor wie folgt bestimmt werden:

$$\xi = k_{\sigma,p} \alpha^2 \frac{b_{sl} 1 + \delta}{b_c \gamma} \text{ for } \psi \neq 1$$

und

$$\xi = \frac{(1 + \alpha^2)^2 - 1}{\gamma} \text{ for } \psi = 1; \quad 0,5 < \alpha \leq \sqrt[4]{\gamma}$$

Aber

$$0 \leq \xi \leq 1$$

Alle Parameter sind in DIN EN 1993-1-5:2010 Anhang A.1 bzw. Bild A.1 gegeben.

Für ausgesteifte Bleche mit einer oder zwei Steifen darf der Wichtungsfaktor wie folgt bestimmt werden:

$$\xi = k_{\sigma,p} \alpha^2 \frac{b_{sl,1}}{b_c} \frac{A_{sl,1} \cdot t^2}{I_{sl,1} \cdot 12 (1 - \nu^2)} - 1$$

wobei

$k_{\sigma,p}$ aus Computersoftware oder nach Anhang A.2 bestimmt werden kann.

$$\xi = \frac{a^4 \cdot b \cdot t^3}{4 \cdot \pi^4 \cdot (1 - \nu^2) \cdot b_1^2 \cdot b_2^2 \cdot I_{sl,1}} \text{ für } a \leq a_c$$

Wenn sich zwei Steifen in der Druckzone eines ausgesteiften Beulfeldes befinden, soll ξ für die drei Fälle, die in DIN EN 1993-1-5:2010 Anhang A.2.1 (Bild A.3) beschrieben sind, berechnet werden. Dabei ist der Mindestwert entscheidend für die Berechnung der Platte.

Bezug Abschnitt 7 Zusätzliche Gleichung für Interaktion zwischen Querbelastung, Biegemoment und Querkraft CEN/TC 250/SC 3; N 1933: (AM-1-5-2013-16)

Eine Interaktionsgleichung wurde für den Fall gleichzeitig wirkender Querbelastung, Biegemoment und Querkraft vorgeschlagen.

$$\bar{\eta}_1^{3,6} + \left[\bar{\eta}_3 \cdot \left(1 - \frac{F_{Ed}}{2 \cdot V_{Ed}} \right) \right]^{1,6} + \eta_2 \leq 1,0$$

mit: $\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}}$ und $\bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}}$

Bezug Abschnitt 6.5(3) Effektive Lasteinleitung bei Querbelastung Typ c CEN/TC 250/SC 3; N 2127: (AM-1-5-2015-1)

Beim Vergleich des Hintergrunddokuments von DIN EN 1993-1-5:2010 Abschnitt 6.5 (JOHANSSON, B., et al. 2007) Seite 79 ist die wirksame Lastausbreitungslänge der Mindestwert der Gleichung (6.11), (6.12) und (6.13). Nach bestehender Norm fehlt Gleichung (6.13).

Diese Anmerkung wurde auch im Buch „Design of Plated Structures“ (BEG, D., et al., 2010) Seite 100 erwähnt. Somit muss die Norm so korrigiert werden, dass die Gleichungen (6.11) und (6.12) durch die Gleichungen (6.11), (6.12) und (6.13) ersetzt werden.

Bezug Abschnitt 5.3 (1), (2), (4) Schubbeulen bei ausgesteiften und nicht ausgesteiften Platten CEN/TC250/SC 3; N1824, N1881, N1950: (AM-1-5-2011-03a-c)

Neue Forschungen zeigten, dass bei der Ermittlung der kritischen Beulspannung τ_{cr} für unversteifte Beulfelder bzw. durch offene Steifen ausgesteiften Blechfelder als Randbedingung eine „Gelenkige Lagerung“ angenommen werden muss. Diese Regelung wurde vom Nationalen Anhang übernommen. Somit gilt nach DIN EN 1993-1-5/NA:2010 NCI 5.3(3): „Bei der Ermittlung der kritischen Beulspannung τ_{cr} von Beulfeldern ohne Längssteifen muss Randbedingung „gelenkige Lagerung“ angenommen werden.“

Außerdem wird bei der Ermittlung des Schubbeulwertes in DIN EN 1993-1-5:2010 Abschnitt 5.3(4) erwähnt: „Das Flächenträgheitsmoment der Steifen ist in der Regel bei der Ermittlung von k_τ auf 1/3 seines wirklichen Wertes zu reduzieren. Diese Reduktion ist bereits in den Gleichungen in A.3 enthalten.“

Neue Untersuchungen haben gezeigt, dass geschlossene Längssteifen im Vergleich zu offenen

Steifen eine positive Wirkung auf die Schubtragfähigkeit der Beulfelder haben. In der bestehenden Norm wird dieser Vorteil nicht berücksichtigt.

Im Nationalen Anhang DIN EN 1993-1-5/NA:2010 NCI zu 5.3(2) wird dieser Vorteil wie folgt berücksichtigt:

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

Außerdem kann die Reduzierung des Flächenträgheitsmoment für die Berechnung von k_τ im Fall von geschlossenen Steifen zu konservativen Ergebnissen führen. Die Reduktion wurde auf offene Steifenquerschnitte begrenzt.

Das Flächenträgheitsmoment der offenen Steifenquerschnitte ist in der Regel bei der Ermittlung von k_τ auf 1/3 seines wirklichen Wertes zu reduzieren. Diese Reduktion ist durch β_{st} in den Gleichungen in DIN EN 1993-1-5:2010-A.3 berücksichtigt.

Hierbei soll Anhang A3 Gleichung (A.5) und (A.6) von DIN EN 1993-1-5:2010 so modifiziert werden.

$$k_{\tau sl} = 9 \left(\frac{h_w}{a} \right)^2 \sqrt[4]{\left(\frac{I_{sl}^*}{t^3 \cdot h_w} \right)^3} > \frac{2,1}{t} \sqrt[3]{\frac{I_{sl}^*}{h_w}}$$

wobei

$$I_{sl}^* = \beta_{st} \cdot I_{sl}$$

$\beta_{st} = 1$ für offene Steifenquerschnitte und $\beta_{st} = 3$ für Hohlsteifenquerschnitte.

I_{sl} ist das Flächenträgheitsmoment einer Längsteife um die z-z-Achse. Bei Stegblechen mit Steifen ist I_{sl} die Summe der Steifigkeiten aller Einzelsteifen, wobei, diese nicht gleichmäßig angeordnet sein müssen.

Analog dazu ändert sich die Gleichung (A.6) zu:

$$k_\tau = 4,1 + \frac{6,3 + 0,18 \cdot \frac{I_{sl}^*}{t^3 \cdot h_w}}{\alpha^2} + 2,2 \sqrt[3]{\frac{I_{sl}^*}{t^3 \cdot h_w}}$$

Beitrag zu Abschnitt 10, (Gleichung 10.5) V-Faktor Biaxialer Druck CEN/TC 250/SC 3; N 2128: (AM- 1-5-2015-02)

In (BRAUN, B., 2010) wurde das Interaktionsverhalten bei unausgesteiften Bleche unter biaxialem Druck und Anwendung der Methode der reduzierten Spannungen untersucht und es wurde gezeigt, dass das Nachweisformat Gl. (10.5) in DIN EN 1993-1-5:2010 für die biaxiale Druckspannung auf der unsicheren Seite liegt. Es wurde eine Modifikation mit einem V-Faktor für die Interaktionsgleichung vorgeschlagen.

Um die Interaktionskurve für mehrachsige Beanspruchungen zu modifizieren, hat Braun in seiner Dissertation für unausgesteifte Bleche im Bereich Druck/Druck eine Interaktionsgleichung ähnlich der aus DIN 18800-3:2008 vorgeschlagen. So wird die Interaktionsgleichung mit dem Faktor V modifiziert:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\rho_x \cdot f_y / \gamma_{M_1}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{\rho_z \cdot f_y / \gamma_{M_1}}\right)^2 - V \cdot \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\rho_x \cdot f_y / \gamma_{M_1}}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{\rho_z \cdot f_y / \gamma_{M_1}}\right) + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{Ed}}{\chi_w \cdot f_y / \gamma_{M_1}}\right)^2 < 1$$

$V = \rho_x \cdot \rho_z$, wenn biaxiale Druckspannungen, sonst $V = 1$

Bezug Abschnitt 4.5.1(4) Mindeststeifigkeit der Steife CEN/TC 250/SC 3; N 1824: (AM-1-5-2011-04)

Für die Berechnung nach der Methode der wirksamen Breiten hat der deutsche Nationale Anhang, auf Grund der erhaltenen Ergebnisse im COMBRI: RFCS-Forschungsprojekt 2007, eine Mindeststeifigkeit für die Steifen festgelegt. Die Begründung für die Mindeststeifigkeit der Steife liegt in der Festlegung von Randstreifen (siehe $b_{edge,eff}$ in DIN EN 1993-1-5:2010 Bild 4.4), die keiner Abminderung infolge globalen Beulens unterliegen.

DIN EN 1993-1-5:2010, Abschnitt 10 ist von der Forderung nach einer Mindeststeifigkeit nicht betroffen, da hier eine pauschale Reduzierung der zulässigen Spannungen vorgenommen wird. Eine Ausnehmung der Randbereiche in der globalen Beulbeurteilung erfolgt in Abschnitt 10 nicht. Daher kann die Methode der reduzierten Spannungen auch auf ausgesteifte Beulfelder mit schwachen Steifen mit $\gamma < 25$ angewendet werden. Trotzdem kann auch bei Anwendung des Verfahrens der reduzierten Spannungen diese Mindeststeifigkeit einen Hinweis geben, dass es sich lohnt, starke Steifen zu wählen, um bei gleichem wirtschaftlichem Aufwand durch Schweißen eine bessere Tragfähigkeit zu bekommen, die im günstigen Fall der Tragfähigkeit des kritischen Einzelfeldes entspricht.

Nach dem Nationalen Anhang DIN EN 1993-1-5/NA:2010 Abschnitt 4.5.1(3) gilt: „Längssteifen mit Steifenquerschnitten, deren Steifigkeit $\gamma < 25$ ist (y nach DIN EN 1993-1-5:2010-12, Anhang A), sind zu vernachlässigen“. Um die Mindeststeifigkeit γ berechnen zu können, wird im Nationalen Anhang auf Anhang A verwiesen. Nach Anhang A ist γ für ausgesteifte Blechfelder mit dem Flächenträgheitsmoment des gesamten längsversteiften Blechfeldes definiert. In COMBRI: RFCS-Forschungsprojekt 2007 wurde die Mindeststeifigkeit für eine Steife festgelegt. D.h. der Nationale Anhang, muss korrigiert werden.

Die bezogene Biegesteifigkeit γ wird wie folgt definiert:

$$\gamma_{sl} = \frac{I_{sl,1}}{I_p}$$

wobei:

$I_{sl,1}$ ist das Flächenträgheitsmoment unter Ansatz der Bruttoquerschnittsfläche der als Ersatzdruckstab betrachteten Steife und der angrenzenden mittragenden Blechstreifen bezogen auf Knicken senkrecht zur Blechebene sowie

I_{pl} ist das Flächenträgheitsmoment für Plattenbiegung (bt^3)/12(1 - ν^2)

Bezug Abschnitt 6.4 und 6.5 Beanspruchbarkeit des Bleches bei Querbelastung CEN/TC 250/SC 3; N 1824: (AM-1-5-2011-06)

Neue Studien zeigen, dass der Wert für die plastische Widerstandsfähigkeit zu modifizieren ist. Die derzeitige Definition des plastischen Widerstands überschätzt die Tragfähigkeit in bestimmten Fällen (Hybrid-Träger) während dieser in anderen Fällen leicht unterschätzt wird (sehr schlanke Träger).

Vorgeschlagene Änderung:

Ersetzen der folgenden Abschnitte in DIN EN 1993-1-5:2010. Dabei basieren die Werte der Gleichung (6.6) auf $\gamma_{M_1} = 1,1$.

6.4 Reduktionsfaktor χ_F für die effektive Länge des Widerstands

$$\chi_F = \frac{1,0}{\varphi_F + \sqrt{\varphi_F^2 - \bar{\lambda}_F}} \leq 1,0 \quad (6.3)$$

mit

$$\varphi_F = \frac{1}{2} \cdot (1 + \alpha_{F0} \cdot (\bar{\lambda}_F - \bar{\lambda}_{F0}) + \bar{\lambda}_F) \quad (6.4)$$

$$\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{I_y \cdot t_w \cdot f_{yw}}{F_{cr}}} \quad (6.5)$$

$$\alpha_{F0} = 0,75 \quad (6.6)$$

$$\bar{\lambda}_{F0} = 0,50 \quad (6.6)$$

6.5 Effektive Lastlänge

$$m_1 = \frac{b_f}{t_w} \quad (6.8)$$

$$m_2 = 0,02 \cdot \left(\frac{h_w}{t_f}\right)^2 \quad \text{für } \bar{\lambda}_F > 0,5 \quad (6.9)$$

$$m_2 = 0 \quad \text{für } \bar{\lambda}_F \leq 0,5 \quad (6.9)$$

Für Hohlkastenträger, sollte b_f aus Gleichung (6.8) auf jeder Seite des Steges zu $15 \cdot \varepsilon \cdot t_f$ reduziert werden.

Für Typ a) und b) aus Bild 6.1, soll I_y aus folgender Gleichung bestimmt werden:

$$I_y = s_s + 2 \cdot t_f \cdot (1 + \sqrt{m_1})$$

Bezug Abschnitt 9.1 (2), 9.2.1(5), 9.2.1(6), 9.2.4(5) und Bild 9.5 Definition der Steifenquerschnitte in Kapitel 9 CEN/TC 250/SC 3; N 2040: (AM-1-5-2013-14)

Die Bezeichnung „Steife“ wird in DIN EN 1993-1-5:2010 Abschnitt 9 für zwei verschiedene Querschnitte verwendet. Zum einen für die Steife selbst, zum anderen für Steifen mit Blech.

Diese Mehrdeutigkeit soll im Folgenden geändert werden. Die Änderungen wurden hier mit roter Farbe gekennzeichnet.

Für den Fall „Steife mit Blech“ wird für die Abschnitte 9.1(2), 9.2.1(5), 9.2.1(6), 9.2.4(5) und die Abbildung 9.5 die Bezeichnung „wirksamer Steifenquerschnitt“ vorgeschlagen.

9.1(2):

Beim Nachweis der Knicksicherheit von Steifen darf der wirksame Steifenquerschnitt mit einer mitwirkenden Blechbreite von $15 \varepsilon t$ auf jeder Seite, jedoch maximal dem Steifenabstand angenommen werden, siehe Bild 9.1.

9.2.1(5):

(5) Sind keine Normalkräfte in der Quersteife vorhanden, so dürfen beide Kriterien in (4) als erfüllt angesehen werden, wenn das wirksame Flächenträgheitsmoment I_{st} der Quersteife mindestens folgende Bedingungen erfüllt:

e_{max} : der Abstand der Randfaser des wirksamen Steifenquerschnitts zum Schwerpunkt der Steife

9.2.1(6):

Bei Quersteifen unter Druckbeanspruchung ist in der Regel die einwirkende Normalkraft um den Wert $\Delta N_{st} = \sigma_m \cdot b^2 / \pi^2$ zur Berücksichtigung von Abtriebskräften zu erhöhen. Die Kriterien in (4) behalten ihre Gültigkeit, jedoch braucht ΔN_{st} bei der Berechnung der konstanten Druckspannung infolge der einwirkenden Druckbeanspruchung in der wirksamen Quersteife nicht berücksichtigt zu werden.

9.2.4(5):

Der Bruttoquerschnitt des Steges im Bereich des Ausschnittes (Schnitt a-a in Bild 9.5 [Bild 2]) ist in der Regel für folgende Querkraft V_{Ed} nachzuweisen:

I_{net} : das Flächenträgheitsmoment des Nettoquerschnitts, bestehend aus der Versteifung minus dem Ausschnitt und der Breite der Platte, wie in 9.1(2) definiert – vgl. Schnitt b-b in Bild 9.5 [Bild 2].

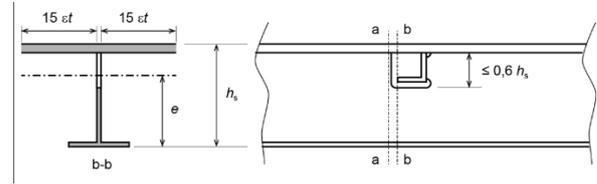


Bild 2: Bild 9.5: Ausschnitt in Quersteifen

Bezug Anhang A.3 – Koeffizienten des Schubbeulens

CEN/TC 250/SC 3; N 2040: (AM-1-5-2014-01)

Die Trägheitsverhältnisse aller Längsversteifungen der Platte sollen in der Gleichung (A.5) in DIN EN 1993-1-5:2010 zusammengefasst werden. In der aktuellen Fassung der Norm DIN EN 1993-1-5:2010 wird aber nicht erwähnt, dass diese Gleichung für Bleche mit gleichmäßig platzierten Längsversteifungen mit derselben Biegesteifigkeit gilt. Wenn die Steifigkeit einer Längssteife deutlich kleiner als die Biegesteifigkeit der anderen Längssteifen ist, kann der Schubbeulkoeffizient des ganzen Bleches kleiner als der berechnete Wert sein (siehe (A.5)). Deshalb wird eine Anmerkung in Anhang A.3 benötigt, die den Anwendungsbereich der Gleichung (A.5) erklärt.

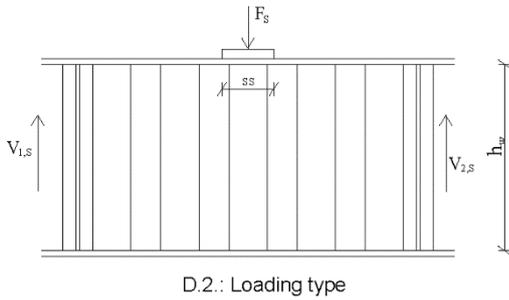
Anmerkung 2: Die Gleichung (A.5) in DIN EN 1993-1-5:2010 ist gültig für Bleche, die als ausgesteifte Bleche mit gleichmäßig platzierten Längssteifen und gleicher Biegesteifigkeit angesehen werden können.

Bezug Abschnitt D.2.4 Bauteile mit profilierten Stegblechen und Beanspruchbarkeit unter Querbelastung CEN/TC 250/SC 3; N 1881: AM-1-5-2012-13)

Die aktuelle Norm DIN EN 1993-1-5:2010 beinhaltet keine Möglichkeit den Widerstand gegen Querlasten für Träger mit trapezförmig profilierten Stegen zu berechnen. Deshalb soll die Norm durch eine Methode ergänzt werden, mit der man diesen Fall berechnen kann.

D.2.4 Widerstand gegen Querlasten

(1) Der Bemessungswiderstand von trapezförmig profilierten Stegen kann gemäß (4) bestimmt werden, vorausgesetzt, der Druckflansch wird in Querrichtung ausreichend zurückgehalten.



D.2.: Loading type

Bild 3: Bild D.2: Belastungstyp

(2) Das Bemessungsverfahren kann verwendet werden, wenn die Last über den Flansch aufgebracht wird und durch Querkkräfte im Steg gehalten wird, siehe Bild D.2 [Bild 3].

(3) Falls Träger mit geneigten Stegen vorliegen, sind die inneren Kräfte, die berücksichtigt werden müssen die Komponenten der äußeren Lasten in der Stegebene.

(4) Der Widerstand der Stege aus Trapezblech bei lokalem Beulen unter Querlast sollte folgendermaßen berechnet werden:

$$F_{Rd} = \frac{\chi \cdot t_w \cdot f_{yw} \cdot s_s \cdot k_\alpha}{1,20 \cdot \gamma_{M1}} \quad (D.11)$$

mit:

t_w : Stegdicke

f_{yw} : Streckgrenze des Stegs

s_s : Lastlänge

k_α : Modifikationsfaktor abhängig vom Winkel der Profilierung, der wie folgt zu berechnen ist:

$$k_\alpha = \frac{a_1 + a_2}{a_1 + a_4} \quad \text{siehe Bild D.1 [Bild 4]} \quad (D.12)$$

χ : Reduktionsfaktor abhängig vom lokalen Beulen, der wie folgt zu berechnen ist:

$$\chi = \frac{1,9}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,8}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,00 \quad (D.13)$$

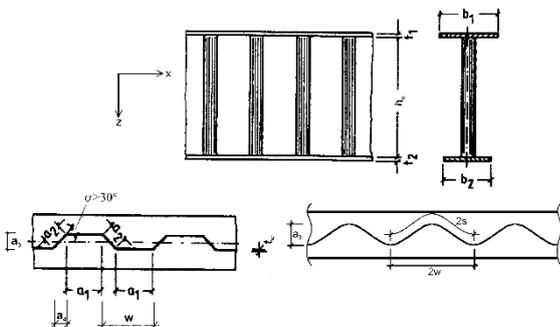


Bild D.1 — Bezeichnungen

Bild 4: Bild D.1: Bezeichnungen

Bezug Abschnitt Anhang D.2.1 Bauteile mit profilierten Stegblechen und Querbiegemoment CEN/TC 250/SC 3; N 1881: (AM-1-5-2011-07) und CEN/TC 250/SC 3; N 2040: (AM-1-5-2011-07)

Die aktuelle Norm DIN EN 1993-1-5:2010 schlägt zwar vor, die Einwirkung des Querbiegemoments bei der Berechnung des Biege widerstands eines profilierten Stegbleches zu berücksichtigen. Jedoch gibt es keine Formulierung, die die zusätzlichen Normalspannungen ($\sigma_x(M_z)$) aus den Biegemomenten der Flansche bestimmt. Neueste Untersuchungen haben ergeben, dass der Effekt des Querbiegemoments in der Berechnung des ebenen Biege widerstands vernachlässigt werden kann, aber im elastischen Nachweis und die Bestimmung des elastischen Spannungsfelds berücksichtigt werden soll.

Vorgeschlagene Änderung:

Änderung von $f_{yf,r}$ in Gleichung (D.1) zu f_{yf} .

Löschen der folgenden Zeilen aus Anhang D.2.1:

- $f_{yf,t}$ die aufgrund der Querbiegemomente in den Gurten wie folgt abgeminderte Fließgrenze:

$$f_{yf,r} = f_{yf} \cdot f_T$$

$$f_T = 1 - 0,4 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_x(M_z)}{f_{yf}}} \cdot \frac{1}{\gamma_{M0}}$$

- $\sigma_x(M_z)$ die durch Querbiegemomente, hervorgerufene Spannung im Gurt

Anmerkung 1 soll durch Folgendes ersetzt werden:

$$M_{z,max} = \frac{V}{h_w} \cdot \frac{a_3}{2} \cdot (2 \cdot a_1 + a_4) \quad (D.2)$$

mit: V ist die Querkraft im betrachteten Querschnitt

Bild D.2 soll durch folgende Abbildung Bild 5 ersetzt werden.

Anmerkung 2 wird geändert zu:

Für sinuswellenförmige Stege kann der Einfluss von M_z vernachlässigt werden.

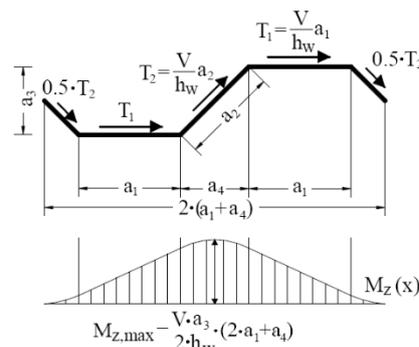


Bild 5: Querlasten infolge Einleitung des Schubflusses in die Gurte

Bezug Abschnitt Anhang E.1 Bestimmung wirk-samer Querschnitte für Spannung unterhalb der Streckgrenze CEN/TC 250/SC 3; N 2040: (AM-1-5-2014-02)

Durch einen unbegrenzt kleinen Wert für $\bar{\lambda}_{p,red}$ ergeben die gegebenen Formeln falsche oder sogar absurde (negative) Werte. Deshalb werden im zweiten Term der Gleichung keine Klammern benötigt.

Folgende Änderungen sollen vorgenommen werden:

Änderung des Abschnitts für innere Druckelemente von

$$\rho = \frac{1 - 0,055 \cdot (3 + \psi) / \bar{\lambda}_{p,red}}{\bar{\lambda}_{p,red}} + 0,18 \cdot \frac{(\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_{p,red})}{(\bar{\lambda}_p - 0,6)}$$

aber $\rho \leq 1$ (E.1)

Zu

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

$$\rho = \frac{1 - 0,055 \cdot (3 + \psi) / \bar{\lambda}_{p,red}}{\bar{\lambda}_{p,red}} + 0,18 \cdot \frac{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_{p,red}}{\bar{\lambda}_p - 0,6}$$

$$\text{aber } \rho \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \geq 0,673 \text{ (E.1.b)}$$

Änderung des Abschnitts für äußere Druckelemente von

$$\rho = \frac{1 - 0,188 / \bar{\lambda}_{p,red}}{\bar{\lambda}_{p,red}} + 0,18 \cdot \frac{(\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_{p,red})}{(\bar{\lambda}_p - 0,6)}$$

aber $\rho \leq 1$ (E.2)

zu

$$\rho = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p < 0,748 \text{ (E.2.a)}$$

$$\rho = \frac{1 - 0,188 / \bar{\lambda}_{p,red}}{\bar{\lambda}_{p,red}} + 0,18 \cdot \frac{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_{p,red}}{\bar{\lambda}_p - 0,6}$$

$$\text{aber } \rho \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \geq 0,748 \text{ (E.2.b)}$$

Bezug Abschnitt 9.2.2 Schweißen der Längssteifen CEN/TC 250/SC 3; N 2040: (AM-1-5-2014-03)

Aufgrund der aktuellen Tendenz zu immer schlankeren Brückenbauwerken wird es schwieriger, Steifen auf die dünnen Bleche zu schweißen. Deshalb sind manche Hersteller eventuell dazu gezwungen, die Längssteifen mit unterbrochenen Schweißnähten zu schweißen, was jedoch die Plattenstabilität gefährdet. Deshalb sollte folgender Abschnitt für das Schweißen in DIN EN 1993-1-5:2010 Abschnitt 9.2.2 hinzugefügt werden.

9.2.2(4):

Wenn unterbrochene Kehlnähte für das Verschweißen der Aussteifung verwendet werden, sollten die Längen der Schweißnähte L_w und die Länge der Lücken L_2 zwischen den Enden jeder Schweißnaht die Anforderungen nach Bild 4.1 in DIN EN 1993-1-8:2010 erfüllen.

2 Ausgewählte Beispiele

2.1 Einleitung

In diesem Kapitel sollen die beiden Nachweiskonzepte miteinander verglichen werden. Dabei werden die prinzipiellen Unterschiede des jeweiligen Nachweisverfahrens aufgezeigt. Um den Vergleich der beiden Nachweisverfahren mit DIN 18800-3 zu ermöglichen, sind die Beispiele aus (SCHEER, J, GENTZ, E, 1994) entnommen.

2.2 Beispiel 1: Vollwandträgersteg mit Längssteifen (Methode der reduzierten Spannungen)

2.2.1 Einleitung

In Bild 6 sind die Abmessungen und Beanspruchungen eines Vollwandträgerstegblechs mit 2 winkelförmigen Längssteifen in der Druckzone dargestellt. Die Spannungen sind im nachfolgenden Abschnitt angegeben.

Auf die Überprüfung der Anforderung an Längssteifen gemäß DIN EN 1993-1-5:2010 Abschnitt 9.2.1(8) und (9) wird an dieser Stelle verzichtet.

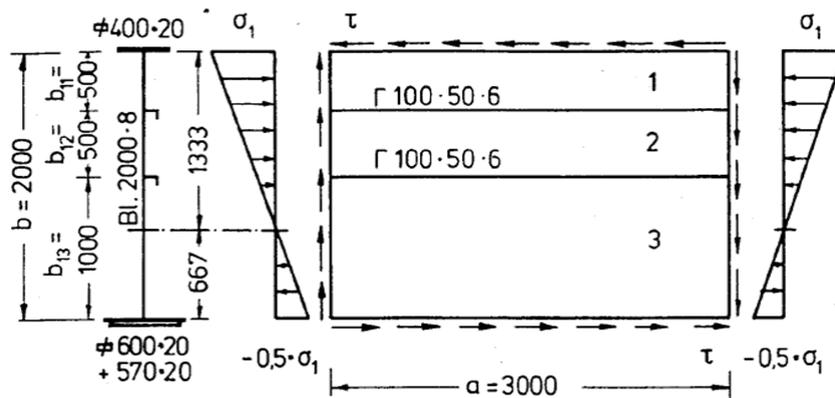


Bild 6: Beispiel 1 – Abmessungen und Beanspruchungen (Bild 3-11.3 aus (Erläuterungen zu DIN 18800-3))

2.2.2 Einzelfeldnachweise

a) Einzelfeld 1

$$\alpha = a/b = 3000/500 = 6,0$$

Beanspruchungen:

$$\sigma_{x,Ed} = 151 \text{ MN/m}^2$$

$$\sigma_{2,Ed} = 151 \cdot 833 / 1333 = 94,4 \text{ MN/m}^2$$

$$\psi_x = \sigma_{2,Ed} / \sigma_{x,Ed} = 94,4 / 151 = 0,625$$

$$\tau_{Ed} = 37,8 \text{ MN/m}^2$$

$$\sigma_{V,Ed} = \sqrt{151^2 + 3 \cdot 37,8^2} = 164,6 \text{ MN/m}^2$$

Die Überprüfung, ob überhaupt ein Beulnachweis für die Einzelfelder erforderlich ist, erfolgt mithilfe des c/t -Verhältnis. Dazu muss der Querschnitt (hier das Einzelfeld 1) den Anforderungen der Querschnittsklasse 3 genügen:

Bedingung 1:

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{86,4 \cdot t \cdot \varepsilon} = \frac{500}{86,4 \cdot 8 \cdot 1,0} = 0,723 \leq 0,83$$

$$\text{mit: } \varepsilon = \sqrt{235 / f_y} = 1,0$$

DIN EN 1993-1-5:2010

Gl. (5.5)

Bedingung erfüllt

Bedingung 2:

$$\text{grenz} \frac{c}{t} = \frac{42 \cdot \varepsilon}{0,67 + 0,33 \cdot \psi} = \frac{42 \cdot 1,0}{0,67 + 0,33 \cdot 0,625} = 47,9$$

$$\text{vorh} \frac{c}{t} = \frac{500}{8} = 62,5 > 47,9 = \text{grenz} \frac{c}{t}$$

Folglich ist ein Beulnachweis für das Einzelfeld zwingend erforderlich.

Beulwerte:

$$\sigma_E = 189800 \cdot (t/b)^2 = 189800 \cdot (8/500)^2 = 48,6 \text{ MN/m}^2$$

$$k_\sigma = 8,2 / (1,05 + \psi_x) = 8,2 / (1,05 + 0,625) = 4,896$$

$$\sigma_{cr,p} = k_\sigma \cdot \sigma_E = 4,896 \cdot 48,6 = 237,9 \text{ MN/m}^2$$

$$k_\tau = 5,34 + 4,0 / \alpha^2 = 5,34 + 4,0 / 6,0^2 = 5,451$$

$$\tau_{cr} = k_\tau \cdot \sigma_E = 5,451 \cdot 48,6 = 264,9 \text{ MN/m}^2$$

 α -Faktoren:

$$\alpha_{ult} = f_y / \sigma_{V,Ed} = 235 / 164,6 = 1,428$$

$$\alpha_{cr,x} = \sigma_{cr,p} / \sigma_{1,Ed} = 237,9 / 151 = 1,576$$

$$\alpha_{cr,\tau} = \tau_{cr} / \tau_{Ed} = 264,9 / 37,8 = 7,008$$

$$\frac{1}{\alpha_{cr}} = \frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} + \left[\left(\frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} \right)^2 + \frac{1 - \psi_x}{2\alpha_{cr,x}^2} + \frac{1}{\alpha_{cr,\tau}^2} \right]^{1/2}$$

$$\frac{1}{\alpha_{cr}} = \frac{1 + 0,625}{4 \cdot 1,576} + \left[\left(\frac{1 + 0,625}{4 \cdot 1,576} \right)^2 + \frac{1 - 0,625}{2 \cdot 1,576^2} + \frac{1}{7,008^2} \right]^{1/2} = 0,6606$$

$$\alpha_{cr} = 1,514$$

Plattenschlankheit und Abminderungsbeiwerte:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\alpha_{ult} / \alpha_{cr}} = \sqrt{1,428 / 1,514} = 0,971$$

DIN EN 1993-1-1:2010
Tab. 5.2

Bedingung **nicht** erfüllt

Ein entsprechendes Vorgehen für den gesamten Steg wäre nur unter Vernachlässigung der Steifen zulässig, aber nicht zielführend.

DIN EN 1993-1-5:2010
Tab. 4.1

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (A.5)
für $k_{tsl} = 0$

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (10.3)

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (10.6)

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (10.2)

$$\rho_x = [\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)] / \bar{\lambda}_p^2$$

$$\rho_x = [0,971 - 0,055 \cdot (3 + 0,625)] / 0,971^2$$

$$\rho_x = 0,818$$

$$\chi_w = 0,83 / \bar{\lambda}_p \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \geq 0,83$$

$$\chi_w = 0,83 / 0,971 = 0,855$$

knickstabähnliches Verhalten:

$$\sigma_{cr,c} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I^2}{10,92 \cdot a^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 8^2}{10,92 \cdot 3000^2} = 1,35 \text{ MN/m}^2$$

$$\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1 = \frac{237,9}{1,35} - 1 = 175,222 > 1$$

$$\text{es gilt: } 0 \leq \xi \leq 1 \Rightarrow \xi = 1$$

$$\rho_{c,x} = (\rho_x - \chi_c) \cdot \xi \cdot (2 - \xi) + \chi_c = \rho_x = 0,818$$

Nachweis Einzelfeld 1:

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\rho_{c,x}}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{Ed}}{\chi_w}\right)^2} \leq \frac{f_y}{\gamma_M}$$

$$\sqrt{\left(\frac{151}{0,818}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{37,8}{0,855}\right)^2} = 199,8 \leq 213,6 = \frac{235 \text{ MN}}{1,1 \text{ m}^2} = f_{yd}$$

$$E_d / R_d = 199,8 / 213,6 = 0,935 < 1$$

b) Einzelfeld 2

Aufgrund der kleineren Beanspruchungen und bei gleichen Abmessungen wie Einzelfeld 1 kann das Einzelfeld 2 nicht maßgebend werden.

c) Einzelfeld 3

$$\alpha = a/b = 3000/1000 = 3,0$$

Beanspruchungen:

$$\sigma_{x,Ed} = 37,7 \text{ MN/m}^2$$

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (4.2)

DIN EN 1993-1-5:2010
Abschn. 5.3(1)
verformbare
Auflagersteifen

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (4.8)

DIN EN 1993-1-5:2010
Abschn. 4.5.4

kein knickstabähnliches
Verhalten

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (4.13)

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (10.5)

Nachweis erfüllt

$$\sigma_{2,Ed} = -0,5 \cdot 151 = -75,5 \text{ MN/m}^2$$

$$\psi_x = \sigma_{2,Ed} / \sigma_{x,Ed} = -75,5 / 37,7 = -2,003$$

$$\tau_{Ed} = 37,8 \text{ MN/m}^2$$

$$\sigma_{V,Ed} = \sqrt{37,7^2 + 3 \cdot 37,8^2} = 75,6 \text{ MN/m}^2$$

Beulwerte:

$$\sigma_E = 189800 \cdot (t/b)^2 = 189800 \cdot (8/1000)^2 = 12,1 \text{ MN/m}^2$$

$$k_\sigma = 5,98 \cdot (1 - \psi_x)^2 = 5,98 \cdot (1 + 2,003)^2 = 53,928$$

$$\sigma_{cr,p} = k_\sigma \cdot \sigma_E = 53,928 \cdot 12,1 = 652,5 \text{ MN/m}^2$$

$$k_\tau = 5,34 + 4,0 / \alpha^2 = 5,34 + 4,0 / 3,0^2 = 5,784$$

$$\tau_{cr} = k_\tau \cdot \sigma_E = 5,784 \cdot 12,1 = 70,0 \text{ MN/m}^2$$

 α -Faktoren:

$$\alpha_{ult} = f_y / \sigma_{V,Ed} = 235 / 75,6 = 3,109$$

$$\alpha_{cr,x} = \sigma_{cr,p} / \sigma_{x,Ed} = 652,5 / 37,7 = 17,308$$

$$\alpha_{cr,\tau} = \tau_{cr} / \tau_{Ed} = 70,0 / 37,8 = 1,852$$

$$\frac{1}{\alpha_{cr}} = \frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} + \left[\left(\frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} \right)^2 + \frac{1 - \psi_x}{2\alpha_{cr,x}^2} + \frac{1}{\alpha_{cr,\tau}^2} \right]^{1/2}$$

$$\frac{1}{\alpha_{cr}} = \frac{1 - 2,003}{4 \cdot 17,308} + \left[\left(\frac{1 - 2,003}{4 \cdot 17,308} \right)^2 + \frac{1 + 2,003}{2 \cdot 17,308^2} + \frac{1}{1,852^2} \right]^{1/2} = 0,530284$$

$$\alpha_{cr} = 1,886$$

Plattenschlankheit und Abminderungsbeiwerte:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\alpha_{ult} / \alpha_{cr}} = \sqrt{3,109 / 1,886} = 1,284$$

$$\rho_x = [\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)] / \bar{\lambda}_p^2$$

$$\rho_x = [1,284 - 0,055 \cdot (3 - 2,003)] / 1,284^2 = 0,746$$

DIN EN 1993-1-5:2010
Tab. 4.1

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (A.5)
für $k_{\tau SI} = 0$

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (10.3)

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (10.6)

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (10.2)

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (4.2)

$$\chi_w = 0,83 / \bar{\lambda}_p \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \geq 0,83$$

$$\chi_w = 0,83 / 1,284 = 0,646$$

knickstabähnliches Verhalten:

$$\sigma_{cr,c} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I^2}{10,92 \cdot a^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 8^2}{10,92 \cdot 3000^2} = 1,35 \text{ MN/m}^2$$

$$\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1 = \frac{237,9}{1,35} - 1 = 175,222 > 1$$

$$\text{es gilt: } 0 \leq \xi \leq 1 \Rightarrow \xi = 1$$

$$\rho_{c,x} = (\rho_x - \chi_c) \cdot \xi \cdot (2 - \xi) + \chi_c = \rho_x = 0,746$$

Nachweis Einzelfeld 3:

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\rho_{c,x}}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{Ed}}{\chi_w}\right)^2} \leq \frac{f_y}{\gamma_M}$$

$$\sqrt{\left(\frac{37,7}{0,746}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{37,8}{0,646}\right)^2} = 113,2 \leq 213,6 \text{ MN/m}^2 = f_{yd}$$

$$E_d / R_d = 113,2 / 213,6 = 0,530 < 1$$

DIN EN 1993-1-5:2010
Abschn. 5.3(1)

verformbare Auflagersteifen

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (4.8)

DIN EN 1993-1-5:2010
Abschn. 4.5.4

kein knickstabähnliches Verhalten

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (4.13)

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (10.5)

Nachweis erfüllt

2.2.3 Gesamtfeldnachweis

a) Vorbemerkungen

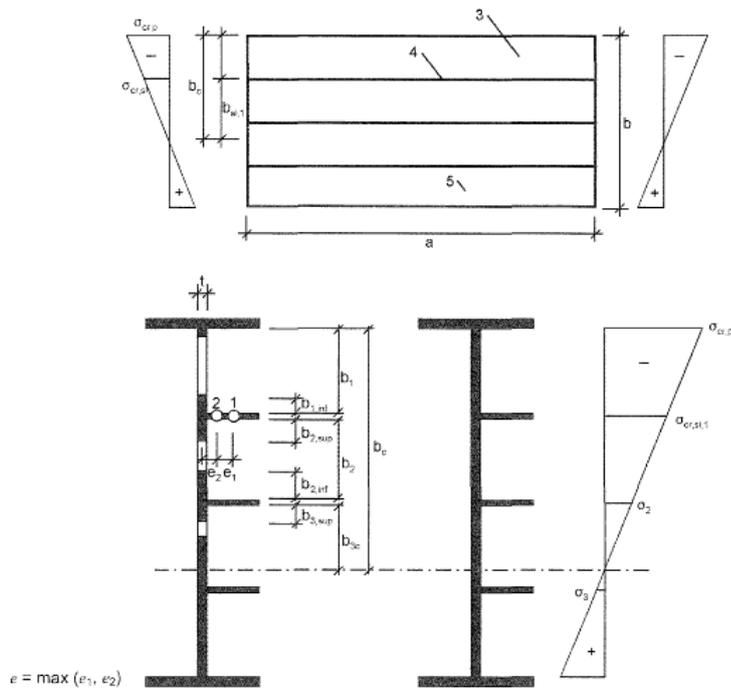
Um den Gesamtfeldnachweis führen zu können, müssen zunächst die Eingangswerte bestimmt werden. Hierbei ist die Ermittlung der Verzweigungsfaktoren bzw. Beulwerte und deren Berechnungsart von zentraler Bedeutung. Nachfolgend werden deshalb zunächst die Verzweigungsfaktoren mittels unterschiedlicher Berechnungsansätze bestimmt. Vorab werden die Querschnittswerte der Steifen ermittelt.

Für die Felder 1-3 ergeben sich folgende ψ -Beiwerte und Abmessungen:

$\psi_1 = 0,625$ und $b_1 = 500$ mm

$\psi_2 = 0,400$ und $b_2 = 500$ mm

$\psi_3 = -2,000$ und $b_{3c} = 1000 - 667 = 333$ mm



Legende

- 1 Schwerelinie der Längssteife
- 2 Schwerelinie des Ersatzdruckstabes = Längssteife + mitwirkende Blechteile
- 3 Einzelfeld
- 4 Längssteife
- 5 Blechdicke t

	Breite bei Bruttoquerschnittsfläche	Breite bei wirksamen Flächen nach Tabelle 4.1	Bedingung für ψ_i
$b_{1,inf}$	$\frac{3 - \psi_1}{5 - \psi_1} b_1$	$\frac{3 - \psi_1}{5 - \psi_1} b_{1,eff}$	$\psi_1 = \frac{\sigma_{cr,sl,1}}{\sigma_{cr,p}} > 0$
$b_{2,sup}$	$\frac{2}{5 - \psi_2} b_2$	$\frac{2}{5 - \psi_2} b_{2,eff}$	$\psi_2 = \frac{\sigma_2}{\sigma_{cr,sl,1}} > 0$
$b_{2,inf}$	$\frac{3 - \psi_2}{5 - \psi_2} b_2$	$\frac{3 - \psi_2}{5 - \psi_2} b_{2,eff}$	$\psi_2 > 0$
$b_{3,sup}$	$0,4 b_{3c}$	$0,4 b_{3c,eff}$	$\psi_3 = \frac{\sigma_3}{\sigma_2} < 0$

Bild 7: Bezeichnungen gemäß Bild A.1 aus DIN EN 1993-1-5:2010

Breiten für die Ermittlung der Bruttoquerschnittsflächen:

$$b_{1,\text{inf}} = (3-0,625) / (5-0,625) \times 500 = 271,4 \text{ mm}$$

$$b_{2,\text{sup}} = 2 \times 500 / (5-0,400) = 217, \text{ mm}$$

$$b_{2,\text{inf}} = (3-0,400) / (5-0,400) \times 500 = 282,6 \text{ mm}$$

$$b_{3,\text{sup}} = 0,4 \times 333 = 133,2 \text{ mm}$$

mitwirkende Breite für Bruttoquerschnittswerte:

$$b_{\text{sl}1} = 271,4 + 6 + 217,4 = 494,8 = \text{ca. } 495 \text{ mm}$$

$$b_{\text{sl}2} = 282,6 + 6 + 133,2 = 421,8 = \text{ca. } 422 \text{ mm}$$

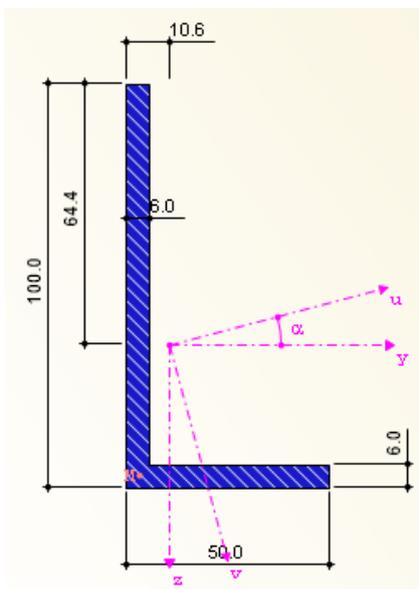
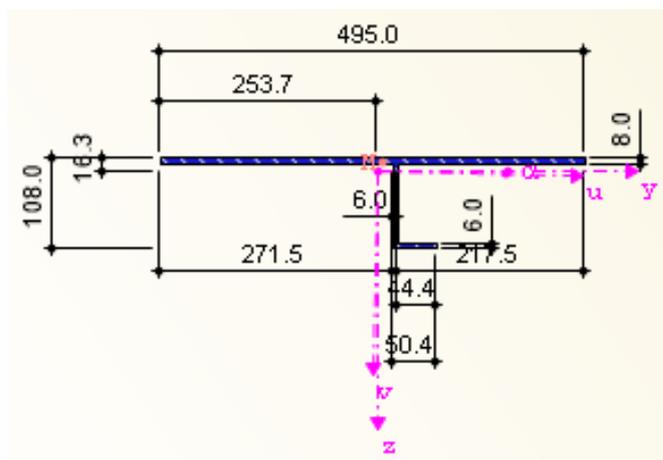


Bild 8: Schwerpunktlage des Winkelprofils ohne mitwirkendes Blech (RSTAB 8.04)



Querschnittswerte

$$A = 48,24 \text{ cm}^2$$

$$I_y = 426,03 \text{ cm}^4$$

Bild 9: Querschnittswerte der Steife 1 einschl. mitwirkendem Blech RSTAB 8.04

$$\sigma_{cr,sl1} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl1}}{A_{sl1} \cdot a^2} + \frac{E \cdot t^3 \cdot b \cdot a^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot (1 - \nu^2) \cdot A_{sl1} \cdot b_1^2 \cdot b_2^2}$$

$$\sigma_{cr,sl1} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 426,03 \cdot 10^4}{4824 \cdot 3000^2} + \frac{210000 \cdot 8^3 \cdot 1000 \cdot 3000^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot (1 - 0,3^2) \cdot 4824 \cdot 500^2 \cdot 500^2}$$

$$\sigma_{cr,sl1} = 203,38 + 89,34 = 292,7 \text{ MN/m}^2$$

$$\sigma_{cr,p,sl1} = \sigma_{cr,sl1} \cdot b_c / b_{sl1} = 292,7 \cdot 1333 / 833 = 468,4 \text{ MN/m}^2$$

Umrechnung auf Randspannungen

untere Steife:

Querschnittswerte gemäß Bild 9

$$A_{sl2} = 4240 \text{ mm}^2 \quad I_{sl2} = 415,69 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$b_1 = 500 \text{ mm} \quad b_2 = 1000 \text{ mm}$$

$$b = b_1 + b_2 = 500 + 1000 = 1500 \text{ mm}$$

$$b_c = 1333 \text{ mm} \quad b_{sl2} = 333 \text{ mm}$$

$$a_c = 4,33 \sqrt[4]{\frac{I_{sl2} \cdot b_1^2 \cdot b_2^2}{t^3 \cdot b}}$$

$$a_c = 4,33 \sqrt[4]{\frac{415,69 \cdot 10^4 \cdot 500^2 \cdot 1000^2}{8^3 \cdot 1000}} = 5168 > 3000 \text{ mm} = a$$

$$\sigma_{cr,sl2} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl2}}{A_{sl2} \cdot a^2} + \frac{E \cdot t^3 \cdot b \cdot a^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot (1 - \nu^2) \cdot A_{sl2} \cdot b_1^2 \cdot b_2^2}$$

$$\sigma_{cr,sl2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 415,69 \cdot 10^4}{4240 \cdot 3000^2} + \frac{210000 \cdot 8^3 \cdot 1500 \cdot 3000^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot (1 - 0,3^2) \cdot 4240 \cdot 500^2 \cdot 1000^2}$$

$$\sigma_{cr,sl2} = 225,78 + 38,12 = 263,9 \text{ MN/m}^2$$

$$\sigma_{cr,p,sl2} = \sigma_{cr,sl2} \cdot b_c / b_{sl2} = 263,9 \cdot 1333 / 333 = 1056,4 \text{ MN/m}^2$$

Umrechnung auf Randspannungen

beide Steifen:

$$A_{sl1+2} = A_{sl1} + A_{sl2} = 4824 + 4240 = 9064 \text{ mm}^2$$

$$I_{sl1+2} = I_{sl1} + I_{sl2} = (426,03 + 415,69) \cdot 10^4 = 841,72 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Die Lage der Resultierenden wird näherungsweise über die Spannungen in Höhe der Steifen (vom oberen Rand aus) ermittelt:

$$b_1 = (500 \cdot 151 + 1000 \cdot 37,7) / (151 + 37,7) = 599,9 \text{ mm}$$

$$b_1 = 600 \text{ mm} \quad b_2 = 2000 - 600 = 1400 \text{ mm}$$

$$b = 2000 \text{ mm}$$

$$b_c = 1333 \text{ mm} \quad b_{s1+2} = 1400 - 667 = 733 \text{ mm}$$

$$a_c = 4,33 \sqrt[4]{\frac{I_{s1+2} b_1^2 b_2^2}{t^3 b}}$$

$$a_c = 4,33 \sqrt[4]{\frac{841,72 \cdot 10^4 \cdot 1400^2 \cdot 600^2}{8^3 \cdot 2000}} = 6720 > 3000 \text{ mm} = a$$

$$\sigma_{cr,s1+2} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{s1+2}}{A_{s1+2} \cdot a^2} + \frac{E \cdot t^3 \cdot b \cdot a^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot (1 - \nu^2) \cdot A_{s1+2} \cdot b_1^2 \cdot b_2^2}$$

$$\sigma_{cr,s1+2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 841,72 \cdot 10^4}{9064 \cdot 3000^2} + \frac{210000 \cdot 8^3 \cdot 2000 \cdot 3000^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot (1 - 0,3^2) \cdot 9064 \cdot 600^2 \cdot 1400^2}$$

$$\sigma_{cr,s1+2} = 213,86 + 8,42 = 222,3 \text{ MN/m}^2$$

$$\sigma_{cr,p,s1+2} = \sigma_{cr,s1+2} \cdot b_c / b_{s1+2} = 222,3 \cdot 1333 / 733 = 404,2 \text{ MN/m}^2$$

Umrechnung auf Randspannungen

Maßgebender Verzweigungsfaktor für Längsspannungen:

Maßgebend ist das Minimum der 3 betrachteten Fälle:

$$\sigma_{cr,p} = \text{MIN}(\sigma_{cr,p,s11}; \sigma_{cr,p,s12}; \sigma_{cr,p,s1+2})$$

$$\sigma_{cr,p} = \text{MIN}(468,4; 1056,4; 404,2) = 404,2 \text{ MN/m}^2$$

$$\alpha_{cr,x} = \sigma_{cr,p} / \sigma_{Ed} = 404,2 / 151 = 2,6768$$

c) Bestimmung des Schubbeulwertes gemäß DIN EN 1993-1-5:2010 Anhang A.3

Die Abminderung der Flächenträgheitsmomente auf 1/3 gemäß DIN EN 1993-1-5:2010 Abschn. 5.3(4) ist bereits in den Formeln des Anhangs A.3 enthalten. Dies ist jedoch gemäß DIN EN 1993-1-5:2010 Abschn. 10.5(3) Anmerkung 1 für ausgesteifte Beulfelder mit der Methode der reduzierten Spannungen nicht erforderlich. Aus diesem Grund wird das Flächenträgheitsmoment der Steifen mit dem Faktor 3 multipliziert.

$$k_{\tau} = 4,1 + \frac{6,3 + 0,18 \cdot \frac{I_{sl}^*}{t^3 \cdot h_w}}{\alpha^2} + 2,2 \cdot \sqrt[3]{\frac{I_{sl}^*}{t^3 \cdot h_w}}$$

$$k_{\tau} = 4,1 + \frac{6,3 + 0,18 \cdot \frac{2,525,16 \cdot 10^4}{8^3 \cdot 2000}}{1,5^2} + 2,2 \cdot \sqrt[3]{\frac{2,525,16 \cdot 10^4}{8^3 \cdot 2000}} = 15,276$$

$$\sigma_E = 189800 \cdot (t/b)^2 = 189800 \cdot (8/2000)^2 = 3,04 \text{ MN/m}^2$$

$$\tau_{cr} = k_{\tau} \cdot \sigma_E = 15,276 \cdot 3,04 = 46,4 \text{ MN/m}^2$$

$$\alpha_{cr,\tau} = \tau_{cr} / \tau_{Ed} = 46,4 / 37,8 = 1,2275$$

d) Verzweigungsfaktor unter kombinierter Beanspruchung

Die Ermittlung des Verzweigungsfaktors unter kombinierter Beanspruchung mit Hilfe der Näherungsformel nach DIN EN 1993-1-5:2010 Gl. (10.6) zeigt einen Wert kleiner 1, der durch das Schubbeulen dominiert wird.

$$\frac{1}{\alpha_{cr}} = \frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} + \left[\left(\frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} \right)^2 + \frac{1 - \psi_x}{2\alpha_{cr,x}^2} + \frac{1}{\alpha_{cr,\tau}^2} \right]^{1/2}$$

$$\frac{1}{\alpha_{cr}} = \frac{1 - 0,5}{4 \cdot 2,6768} + \left[\left(\frac{1 - 0,5}{4 \cdot 2,6768} \right)^2 + \frac{1 + 0,5}{2 \cdot 2,6768^2} + \frac{1}{1,2275^2} \right]^{1/2} = 0,924496$$

$$\alpha_{cr} = 1,0817$$

e) Verzweigungsfaktoren mittels EBPlate

Alternativ erfolgt die Berechnung der Verzweigungsfaktoren mit dem Programm EBPlate 2.01. Hierbei können diskrete Steifen berücksichtigt werden. Die mitwirkende Breite des Beulfeldes ist dabei programmintern festgelegt, so dass zur Erzielung der unter b) ermittelten Querschnittswerte der Steifen die Dicke t so modifiziert wird, dass das jeweilige Flächenträgheitsmoment hinreichend genau übereinstimmt, vgl. Bild 8 und Bild 12 bzw. Bild 9 und Bild 13.

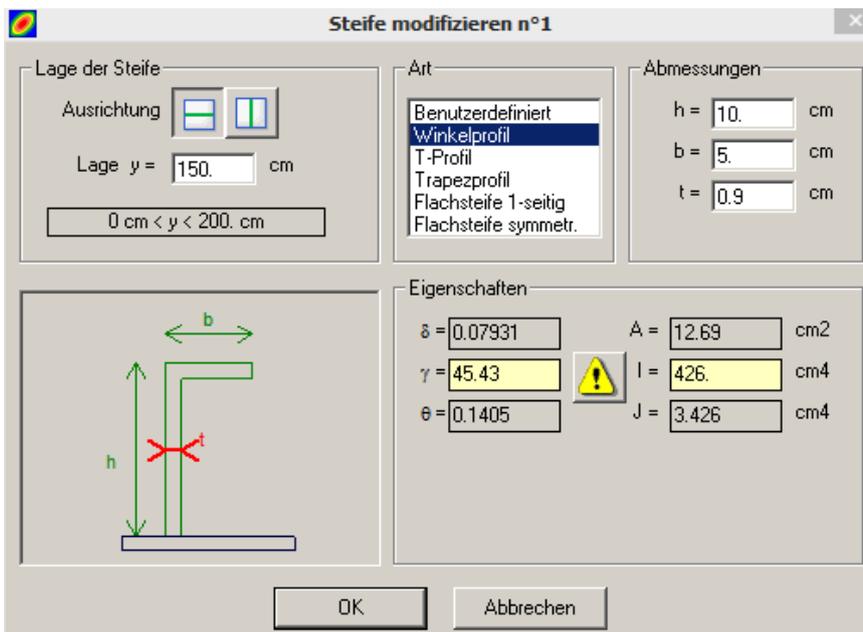


Bild 12: Querschnittswerte Steife 1 (oben) mit modifizierter Dicke [EBPlate 2.01]

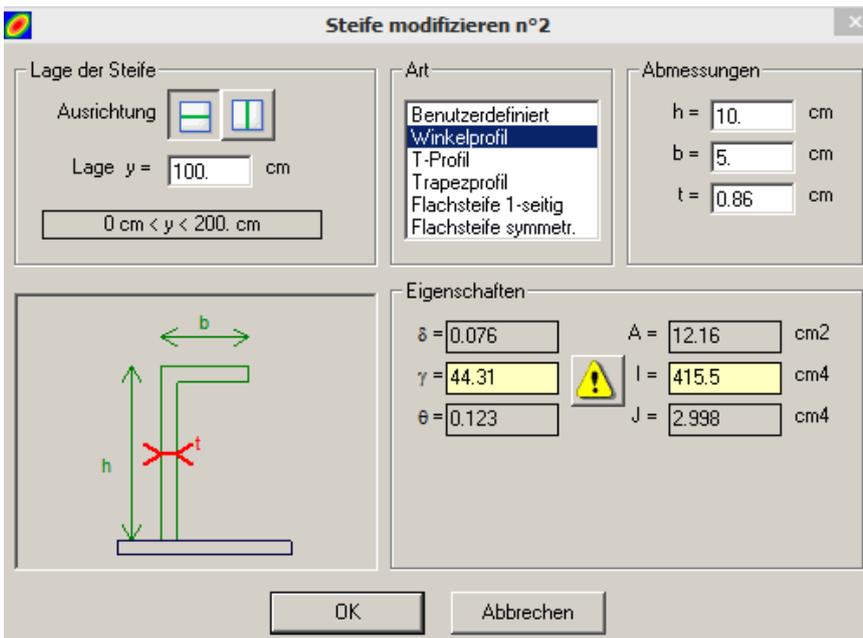


Bild 13: Querschnittswerte Steife 2 (unten) mit modifizierter Dicke [EBPlate 2.01]

Die nachfolgenden Bilder zeigen verschiedene Eigenformen, die für die weiteren Erläuterungen von Interesse sind. Bild 14 zeigt die Verzweigungsfigur für den kleinsten Eigenwert (1,9107) unter alleiniger Längsbeanspruchung. Man erkennt eindeutig, dass es sich um das mehrwellige Beulen des oberen Einzelfeldes handelt, d.h. um eine lokale Eigenform. Bei den folgenden Eigenwerten 2 bis 9 handelt es sich im Prinzip um ähnliche Formen, die sich in der Anzahl der Wellen unterscheiden. Die erste globale Verzweigungsfigur im Sinne einer signifikanten Eigenverformung der Steifen tritt erst beim 10. Eigenwert (2,8169) auf, siehe Bild 15.

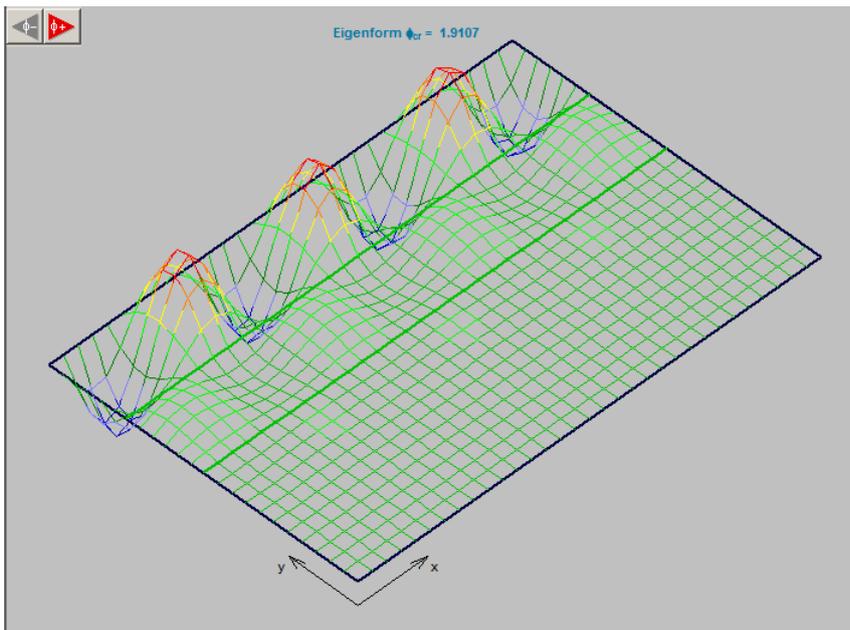


Bild 14: Verzweigungsfigur für 1. Eigenwert (1,9107, nur $\sigma_{x,Ed}$) [EBPlate 2.01]

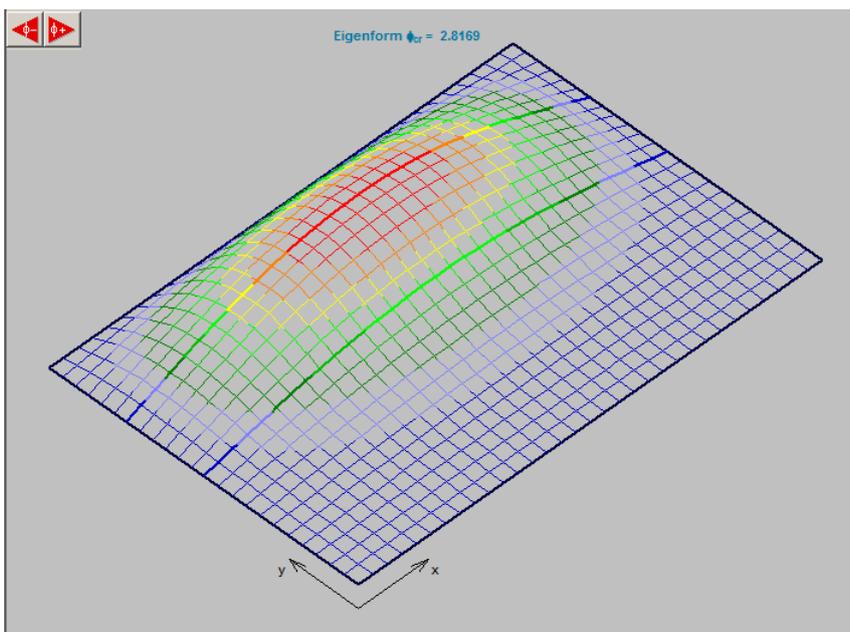


Bild 15: Verzweigungsfigur für 10. Eigenwert (2,8169, nur $\sigma_{x,Ed}$) [EBPlate 2.01]

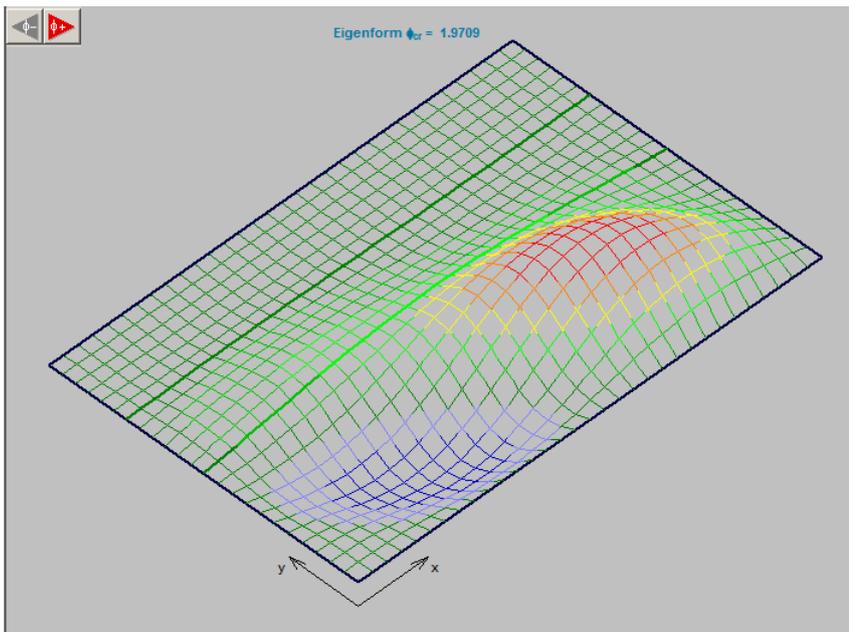


Bild 16: Verzweigungsfigur für 1. Eigenwert (1,9709, nur τ_{Ed}) [EBPlate 2.01]

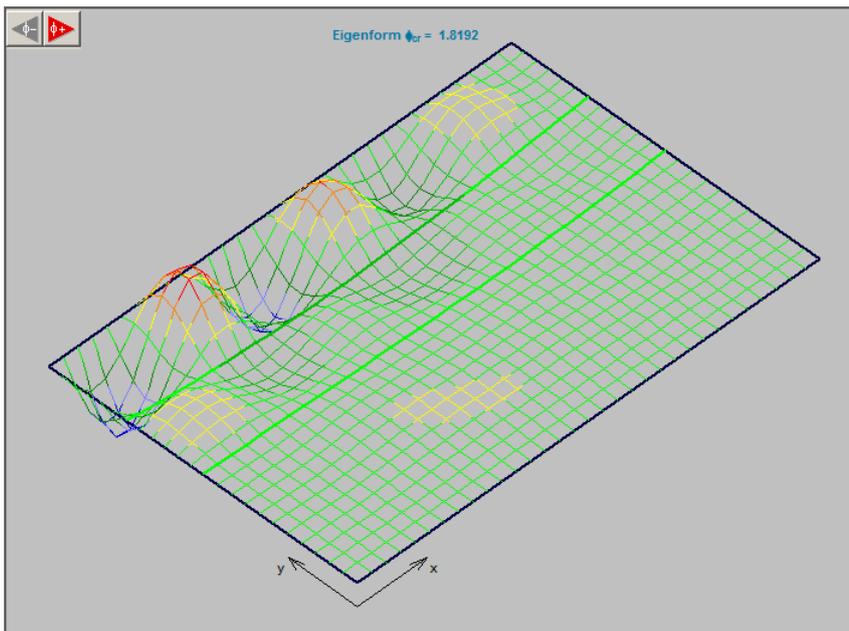


Bild 17: Verzweigungsfigur für 1. Eigenwert (1,8192, $\sigma_{x,Ed} + \tau_{Ed}$) [EBPlate 2.01]

Der kleinste Eigenwert unter alleiniger Schubbeanspruchung sowie die zugehörige Verzweigungsfigur zeigt Bild 16. Erwartungsgemäß ist hier das untere Einzelfeld maßgebend, wobei auch ein gewisser Einfluss der Nachgiebigkeit der Steife 2 zu erkennen ist. Die Ermittlung erfolgte mit zuvor genannten Steifigkeiten der Steifen, also ohne die gemäß DIN EN 1993-1-5:2010 Abschnitt 5.3(4) erforderliche Reduktion der Flächenträgheitsmomente zur Ermittlung der Schubbeulwerte auf 1/3, vgl. Erläuterungen vorne.

Gleiche Eingangswerte liegen der Berechnung gemäß Bild 17 unter kombinierter Längs- und Schubbeanspruchung zugrunde. Der kleinste Verzweigungsfaktor, der somit maßgeblich in die Berechnung der bezogenen Schlankheit eingeht, beträgt in diesem Fall 1,8192. Verwendet man alternativ die Näherungsformel gemäß DIN EN 1993-1-5:2010 Gl. (10.6), ergibt sich:

$$\frac{1}{\alpha_{cr}} = \frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} + \left[\left(\frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} \right)^2 + \frac{1 - \psi_x}{2\alpha_{cr,x}^2} + \frac{1}{\alpha_{cr,\tau}^2} \right]^{1/2}$$

$$\frac{1}{\alpha_{cr}} = \frac{1 - 0,5}{4 \cdot 1,9107} + \left[\left(\frac{1 - 0,5}{4 \cdot 1,9107} \right)^2 + \frac{1 + 0,5}{2 \cdot 1,9107^2} + \frac{1}{1,9709^2} \right]^{1/2} = 0,748907$$

$$\alpha_{cr} = 1,3353$$

In diesem Fall ist die Güte der Näherung nicht optimal, was aber in Kenntnis der Zusammenhänge nicht verwunderlich ist. Denn Bild 14 zeigt die maßgebliche Beulfigur infolge Längsbeanspruchung im oberen Einzelfeld ($\alpha_{cr,x} = 1,9107$), während für die Schubbeanspruchung ($\alpha_{cr,\tau} = 1,9709$) gemäß Bild 16 das untere Einzelfeld maßgebend ist. Die geringe gegenseitige Beeinflussung der beiden Beulmoden wird durch den Verzweigungsfaktor $\alpha_{cr} = 1,8192$ in Bild 17 deutlich. Diese geometrische Entkopplung kann die Näherungsformel naturgemäß nicht abbilden.

f) Verzweigungsfaktoren aus der Literatur

Die Beulwerttafeln von *Klöppel/Scheer* sind ein seit Jahrzehnten bewährtes und verbreitetes Hilfsmittel zur Bestimmung von Verzweigungslasten. Die grundlegende Darstellung mechanischer Zusammenhänge lassen es unabhängig von normativen Regelungen zu, diese auch heute noch anzuwenden. Gleichwohl ist ihre Anwendung an die Papierform gebunden und entzieht sich damit einer unmittelbaren digitalen Nutzung und ist natürlich nur auf die dort enthaltenen Fälle beschränkt.

Als Eingangswerte dienen die auf die Platte bezogenen Querschnittswerte. Die Tafelwerte gehen dabei von 2 gleichen Steifen aus, was streng genommen aufgrund der unterschiedlichen Steifigkeitswerte der beiden Steifen gemäß a) nicht, aber näherungsweise sehr gut erfüllt ist. Es wird deshalb vereinfachend mit einem gemittelten Flächenträgheitsmoment der Steifen von 420 cm^4 gerechnet.

$$\delta = \frac{A_{sl}}{b \cdot t} = \frac{864}{2000 \cdot 8} = 0,054$$

$$\gamma = 10,92 \cdot \frac{I_{sl}}{b \cdot t^3} = 10,92 \cdot \frac{420 \cdot 10^4}{2000 \cdot 8^3} = 44,8$$

Aus Bild 18 ergibt sich für $\alpha = 1,5$:

$$k_\sigma = 77,9 \quad \text{zugehörig zu } \gamma^{L*} = 18$$

$$\sigma_E = 189800 \cdot (t/b)^2 = 189800 \cdot (8/2000)^2 = 3,04 \text{ MN/m}^2$$

$$\sigma_{cr,p} = k_{\sigma} \cdot \sigma_E = 77,9 \cdot 3,04 = 236,8 \text{ MN/m}^2$$

$$\alpha_{cr,x} = \sigma_{cr,p} / \sigma_{x,Ed} = 236,8 / 151 = 1,5682$$

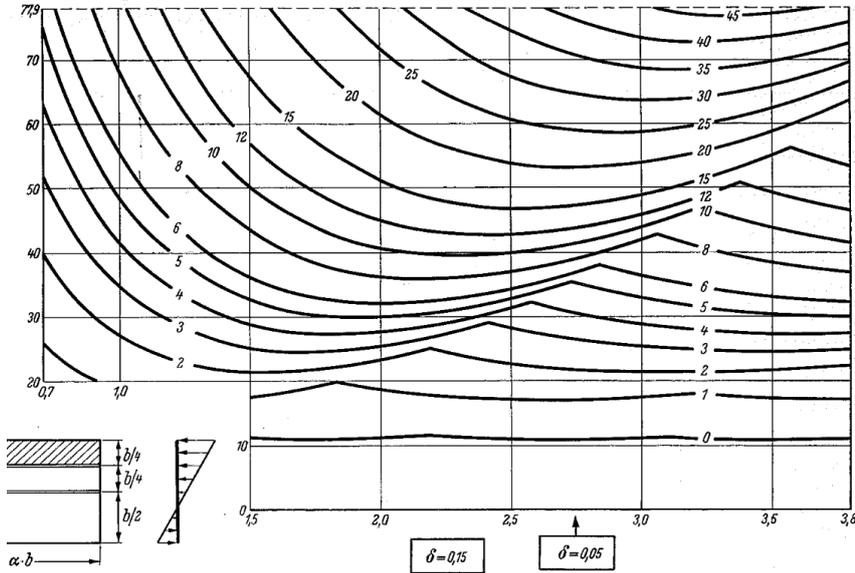


Bild 18: Beulwerttafel für Längsspannungen (Klöppel/Scheer)

Die Beulwerttafel berücksichtigen die diskrete Steifenanordnung. Sie sind maximal auf den Wert des maßgebenden Einzelfeldes (schraffiertes Einzelfeld, in Bild 18), begrenzt. Somit wird die tatsächliche Steifigkeit der Steifen mit $\gamma^L = 44,8$ zunächst gar nicht wirksam. Klar wird dies auch durch den Vergleich des zuvor ermittelten Wertes $\sigma_{cr,p} = 236,8 \text{ MN/m}^2$ mit dem Wert für das Einzelfeld 1 gemäß a) von $\sigma_{cr,p} = 237,9 \text{ MN/m}^2$ (geringfügige Abweichung aufgrund von Rundungsdifferenzen).

Unter Verwendung der in DIN 18800-3:2008 enthaltenen Gleichungen (20) und (23) lässt sich die o.g. Begrenzung aufheben bzw. der Beulwert des Gesamtfeldes erhöhen:

$$\frac{\sigma_{Pi}}{\sigma_{Ki}} = k_{\sigma} \cdot \alpha^2 \cdot \frac{1 + \sum \delta^L}{1 + \sum \gamma^L} \rightarrow \text{Gl. (23) DIN 18800-3:2008}$$

$$\frac{\sigma_{Pi}^*}{\sigma_{Ki}^*} = 77,9 \cdot 1,5^2 \cdot \frac{1 + \sum 2 \cdot 0,054}{1 + \sum 2 \cdot 18} = 5,24$$

$$k_{\sigma} = k_{\sigma}^* \cdot \left[1 + \frac{\sigma_{Ki}^*}{\sigma_{Pi}^*} \cdot \left(\frac{1 + \sum \gamma^L}{1 + \sum \gamma^{L*}} - 1 \right) \right] \leq 3 \cdot k_{\sigma}^* \rightarrow \text{Gl. (20) DIN 18800-3:2008}$$

$$k_{\sigma} = 77,9 \cdot \left[1 + \frac{1}{5,24} \cdot \left(\frac{1 + \sum 2 \cdot 44,8}{1 + \sum 2 \cdot 18} - 1 \right) \right] = 99,44 \leq 233,70 = 3 \cdot k_{\sigma}^*$$

$$\sigma_{cr,p} = k_{\sigma} \cdot \sigma_E = 99,44 \cdot 3,04 = 302,3 \text{ MN/m}^2$$

$$\alpha_{cr,x} = \sigma_{cr,p} / \sigma_{x,Ed} = 302,3 / 151 = 2,0020$$

Der Verzweigungsfaktor $\alpha_{cr,x} = 2,0020$ entspricht somit näherungsweise dem Verzweigungsfaktor $\alpha_{cr,x} = 1,9107$ gemäß Bild 14 mittels EBPlate 2.01 unter alleiniger Längsbeanspruchung (Abweichung $< 5\%$). In strenger Auslegung der Regelungen in DIN EN 1993-1-5:2010 A.1 dürfen äquivalente orthotrope Platten nur für Blechfelder mit mindestens 3 Längssteifen verwendet werden. Obgleich die o.g. Formeln auch in DIN 18800-3:2008 einer solchen Einschränkung nicht unterlagen, implizieren die Summenausdrücke doch eine entsprechende Berücksichtigung als äquivalente orthotrope Platte. Darüber hinaus beschreibt Gl. (23) nach DIN 18800-3:2008 das Verhältnis von platten- zu stabartigen Verzweigungsspannungen hier zu 5,24, worauf im Weiteren bei der Diskussion des knickstabähnlichen Verhaltens noch eingegangen wird.

Neben der Längsbeanspruchung kann mithilfe von *Klöppel/Scheer* auch der Schubbeulwert bestimmt werden, siehe Bild 19.

$$k_{\tau} = 23,2 \quad \text{zugehörig zu } \gamma^{L*} = 30$$

$$\sigma_{cr,p} = k_{\tau} \cdot \sigma_E = 23,2 \cdot 3,04 = 70,5 \text{ MN/m}^2$$

$$\alpha_{cr,\tau} = \tau_{cr} / \tau_{Ed} = 70,5 / 37,8 = 1,8651$$

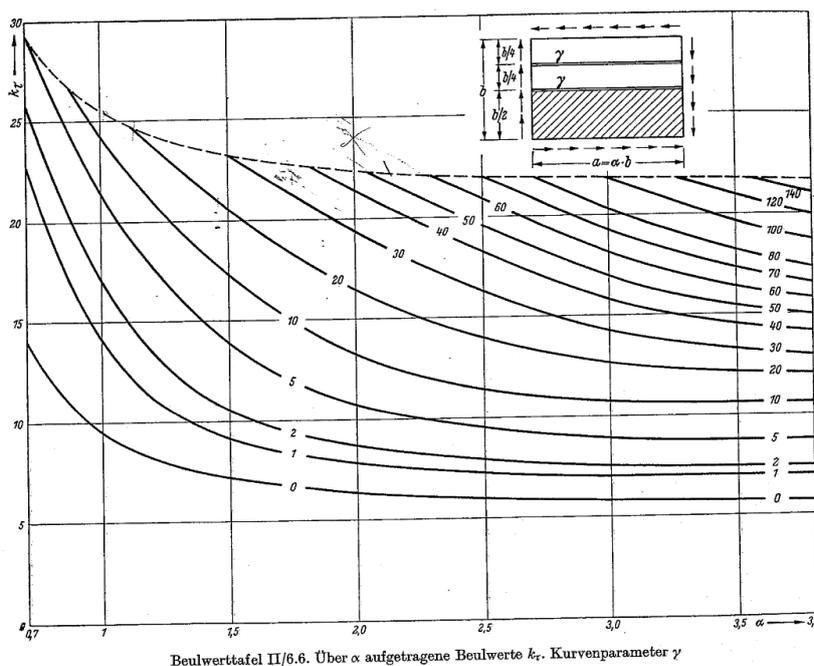


Bild 19: Beulwerttafel für Schub (*Klöppel/Scheer*)

Der Verzweigungswert für Schub liegt hier mit 1,8651 in ähnlicher Größenordnung wie mit EBPlate 2.01 gemäß Bild 16 ($\alpha_{cr,\tau} = 1,9709$), wobei in beiden Fällen eine Abminderung der Steifen-Steifigkeit auf 1/3 (s.v.) nicht enthalten ist.

Mit der Näherungsformel gemäß DIN EN 1993-1-5:2010 Gl. (10.6) ergibt sich ein resultierender Verzweigungswert α_{cr} von:

$$\frac{1}{\alpha_{cr}} = \frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} + \left[\left(\frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} \right)^2 + \frac{1 - \psi_x}{2\alpha_{cr,x}^2} + \frac{1}{\alpha_{cr,\tau}^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{1}{\alpha_{cr}} = \frac{1 - 0,5}{4 \cdot 2,0020} + \left[\left(\frac{1 - 0,5}{4 \cdot 2,0020} \right)^2 + \frac{1 + 0,5}{2 \cdot 2,0020^2} + \frac{1}{1,8651^2} \right]^{\frac{1}{2}} = 0,754172$$

$$\alpha_{cr} = 1,3260$$

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (10.6)

g) Zusammenstellung der Verzweigungsfaktoren

Nachfolgende Tabelle fasst die Verzweigungsfaktoren der unterschiedlichen Berechnungsweisen zusammen.

Tab. 2: Übersicht Verzweigungsfaktoren (EF: Einzelfeld, GF: Gesamtfeld)

Zeile	Berechnungsart	$\alpha_{cr,x}$	$\alpha_{cr,\tau}$ ³⁾	α_{cr}	Siehe
1	EF-1 (Formel)***	1,576	7,008	1,514 ¹⁾	a)
2	EF-3 (Formel)***	17,308	1,852	1,886 ¹⁾	b)
3	GF-Ersatzmodell*	2,677	1,2275	1,0817¹⁾	c)
4	GF mit <i>Klöppel/Scheer</i> (Mindeststeifigkeit)	1,568	1,865	1,172 ¹⁾	f)
5	GF mit <i>Klöppel/Scheer</i> + DIN 18800-3	2,002	1,865 ²⁾	1,319 ¹⁾	f)
6	EBPlate (1. Eigenwert)	1,911	1,971	1,819 (1,314¹⁾)	e)
7	EBPlate** (starre Steifen)	2,076	2,353	1,982 (1,518 ¹⁾)	-

* Einzelfeldbeulen nicht enthalten

** Steifenversagen nicht enthalten

*** Naviersche Lagerung an allen Rändern

1) Näherungsformel gemäß DIN EN 1993-1-5:2010 Gl. (10.6)

2) ohne Extrapolation von k_τ

3) ohne Abminderung der Steifensteifigkeit auf $I_s/3$ gemäß DIN EN 1993-1-5:2010 Abschn. 5.3(4), wegen Anmerkung 1 DIN EN 1993-1-5:2010 Abschn. 10(3)

h) Nachweis

Nachweismöglichkeit 1

Es erfolgt ein getrennter Nachweis für alle Einzelfelder sowie für das Gesamtfeld. Der Gesamtfeldnachweis kann somit mittels einer Methode geführt werden, die die Einzelfelder nicht enthält (da diese zusätzlich nachgewiesen werden). Insofern könnte das Ersatzmodell gemäß Abschnitt b) verwendet werden. Aufgrund der Tatsache, dass die Näherung für den Schub etwas konservativ ist und infolge dessen der resultierende Verzweigungsfaktor bei 1 liegt, ist der Nachweis nicht erfolgversprechend. Die Näherung mittels des Ersatzmodells eines elastisch gebetteten Stabes liefert jedoch gute Ergebnisse.

Denn in diesem Fall wäre der Wert $\alpha_{cr,x} = 2,677$ (Tab. 2, Zeile 3) nicht mit $\alpha_{cr,x} = 1,911$ (Tab. 2, Zeile 6) zu vergleichen, sondern mit $\alpha_{cr,x} = 2,8169$ gemäß Bild 15. Aus dem in Abschnitt b) verwendeten Modell lässt sich im Übrigen unmittelbar der Einfluss der Plattensteifigkeit anhand des Anteils infolge elastischer Bettung erkennen. Maßgebend war der Fall „Ausknicken beider Steifen“:

$$\sigma_{cr,sl1+2} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl1+2}}{A_{sl1+2} \cdot a^2} + \frac{E \cdot t^3 \cdot b \cdot a^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot (1 - \nu^2) \cdot A_{sl1+2} \cdot b_1^2 \cdot b_2^2}$$

$$\sigma_{cr,sl1+2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 841,72 \cdot 10^4}{9064 \cdot 3000^2} + \frac{210000 \cdot 8^3 \cdot 2000 \cdot 3000^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot (1 - 0,3^2) \cdot 9064 \cdot 600^2 \cdot 1400^2}$$

$$\sigma_{cr,sl1+2} = 213,86 + 8,42 = 222,28 \text{ MN} / \text{m}^2$$

Unabhängig von der erforderlichen Umrechnung auf den Bezugsort oberer Plattenrand (dort größte Druckspannung), gibt der erste Anteil die reine Knickstabspannung gemäß Eulerfall II wieder. Damit folgt:

$$\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1 = \frac{222,28}{213,86} - 1 = 0,039$$

Es handelt sich somit nahezu bzw. überwiegendes knickstabähnliches Verhalten. Dies ist im Übrigen keine Frage der verwendeten Näherung, sondern verhält sich mit den genaueren Werten gemäß EBPlate 2.01 analog. Gemäß Tab. 2, Zeile 6 beträgt der Verzweigungswert $\alpha_{cr,x} = 1,911$ für plattenartiges Verzweigen. Eigentlich sind bei der Ermittlung des o.g. Verhältniswertes dieselben Randbedingungen zu wählen, wobei die korrespondierenden Längsränder freizusetzen sind. Dies ist jedoch mit dem Programm EBPlate 2.01 nicht möglich, so dass nachfolgend gemäß DIN EN 1993-1-5:2010 Abschnitt 4.5.3 verfahren wird.

$$\sigma_{cr,sl1} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl1}}{A_{sl1} \cdot a^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 426,03 \cdot 10^4}{4824 \cdot 3000^2} = 203,4 \text{ MN} / \text{m}^2$$

$$\sigma_{cr,c} = \sigma_{cr,sl1} \cdot b_c / b_{sl1} = 203,4 \cdot 1333 / 833 = 325,5 \text{ MN} / \text{m}^2$$

$$\alpha_{cr,c} = \sigma_{cr,c} / \sigma_{Ed} = 325,5 / 151 = 2,156$$

$$\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1 = \frac{\alpha_{cr,p}}{\alpha_{cr,c}} - 1 = \frac{1,911}{2,156} - 1 = -0,114 < 1!$$

Dies ist ein offensichtlicher Widerspruch, denn dass Stabknicken kann nicht geringere Verzweigungswerte ergeben als das Plattenbeulen. Der Wert kleiner 1 kommt nur deshalb zustande, weil es sich bei der zu 1,911 gehörenden Verzweigungsfigur um das Beulen des oberen Einzelfeldes handelt, siehe Bild 14. Dieses kennzeichnet ein Einzelfeldversagen unter Berücksichtigung der Teileinspannung in das Nachbarfeld sowie der Nachgiebigkeit der oberen Steife.

DIN EN 1993-1-5:2010
Anhang A, A.2.2

Stab- und Plattenanteil
der kritischen Spannung

DIN EN 1993-1-5:2010
Abschn. 4.5.4

überwiegend knickstab-
ähnliches Verhalten

DIN EN 1993-1-5:2010
Abschn. 4.5.3

Umrechnung auf Rand

DIN EN 1993-1-5:2010
Abschn. 4.5.4
reines knickstabähnliches
Verhalten

Unter Verwendung der richtigen bzw. zugehörigen 10. Eigenform gemäß Bild 15 ergibt sich ein prinzipiell plausibler Verhältnisswert von:

$$\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1 = \frac{\alpha_{cr,p}}{\alpha_{cr,c}} - 1 = \frac{2,817}{2,156} - 1 = 0,307$$

DIN EN 1993-1-5:2010
Abschn. 4.5.4

Zunächst wird der Abminderungsbeiwert für das Plattenbeulen bestimmt. Hierbei wird aber der α_{cr} -Wert unter kombinierter Beanspruchung verwendet, siehe Bild 17.

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\alpha_{ult} / \alpha_{cr}} = \sqrt{1,428 / 1,8192} = 0,886$$

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (10.2)

$$\rho_x = [\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)] / \bar{\lambda}_p^2 = [0,886 - 0,055 \cdot (3 - 0,5)] / 0,886^2 = 0,954$$

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (4.2)

Im Folgenden wird der Abminderungsbeiwert für das Stabknicken berechnet:

$$i = \sqrt{\frac{I_{sl1}}{A_{sl1}}} = \sqrt{\frac{426,03 \cdot 10^4}{4824}} = 29,7 \text{ mm}$$

$$e = \text{MAX}(e_1 = 64,4 + 8 - 16,3 = 56,1 \text{ mm}; e_2 = 16,3 - 8 / 2 = 12,3 \text{ mm})$$

Bild 8 und Bild 9
DIN EN 1993-1-5:2010
Anhang A, Bild A.1

$$e = 56,1 \text{ mm}$$

$$\alpha = 0,49 \quad (\text{für offene Steifenquerschnitte KSL c})$$

$$\alpha_e = \alpha + \frac{0,09}{i/e} = 0,49 + \frac{0,09}{29,7/56,1} = 0,660$$

DIN EN 1993-1-5:2010
Abschn. 4.5.3

$$\chi_c = \frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{1,1189 + \sqrt{1,1189^2 - 0,886^2}} = 0,555$$

DIN EN 1993-1-1:2010
Gl. (6.49)

$$\text{mit: } \varphi = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \alpha_e \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right) \text{ und } \bar{\lambda} = \bar{\lambda}_p$$

$$\varphi = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + 0,660 \cdot (0,886 - 0,2) + 0,886^2 \right) = 1,1189$$

Die Interpolation zwischen den beiden Werten ergibt (ξ s.o.):

es gilt: $0 \leq \xi \leq 1$ eingehalten

$$\rho_{c,x} = (\rho_x - \chi_c) \cdot \xi \cdot (2 - \xi) + \chi_c$$

$$\rho_{c,x} = (0,954 - 0,555) \cdot 0,307 \cdot (2 - 0,307) + 0,555 = 0,762$$

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (4.13)

Für das Schubbeulen ergibt sich:

$$\chi_w = 0,83 / \bar{\lambda}_p \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \geq 0,83$$

$$\chi_w = 0,83 / 0,886 = 0,937$$

Damit ergibt sich der Beulnachweis für das Gesamtfeld zu:

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\rho_{c,x}}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{Ed}}{\chi_w}\right)^2} \leq \frac{f_y}{\gamma_M}$$

$$\sqrt{\left(\frac{151}{0,762}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{37,8}{0,937}\right)^2} = 210,1 \leq 213,6 = \frac{235 \text{ MN}}{1,1 \text{ m}^2} = f_{yd}$$

$$E_d / R_d = 210,1 / 213,6 = 0,984 < 1$$

Das Ergebnis macht deutlich, dass das knickstabähnliche Verhalten erheblich das Ergebnis beeinflusst. Nur unter Verwendung von Zusatzbetrachtungen, wie z.B. das Heraussuchen der zugehörigen Eigenform zu den jeweiligen Nachweisen, gelingt die Nachweisführung. In der Praxis ist dies nur im Ausnahmefall möglich, da der Aufwand wirtschaftlich nicht darstellbar und i.d.R. bei komplexeren Fällen auch nicht möglich ist. Denn nicht immer können die entsprechenden Eigenformen/-werte eindeutig zugeordnet werden, wie dies im vorliegenden Fall (vgl. maßgebende 10. Eigenform zur Berücksichtigung des knickstabähnlichen Verhaltens, Bild 15) möglich war. Dies liegt daran, dass häufig Mischformen auftreten, die eine Zuordnung schwierig machen.

DIN EN 1993-1-5:2010
Abschn. 5.3(1)
verformbare Auflagersteifen

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (10.5)

Nachweis erfüllt

2.3 Beispiel 1: Vollwandträgersteg mit Längssteifen (Methode der wirksamen Breiten)

2.3.1 Einleitung

Bild 6 zeigt die Abmessungen und Beanspruchungen eines Vollwandträgerstegblechs mit 2 winkelförmigen Längssteifen in der Druckzone.

Querschnittswerte des Bruttoquerschnitts (hier wurde die Steifen vernachlässigt):

$$A = 400 \cdot 20 + 2000 \cdot 8 + 600 \cdot 20 + 570 \cdot 20 = 47400 \text{ [mm}^2\text{]} = 474 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$A_w = 2000 \cdot 8 = 16000 \text{ [mm}^2\text{]} = 160 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$I_y = 3257596,6 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$Z_s = \frac{(\sum(A_i \cdot Z_i))}{A} = \frac{(8000 \cdot 10 + 16000 \cdot 1020 + 12000 \cdot 2030 + 11400 \cdot 2050)}{47400} = 1353 \text{ [mm]} = 135,3 \text{ [cm]}$$

Aus dem Vergleich von Z_s und der einwirkenden Normalspannung kann man erkennen, dass keine Normalkraft im Querschnitt liegt.

$$M_y = \frac{\sigma \cdot I_y}{z} = \frac{15,3 \cdot 3257596,6}{135,3 - 2} = 36902,79 \text{ [kNcm]}$$

$$V_z = \tau \cdot A_w = 3,78 \cdot 160 = 604,8 \text{ [kN]}$$

2.3.2 Querschnittstragfähigkeit bei Längsspannungen

Berechnung der mittragenden und wirksamen Breiten

Lokales Beulen Stegblech Einzelfeld 1:

$$\sigma_{11} = 151 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$$

$$\sigma_{12} = 94,4 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$$

$$b_1 = b_{11} - \frac{t_{st,w}}{2} = 500 - \frac{6}{2} = 497 \text{ [mm]}$$

$$\psi_1 = \frac{\sigma_{12}}{\sigma_{11}} = \frac{94,4}{15,1} = 0,63$$

$$k_{\sigma_1} = \frac{8,2}{1,05 + \psi_1} = \frac{8,2}{1,05 + 0,63} = 4,88$$

DIN EN 1993-1-5, 4.4,
Tab. 4.1

$$\bar{\lambda}_{p1} = \frac{\bar{b}_1/t_w}{28,4 \cdot \epsilon \cdot \sqrt{k_{\sigma 1}}} = \frac{497/8}{28,4 \cdot 1,0 \cdot \sqrt{4,88}} = 0,99$$

$$\geq 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,05 \cdot \Psi_1} = 0,731$$

$$\rho_1 = \frac{\bar{\lambda}_{p1} - 0,055 \cdot (3 + \Psi_1)}{\bar{\lambda}_{p1}^2} = \frac{0,99 - 0,055 \cdot (3 + 0,63)}{0,99^2} = 0,806 \leq 1,0$$

Breite Bruttoquerschnittsfläche

$$b_{1,edge} = \frac{2}{5 - \Psi_1} \cdot \bar{b}_1 = \frac{2}{5 - 0,63} \cdot 497 = 227,5 \text{ [mm]}$$

$$b_{1,inf} = \frac{3 - \Psi_1}{5 - \Psi_1} \cdot \bar{b}_1 = \frac{3 - 0,63}{5 - 0,63} \cdot 497 = 270 \text{ [mm]}$$

Wirksame Breiten

$$b_{1,eff} = \rho_1 \cdot \bar{b}_1 = 0,806 \cdot 497 = 401 \text{ [mm]}$$

$$b_{1,edge,eff} = \frac{2}{5 - \Psi_1} \cdot b_{1,eff} = \frac{2}{5 - 0,63} \cdot 401 = 184 \text{ [mm]}$$

$$b_{1,inf,eff} = \frac{3 - \Psi_1}{5 - \Psi_1} \cdot b_{1,eff} = \frac{3 - 0,63}{5 - 0,63} \cdot 401 = 217 \text{ [mm]}$$

$$X_{1,eff} = \bar{b}_1 - b_{1,eff} = 497 - 401 = 96 \text{ [mm]}$$

Lokales Beulen Stegblech Einzelfeld 2

$$\sigma_{21} = 94,4 \left[\frac{N}{mm^2} \right] = \sigma_{12}$$

$$\sigma_{22} = 37,7 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

$$\bar{b}_2 = 50 - t_{sl} = 50 - 0,6 = 49,4 \text{ [mm]}$$

$$\Psi_2 = \frac{\sigma_{22}}{\sigma_{21}} = \frac{37,7}{94,4} = 0,4$$

$$k_{\sigma 2} = \frac{8,2}{1,05 + \Psi_2} = \frac{8,2}{1,05 + 0,4} = 5,66$$

$$\bar{\lambda}_{p2} = \frac{\bar{b}_2/t_w}{28,4 \cdot \epsilon \cdot \sqrt{k_{\sigma 2}}} = \frac{49,4/8}{28,4 \cdot 1,0 \cdot \sqrt{5,66}} = 0,91$$

DIN EN 1993-1-5, 4.4(2)

DIN EN 1993-1-5, 4.4(2),
Gl. (4.2)

DIN EN 1993-1-5, A.1,
Bild A.1

DIN EN 1993-1-5, 4.4,
Tab 4.1

DIN EN 1993-1-5, 4.4,
Tab. 4.1

DIN EN 1993-1-5, 4.4(2)

$$\geq 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,05 \cdot \Psi_2} = 0,755$$

$$\rho_2 = \frac{\bar{\lambda}_{p2} - 0,055 \cdot (3 + \Psi_2)}{\bar{\lambda}_{p2}^2}$$

$$\rho_2 = \frac{\bar{\lambda}_{p2} - 0,055 \cdot (3 + \Psi_2)}{\bar{\lambda}_{p2}^2}$$

$$= \frac{0,91 - 0,055 \cdot (3 + 0,40)}{0,91^2} = 0,873 \leq 1,0$$

Breite Bruttoquerschnittsfläche

$$b_{2,sup} = \frac{2}{5 - \Psi_2} \cdot \bar{b}_2 = \frac{2}{5 - 0,40} \cdot 494 = 215 \text{ [mm]}$$

$$b_{2,inf} = \frac{3 - \Psi_1}{5 - \Psi_2} \cdot \bar{b}_2 = \frac{3 - 0,63}{5 - 0,40} \cdot 494 = 279 \text{ [mm]}$$

Wirksame Breiten

$$b_{2,eff} = \rho_2 \cdot \bar{b}_2 = 0,873 \cdot 494 = 431 \text{ [mm]}$$

$$b_{2,sup,eff} = \frac{2}{5 - \Psi_2} \cdot b_{2,eff} = \frac{2}{5 - 0,40} \cdot 431 = 187 \text{ [mm]}$$

$$b_{2,inf,eff} = \frac{3 - \Psi_2}{5 - \Psi_2} \cdot b_{2,eff} = \frac{3 - 0,40}{5 - 0,40} \cdot 431 = 244 \text{ [mm]}$$

$$X_{2,eff} = \bar{b}_2 - b_{2,eff} = 494 - 431 = 62 \text{ [mm]}$$

Lokales Beulen Stegblech Einzelfeld 3

$$\sigma_{31} = 37,7 \left[\frac{N}{mm^2} \right] = \sigma_{22}$$

$$\sigma_{32} = -75,5 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

$$\bar{b}_{3c} = h_s - h_{w22} - \frac{t_{sl}}{2} = 1333 - 1000 - \frac{6}{2} = 330 \text{ [mm]}$$

$$\bar{b}_3 = h_w - h_{w2} - \frac{t_{sl}}{2} = 2000 - 1000 - \frac{6}{2} = 997 \text{ [mm]}$$

$$\Psi_3 = \frac{\sigma_2}{\sigma_{sl2}} = \frac{h_s - h_w}{h_s - h_{w2}} = \frac{1333 - 2000}{1333 - 1000} = -2,0 = \sigma_{32}/\sigma_{31}$$

DIN EN 1993-1-5, A.1.,
Bild A.1

DIN EN 1993-1-5, 4.4,

$$k_{\sigma 3} = 5,98 \cdot (1 - \Psi_3)^2 = 5,98 \cdot (1 + 2)^2 = 53,82$$

$$\bar{\lambda}_{p3} = \frac{\bar{b}_{3c}/t_w}{28,4 \cdot \epsilon \cdot \sqrt{k_{\sigma 3}}} = \frac{\frac{330}{8}}{28,4 \cdot 1,0 \cdot \sqrt{53,82}} = 0,198$$

$$\geq 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,05 \cdot \Psi_3} = 0,930$$

$$\rightarrow \rho_3 = 1,0$$

Es tritt kein lokales Beulen auf.

Breite Bruttoquerschnittsfläche

$$b_{3,sup} = 0,4 \cdot \bar{b}_{3c} = 0,4 \cdot 330 = 132 \text{ [mm]}$$

$$b_{2,edge} = 0,6 \cdot \bar{b}_{3c} = 0,6 \cdot 330 = 198 \text{ [mm]}$$

Wirksame Breiten. (→ entsprechen den Breiten der Bruttoquerschnittsflächen, da $\rho_3=1,0$)

$$b_{3,eff} = \rho_3 \cdot \bar{b}_{3c} = 1,0 \cdot 330 = 330 \text{ [mm]}$$

$$b_{3,sup,eff} = 0,4 \cdot b_{3,eff} = 0,4 \cdot 330 = 132 \text{ [mm]}$$

$$b_{2,edge,eff} = 0,6 \cdot b_{3,eff} = 0,6 \cdot 330 = 198 \text{ [mm]}$$

Überprüfung der Querschnittsklasse der Längssteife L 100x50x6 mm

$$A_{steife} = 871 \text{ [mm}^2], I_{steife} = 899000 \text{ [mm}^4]$$

$$b_{sl} = 100 \text{ [mm]}, e_y = 35,1 \text{ [mm]}$$

$$h_{sl} = 50 \text{ [mm]}, t_{sl} = 6 \text{ [mm]}$$

$$\frac{b_{sl}}{t_{sl}} = \frac{100}{6} = 16,7 \leq 33 \cdot \epsilon = 33$$

$$\frac{h_{sl}}{t_{sl}} = \frac{50}{6} = 8,3 \leq 10 \cdot \epsilon = 10$$

→ Querschnittsklasse 1 (Querschnitt ist voll wirksam)

Ermittlung der kritischen Plattenbeulspannung $\sigma_{cr,D}$

Liegen 2 Steifen in der Druckzone, werden 3 Versagensfälle untersucht, vgl. Bild 8 bis Bild 11.

- 1) Ausknicken der oberen Längssteife
- 2) Ausknicken der unteren Längssteife
- 3) Ausknicken einer zusammengeführten Ersatzsteife

DIN EN 1993-1-5, 4.4,
Tab. 4.1

DIN EN 1993-1-5, An-
hang A.2

Querschnittswerte der Längsaussteifungen

1) Querschnittswerte der oberen Längsaussteifung

$$A_{sl,I} = (b_{1,inf} + b_{2,sup} + t_{sl}) \cdot t_w + A_{steife} = (270 + 215 + 6) \cdot 8 + 871 \\ = 3928 + 871 = 4799 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$e_{sl} = b_{sl} - e_y + \frac{t_w}{2} = 100 - 35,1 + \frac{8}{2} = 68,9 \text{ [mm]}$$

$$x_{sl,I} = \frac{A_{steife} \cdot e_{sl}}{A_{sl,I}} = \frac{871 \cdot 68,9}{4799} = 12,5 \text{ [mm]}$$

$$I_{sl,I} = I_{steife} + \frac{(b_{1,inf} + b_{2,sup} + t_{sl}) \cdot t_w \cdot A_{steife}}{A_{sl,I}} \cdot e_{sl}^2 \\ = 899000 + \frac{3928 \cdot 871}{4799} \cdot 68,9^2 = 4283000 \text{ [mm}^4\text{]}$$

2) Querschnittswerte der unteren Längsaussteifung

$$A_{sl,II} = (b_{2,inf} + b_{3,sup} + t_{sl}) \cdot t_w + A_{steife} = (279 + 132 + 6) \cdot 8 + 871 \\ = 3336 + 871 = 4207 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$e_{sl} = b_{sl} - e_y + \frac{t_w}{2} = 100 - 35,1 + \frac{8}{2} = 68,9 \text{ [mm]}$$

$$x_{sl,II} = \frac{A_{steife} \cdot e_{sl}}{A_{sl,II}} = \frac{871 \cdot 68,9}{4207} = 14,3 \text{ [mm]}$$

$$I_{sl,II} = I_{steife} + \frac{(b_{1,inf} + b_{2,sup} + t_{sl}) \cdot t_w \cdot A_{steife}}{A_{sl,II}} \cdot e_{sl}^2 \\ = 899000 + \frac{3928 \cdot 871}{4207} \cdot 68,9^2 = 4178000 \text{ [mm}^4\text{]}$$

3) Querschnittswerte der zusammengeführten Ersatzsteife

$$A_{sl,zus} = A_{sl,I} + A_{sl,II} = 4799 + 4207 = 9006 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$I_{sl,zus} = I_{sl,I} + I_{sl,II} = 4283000 + 4178000 = 8461000 \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$F_{sl,I} = A_{sl,I} \cdot \sigma_{sl,I} = 4799 \cdot (-94,4) = -453000 \text{ [N]}$$

$$F_{sl,II} = A_{sl,II} \cdot \sigma_{sl,II} = 4207 \cdot (-37,7) = -158600 \text{ [N]}$$

$$\begin{aligned}
 h_{w,zus} &= \frac{F_{sl,II}}{F_{sl,I} + F_{sl,II}} \cdot (h_{w2} - h_{w1}) + h_{w1} \\
 &= \frac{158600}{453000 + 158600} \cdot (1000 - 500) + 500 \\
 &= 630 \text{ [mm]}
 \end{aligned}$$

kritische Plattenbeulspannung $\sigma_{cr,p}$

Fall 1: Beulen der oberen Längsaussteifung

$$b_{l,1}^* = h_{w1} = 500 \text{ [mm]}$$

$$b_{l,2}^* = h_{w2} - h_{w1} = 1000 - 500 = 500 \text{ [mm]}$$

$$B_l^* = b_{l,1}^* + b_{l,2}^* = 1000 \text{ [mm]}$$

$$\begin{aligned}
 a_{c,l} &= 4,33 \cdot \sqrt[4]{\frac{I_{sl,I} \cdot b_{l,1}^{*2} \cdot b_{l,2}^{*2}}{t_w^3 \cdot B_l^*}} = 4,33 \cdot \sqrt[4]{\frac{4283000 \cdot 500^2 \cdot 500^2}{8^3 \cdot 1000}} \\
 &= 3682 \text{ [mm]} \geq a = 3000 \text{ [mm]}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_{cr,sl,I} &= \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl,I}}{A_{sl,I} \cdot a^2} + \frac{E \cdot t_w^3 \cdot B_l^* \cdot a^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot (1 - \nu^2) \cdot A_{sl,I} \cdot b_{l,1}^{*2} \cdot b_{l,2}^{*2}} \\
 &= \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 4283000}{4800 \cdot 3000^2} + \frac{210000 \cdot 8^3 \cdot 1000 \cdot 3000^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot (1 - 0,3^2) \cdot 4800 \cdot 500^2 \cdot 500^2} \\
 &= 295,3 \left[\frac{N}{mm^2} \right]
 \end{aligned}$$

$$\sigma_{cr,p,I} = \frac{h_s}{h_s - h_{w,1}} \cdot \sigma_{cr,sl,I} = \frac{1333}{1333 - 500} \cdot 295,3 = 472,6 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

DIN EN 1993-1-5, A.2.2
(1)

Fall 2: Beulen der unteren Längsaussteifung

$$b_{II,1}^* = 500 \text{ [mm]}$$

$$b_{II,2}^* = 1000 \text{ [mm]}$$

$$B_{II}^* = b_{II,1}^* + b_{II,2}^* = 1500 \text{ [mm]}$$

$$\begin{aligned} a_{c,II} &= 4,33 \cdot \sqrt[4]{\frac{I_{sl,II} \cdot b_{II,1}^{*2} \cdot b_{II,2}^{*2}}{t_w^3 \cdot B_{II}^*}} \\ &= 4,33 \cdot \sqrt[4]{\frac{4178000 \cdot 500^2 \cdot 1000^2}{8^3 \cdot 1500}} \\ &= 4676 \text{ [mm]} \geq a = 3000 \text{ [mm]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{cr,sl,I} &= \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl,II}}{A_{sl,II} \cdot a^2} + \frac{E \cdot t_w^3 \cdot B_{II}^* \cdot a^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot (1 - \nu^2) \cdot A_{sl,II} \cdot b_{II,1}^{*2} \cdot b_{II,2}^{*2}} \\ &= \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 4178000}{4210 \cdot 3000^2} + \frac{210000 \cdot 8^3 \cdot 1500 \cdot 3000^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot (1 - 0,3^2) \cdot 4210 \cdot 500^2 \cdot 1000^2} \\ &= 266,9 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] \\ \sigma_{cr,p,II} &= \frac{h_s}{h_s - h_{w,2}} \cdot \sigma_{cr,sl,II} = \frac{1333}{1333 - 1000} \cdot 266,9 = 1068,4 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] \end{aligned}$$

DIN EN 1993-1-5, A.2.2
(1)

Fall 3: Beulen der zusammengeführten Ersatzsteife

$$b_{zus,1}^* = 630 \text{ [mm]}$$

$$b_{zus,2}^* = h_w - h_{w,zus} = 1370 \text{ [mm]}$$

$$B_{zus}^* = h_w = 2000 \text{ [mm]}$$

$$\begin{aligned} a_{c,zus} &= 4,33 \cdot \sqrt[4]{\frac{I_{sl,zus} \cdot b_{zus,1}^{*2} \cdot b_{zus,2}^{*2}}{t_w^3 \cdot B_{zus}^*}} = 4,33 \cdot \sqrt[4]{\frac{8561000 \cdot 630^2 \cdot 1370^2}{8^3 \cdot 2000}} \\ &= 6840 \text{ [mm]} \geq a = 3000 \text{ [mm]} \end{aligned}$$

DIN EN 1993-1-5, A.2.2
(1)

$$\begin{aligned}\sigma_{cr,sl,zus} &= \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl,zus}}{A_{sl,zus} \cdot a^2} + \frac{E \cdot t_w^3 \cdot B_{zus}^* \cdot a^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot (1 - \nu^2) \cdot A_{sl,zus} \cdot b_{zus,1}^2 \cdot b_{zus,2}^2} \\ &= \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 8561000}{9000 \cdot 3000^2} + \frac{210000 \cdot 8^3 \cdot 2000 \cdot 3000^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot (1 - 0,3^2) \cdot 9000 \cdot 1370^2 \cdot 630^2} \\ &= 227,1 \left[\frac{N}{mm^2} \right] \\ \sigma_{cr,p,zus} &= \frac{h_s}{h_s - h_{w,zus}} \cdot \sigma_{cr,sl,zus} = \frac{1333}{1333 - 630} \cdot 227,1 = 430,6 \left[\frac{N}{mm^2} \right]\end{aligned}$$

Kritische Plattenbeulspannung

$$\sigma_{cr,p} = \min(\sigma_{cr,p,I}, \sigma_{cr,p,II}, \sigma_{cr,p,zus}) = \min(472,6; 1068,4; 430,6)$$

$$\rightarrow \sigma_{cr,p} = 430,6 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

Ermittlung des Abminderungsfaktors bei plattenartigem Verhalten

Plattenartiges Verhalten

$$\begin{aligned}A_c &= (h_s - b_{1,edge} - b_{3,edge}) \cdot t_w + 2 \cdot A_{sl} \\ &= (1330 - 227 - 198) \cdot 8 + 2 \cdot 870,9 = 8978 \text{ [mm}^2\text{]}\end{aligned}$$

$$A_{c,eff,loc} =$$

$$\begin{aligned}\sum A_{sl,eff} + (b_{1,inf,eff} + b_{2,sup,eff} + b_{2,inf,eff} + b_{3,sup,eff} + 2 \cdot t_{sl}) \cdot t_w \\ &= 1742 + (217 + 187 + 244 + 132 + 2 \cdot 6) \cdot 8 \\ &= 8078 \text{ [mm}^2\text{]}\end{aligned}$$

$$\beta_{A,c}^p = \frac{A_{c,eff,loc}}{A_c} = \frac{8078}{8978} = 0,90$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\beta_{A,c}^p \cdot f_y}{\sigma_{cr,p}}} = \sqrt{\frac{0,90 \cdot 235}{430,6}} = 0,701 \leq 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,05 \cdot \Psi} = 0,832$$

$$\rightarrow \rho = 1,0$$

DIN EN 1993-1-5, 4.5.2

DIN EN 1993-1-5,
4.5.2(2)

DIN EN 1993-1-5,
4.5.2(1), Gl. 4.7

Ermittlung der kritischen Knickspannung $\sigma_{cr,c}$

Knickstabähnliches Verhalten

DIN EN 1993-1-5, 4.5.3

Die obere Längsaussteifung ist maßgebend.

$$A_{sl,I,eff} = (b_{1,inf,eff} + t_{sl} + b_{2,sup,eff}) \cdot t_w + \frac{\sum A_{sl,eff}}{2}$$

$$= (217 + 6 + 187) \cdot 8 + 870,9 = 4151 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$A_{sl,I} = (b_{1,inf} + t_{sl} + b_{2,sup}) \cdot t_w + A_{steife}$$

$$= (270 + 6 + 215) \cdot 8 + 8709 = 4799 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$I_{sl,I} = 4242910 \text{ [mm}^4\text{]}$$

DIN EN 1993-1-5,
4.5.3(2), Gl. 4.9

$$\sigma_{cr,sl} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl,I}}{A_{sl,I} \cdot a^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 4242910}{4799 \cdot 3000^2} = 203,6 \left[\frac{N}{\text{mm}^2} \right]$$

$$\sigma_{cr,c} = \sigma_{cr,sl} \cdot \frac{h_s}{h_s - h_{w,1}} = 203,6 \cdot \frac{1333}{1333 - 500} = 325,8 \left[\frac{N}{\text{mm}^2} \right]$$

Ermittlung des Abminderungsfaktors bei knickstabähnlichem Verhalten

$$\chi_c = [\phi + (\phi^2 - \bar{\lambda}_c^2)^{0,5}]^{-1}$$

$$\phi = 0,5 \cdot (1 + \alpha_e \cdot (\bar{\lambda}_c - 0,2) + \bar{\lambda}_c^2)$$

$$\beta_{A,c} = \frac{A_{sl,I,eff}}{A_{sl,I}} = \frac{4151}{4799} = 0,865$$

DIN EN 1993-1-5,
4.5.3(4), Gl. 4.11

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{\beta_{A,c} \cdot f_y}{\sigma_{cr,c}}} = \sqrt{\frac{0,865 \cdot 235}{325,8}} = 0,79$$

DIN EN 1993-1-5,
4.5.3(5), Gl. 4.12

$$\alpha_e = \alpha + \frac{0,09}{i/e} = 0,49 + \frac{0,09}{2,97/5,55} = 0,66$$

$$i = \sqrt{\frac{I_{sl,I}}{A_{sl,I}}} = \sqrt{\frac{4242910}{4799}} = 29,7 \text{ [mm]}$$

$$e_2 = x_{sl,I} = 12,3 \text{ [mm]}$$

$$e_1 = \frac{\frac{b_{sl}^2}{2} \cdot t_{sl} + (h_{sl} - t_{sl}) \cdot t_{sl} \cdot \left(b_{sl} - \frac{t_{sl}}{2}\right)}{A_{sl}} + \frac{t_w}{2} - e_2$$

$$= \frac{\frac{100^2}{2} \cdot 6 + (50 - 6) \cdot 6 \cdot \left(100 - \frac{6}{2}\right)}{870,9} + \frac{8}{2} - 12,3 = 55,5 \text{ [mm]}$$

$$e = \max(e_1; e_2) = \max(12,3; 55,5) = 55,5 \text{ [mm]}$$

$\alpha = 0,49$ (Kurve c) für offene Steifenquerschnitte

$$\phi = 0,5 \cdot (1 + \alpha_e \cdot (\bar{\lambda}_c - 0,2) + \bar{\lambda}_c^2)$$

$$= 0,5 \cdot (1 + 0,66 \cdot (0,79 - 0,2) + 0,79^2) = 1,007$$

$$\chi_c = 1/[\phi + (\phi^2 - \bar{\lambda}_c^2)^{0,5}] = 1/[1,007 + (1,007^2 - 0,79^2)^{0,5}] = 0,61$$

Interaktion zwischen plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten

$$\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1 = \frac{430,6}{325,8} - 1 = 0,321 \quad 0 \leq \xi \leq 1$$

$$\rho_c = (\rho - \chi_c) \cdot \xi \cdot (2 - \xi) + \chi_c = (1,0 - 0,61) \cdot 0,321 \cdot (2 - 0,321) + 0,61 = 0,8$$

Berechnung der wirksamen geometrischen Bezugsgrößen

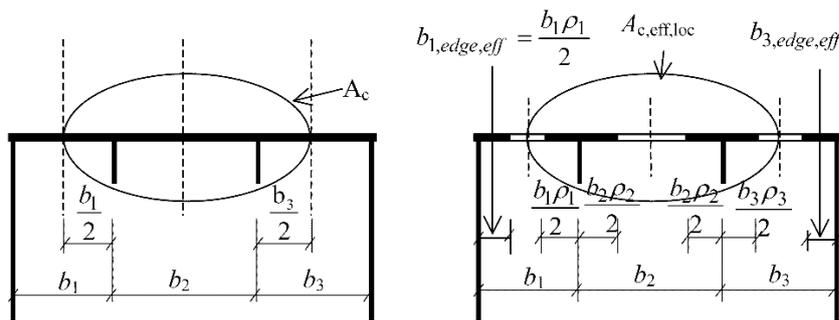


Bild 20: Längsausgesteiftes Blechfeld unter konstanter Druckbeanspruchung (Bild 4.4 aus DIN EN 1993-1-5:2010)

$$A_{c,eff} = \rho_c \cdot A_{c,eff,loc} + \sum b_{edge,eff} \cdot t_w$$

$$= 0,8 \cdot 8078 + (184 + 198) \cdot 8 = 9518,4 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$t_{w,red} = \rho_c \cdot t_w = 0,8 \cdot 8 = 6,4 \text{ [mm]}$$

$$t_{sl,red} = \rho_c \cdot t_{sl} = 0,8 \cdot 6 = 6,4 \text{ [mm]}$$

$$I_{eff} = 31338,9 \text{ [mm}^2\text{m}^2\text{]}$$

$$h_{s,eff} = 1359,4 \text{ [mm]}$$

$$W_{eff} = \frac{I_{eff}}{h_{s,eff} + \frac{t_{f1}}{2}} = \frac{31338,9}{1359,4 + \frac{20}{2}} = 22885616,81 \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$\rho_c \cdot f_{yd} = 0,8 \cdot \frac{235}{1,1} = 170,9 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] \geq \sigma_{com,Ed}$$

$$\sigma_{com,Ed} = \frac{M_{Ed} \cdot (h_{s,eff} - h_{w,1})}{I_{eff}} = 101,2 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$$

Bauteilnachweis für Längsspannungen

$$M_{Ed} = 3690,28 \text{ [kN} \cdot \text{m]}$$

$$\eta_1 = \frac{M_{Ed}}{f_{yd} \cdot W_{eff}} = 0,7 \leq 1,0$$

DIN EN 1993-1-5,
4.5.4(1)

(Wichtungsfaktor)

DIN EN 1993-1-5, 4.5.4
(1), Gl. 4.13

2.3.3 Querschnittstragfähigkeit bei Schubspannungen

Schubbeulen

$$V_{Ed} = 604,8 \text{ [kN]}$$

Bemessungswert der Querkraftbeanspruchbarkeit

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

DIN EN 1993-1-5, 5.2(1),
Gl. (5.1)

Beitrag des Steges $V_{bw,Rd}$

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t_w}{\gamma_{M1} \cdot \sqrt{3}}$$

DIN EN 1993-1-5, 5.2(1),
Gl. (5.2)

Ausgesteiftes Blech

$$\begin{aligned} A_{sl} &= A_{steife} + 30 \cdot \varepsilon \cdot t_w^2 + t_{sl} \cdot t_w \\ &= 871 + 30 \cdot 1 \cdot 8^2 + 6 \cdot 8 = 871 + 1968 = 2839 \text{ [mm}^2\text{]} \end{aligned}$$

$$e_{sl} = b_{sl} - e_y + \frac{t_w}{2} = 100 - 35,1 + \frac{8}{2} = 68,9 \text{ [mm]}$$

$$x_{sl} = \frac{A_{steife} \cdot e_{sl}}{A_{sl}} = \frac{871 \cdot 68,9}{2839} = 211 \text{ [mm]}$$

$$\begin{aligned} I_{sl} &= I_{steife} + \frac{(30 \cdot \varepsilon \cdot t_w + t_{sl}) \cdot t_w \cdot A_{steife} \cdot e_{sl}^2}{A_{sl}} \\ &= 899000 + \frac{1968 \cdot 871}{2839} \cdot 68,9^2 = 3668000 \text{ [mm}^4\text{]} \end{aligned}$$

Für längsausgesteifte Blechfelder mit ein oder zwei Steifen und

$$\alpha = \frac{a}{h_w} = \frac{3000}{2000} = 1,5 < 3$$

gilt

$$\begin{aligned} k_{\tau} &= 4,1 + \frac{6,3 + 0,18 \cdot \frac{\sum I_{sl}}{t_w^3 \cdot h_w}}{\alpha^2} + 2,2 \cdot \sqrt[3]{\frac{\sum I_{sl}}{t_w^3 \cdot h_w}} \\ &= 4,1 + \frac{6,3 + 0,18 \cdot \frac{2 \cdot 3668000}{8^3 \cdot 2000}}{1,5^2} + 2,2 \cdot \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 3668000}{8^3 \cdot 2000}} = 11,71 \end{aligned}$$

DIN EN 1993-1-5, A.3, Gl.
(A.6)

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{37,4 \cdot t_w \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_{\tau}}} = \frac{2000}{37,4 \cdot 8 \cdot 1,0 \cdot \sqrt{11,71}} = 1,953$$

DIN EN 1993-1-5, 5.3(3),
Gl. (5.6)

Einzelfeld

Das Feld mit dem kleinsten Längenverhältnis bzw. der größten Breite (bei gleichen Längen) ist maßgebend

$$\text{Für } \frac{a}{h_w - h_{w2}} = \frac{3000}{1000} = 3 > 1$$

$$k_\tau = 5,34 + 4,00 \cdot \left(\frac{h_w - h_{w2}}{a} \right)^2 + k_{\tau1,st} = 5,34 + 4,0 \cdot \left(\frac{1000}{3000} \right)^2 + 0 = 5,78$$

$$k_{\tau1,st} = 0$$

$$\bar{\lambda}_{w,1} = \frac{h_w - h_{w2}}{37,4 \cdot t_w \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\tau}} = \frac{1000}{37,4 \cdot 8 \cdot 1,0 \cdot \sqrt{5,78}} = 1,390$$

Maßgebende Schlankheit und Abminderungsbeiwert

$$\bar{\lambda}_w = 1,953 > 1,390 = \bar{\lambda}_{w,1}$$

➔ Beulen des ausgesteiften Feldes ist maßgebend.

$$\bar{\lambda}_w > 1,08$$

$$\rightarrow \chi_w = \frac{1,37}{0,7 + \bar{\lambda}_w} = \frac{1,37}{0,7 + 1,953} = 0,516$$

Beitrag des Steges zur Querkrafttragfähigkeit:

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t_w}{\gamma_{M1} \cdot \sqrt{3}} = \frac{0,516 \cdot 235 \cdot 2000 \cdot 8}{1,1 \cdot \sqrt{3}} \cdot 10^{-3} = 1020,0 [kN]$$

Beitrag der Flansche $V_{bf,Rd}$

$$V_{bf,Rd} = \frac{b_f \cdot t_f^2 \cdot f_{yf}}{c \cdot \gamma_{M1}} \cdot \left(1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right)$$

$$\text{mit } b_f = \min(30 \cdot \varepsilon \cdot t_f + t_w; b_{f1})$$

$$= \min(30 \cdot 1,0 \cdot 20 + 8; 400) = 400 [mm]$$

$$M_{f,Rd} = b_f \cdot t_f \cdot \left(h_w + \frac{t_{f1}}{2} + \frac{t_{f2}}{2} \right) \cdot \frac{f_{yf}}{\gamma_{M0}}$$

$$= 400 \cdot 20 \cdot \left(2000 + \frac{20}{2} + 19,7 \right) \cdot \frac{235}{1,0} \cdot 10^{-6} = 38158,4 [kNm]$$

$$z_s = \frac{\sum A_i \cdot z_i}{\sum A_i} = \frac{600 \cdot 20 \cdot 10 + 570 \cdot 20 \cdot 30}{600 \cdot 20 + 57 \cdot 20} = 19,7 [mm]$$

$$M_{Ed} = 3690,3 [kNm] \leq 3815,8 [kNm] = M_{f,Rd}$$

➔ Der Beitrag der Flansche zur Querkrafttragfähigkeit:

$$c = a \cdot \left(0,25 + \frac{1,6 \cdot b_f \cdot t_{f1}^2 \cdot f_{yf1}}{t_w \cdot h_w^2 \cdot f_{yw}} \right)$$

$$= 3000 \cdot \left(0,25 + \frac{1,6 \cdot 400 \cdot 20^2 \cdot 235}{8 \cdot 2000^2 \cdot 235} \right) = 774 [mm]$$

DIN EN 1993-1-5, A.3,
Gl. (A.5)

DIN EN 1993-1-5, 5.3,
Tab. 5.1

DIN EN 1993-1-5, 5.2(1),
GL. (5.2)

DIN EN 1993-1-5, 5.4,
Gl. (5.8)

DIN EN 1993-1-5, 5.4(1)

DIN EN 1993-1-5, 5.4(1)

Beitrag der Flansche zur Querkrafttragfähigkeit:

$$V_{bf,Rd} = \frac{b_f \cdot t_f^2 \cdot f_{yf}}{c \cdot \gamma_{M1}} \cdot \left(1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}}\right)^2\right)$$

$$= \frac{400 \cdot 20^2 \cdot 235}{774 \cdot 1,1} \cdot \left(1 - \left(\frac{3690,3}{38158,4}\right)^2\right) \cdot 10^{-3} = 2,860 \text{ [kN]}$$

DIN EN 1993-1-5, 5.4, Gl. (5.8)

Bemessungswert der Querkraftbeanspruchbarkeit:

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} = 1022, \text{ [kN]}$$

$$\leq \frac{\eta \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t_w}{\gamma_{M1} \cdot \sqrt{3}} = \frac{1,0 \cdot 235 \cdot 2000 \cdot 8}{1,1 \cdot \sqrt{3}} \cdot 10^{-3} = 1973,5 \text{ [kN]}$$

DIN EN 1993-1-5, 5.2(1)

mit $\eta=1,0$ (für den Brückenbau)

Nachweis:

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{604800}{1022880,1} = 0,59 \leq 1,0$$

NA zu DIN EN 1993-1-5, 5.1(2), Anmerkung 2

DIN EN 1993-1-5, 5.5(1), Gl. (5.10)

2.3.4 Querschnittstragfähigkeit bei Längs- und Schubspannungen

Interaktion zwischen Biegung und Schub

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) \cdot (2 \cdot \bar{\eta}_3 - 1)^2 \leq 1,0$$

$$\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} \geq \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}$$

$$\bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}}$$

DIN EN 1993-1-5, 7.1(1), Gl. (7.1)

Plastische Momententragfähigkeit:

$$M_{pl,Rd} = \left[b_{f1} \cdot t_{f1} \cdot \left(\frac{t_{f1}}{2} + z_{pl}\right) + t_w \cdot z_{pl} \cdot \frac{z_{pl}}{2} + t_w \cdot (h_w - z_{pl}) \cdot \frac{(h_w - z_{pl})}{2} + b_{f2} \cdot t_{f2} \cdot \left(h_w - z_{pl} + \frac{t_{f2}}{2}\right) + b_{f3} \cdot t_{f3} \cdot \left(h_w - z_{pl} + t_{f2} + \frac{t_{f3}}{2}\right) \right] \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$= \left[400 \cdot 20 \cdot \left(\frac{20}{2} + 1962,5\right) + 8 \cdot 1962,5 \cdot \frac{1962,5}{2} + 8 \cdot (2000 - 1962,5) \cdot \frac{(2000 - 1962,5)}{2} + 600 \cdot 20 \cdot \left(2000 - 1962,5 + \frac{20}{2}\right) + 570 \cdot 20 \cdot \left(2000 - 1962,5 + 20 + \frac{20}{2}\right) \right] \cdot \frac{235}{1,0} \cdot 10^{-6}$$

$$= 7644,7 \text{ [kNm]}$$

DIN EN 1993-1-5, 7.1(1)

$$\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} \geq \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}$$

$$= \frac{3690,3}{7644,7} = 0,48 \geq 0,499 = \frac{3815,8}{7644,7}$$

$$\rightarrow \bar{\eta}_1 = 0,499$$

DIN EN 1993-1-5, 7.1(1)

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}} = \frac{604,8}{1020,0} = 0,59 > 0,5$$

➔ Interaktion ist erforderlich.

Interaktionsnachweis:

$$\begin{aligned} \bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) \cdot (2 \cdot \bar{\eta}_3 - 1)^2 &= 0,499 + (1 - 0,499) \cdot (2 \cdot 0,59 - 1)^2 \\ &= 0,52 \leq 1 \end{aligned}$$

Interaktionsnachweis nach Sinur-Vorschlag (SINUR, F. 2011):

$$\begin{aligned} \bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{el,eff,Rd}}\right) \cdot (2 \cdot \bar{\eta}_3 - 1) &\leq 1,0 \\ 0,69 + \left(1 - \frac{3815,8}{5378,11}\right) \cdot (2 \cdot 0,59 - 1) &= 0,7 \leq 1,0 \end{aligned}$$

$$\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{el,eff,Rd}} = \frac{3690,2}{5310,0} = 0,69$$

$$M_{el,eff,Rd} = W_{eff} \cdot f_y = 22885616,81 \cdot 235 \cdot 10^{-6} = 5378,1 [kNm]$$

2.4 Beispiel 1: Vollwandträgersteg mit Längssteifen Vergleich

In Tab. 3 sind die jeweilige Ausnutzungsgrade zum Vergleich des Nachweisverfahrens zusammengefasst. Anhand des Vergleiches kann man feststellen, dass die Methode der wirksamen Breiten die geringste Ausnutzung liefert. Bei der Methode wirksamen Breiten wird der Gesamtquerschnitt betrachtet und die Spannung wird von Steg auf Flansch umgelagert. Dieser Effekt fehlt bei der Methode der reduzierten Spannung. Bei der Methode reduzierte Spannung wird nur das Stegblech betrachtet und infolgedessen fehlt der Spannungsumlagerungseffekt. Aus diesem Grund liefert die Methode der reduzierten Spannungen die konservativsten Ergebnisse.

Tab. 3: Vergleich der Ausnutzungsgrade der Nachweismethode für Beispiel 1

Methode	Ausnutzungsgrad
Methode der wirksamen Breiten (Gesamtquerschnitt)	$\eta_1 = 0,70 < 1,0$
	$\eta_3 = 0,59 < 1,0$
	$M - N - V$ Interak. nach EC: $0,52 < 1,0$ $M - N - V$ Interak. nach Sinur: $0,7 < 1,0$
Methode der reduzierten Spannungen (Stegblech)	$\eta_{MRS} = 0,98 < 1,0$
DIN 18800-3:2008	$\eta_{DIN} = 0,88 < 1,0$

DIN EN 1993-1-5, 7.1(1)

DIN EN 1993-1-5, 7.1(1),
Gl. (7.1)

Siehe Abschnitt 3.3.4

oder TWG8.3 2014-052
(AM-1-5-2013-15)

2.5 Beispiel 2: Orthotrope Platte mit Trapezsteifen (Methode der reduzierten Spannungen)

2.5.1 Einleitung

Bild 21 zeigt das Beispiel 2 eines mit Trapezsteifen ausgesteiften Blechfeldes unter Längs- und Schubbeanspruchungen. Die Konstruktion besteht aus S 355 und die Beanspruchungen sind im nachfolgenden Abschnitt 2.5.2 Einzelfeldnachweis angegeben.

Auf die Überprüfung der Anforderung an Längssteifen gemäß DIN EN 1993-1-5:2010 Abschnitt 9.2.1(8) und (9) wird an dieser Stelle verzichtet.

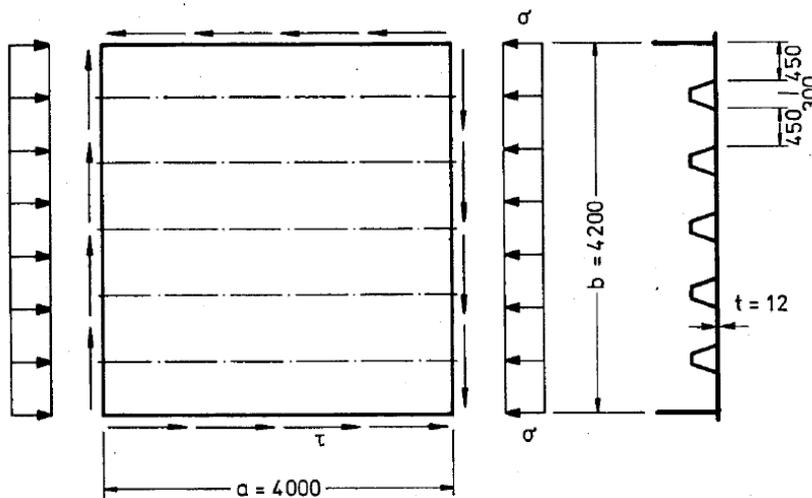


Bild 21: Beispiel 2 – Abmessungen und Beanspruchungen (Bild 3-11.4 aus „Stahlbauten - Erläuterungen zu DIN 18800-3“)

2.5.2 Einzelfeldnachweis

Aufgrund der konstanten Beanspruchungen und gleichmäßigen Abmessungen wird der Einzelfeldtyp mit der größeren Breite von 450 mm maßgebend.

$$\alpha = a/b = 4000/450 = 8,889$$

Beanspruchungen:

$$\sigma_{x,Ed} = 245 \text{ MN} / \text{m}^2 \quad \psi_x = 1$$

$$\tau_{Ed} = 41 \text{ MN} / \text{m}^2$$

$$\sigma_{v,Ed} = \sqrt{245^2 + 3 \cdot 41^2} = 255,1 \text{ MN} / \text{m}^2$$

Die Überprüfung, ob überhaupt ein Beulnachweis für die Einzelfelder erforderlich ist, erfolgt mithilfe des c/t -Verhältnis. Dazu muss der Querschnitt (für das betrachtete Einzelfeld) den Anforderungen der Querschnittsklasse 3 genügen:

Bedingung 1:

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{86,4 \cdot t \cdot \varepsilon} = \frac{450}{86,4 \cdot 12 \cdot 0,814} = 0,534 \leq 0,83$$

$$\text{mit: } \varepsilon = \sqrt{235 / f_y} = \sqrt{235 / 355} = 0,814$$

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (5.5)

Bedingung 1 erfüllt

Bedingung 2:

$$\text{grenz} \frac{c}{t} = \frac{42 \cdot \varepsilon}{0,67 + 0,33 \cdot \psi} = \frac{42 \cdot 0,814}{0,67 + 0,33 \cdot 1,0} = 34,2$$

$$\text{vorh} \frac{c}{t} = \frac{450}{12} = 37,5 > 34,2 = \text{grenz} \frac{c}{t}$$

Damit wäre ein Einzelfeldnachweis erforderlich. Man kann jedoch auch näherungsweise die Einspannwirkung der kürzeren Nachbarfelder berücksichtigen und mit einer gemittelten Feldbreite von $b_m = 375$ mm rechnen:

$$\text{vorh} \frac{c}{t} = \frac{375}{12} = 31,3 < 34,2 = \text{grenz} \frac{c}{t}$$

Bedingung 2 **nicht** erfüllt

Bedingung erfüllt

2.5.3 Gesamtfeldnachweis

Aufgrund der Steifenanzahl und regelmäßigen Anordnung wird ein Nachweis als äquivalente orthotrope Platte gemäß DIN EN 1993-1-5:2010 Anhang A.1 geführt, wobei letztere Bedingung (Regelmäßigkeit) nicht zwingend ist.

Dafür werden zunächst die Querschnittswerte einer herausgeschnittenen Trapezsteife in Bild 22 bestimmt.

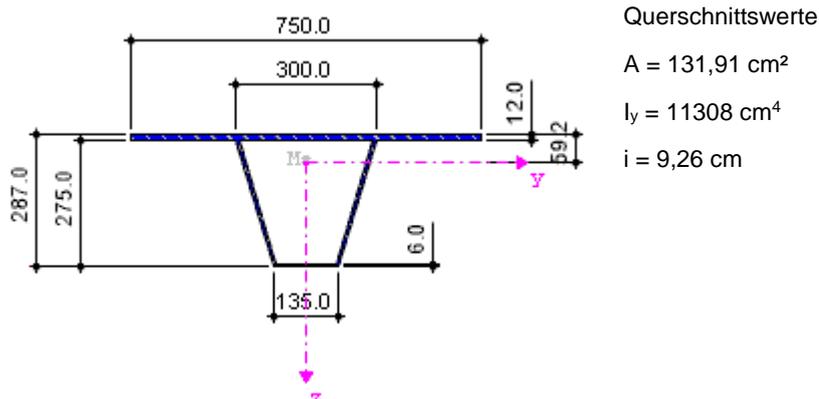


Bild 22: Querschnittswerte einer Trapezsteife einschl. mitwirkendem Blech [RSTAB 8.04]

$$\alpha = a/b = 4000/4200 = 0,952$$

$$\sigma_E = 189800 \cdot (t/b)^2 = 189800 \cdot (12/4200)^2 = 1,55 \text{ MN/m}^2$$

$$\delta = \frac{\sum A_{sl}}{b \cdot t} = \frac{5 \cdot (13191 - 750 \cdot 12)}{4200 \cdot 12} = 0,416$$

$$\gamma = \frac{10,92 \cdot \sum I_{sl}}{b \cdot t^3} = \frac{10,92 \cdot 5 \cdot 11308 \cdot 10^4}{4200 \cdot 12^3} = 850$$

$$\alpha = 0,952 < 5,340 = \sqrt[4]{850} = \sqrt[4]{\gamma}$$

$$k_{\sigma} = \frac{2 \cdot \left[(1 + \alpha^2)^2 + \gamma - 1 \right]}{\alpha^2 \cdot (\psi + 1) \cdot (1 + \delta)} = \frac{2 \cdot \left[(1 + 0,952^2)^2 + 850 - 1 \right]}{0,952^2 \cdot (1 + 1) \cdot (1 + 0,416)} = 664,394$$

$$\sigma_{cr} = k_{\sigma} \cdot \sigma_E = 664,394 \cdot 1,55 = 1029,8 \text{ MN} / \text{m}^2$$

Schubbeulen:

$$k_{\tau} = 4,00 + 5,34 + k_{\text{nst}} \quad \text{für } \alpha < 1$$

$$\text{mit: } k_{\text{nst}} = \left(\frac{3}{\alpha} \right)^2 \sqrt[4]{\left(\frac{I_{sl}}{t^3 b} \right)^3} \geq \frac{2,1}{t} \sqrt[3]{\frac{I_{sl}}{b}}$$

$$I_{sl} = \sum I_{sl} = 5 \cdot 11308 \cdot 10^4 = 56540 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$k_{\text{nst}} = \left(\frac{3}{0,952} \right)^2 \sqrt[4]{\left(\frac{56540 \cdot 10^4}{12^3 \cdot 4200} \right)^3} = 260,400 > 8,969$$

$$\text{mit: } \frac{2,1}{12} \cdot \sqrt[3]{\frac{56540 \cdot 10^4}{4200}} = 8,969$$

$$k_{\tau} = 4,00 + 5,34 \cdot 0,952^2 + 260,400 = 269,240$$

$$\tau_{cr} = k_{\tau} \cdot \sigma_E = 269,240 \cdot 1,55 = 417,3 \text{ MN} / \text{m}^2$$

α -Faktoren:

$$\alpha_{\text{ult}} = f_y / \sigma_{V,Ed} = 355 / 255,1 = 1,392$$

$$\alpha_{\text{cr},x} = \sigma_{cr} / \sigma_{x,Ed} = 1029,8 / 245 = 4,203$$

$$\alpha_{\text{cr},\tau} = \tau_{cr} / \tau_{Ed} = 417,3 / 41 = 10,178$$

$$\frac{1}{\alpha_{cr}} = \frac{1+1}{4 \cdot 4,203} + \left[\left(\frac{1+1}{4 \cdot 4,203} \right)^2 + \frac{1-1}{2 \cdot 4,203^2} + \frac{1}{10,178^2} \right]^{1/2} = 0,273253$$

$$\alpha_{cr} = 3,660$$

Plattenschlankheit und Abminderungsbeiwerte:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\alpha_{\text{ult}} / \alpha_{cr}} = \sqrt{1,392 / 3,660} = 0,617$$

$$\rho_x = 1,0$$

DIN EN 1993-1-5:2010
Anhang A.3

Abminderung der Flächenträgheitsmomente der Steifen auf 1/3 (in Formel enthalten) hier wegen geschlossener Steifen (DIN EN 1993-1-5/NA:2012-12 NA2.2, NCI zu 5.3(4)) und gemäß DIN EN 1993-1-5:2010 Abschn. 10.5(3) Anmerkung 1 bei ausgesteiften Beulfeldern nicht erforderlich
→ Formel liegt auf der sicheren Seite

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (10.3)

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (10.6)

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (10.2)
DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (4.2)

knickstabähnliches Verhalten:

$$\sigma_{cr,c} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl}}{A_{sl} \cdot a^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 11308 \cdot 10^4}{13191 \cdot 4200^2} = 1007,2 \text{ MN/m}^2$$

$$\zeta = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1 = \frac{1029,8}{1007,2} - 1 = 0,022$$

$$i = \sqrt{\frac{I_{sl}}{A_{sl}}} = \sqrt{\frac{11308 \cdot 10^4}{13191}} = 92,6 \text{ mm}$$

$$e = \text{MAX}(e_1 = 59,2 - 12/2 = 53,2 \text{ mm}; e_2 = 161,4 + 12 - 59,2 = 114,2 \text{ mm})$$

$$e = 114,2 \text{ mm}$$

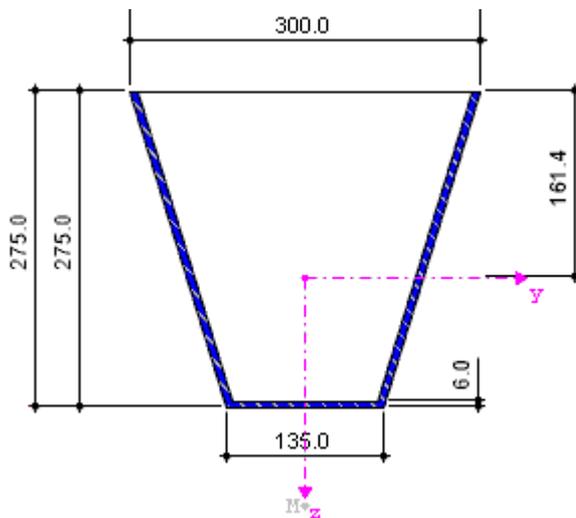


Bild 23: Schwerpunkt einer Trapezsteife ohne mitwirkendes Blech [RSTAB 8.04]

$$\alpha = 0,34 \quad (\text{für geschlossene Steifenquerschnitte KSL b})$$

$$\alpha_e = \alpha + \frac{0,09}{i/e} = 0,34 + \frac{0,09}{92,6/114,2} = 0,451$$

$$\chi_c = \frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,784 + \sqrt{0,784^2 - 0,617^2}} = 0,789$$

$$\text{mit: } \varphi = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \alpha_e \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right) \text{ und } \bar{\lambda} = \bar{\lambda}_p$$

$$\varphi = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + 0,451 \cdot (0,617 - 0,2) + 0,617^2 \right) = 0,784$$

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (4.8)

nahezu reines
knickstabähnliches Ver-
halten

vgl. Bild 22 und Bild 23
DIN EN 1993-1-5:2010
Anhang A, Bild A.1

DIN EN 1993-1-5:2010
Abschn. 4.5.3

DIN EN 1993-1-1:2010
Gl. (6.49)

Interpolation zwischen den Abminderungsbeiwerten:

$$\rho_{c,x} = (\rho_x - \rho_c) \cdot \xi \cdot (2 - \xi) + \rho_c$$
$$\rho_{c,x} = (1,0 - 0,789) \cdot 0,022 \cdot (2 - 0,022) + 0,789 = 0,798$$

Für das Schubbeulen ergibt sich:

$$\chi_w = 1,0 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p < 0,83$$

Der Nachweis lautet somit:

$$\sqrt{\left(\frac{245}{0,798}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{41}{1,0}\right)^2} = 315,1 < 322,7 = \frac{355}{1,1} \frac{MN}{m^2} = f_{yd}$$

$$E_d / R_d = 310,3 / 322,7 = 0,962 < 1$$

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (4.13)

DIN EN 1993-1-5:2010
Abschn. 5.3(1)
hier könnte man von star-
rer Lagerung ausgehen

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (10.5)

Nachweis erfüllt

2.6 Beispiel 2: Orthotrope Platte mit Trapezsteife (Methode der wirksamen Breiten)

2.6.1 Einleitung

Beispiel 2 eines mit Trapezsteifen ausgesteiften Blechfeldes unter Längs- und Schubbeanspruchungen. Die Konstruktion besteht aus S 355. Die Abmessungen sind in Bild 21 und die Beanspruchungen sind im Abschnitt 2.2.2 angegeben.

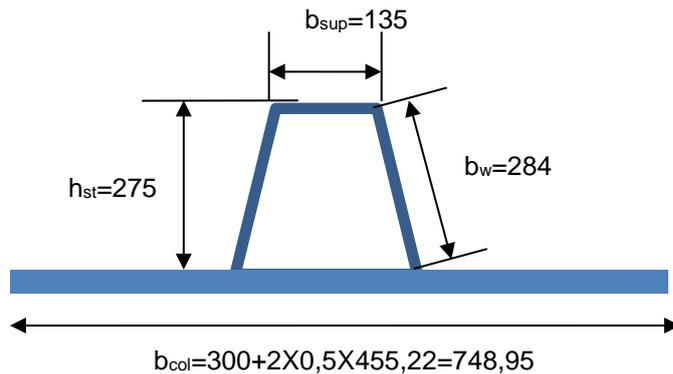


Bild 24: Steifengeometrie-Beispiel 2

Querschnittswerte

$$A_{sl} = 4190,9 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$A = 5 \cdot A_{sl} + b \cdot t_f = 71354,5 \text{ [mm}^2\text{]}$$

2.6.2 Querschnittstragfähigkeit bei Längsspannungen

Einzelfeldnachweis

Um zu prüfen, ob die einzelnen Bleche beulgefährdet sind, muss zuerst die Klasse jeder Bleche bestimmt werden.

$$\frac{b_{11}}{t_f} = \frac{455,2}{12} = 38 > 42 \cdot \varepsilon = 34,02 \Rightarrow QK4$$

$$\frac{b_{22}}{t_f} = \frac{293}{12} = 24,4 < 33 \cdot \varepsilon = 26,73 \Rightarrow QK1$$

$$\frac{b_w}{t_{sl}} = \frac{284}{6} = 47,3 > 42 \cdot \varepsilon = 34,02 \Rightarrow QK4$$

$$\frac{b_{sup}}{t_{sl}} = \frac{135}{6} = 22,5 < 33 \cdot \varepsilon = 26,73 \Rightarrow QK1$$

Der Beulsicherheitsnachweis muss für die Steife und Einzelfeld b_{11} durchgeführt werden.

Beulsicherheitsnachweis für b_{11}

Platte unter konstante Druckspannung

$$\psi = 1$$

Beulwert: $k_{\sigma} = 4$

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot t_f^2}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot b_{11}^2} = \frac{\pi^2 E \cdot 12^2}{12(1 - 0,3^2) \cdot 453,1^2} = 133,9 \text{ N/mm}^2$$

Schlankheit:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{k_{\sigma} \cdot \sigma_E}} = \sqrt{\frac{355}{4 \cdot 133,1}} = 0,82 \geq 0,673$$

$$\rho_{11} = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \Psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = 0,892$$

$$b_{1,inf,eff} = b_{3,sup,eff} = 0,5 \cdot \rho_{11} \cdot b_{11} = 0,5 \cdot 0,892 \cdot 455,22 = 203,05 [\text{mm}]$$

DIN EN 1993-1-5, 4.4,
Tab. 4.1**Beulsicherheitsnachweis für b_w** Beulwert: $k_{\sigma} = 4$

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot t_{sl}^2}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot b_w^2} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot 6^2}{12 \cdot (1 - 0,3^2) \cdot 284^2} = 84,7 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$$

Schlankheit:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{k_{\sigma} \cdot \sigma_E}} = \sqrt{\frac{355}{4 \cdot 84,7}} = 1,023 \geq 0,673$$

$$\rho_w = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \Psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = 0,767$$

$$b_{w,eff1} = b_{w,eff2} = b_{edge,eff} = \rho_w \cdot b_w = 0,767 \cdot 284 = 108,9 [\text{mm}]$$

DIN EN 1993-1-5, 4.4,
Tab. 4.1DIN EN 1993-1-5,
4.5.3(2), Gl. (4.8)**Ermittlung des Abminderungsfaktors bei plattenartigem Verhalten**

Ermittlung der idealen Plattenbeulspannung

Platte unter konstante Spannung

$$\alpha = \frac{a}{b} = \frac{4000}{4200} = 0,95 > 0,5$$

DIN EN 1993-1-5, 4.4(2),
Gl. (4.2)

$$\delta = \frac{\sum A_{sl}}{b \cdot t_f} = \frac{5 \cdot 4190,9}{4200 \cdot 12} = 0,416$$

$$I_{sl} = 579507365,8 \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$I_p = \frac{b \cdot t_f^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} = 664615,4 \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$\gamma = \frac{I_{sl}}{I_{pl}} = \frac{579507365,8}{664615,4} = 871,9$$

$$\alpha = 0,95 < \sqrt[4]{\gamma} = 5,43$$

$$k_{\sigma,p} = \frac{2 \cdot ((1 + \alpha^2)^2 + \gamma - 1)}{\alpha^2 \cdot (\psi + 1) \cdot (1 + \delta)} = 681,06$$

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot t_f^2}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot b^2} = 1,5494 \left[\frac{N}{\text{mm}^2} \right]$$

$$\sigma_{cr,p} = k_{\sigma,p} \cdot \sigma_E = 681,06 \cdot 1,5494 = 1055,23 \left[\frac{N}{\text{mm}^2} \right]$$

DIN EN 1993-1-5,
4.5.3(2), Gl. (4.8)

Plattenartiges Verhalten

Abminderungsfaktor nach DIN EN 1993-1-5, 4.4(2)

$$A_c = (b - b_{1,edge} - b_{3,edge}) \cdot t_f + 5 \cdot A_{sl}$$

$$= (4200 - 0,5 \cdot 455,2 - 0,5 \cdot 455,2) \cdot 12 + 5 \cdot 4190,9 = 65891,9 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$\sum A_{sl,eff} = 5 \cdot A_{sl,eff} = 5 \cdot (A_{sl} - (1 - \rho_w) \cdot b_w \cdot t_{sl} \cdot 2) = 16985,4 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$A_{c,eff,loc} = \sum A_{sl,eff} + 5 \cdot (b_{1,inf,eff} + b_2 + b_{3,sup,eff}) \cdot t_f$$

$$= 16985,4 + 5 \cdot (2 \cdot 203,05 + 293,7) \cdot 12 = 58976,1 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$\beta_{A,c}^p = \frac{A_{c,eff,loc}}{A_c} = \frac{58976,1}{65891,9} = 0,895$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\beta_{A,c}^p \cdot f_y}{\sigma_{cr,p}}} = \sqrt{\frac{0,895 \cdot 355}{1055,23}} = 0,548 \leq 0,673$$

$$\rightarrow \rho = 1,0$$

$$b_{col} = 293,735 + 2 \cdot 0,5 \cdot 455,22 = 748,96 \text{ [mm]}$$

$$A_{sl,1} = b_{col} \cdot t_f + A_{sl} = 13178,4 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$e_1 = 53,24 \text{ [mm]}$$

$$e_2 = 114,18 \text{ [mm]}$$

$$e = \max(e_1, e_2) = 114,18 \text{ [mm]}$$

$$I_{sl,1} = 113028207,3 \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$A_{sl,1,eff} = (A_{sl} - (1 - \rho_w) \cdot b_w \cdot t_{sl} \cdot 2) + (b_{1,inf,eff} + b_2 + b_{3,sup,eff}) \cdot t_f$$

$$= \frac{A_{c,eff,loc}}{5} = 11794,22 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$\sigma_{cr,c} = \sigma_{cr,sl} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl,1}}{A_{sl,1} \cdot a^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 113028207,3}{13178,4 \cdot 4000^2} = 1111,02 \left[\frac{N}{\text{mm}^2} \right]$$

DIN EN 1993-1-5, 4.5.2

DIN EN 1993-1-5,
4.5.2(1), Gl. (4.7)

DIN EN 1993-1-5,
4.5.3(3), Gl. (4.9)

$$\beta_{A,c} = \frac{A_{sl,1,eff}}{A_{sl,1}} = \frac{11794,22}{13178,4} = 0,895$$

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{\beta_{A,c} \cdot f_y}{\sigma_{cr,c}}} = \sqrt{\frac{0,895 \cdot 355}{1111,02}} = 0,534$$

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{\beta_{A,c} \cdot f_y}{\sigma_{cr,c}}} = \sqrt{\frac{0,895 \cdot 355}{1111,02}} = 0,534$$

$$\alpha_e = \alpha + \frac{0,09}{i/e} = 0,451$$

$$i = \sqrt{\frac{113028207,3}{13178,4}} = 92,61$$

$$\phi_c = 0,5 \cdot (1 + \alpha_e \cdot (\bar{\lambda}_c - 0,2) + \bar{\lambda}_c^2) = 0,5 \cdot (1 + 0,451 \cdot (0,534 - 0,2) + 0,534^2) = 0,718$$

$$\chi_c = \frac{1}{\phi_c + \sqrt{\phi_c^2 - \bar{\lambda}_c^2}} = \frac{1}{0,718 + \sqrt{0,718^2 - 0,534^2}} = 0,834 \leq 1,0$$

Interaktion zwischen Plattenartigen und Knickstabähnlichem Verhalten

$$\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1 = \frac{1055,23}{1111,02} - 1 < 0 \rightarrow \xi = 0$$

$$\rho_c = \chi_c = 0,834$$

$$A_{c,eff} = \rho_c \cdot A_{c,eff,loc} + 2 \cdot b_{edge,eff} \cdot t_f = 0,834 \cdot 58976,1 + 2 \cdot 203,05 \cdot 12 = 54089,2 [mm^2]$$

Nachweis

$$\eta_1 = \frac{\sigma_{Ed} \cdot A}{\frac{f_y \cdot A_{c,eff}}{\gamma_{M1}}} = \frac{245 \cdot 71354,5}{\frac{355 \cdot 54089,2}{1,1}} = 1,00$$

Anmerkung: Für eine längs des Beulfeldes veränderliche Spannung ist in der Regel der Beulnachweis für die Schnittgrößen an der Querschnittsstelle zu führen, die sich im Abstand 0,4 a oder 0,5 b (kleinster Wert) von dem Beulfeldrand befindet, an dem die größten Spannungen auftreten.

DIN EN 1993-1-5,
4.5.2(1), Gl. (4.7)

DIN EN 1993-1-5,
4.5.3(5), Gl. (4.12)

DIN EN 1993-1-1, 6.3.1.2

DIN EN 1993-1-5, 4.5.4

DIN EN 1993-1-5, 4.6

2.6.3 Querschnittstragfähigkeit bei Schubspannungen

$$h_w = b = 4200 \text{ [mm]}$$

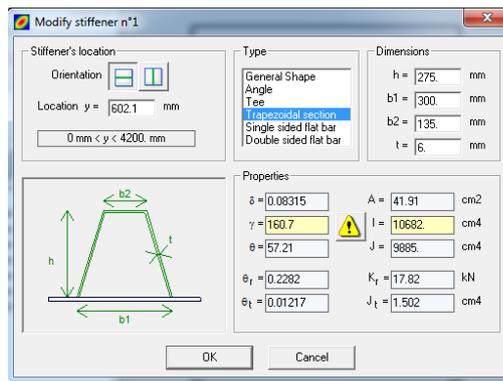
$$b_1 = b_2 = 15 \cdot \varepsilon \cdot t = 15 \cdot 0,81 \cdot 12 = 146,5 \text{ [mm]}$$

$$2 \cdot b_1 < b_{inf} = 300$$

$$b_\gamma = 592,9 \text{ [mm]}$$

$$I_{sl} = 106840000 \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$\gamma = 160,7$$



Gesamtfeld

$$\frac{a}{b} = 0,95 < 1$$

$$k_\tau = 4,00 + 5,34 \cdot \left(\frac{b}{a}\right)^2 + k_{\tau,sl} = 4,00 + 5,34 \cdot \left(\frac{4200}{4000}\right)^2 + 249,3 = 259,2$$

$$k_{\tau,sl} = \max\left(9 \cdot \left(\frac{b}{a}\right)^2 \cdot \sqrt[4]{\frac{(\sum I_{sl})^3}{t_f^3 \cdot b}}; \frac{2,1}{t_f} \cdot \sqrt[3]{\frac{\sum I_{sl}}{b}}\right)$$

$$= \max\left(9 \cdot \left(\frac{4200}{4000}\right)^2 \cdot \sqrt[4]{\frac{(5 \cdot 106840000)^3}{12^3 \cdot 4200}}; \frac{2,1}{12} \cdot \sqrt[3]{\frac{5 \cdot 106840000}{4200}}\right)$$

$$= \max(249,3; 8,8) = 249,3$$

$$\bar{\lambda}_w = \frac{b}{37,4 \cdot t_f \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\tau}} = \frac{4200}{37,4 \cdot 12 \cdot 0,81 \cdot \sqrt{259,2}} = 0,71$$

DIN EN 1993-1-5, A.3, Gl. (A.5)

DIN EN 1993-1-5, 5.3(3), Gl. (5.6)

Einzelfeld

$$h_w = b_{11} = 455,22$$

$$\frac{a}{b_{11}} = \frac{4000}{455,22} = 8,78 > 1$$

$$k_\tau = 5,34 + 4,00 \cdot \left(\frac{b_{11}}{a}\right)^2 + k_{\tau,sl} = k_\tau = 5,34 + 4,00 \cdot \left(\frac{455,22}{4000}\right)^2 + 0 = 5,39$$

$$k_{\tau,sl} = 0$$

$$\bar{\lambda}_{w,1} = \frac{b_{11}}{37,4 \cdot t_f \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\tau}} = \frac{455,22}{37,4 \cdot 12 \cdot 0,81 \cdot \sqrt{5,39}} = 0,54$$

$$\bar{\lambda}_w = 0,71 > \bar{\lambda}_{w,1} = 0,54$$

Annahme: Brückenbau $\eta = 1$

$$\bar{\lambda}_w = 0,71 < 0,83/\eta$$

$$\chi_w = 1,0$$

DIN EN 1993-1-5, A.3, Gl. (A.5)

DIN EN 1993-1-5, 5.3(3), Gl. (5.6)

DIN EN 1993-1-5, 5.3, Tab. 5.1

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w \cdot f_{yw} \cdot b \cdot t_f}{\gamma_{M1} \cdot \sqrt{3}} = \frac{1,0 \cdot 355 \cdot 4200 \cdot 12}{1,1 \cdot \sqrt{3}} = 9390864,5 \text{ [N]}$$

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} = V_{bw,Rd} + 0 = 9390864,5 \text{ [N]}$$

Nachweis

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{\tau_{Ed} \cdot b \cdot t_f}{\frac{\chi_w \cdot f_{yw} \cdot b \cdot t_f}{\gamma_{M1} \cdot \sqrt{3}}} = \frac{41}{\frac{1 \cdot 355}{1,1 \cdot \sqrt{3}}} = 0,22 < 1,0$$

$\eta_3 < 0,5 \rightarrow$ Interaktion nicht erforderlich

DIN EN 1993-1-5, 5.2(1),
Gl. (5.2)

DIN EN 1993-1-5, 7.1(1)

2.7 Beispiel 2: Orthotrope Platte mit Trapezsteife (Vergleich)

Die Ausnutzungsgrade der Nachweiskonzepte sind in Tab. 4 zusammengestellt. In diesem Beispiel wurde das Bodenblech als Teilsystem in beiden Nachweisverfahren betrachtet. Deshalb spielt die Spannungsumlagerung bei diesem Beispiel keine große Rolle. Aus diesem Grund haben die beiden Nachweisverfahren einen ähnlichen Ausnutzungsgrad.

Tab. 4: Vergleich der Ausnutzungsgrade der Nachweismethode für Beispiel 2

Methode	Ausnutzungsgrad
Methode der wirksamen Breiten (Bodenblech als Teilsystem)	$\eta_1 = 1,00 < 1,0$
	$\eta_2 = -$
	$\eta_3 = 0,22 < 1,0$
Methode der reduzierten Spannungen (Bodenblech)	$\eta_{MRS} = 0,96 < 1,0$
DIN 18800-3:2008	$\eta_{DIN} = 0,89 < 1,0$

2.8 Beispiel 3: Vollwandträgersteg mit örtlicher Lasteinleitung (Methode der reduzierten Spannungen)

Bild 25 zeigt das Beispiel 3 eines Vollwandträgersteges mit örtlicher Lasteinleitung am oberen Rand. In der Mitte sowie im oberen Viertelpunkt ist jeweils ein längslaufendes Winkelprofil als Aussteifung angeordnet. Die Konstruktion besteht aus S 355.

Auf die Überprüfung der Anforderung an Längssteifen gemäß DIN EN 1993-1-5:2010 Abschnitt 9.2.1(8) und (9) wird an dieser Stelle verzichtet.

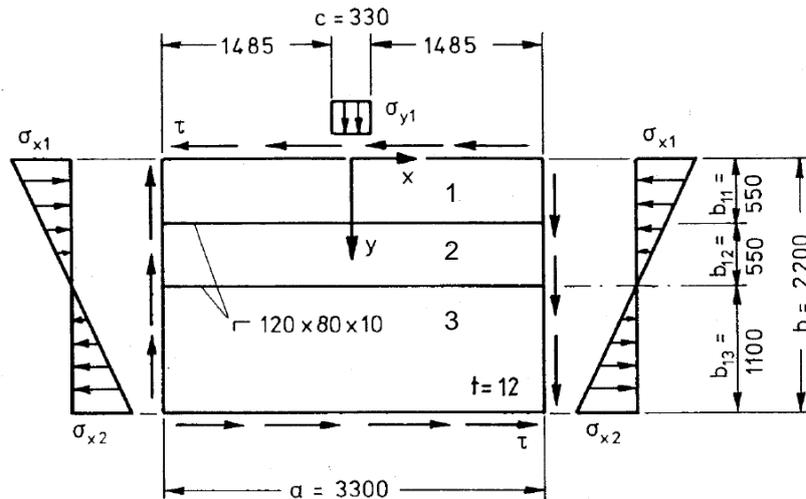


Bild 25: Beispiel 3 – Abmessungen und Beanspruchungen (Bild 3-11.7 aus Erläuterungen zu DIN 18800-3)

Es sind folgende Randspannungen angegeben:

$$\sigma_{x1} = -\sigma_{x2} = 231 \text{ MN/m}^2$$

$$\sigma_{y1} = 109 \text{ MN/m}^2$$

$$\tau = 75 \text{ MN/m}^2$$

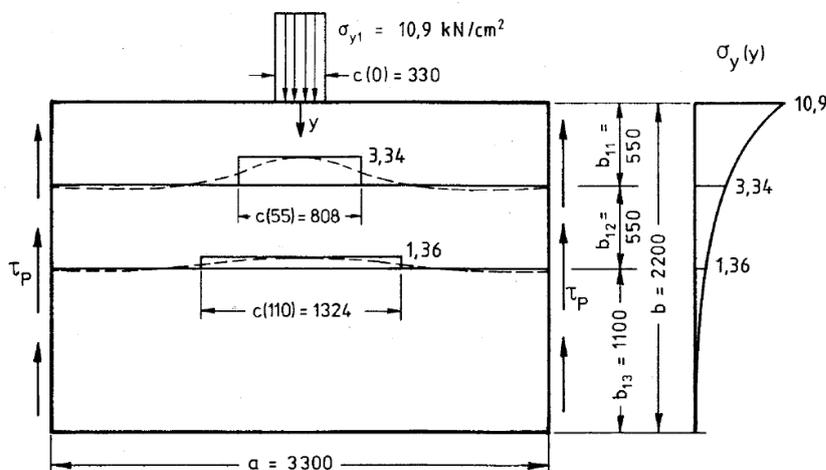


Bild 26: Spannungsverteilung für σ_y (Bild 3-11.8 aus Erläuterungen zu DIN 18800-3)

Bzgl. der Spannungsverteilung infolge der Querdruckbeanspruchung (wird im Weiteren mit σ_z bezeichnet) wird auf die in den Erläuterungen zu DIN 18800-3:2008 gewählte Näherungslösung zurückgegriffen, vgl. Bild 26. Alternativ könnte man die Scheibenbeanspruchungen auch mittels einer FEM-Berechnung bestimmen.

2.8.1 Einzelfeldnachweise

a) Einzelfeld 1

$$\alpha = a/b = 3300/550 = 6,0$$

Beanspruchungen:

$$\sigma_{x,Ed} = 231 \text{ MN/m}^2$$

$$\sigma_{2,Ed} = 231 \cdot 550/1100 = 115,5 \text{ MN/m}^2$$

$$\psi_x = \sigma_{2,Ed} / \sigma_{x,Ed} = 115,5/231 = 0,5$$

$$\sigma_{z,Ed,o} = 109 \text{ MN/m}^2 \quad \sigma_{z,Ed,u} = 33,4 \text{ MN/m}^2$$

$$\psi_z = 1$$

$$\tau_{Ed} = 75 \text{ MN/m}^2$$

$$\sigma_{v,Ed} = \sqrt{231^2 + 109^2 - 231 \cdot 109 + 3 \cdot 75^2} = 238,6 \text{ MN/m}^2$$

Eine Überprüfung der c/t-Verhältnisse ist hier nicht erforderlich, weil diese nur die Längs- und Schubbeanspruchung (einschl. Schlankheitsbedingung, vgl. Beispiel 1) erfassen bzw. abdecken. Aufgrund des mehrachsialen Spannungszustands ist ein Beulnachweis zwingend erforderlich.

Verzweigungsfaktoren:

Die Verzweigungsfaktoren werden mit EBPlate 2.01 berechnet.

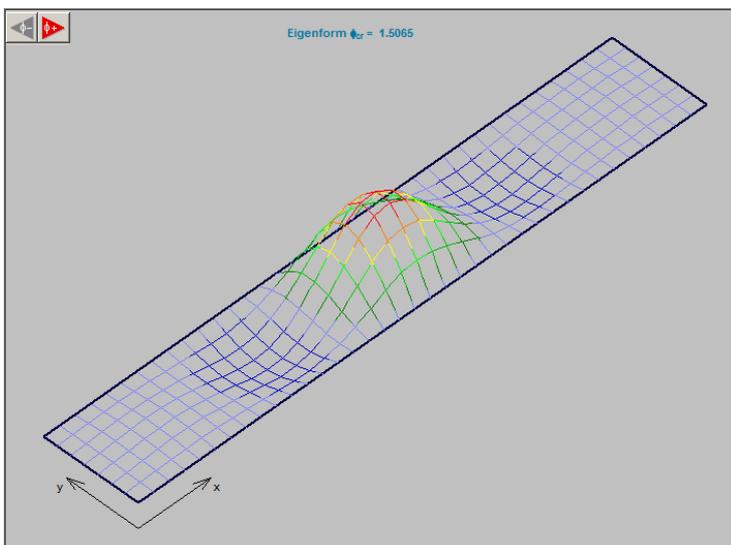


Bild 27: Feld 1: Eigenform für kombinierte Wirkung $\sigma_{x,Ed} + \sigma_{z,Ed} + \tau_{ED}$ ($\alpha_{cr} = 1,5065$) [EBPlate 2.01]

Querdruck am oberen und unteren Rand von Feld 1, vgl. Bild 26

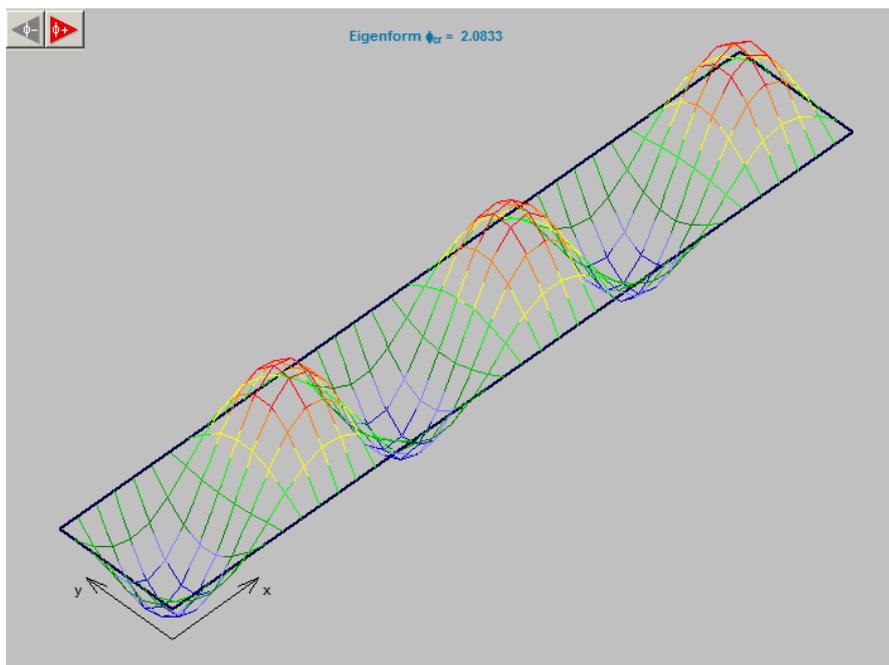


Bild 28: Feld 1: Eigenform für alleinige Wirkung von $\sigma_{x,Ed}$ ($\alpha_{cr,x} = 2,0833$) [EBPlate 2.01]

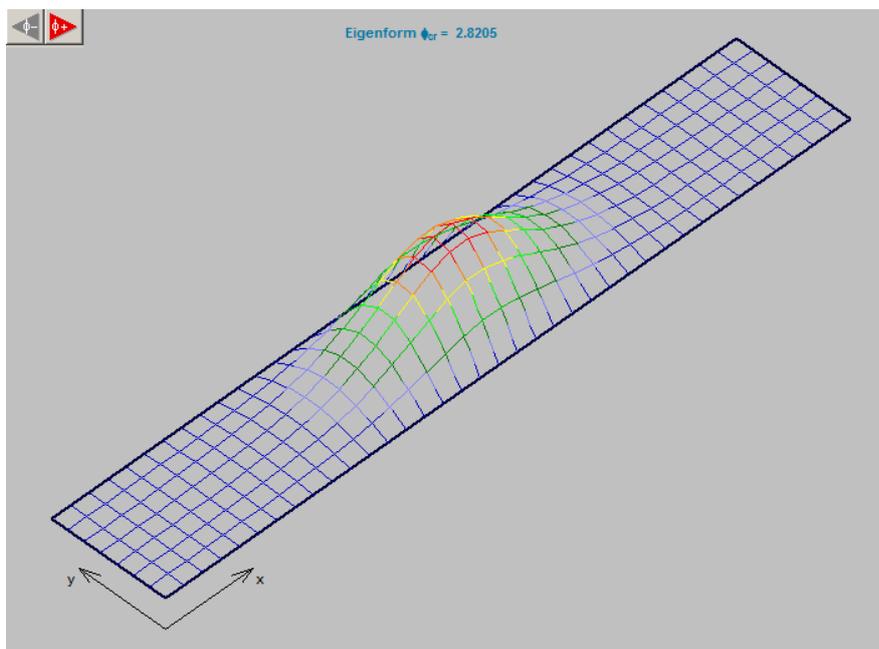


Bild 29: Feld 1: Eigenform für alleinige Wirkung von $\sigma_{z,Ed}$ ($\alpha_{cr,z} = 2,8205$) [EBPlate 2.01]

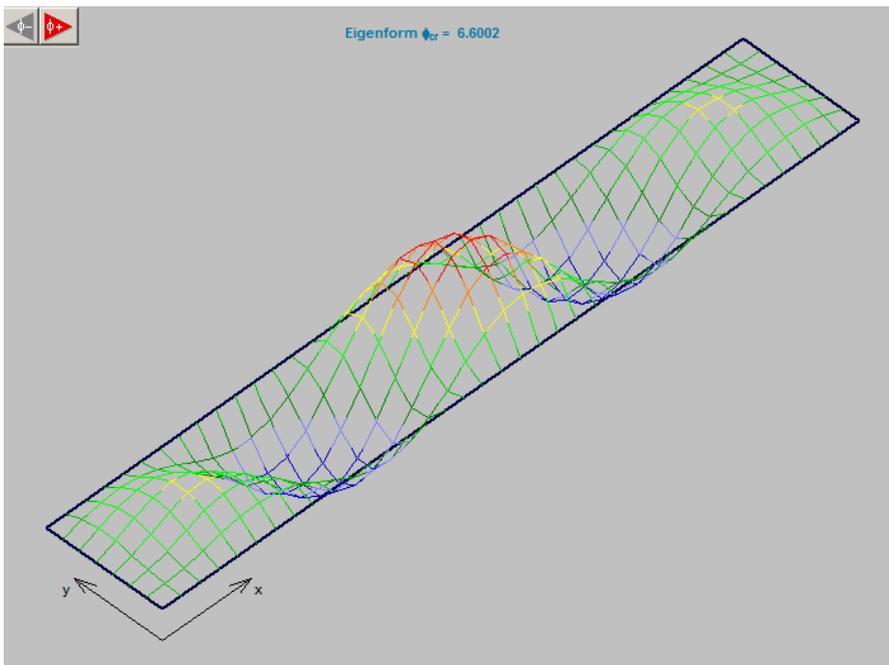


Bild 30: Feld 1: Eigenform für alleinige Wirkung τ_{ED} ($\alpha_{cr,\tau} = 6,6002$) [EBPlate 2.01]

Tab. 5: Vergleich der Verzweigungswerte $\alpha_{cr,j}$

Einwirkung	$\sigma_{x,ED}$	$\sigma_{z,ED}$	τ_{ED}	kombiniert
EBPlate 2.01	2,0833	2,8205	6,6002	1,5065
Erläuterungen zu DIN 18800-3	2,0693	2,7523	6,5733	1,2127 ¹⁾

¹⁾ mit Näherungsgleichung (10.6) für $\psi_x = 0,5$ und $\psi_z = 1$

α -Faktoren:

$$\alpha_{ult} = f_y / \sigma_{V,Ed} = 355 / 238,6 = 1,488$$

$\alpha_{cr,j}$ siehe Tab. 5 (EBPlate 2.01)

Plattenschlankheit und Abminderungsbeiwerte:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\alpha_{ult} / \alpha_{cr}} = \sqrt{1,488 / 1,5065} = 0,994$$

$$\rho_x = [\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)] / \bar{\lambda}_p^2$$

$$\rho_x = [0,994 - 0,055 \cdot (3 + 0,5)] / 0,994^2 = 0,811$$

$$\rho_z = \frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \bar{\lambda}_p}} = \frac{1}{1,030 + \sqrt{1,030^2 - 0,994}} = 0,776$$

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (10.3)

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (10.2)

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (4.2)

DIN EN 1993-1-5:2010
Anhang B.1

$$\text{mit: } \varphi = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \alpha_p \cdot (\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}_p \right)$$

$$\alpha_p = 0,34 \quad \text{und} \quad \bar{\lambda}_0 = 0,8$$

$$\varphi = \frac{1}{2} \cdot (1 + 0,34 \cdot (0,994 - 0,8) + 0,994) = 1,030$$

$$\chi_w = 0,83 / \bar{\lambda}_p \quad \text{für} \quad \bar{\lambda}_p \geq 0,83$$

$$\chi_w = 0,83 / 0,994 = 0,835$$

knickstabähnliches Verhalten (Längsbeanspruchung):

$$\sigma_{cr,c,x} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I^2}{10,92 \cdot a^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 12^2}{10,92 \cdot 3300^2} = 2,51 \text{ MN/m}^2$$

$$\sigma_{cr,p,x} = \alpha_{cr,x} \cdot \sigma_{x,Ed} = 2,0833 \cdot 231 = 481,2 \text{ MN/m}^2$$

Für die Beurteilung des knickstabähnlichen Verhaltens wird der Verzeigungsfaktor infolge alleiniger Längsbeanspruchung der Platte $\alpha_{cr,x}$ angesetzt.

$$\xi = \frac{\sigma_{cr,p,x}}{\sigma_{cr,c,x}} - 1 = \frac{481,2}{2,51} - 1 = 190,713 > 1$$

$$\text{es gilt: } 0 \leq \xi \leq 1 \Rightarrow \xi = 1$$

$$\rho_{c,x} = (\rho_x - \chi_c) \cdot \xi \cdot (2 - \xi) + \chi_c = \rho_x = 0,811$$

knickstabähnliches Verhalten (Querbeanspruchung):

Die Knicklänge kann z.B. gemäß DIN 4114-2:1953 Blatt 2 Tafel 5 unter Punkt 6 wie folgt bestimmt werden:

$$s_K = s \cdot \sqrt{\frac{1 + 0,88 \cdot N_0 / N_1}{1,88}} = 550 \cdot \sqrt{\frac{1 + 0,88 \cdot 324 / 432}{1,88}} = 517 \text{ mm}$$

$$\text{mit: } N_1 = 109 \cdot 0,330 \cdot 0,012 = 0,432 \text{ MN}$$

$$N_0 = 33,4 \cdot 0,808 \cdot 0,012 = 0,324 \text{ MN}$$

$$\sigma_{cr,c,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I^2}{10,92 \cdot s_K^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 12^2}{10,92 \cdot 517^2} = 102,3 \text{ MN/m}^2$$

$$\sigma_{cr,p,z} = \alpha_{cr,z} \cdot \sigma_{z,Ed} = 2,8205 \cdot 109 = 307,4 \text{ MN/m}^2$$

$$\xi = \frac{\sigma_{cr,p,z}}{\sigma_{cr,c,z}} - 1 = \frac{307,4}{102,3} - 1 = 2,005 > 1$$

$$\text{es gilt: } 0 \leq \xi \leq 1 \Rightarrow \xi = 1$$

DIN EN 1993-1-5:2010
Abschn. 5.3(1)
verformbare Auflagersteifen

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (4.8)

DIN EN 1993-1-5:2010
Abschn. 4.5.4

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (4.13)
kein knickstabähnliches Verhalten

vgl. Bild 22

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (4.8)

DIN EN 1993-1-5:2010
Abschn. 4.5.4

kein knickstabähnliches Verhalten

Nachweis Einzelfeld 1:

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\rho_{c,x}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{\rho_{c,z}}\right)^2} - V \cdot \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\rho_{c,x}}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{\rho_{c,z}}\right) + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{Ed}}{\chi_w}\right)^2 \leq \frac{f_y}{\gamma_M}$$

mit: $V = \rho_{c,x} \cdot \rho_{c,z}$ für biaxialen Druck (sonst $V = 1$)

$$\sqrt{\left(\frac{231}{0,811}\right)^2 + \left(\frac{109}{0,776}\right)^2} - 231 \cdot 109 + 3 \cdot \left(\frac{75}{0,835}\right)^2 \leq \frac{355}{1,1}$$

$$E_d / R_d = 316,0 / 322,7 = 0,979 < 1 \quad \text{Nachweis erfüllt}$$

b) Einzelfeld 2

Das Einzelfeld kann aufgrund gleicher Abmessungen und kleinerer Beanspruchungen im Vergleich zu Einzelfeld 1 nicht maßgebend werden.

c) Einzelfeld 3

$$\alpha = a/b = 3300/1100 = 3,0$$

Beanspruchungen:

$$\sigma_{x,Ed} = -231 \text{ MN/m}^2 \text{ (Zug!)}$$

$$\sigma_{2,Ed} = 0 \text{ MN/m}^2$$

$$\psi_x = 0$$

$$\sigma_{z,Ed,o} = 13,6 \text{ MN/m}^2 \quad \sigma_{z,Ed,u} = 0 \text{ MN/m}^2$$

$$\psi_z = 1$$

$$\tau_{Ed} = 75 \text{ MN/m}^2$$

Weil $\sigma_{x,Ed}$ am oberen Rand, also dort, wo $\sigma_{z,Ed}$ den Maximalwert aufweist, gleich Null ist, ergibt sich die maximale Vergleichsspannung am unteren Rand infolge der Längszugbeanspruchungen:

$$\sigma_{V,Ed} = \sqrt{(-231)^2 + 3 \cdot 75^2} = 265,0 \text{ MN/m}^2$$

Da im Weiteren aber die entlastende Wirkung der Längszugbeanspruchungen nicht berücksichtigt wird, muss die Vergleichsspannung für die zu α_{cr} -Bestimmung korrespondierende Stelle (oberer Rand des Einzelfeldes 3, $\sigma_{x,Ed} = 0$) angesetzt werden:

DIN EN 1993-1-5:2010

Gl. (10.5)

mit Ergänzung von V

vgl. CEN/TC 250/SC 3; N 2128: (AM- 1-5-2015-02)

$$\sigma_{V,Ed} = \sqrt{13,6^2 + 3 \cdot 75^2} = 130,6 \text{ MN} / \text{m}^2$$

Verzweigungsfaktoren:

Bei der Berechnung der Beulwerte bzw. Verzweigungsfaktoren wird der günstige Einfluss der Längszugbeanspruchungen nicht berücksichtigt. Dies ist auch der gemäß DIN EN 1993-1-5 vorgesehene Regelfall, der besagt, dass Zugbeanspruchungen zu vernachlässigen sind. Prinzipiell ist eine Berücksichtigung aber möglich, wenn gewährleistet ist, dass es sich um zugehörige Spannungen handelt, d.h. der günstige Einfluss auch wirklich sichergestellt ist. Darüber hinaus ist der Faktor V entsprechend (ZIZZA, A., 2016) anzupassen. Diese alternative Nachweisführung erfolgt im Anschluss an den Regelnachweis. Aus diesem Grunde sind die entsprechenden Verzweigungsfaktoren bei den jeweiligen Fällen in Klammern () informativ angegeben. Die Berechnung erfolgt mit EBPlate 2.01.

DIN EN 1993-1-5:2010
Abschn. 10(5)b
Anmerkung 2

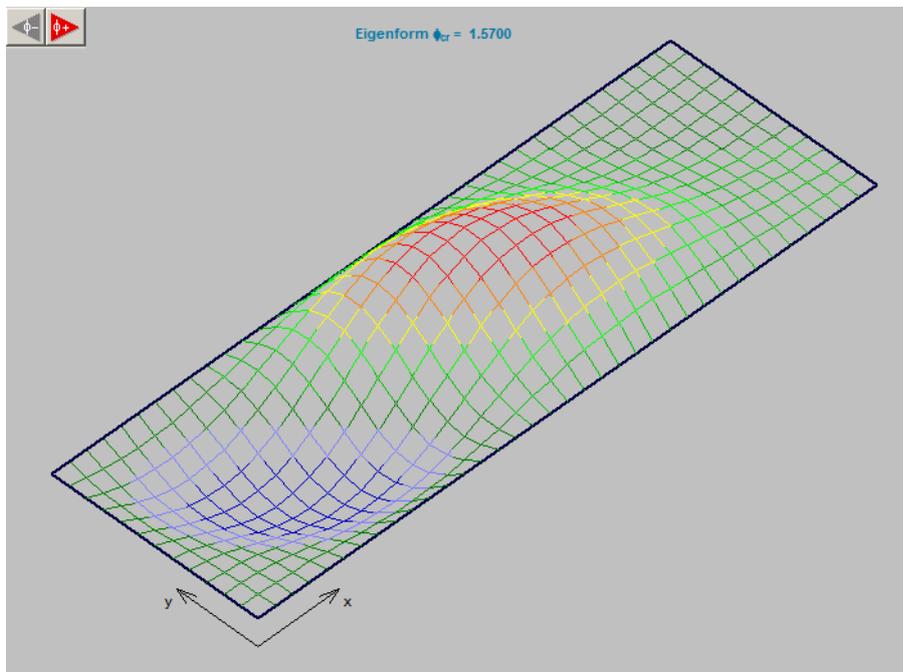


Bild 31: Feld 3: $\alpha_{cr} = 1,5700$ bei kombinierter Wirkung von $\sigma_{z,Ed} + \tau_{ED}$ ($\alpha_{cr} = 3,4610$) [EBPlate 2.01]

Bei dem herausgeschnittenen Einzelfeldnachweis wird i.d.R. eine Naviersche Lagerung angenommen. Bezüglich der Überprüfung dieser Annahme wird auf den nachfolgenden Abschnitt 2.8.2 c) verwiesen.

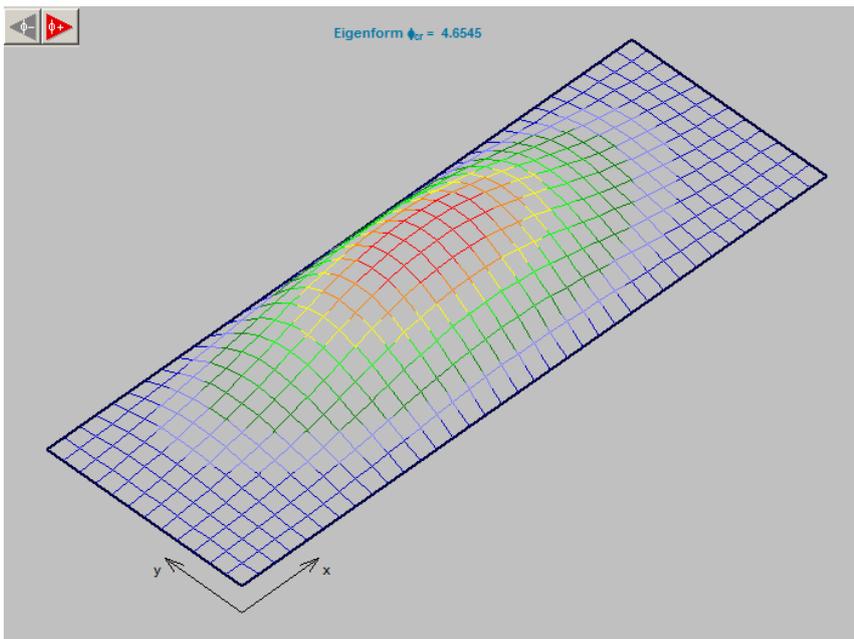


Bild 32: Feld 3: $\alpha_{cr,z} = 4,6545$ unter alleiniger Wirkung von $\sigma_{z,Ed}$ ($\alpha_{cr,z} = 14,937$) [EBPlate 2.01]

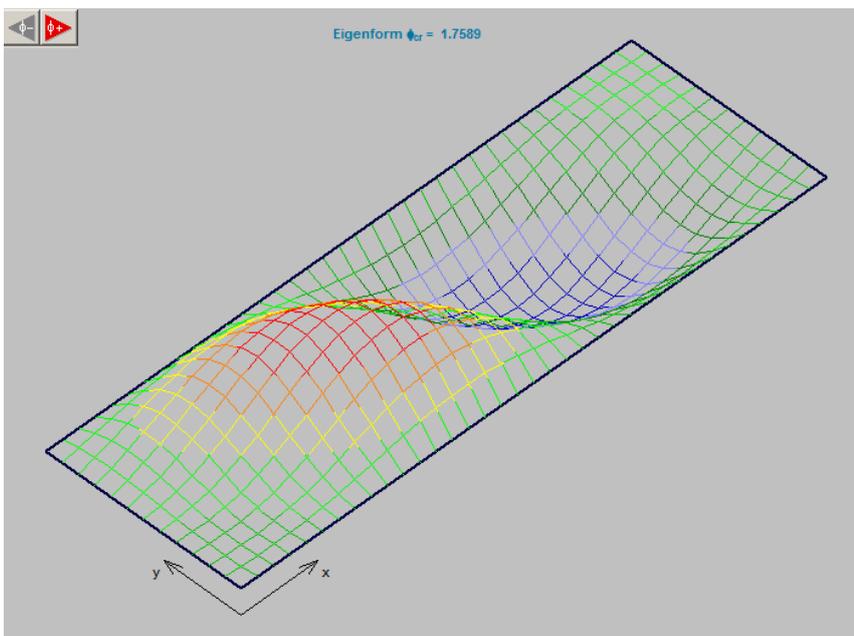


Bild 33: Feld 3: $\alpha_{cr,t} = 1,7589$ unter alleiniger Wirkung von τ_{ED} ($\alpha_{cr,t} = 4,4864$) [EBPlate 2.01]

Tab. 6: Vergleich der Verzweigungswerte $\alpha_{cr,i}$ für Einzelfeld 3

Einwirkung	$\sigma_{x,ED}$	$\sigma_{z,ED}$	τ_{ED}	kombiniert
EBPlate 2.01	∞	4,6545	1,7589	1,5700 (3,4610) ¹⁾
Erläuterungen zu DIN 18800-3	∞	4,4338	1,7467	1,4362 ²⁾

¹⁾ mit σ_x (Zug)

²⁾ mit Näherungsgleichung gemäß DIN EN 1993-1-5:2010 Gl. (10.6) für $\psi_z = 1$ und ohne σ_x (Zug)

α -Faktoren:

$$\alpha_{ult} = f_y / \sigma_{V,Ed} = 355 / 130,6 = 2,718$$

$\alpha_{cr,i}$ siehe Tab. 6, EBPlate 2.01 (ohne Berücksichtigung von Zugbeanspruchungen)

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (10.3)

Plattenschlankheit und Abminderungsbeiwerte:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\alpha_{ult} / \alpha_{cr}} = \sqrt{2,718 / 1,5700} = 1,316$$

$$\rho_z = \frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \bar{\lambda}_p}} = \frac{1}{1,246 + \sqrt{1,246^2 - 1,316}} = 0,577$$

mit: $\varphi = \frac{1}{2} \cdot (1 + \alpha_p \cdot (\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}_p)$

$$\alpha_p = 0,34 \quad \text{und} \quad \bar{\lambda}_0 = 0,8$$

$$\varphi = \frac{1}{2} \cdot (1 + 0,34 \cdot (1,316 - 0,8) + 1,316) = 1,246$$

$$\chi_w = 0,83 / \bar{\lambda}_p \quad \text{für} \quad \bar{\lambda}_p \geq 0,83$$

$$\chi_w = 0,83 / 1,316 = 0,631$$

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (10.2)

DIN EN 1993-1-5:2010
Anhang B.1

DIN EN 1993-1-5:2010
Abschn. 5.3(1)
verformbare Auflagersteifen

knickstabähnliches Verhalten (Querbeanspruchung):

Die Knicklänge kann gemäß DIN 4114 Blatt 2 Tafel 5 unter Punkt 6 wie folgt bestimmt werden:

$$s_K = s \cdot \sqrt{\frac{1 + 0,88 \cdot N_0 / N_1}{1,88}} = 1100 \cdot \sqrt{\frac{1 + 0,88 \cdot 0 / 216}{1,88}} = 802 \text{ mm}$$

mit: $N_1 = 13,6 \cdot 1,324 \cdot 0,012 = 0,216 \text{ MN}$

$$N_0 = 0 \text{ MN}$$

$$\sigma_{cr,c,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot t^2}{10,92 \cdot s_K^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 12^2}{10,92 \cdot 802^2} = 42,5 \text{ MN / m}^2$$

$$\sigma_{cr,p,z} = \alpha_{cr,z} \cdot \sigma_{z,Ed} = 4,6545 \cdot 13,6 = 63,3 \text{ MN / m}^2$$

$$\xi = \frac{\sigma_{cr,p,z}}{\sigma_{cr,c,z}} - 1 = \frac{63,3}{42,5} - 1 = 0,489 < 1$$

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (4.8)

DIN EN 1993-1-5:2010
Abschn. 4.5.4

Interpolation mit Stabknicken erforderlich!

$\alpha_e = \alpha = 0,21$ (da Einzelfeldnachweis mit Navierscher Lagerung)

Der Anteil für die Steifen $0,09 / (i / e)$ bei der Bestimmung von α_e entfällt hier, da es sich hier um den Einzelfeldnachweis handelt und im Übrigen keine Steifen in der betrachteten Beanspruchungsrichtung z vorhanden sind.

$$\chi_c = \frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{1,483 + \sqrt{1,483^2 - 1,316^2}} = 0,462$$

DIN EN 1993-1-1:2010
Gl. (6.49)

mit: $\varphi = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \alpha_e \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right)$ und $\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_c$

$$\varphi = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + 0,21 \cdot (1,316 - 0,2) + 1,316^2 \right) = 1,483$$

Interpolation zwischen den Abminderungsbeiwerten:

$$\rho_{c,z} = (\rho_z - \chi_c) \cdot \xi \cdot (2 - \xi) + \chi_c$$

$$\rho_{c,z} = (0,577 - 0,462) \cdot 0,489 \cdot (2 - 0,489) + 0,462 = 0,547$$

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (4.13)

Nachweis Einzelfeld 3:

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{\rho_{c,z}} \right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{Ed}}{\chi_w} \right)^2} \leq \frac{f_y}{\gamma_M}$$

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (10.5)

$$\sqrt{\left(\frac{13,6}{0,547} \right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{75}{0,631} \right)^2} \leq \frac{355}{1,1}$$

$$E_d / R_d = 207,4 / 322,7 = 0,643 < 1 \quad \text{Nachweis erfüllt}$$

Hinweis: Dieser Nachweis auf Grundlage der bisherigen Regelungen in DIN EN 1993-1-5:2010 liegt auf der unsicheren Seite, vgl. Erläuterungen in Abschnitt 3.2.8. Eine Anpassung zur Berücksichtigung von Zugspannungen wird in Abschnitt 4.2 vorgeschlagen.

Nachweisführung mit Berücksichtigung der Zugbeanspruchung

α -Faktoren:

$$\alpha_{ult} = f_y / \sigma_{V,Ed} = 355 / 265 = 1,340$$

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (10.3)

$\alpha_{cr,i}$ siehe Tab. 6, EBPlate 2.01 (mit Berücksichtigung von Zugbeanspruchungen)

Plattenschlankheit und Abminderungsbeiwerte:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\alpha_{ult} / \alpha_{cr}} = \sqrt{1,340 / 3,461} = 0,622$$

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (10.2)

$$\rho_x = 1$$

$$\rho_z = 1 \quad \text{da} \quad \bar{\lambda}_p = 0,622 < 0,8 = \bar{\lambda}_0$$

$$\text{mit: } \varphi = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \alpha_p \cdot (\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}_p \right)$$

$$\alpha_p = 0,34 \quad \text{und} \quad \bar{\lambda}_0 = 0,8$$

$$\chi_w = 1 \quad \text{für} \quad \bar{\lambda}_p < 0,83$$

knickstabähnliches Verhalten (Querbeanspruchung):

Der Interpolationsbeiwert ist mit der zuvor durchgeführten Berechnung identisch, allerdings ergibt sich aufgrund des abweichenden Schlankheitsgrades ein anderer Abminderungsbeiwert für das Stabknicken:

$$\chi_c = \frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,797 + \sqrt{0,797^2 - 0,622^2}} = 0,772$$

$$\text{mit: } \varphi = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \alpha_e \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right) \quad \text{und} \quad \bar{\lambda} = \bar{\lambda}_c$$

$$\varphi = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + 0,49 \cdot (0,622 - 0,2) + 0,622^2 \right) = 0,797$$

Interpolation zwischen den Abminderungsbeiwerten:

$$\rho_{c,z} = (\rho_z - \chi_c) \cdot \xi \cdot (2 - \xi) + \chi_c$$

$$\rho_{c,z} = (1 - 0,772) \cdot 0,489 \cdot (2 - 0,489) + 0,772 = 0,941$$

Nachweis Einzelfeld 3 nach Vorschlag Zizza

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\rho_{c,x}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{\rho_{c,z}} \right)^2} - V \cdot \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\rho_{c,x}} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{\rho_{c,z}} \right) + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{Ed}}{\chi_w} \right)^2 \leq \frac{f_y}{\gamma_M}$$

$$\text{mit: } V = \rho_{c,x} \cdot \rho_{c,z} \quad \text{für biaxialen Druck}$$

$$V = 1 / \left(\rho_{c,x} \cdot \rho_{c,z}^{2-\xi_z} \right) \quad \text{sonstige Fälle}$$

wegen Zug

DIN EN 1993-1-5:2010
Anhang B.1

DIN EN 1993-1-5:2010
Abschn. 5.3(1)

DIN EN 1993-1-1:2010
Gl. (6.49)

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (4.13)

Da für das knickstabähnliche Verhalten stets nur eine einaxiale Betrachtung erforderlich ist, kann der ξ -Wert unverändert übernommen werden.

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (10.5)

mit Ergänzung von V
nach (ZIZZA, A., 2016)

$$\sqrt{\left(\frac{-231}{1}\right)^2 + \left(\frac{13,6}{0,941}\right)^2 - 1,096 \cdot \left(\frac{-231}{1}\right) \cdot \left(\frac{13,6}{0,941}\right) + 3 \cdot \left(\frac{75}{1}\right)^2} \leq \frac{355}{1,1}$$

mit: $V = 1 / (1 \cdot 0,941^{2-0,489}) = 1,096$

$E_d / R_d = 272,2 / 322,7 = 0,844 < 1$ Nachweis erfüllt

2.8.2 Gesamtfeldnachweis

a) Querschnittswerte Steifen

Nachfolgend werden zunächst die Bruttoquerschnittswerte der Steifen berechnet.

Für die Felder 1 und 2 ergeben sich folgende ψ -Beiwerte und Abmessungen, vgl. Abschnitt 2.8.2 und Bild 25.

$$\psi_1 = 0,5 \text{ und } b_1 = 550 \text{ mm}$$

$$\psi_2 = 0,0 \text{ und } b_2 = 500 \text{ mm}$$

Breiten für die Ermittlung der Bruttoquerschnittsflächen:

$$b_{1,\text{inf}} = (3-0,5) / (5-0,5) \times 550 = 305,6 \text{ mm}$$

$$b_{2,\text{sup}} = 2 \times 550 / (5-0,0) = 220 \text{ mm}$$

Für die 2. Steife (in Nulllinienlage) wird die mitwirkende Breite auf der Zugseite näherungsweise ebenfalls $b_{2,\text{sup}}$ angesetzt.

mitwirkende Breite für Bruttoquerschnittswerte:

$$b_{\text{sl}1} = 305,6 + 10 + 220 = 535,6 = \text{ca. } 536 \text{ mm}$$

$$b_{\text{sl}2} = 220 + 10 + 220 = \text{ca. } 450 \text{ mm}$$

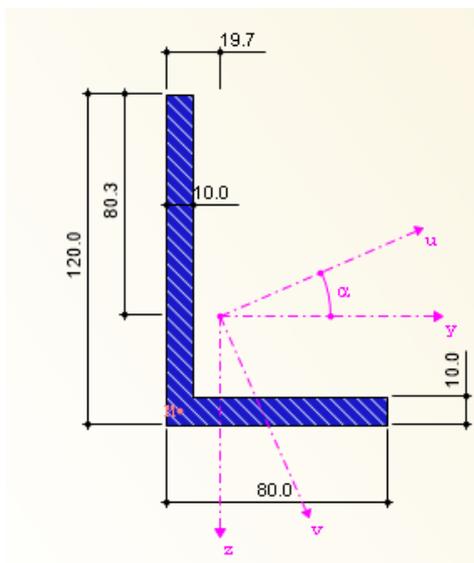


Bild 34: Schwerpunktlage der Steife ohne mitwirkendes Blech [RSTAB 8.04]

DIN EN 1993-1-5:2010
Anhang A, Bild A.1

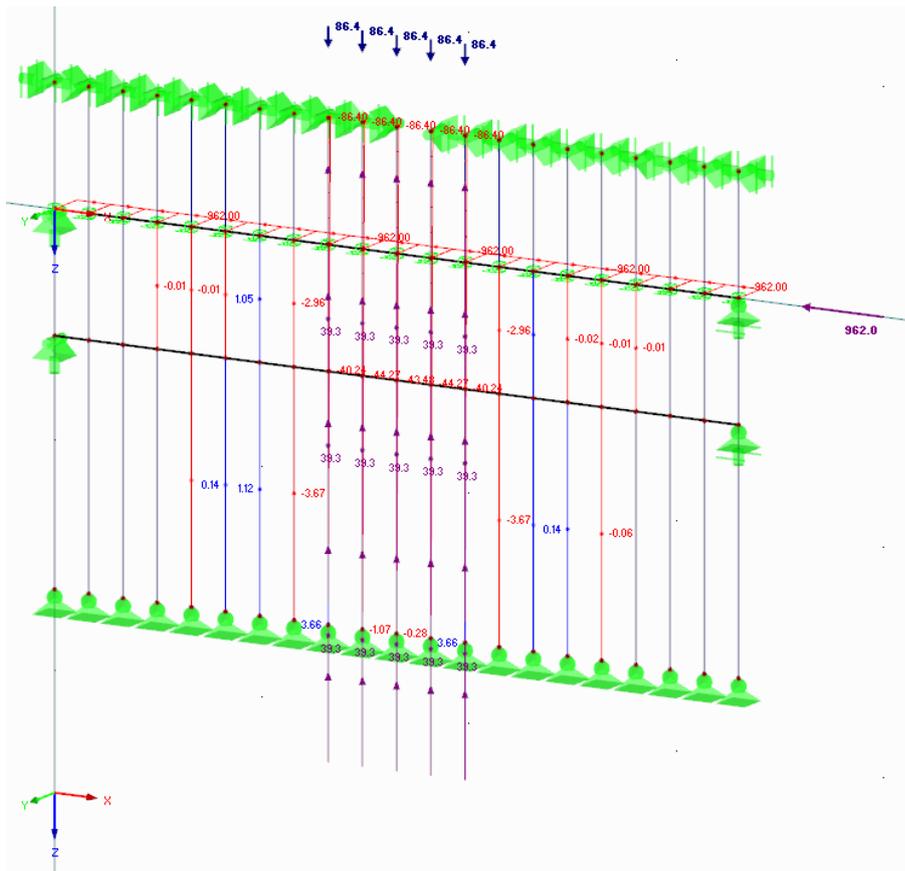


Bild 37: Stabwerksmodell für Gesamtfeldnachweis [RSTAB 8.04]

Analog zu DIN EN 1993-1-5:2010 Anhang A.2 wird die elastische Bettung der knickgefährdeten Steife (Gesamtfeldbeulen) durch die benachbarten Blechfelder 1 und 2 (jeweils 55 cm, vgl. Bild 25) erfasst:

$$c_{w,sl1} = \frac{48 \cdot E \cdot t^3}{10,92 \cdot \ell^3} = \frac{48 \cdot 21000 \cdot 1,2^3}{10,92 \cdot (55 + 55)^3} = 0,1198 \frac{kN}{cm^2} = 1198 \frac{kN}{m^2}$$

Das bis hierher beschriebene Stabwerksmodell liefert im Prinzip dieselben Ergebnisse wie das Ersatzmodell gemäß DIN EN 1993-1-5:2010 Anhang A.2, wobei dort jedoch die sogenannten Zwischenmaxima der Verzweigungswerte bei stärkeren Bettungen durch eine Grenzkurve auf der sicheren liegend angenähert werden.

Für das hier untersuchte Gesamtfeldbeulen ist darüber hinaus auch der Einfluss der Querbeanspruchung zu berücksichtigen. Dazu werden in vertikaler Richtung Fachwerkstäbe im Abstand von $\Delta L = 3300/20 = 165 \text{ mm}$ angeordnet. Diese Fachwerkstäbe erhalten große Steifigkeiten, damit sie nicht knicken bzw. das Einzelfeldbeulen simulieren. Durch ihre Fachwerkeigenschaft (Gelenke) wird die Bettung infolge der anschließenden Blechfelder auch nicht doppelt berücksichtigt. Die Fachwerkstäbe erzeugen für den stabilisierenden Stab (obere Steife) in einem ausgelenkten Verformungszustand durch ihre Kopplung und der damit einhergehenden Schiefstellung aufgrund ihrer eigenen Druckbeanspruchung (Querdruck) Abtriebskräfte. In Höhe der oberen Steife liegt näherungsweise eine Querdruckspannung von $3,34 \text{ kN/cm}^2$ auf einer Länge von 808 mm an, vgl. Bild 26.

Zur Modellierung der Abtriebskräfte wird die Querdruckbeanspruchung deshalb auf 5 Knoten ($L = 5 \times 165 = 825 \text{ mm} = \text{ca. } 808 \text{ mm}$) aufgebracht. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass es für diesen speziellen Fall auch ausreichend gewesen wäre, nur diese 5 vertikalen Fachwerkstabzüge abzubilden, da die übrigen i. W. lastfrei bleiben. Die resultierende Querdruckkraft (vgl. Einzelfeldnachweis 1 in Abschnitt 2.8.1) am oberen Rand beträgt je Knoten:

$$N_z \cong 432 / 5 = 86,4 \text{ kN}$$

Hieraus ergibt sich unter Annahme einer linearen Verteilung über die Steghöhe und der Randbedingung (am unteren Rand ist die $N_z = 0 \text{ kN}$) folgende Gleichstreckennormalkraft in den 5 mittleren Fachwerk-Stubzügen:

$$n_z \cong 432 / 5 / 2,200 = 39,27 \text{ kN/m}$$

Diese Lasten und die sie erzeugenden Normalkräfte sind ebenfalls in Bild 37 abgebildet.

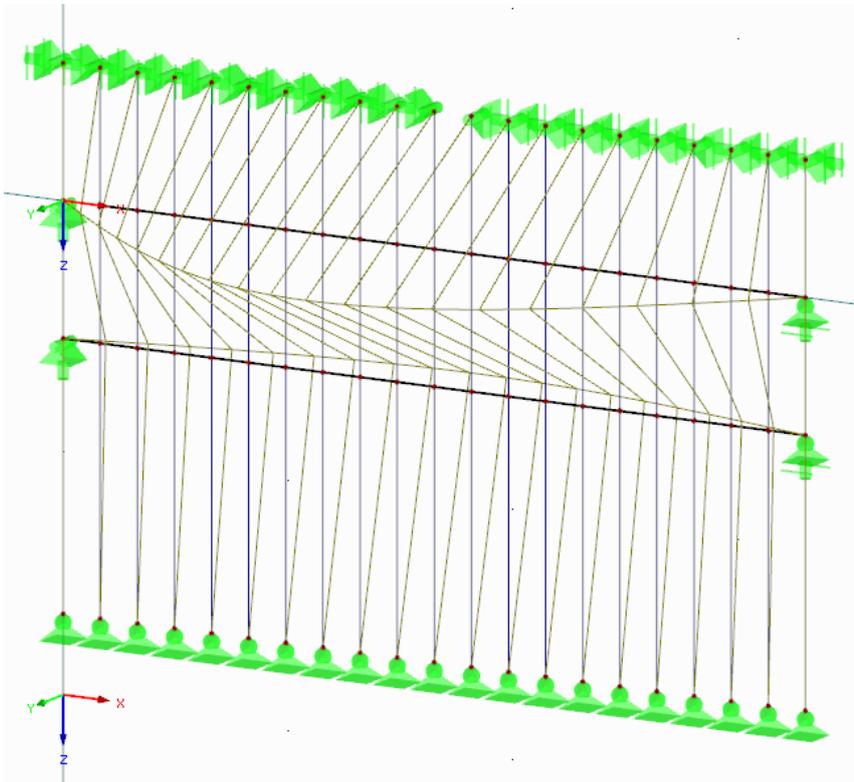


Bild 38: Eigenform für $\alpha_{cr,c,xz} = 1,348$ ohne Bettung (mit Bettung: $\alpha_{cr,p,xz} = 1,949$) [RSTAB 8.04]

Das Bild 38 zeigt die Verzweigungsfigur des Stabmodells ohne Berücksichtigung der elastischen Bettung, also im Prinzip den zum Stabknicken korrespondierenden Verzweigungsfaktor. Da i.Allg. zu beachten ist, dass der Verhältniswert ξ zur Berücksichtigung des knickstabähnlichen Verhaltens an möglichst ähnlichen Modellen zu ermitteln ist, kann auf die Ermittlung des Plattenbeulwertes mittels EBPlate 2.01 eigentlich verzichtet werden.

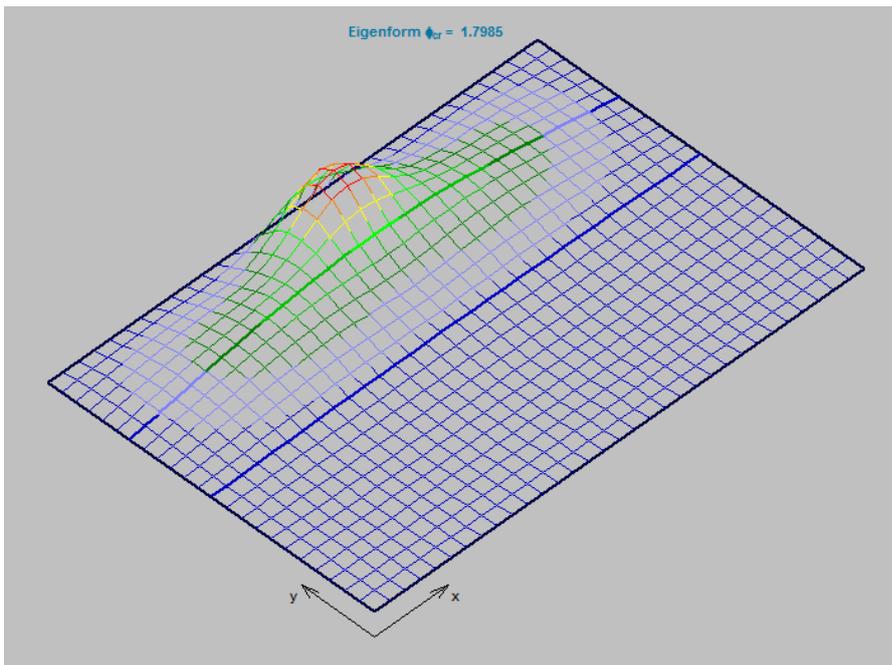


Bild 39: 1. Eigenform mit EBPlate unter Längs- u. Querdruck ($\alpha_{cr,c,xz} = 1,7985$) [EBPlate 2.01]

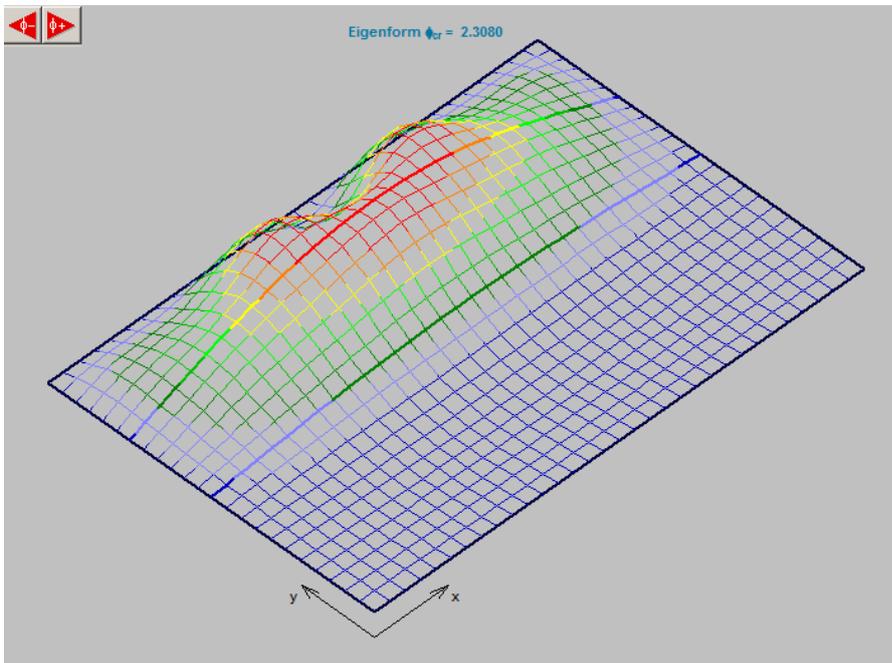


Bild 40: 3. Eigenform mit EBPlate unter Längs- u. Querdruck ($\alpha_{cr,c,xz} = 2,3080$) [EBPlate 2.01]

Aus Vergleichsgründen zeigen Bild 39 die 1. Eigenform und Bild 40 die 3. Eigenform, die sich mit EBPlate 2.01 ergeben.

Beide Bilder machen deutlich, dass es im Einzelfall schwierig sein kann, eine Eigenform einer bestimmten Versagensform (hier Gesamtfeld) eindeutig und zweifelfrei zuzuordnen.

Für die weitere Nachweisführung wird deshalb die Verzweigungsberechnung [RSTAB 8.04] mittels des Stabwerks unter Ansatz der zuvor bestimmten Bettung wiederholt und zu $\alpha_{cr,p,xz} = 1,949$ bestimmt, vgl. Bild 38. Für den Interpolationsbeiwert zur Berücksichtigung des knickstabähnlichen Verhaltens folgt somit:

$$\xi = \frac{\alpha_{cr,p,xz}}{\alpha_{cr,e,xz}} - 1 = \frac{1,949}{1,348} - 1 = 0,446$$

Eine getrennte Betrachtung beider Komponenten wäre zwar prinzipiell auch mit dem Stabwerksmodell ohne weiteres möglich, allerdings macht dies bei dem gewählten Modell keinen Sinn, da das aussteifende Element (Steife 1) einschl. der Abtriebskräfte infolge Querdruk letztlich nach Theorie II. Ordnung nachgewiesen werden muss.

Mit Hilfe von Bild 55, vgl. auch Erläuterungen in Abschnitt 3.2.7, wird über den Beiwert α_e der Stich der Vorkrümmung für knickstabähnliches Versagen ermittelt. Dazu muss zunächst der Beiwert α berechnet werden:

$$i = \sqrt{\frac{I_{st1}}{A_{st1}}} = \sqrt{\frac{1377,5 \cdot 10^4}{8330}} = 40,7 \text{ mm}$$

$$e = \text{MAX} (e_1 = 80,3 + 12 - 25,7 = 66,6 \text{ mm}; e_2 = 25,7 - 12 / 2 = 19,7 \text{ mm}) e = 66,6 \text{ mm}$$

$$\alpha = 0,49 \quad (\text{für offene Steifenquerschnitte gilt KSL c})$$

$$\alpha_e = \alpha + \frac{0,09}{i/e} = 0,49 + \frac{0,09}{40,7/66,6} = 0,637$$

Der Stich der Vorverformung bestimmt sich gemäß Bild 55 damit zu:

$$d_c = 705 \cdot \alpha_e^2 - 1250 \cdot \alpha_e + 690 = 705 \cdot 0,637^2 - 1250 \cdot 0,637 + 690 = 180$$

$$w_{0c} = \frac{a}{d_c} = \frac{3300}{180} = 18,3 \text{ mm}$$

Für plattenartiges Versagen beträgt der Stich der Vorverformung gemäß DIN EN 1993-1-5:2010 Anhang C, Tab. C.2 und Bild C.1:

$$w_{0p} = \frac{\text{MIN}(a; b)}{400} = \frac{\text{MIN}(3300; 2200)}{400} = 5,5 \text{ mm}$$

Zwischen den Stichwerten der Vorverformung für knickstabähnliches und plattenartiges Verhalten wird mit Hilfe des Interpolationsbeiwert ξ linear interpoliert:

$$w_{0pc} = w_{0c} - (w_{0c} - w_{0p}) \cdot \xi = 18,3 + (18,3 - 5,5) \cdot 0,446 = 12,6 \text{ mm}$$

Dies entspricht einem Wert von $a / 262$, womit eine Berechnung des Stabwerks nach Theorie II. Ordnung durchgeführt wird.

vgl. Bild 34 und Bild 35
DIN EN 1993-1-5:2010
Anhang A, Bild A.1

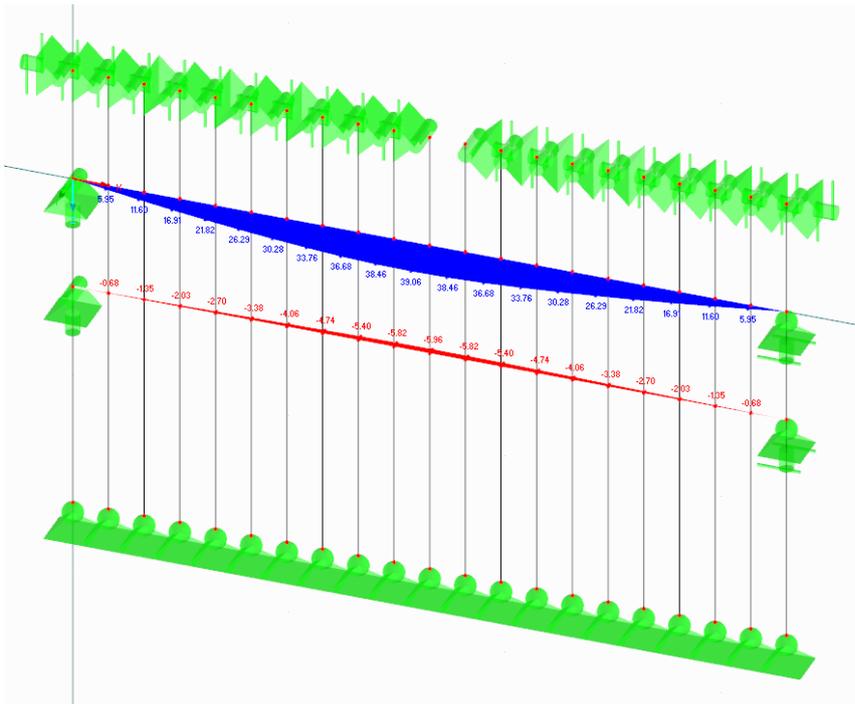


Bild 41: Biegemoment nach Theorie II. Ordnung: $M_{sl1} = 39,06 \text{ kNm}$ [RSTAB 8.04]

$$\text{res. } \sigma_x = \frac{N_{sl1}}{A_{sl1}} + \frac{M_{sl1}''}{W_{sl1,u}} = \frac{0,962}{0,00833} + \frac{0,03472}{0,00012959} = 115,5 + 301,4 \left[\frac{\text{MN}}{\text{m}^2} \right]$$

mit: $W_{sl1,u} = 1377,5 / (13,2 - 2,57) = 129,59 \text{ cm}^3$

$$\text{res. } \sigma_x = 416,9 > 322,7 \text{ MN/m}^2 = f_{yd} \quad (+29,2\% \text{ Überschreitung})$$

Der Nachweis ist aufgrund der deutlichen Überschreitung nicht erfüllt. Gleiches gilt auch für die Verformung, welche in Anlehnung an DIN EN 1993-1-5:2010 Abschnitt 9.2.1(4) auf $a/300$ begrenzt werden sollte:

$$\text{vorh. } w = 14,6 > 11,0 = a/300 \text{ [mm]} \quad (+32,7\% \text{ Überschreitung})$$

Als Maßnahme wäre in diesem Fall die Steife (nicht das Stegblech) zu verstärken und der Nachweis entsprechend neu zu führen.

Im Hinblick auf die angesetzten Imperfektionen wird auf die Erläuterungen in Abschnitt 3.2.7 verwiesen.

Es wird ferner darauf hingewiesen, dass hier aufgrund der Schubbeanspruchung eigentlich gegen die infolge Schub reduzierte Streckgrenze nachgewiesen werden müsste, auf die im folgenden Unterabschnitt c) näher eingegangen wird.

vgl. Bild 35

Nachweis **nicht** erfüllt

Verformungskriterium **nicht** eingehalten

c) Schub

Nachfolgend wird untersucht, inwieweit sich die Schubbeanspruchung auf den Gesamtfeldnachweis auswirkt. Dazu zeigt Bild 42 den mit EBPlate 2.01 berechneten kleinsten Eigenwert bzw. -form für reine Schubbeanspruchung ohne Berücksichtigung der Abminderung der Steifen-Steifigkeit gemäß DIN EN 1993-1-5:2010 Abschnitt 5.3(4), aufgrund von Anmerkung 1 in DIN EN 1993-1-5:2010 Abschnitt 10(3)..

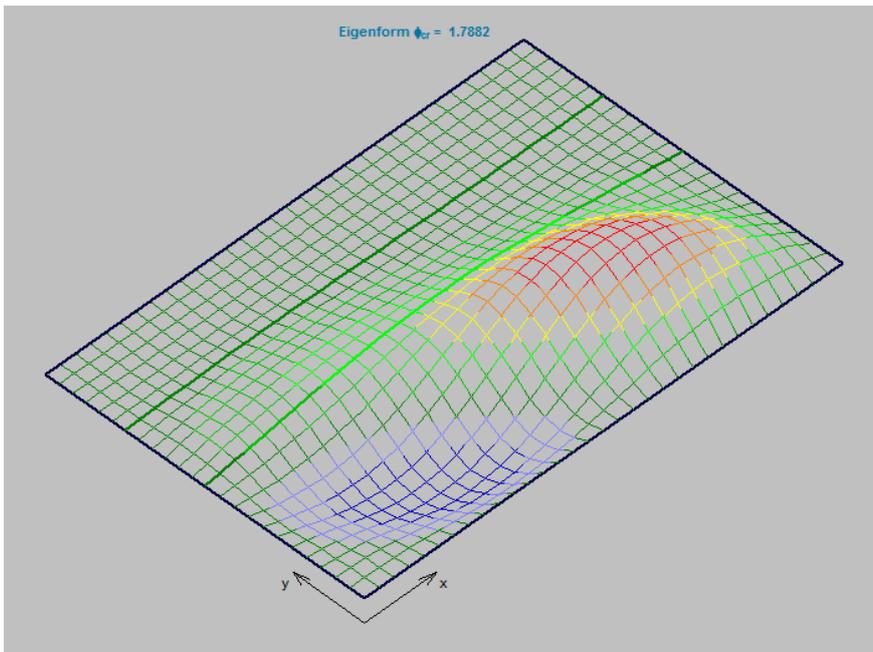


Bild 42: Gesamtfeld: $\alpha_{cr,z} = 1,7882$ bei alleiniger Wirkung von τ_{Ed} [EBPlate 2.01]

Analog zu der Beschreibung in Abschnitt 3.2.7 erfolgt die Berücksichtigung der Schubbeanspruchung näherungsweise durch eine Reduktion der Streckgrenze infolge Schub. Die Spannungen infolge der Berechnung der Stabwerksschnittgrößen nach Theorie II. Ordnung, siehe b), dürfen nicht größer sein als die reduzierte Streckgrenze.

$$\text{res. } \sigma_{sl} = \sigma_{sl} + M_{sl}^{Th.II.O.} / W_{sl} \leq \text{red. } f_y$$

$$\text{mit: } \text{red. } f_y = \sqrt{f_y^2 - 3 \cdot (\tau_{Ed} / \chi_w)^2}$$

Zur Ermittlung des Einfluss der Schubbeanspruchung wird der Abminderungsbeiwert bzw. als Eingangswert dafür der bezogene Gesamtschlankheitsgrad benötigt.

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\alpha_{ult} / \alpha_{cr}}$$

Der Faktor α_{ult} wird mithilfe des Fließkriteriums und der Vergleichsspannung am oberen Rand (Quer- und Längsdruck) des Gesamtfeldes bestimmt:

$$\alpha_{ult} = f_y / \sigma_{v,Ed} = 355 / 238,6 = 1,488$$

$$\text{mit: } \sigma_{v,Ed} = \sqrt{231^2 + 109^2 - 231 \cdot 109 + 3 \cdot 75^2} = 238,6 \text{ MN} / \text{m}^2$$

Der resultierende Verzweigungsfaktor α_{cr} ergibt sich unter Verwendung des Verzweigungsfaktors für Längs- und Querbeanspruchung am Stabwerksmodell und Berücksichtigung der elastischen Bettung (plattenartiges Verhalten) gemäß Bild 38 zu

vgl. Abschnitt 3.2.7

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (10.2)

DIN EN 1993-1-5:2010
Gl. (10.3)

$$\alpha_{cr,p,xz} = 1,949$$

Der Verzweigungsfaktor für beträgt gemäß Bild 42:

$$\alpha_{cr,\tau} = 1,788$$

Da in $\alpha_{cr,p,xz}$ beide Richtungen x und z mit unterschiedlichen Verläufen enthalten sind, wird die Gleichung (10.6) aus DIN EN 1993-1-5:2010 näherungsweise zur Ermittlung eines resultierenden Verzweigungsfaktor mit $\psi_{xz} = 1$ verwendet:

$$\frac{1}{\alpha_{cr}} \cong \frac{1 + \psi_{xz}}{4\alpha_{cr,xz}} + \left[\left(\frac{1 + \psi_{xz}}{4\alpha_{cr,xz}} \right)^2 + \frac{1 - \psi_{xz}}{2\alpha_{cr,xz}^2} + \frac{1}{\alpha_{cr,\tau}^2} \right]^{1/2}$$

$$\frac{1}{\alpha_{cr}} \cong \frac{1 + 1}{4 \cdot 1,949} + \left[\left(\frac{1 + 1}{4 \cdot 1,949} \right)^2 + 0 + \frac{1}{1,788^2} \right]^{1/2} = 0,871857$$

$$\alpha_{cr} = 1,147$$

Damit kann der bezogene Gesamtschlankheitsgrad und der Abminderungsbeiwert für Schub bestimmt werden.

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\alpha_{ult} / \alpha_{cr}} = \sqrt{1,488 / 1,147} = 1,139$$

$$\chi_w = 0,83 / \bar{\lambda}_p \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \geq 0,83$$

$$\chi_w = 0,83 / 1,139 = 0,729$$

Die reduzierte Streckgrenze ergibt sich wie folgt:

$$red. f_y = \sqrt{f_y^2 - 3 \cdot (\tau_{Ed} / \chi_w)^2}$$

$$red. f_y = \sqrt{355^2 - 3 \cdot (75 / 0,729)^2} = 307,0 \text{ MN} / \text{m}^2$$

Die Abminderung infolge Schub beträgt somit ca. 13,5% und wurde bei der Nachweisführung unter b) zunächst vernachlässigt, da der Nachweis dort bereits überschritten war.

in Anlehnung an DIN EN 1993-1-5:2010 Gl. (10.6)

DIN EN 1993-1-5:2010
Abschn. 5.3(1)
verformbare Auflagersteifen

2.9 Beispiel 3: Vollwandträgersteg mit örtlicher Lasteinleitung (Methode der wirksamen Breiten)

2.9.1 Einleitung

Bild 25 zeigt das Beispiel 3 eines Vollwandträgersteges mit örtlicher Lasteinleitung am oberen Rand. In der Mitte sowie im oberen Viertelpunkt ist jeweils ein längslaufendes Winkelprofil als Aussteifung angeordnet. Die Konstruktion besteht aus S 355.

Querschnittswerte des Bruttoquerschnitts mit Flansch (oben und unten (400X20)):

$$I_{y,g} = 30362133333 [\text{mm}^4]$$

Querschnittswerte des Bruttoquerschnitts ohne Flansch (hier wurde die steifen vernachlässigt):

$$A = 2200 \cdot 12 = 26400 [\text{mm}^2] = 264 [\text{cm}^2]$$

$$I_y = 1064800 [\text{cm}^4]$$

Aus der Vergleich Z_s und einwirkende Normalspannung kann man erkennen, dass keine Normalkraft im Querschnitt liegt.

$$M_{Ed} = M_y = \frac{\sigma \cdot I_{y,g}}{z} = \frac{235,2 \cdot 30362133333}{1100 + 20} \cdot 10^{-6} = 6376,0 [\text{kNm}]$$

$$V_{Ed} = V_z = \tau \cdot A = 75 \cdot 26400 \cdot 10^{-3} = 1980,0 [\text{kN}]$$

$$F_{Ed} = 109 \cdot 330 \cdot 12 = 432 [\text{kN}]$$

2.9.2 Querschnittstragfähigkeit bei Längsspannungen

Berechnung der mittragenden und Wirksamen Breiten

Lokales Beulen Stegblech Einzelfeld 1:

$$\sigma_{11} = 231 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$$

$$\sigma_{12} = 115,5 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$$

$$\bar{b}_1 = b_{11} - \frac{t_{st,w}}{2} = 550 - \frac{10}{2} = 545 [\text{mm}]$$

$$\psi_1 = \frac{\sigma_{12}}{\sigma_{11}} = \frac{231}{115,5} = 0,5$$

$$k_{\sigma 1} = \frac{8,2}{1,05 + \psi_1} = \frac{8,2}{1,05 + 0,5} = 5,29$$

$$\bar{\lambda}_{p1} = \frac{\bar{b}_1/t_w}{28,4 \cdot \epsilon \cdot \sqrt{k_{\sigma 1}}} = \frac{545/12}{28,4 \cdot 0,81 \cdot \sqrt{5,29}} = 0,86$$

$$\geq 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 \cdot \psi_1} = 0,74$$

$$\rho_1 = \frac{\bar{\lambda}_{p1} - 0,055 \cdot (3 + \psi_1)}{\bar{\lambda}_{p1}^2}$$

$$= \frac{0,86 - 0,055 \cdot (3 + 0,5)}{0,86^2} = 0,90 \leq 1,0$$

DIN EN 1993-1-5, 4.4,
Tab. 4.1

DIN EN 1993-1-5, 4.4(2)

DIN EN 1993-1-5, 4.4(2),
Gl. (4.2)

Breite Bruttoquerschnittsfläche

$$b_{1,edge} = \frac{2}{5 - \psi_1} \cdot \bar{b}_1 = \frac{2}{5 - 0,5} \cdot 545 = 242,2 \text{ [mm]}$$

$$b_{1,inf} = \frac{3 - \psi_1}{5 - \psi_1} \cdot \bar{b}_1 = \frac{3 - 0,5}{5 - 0,5} \cdot 545 = 302,8 \text{ [mm]}$$

Wirksame Breiten

$$b_{1,eff} = \rho_1 \cdot \bar{b}_1 = 0,90 \cdot 545 = 490,5 \text{ [mm]}$$

$$b_{1,edge,eff} = \frac{2}{5 - \psi_1} \cdot b_{1,eff} = \frac{2}{5 - 0,5} \cdot 490,5 = 218,28 \text{ [mm]}$$

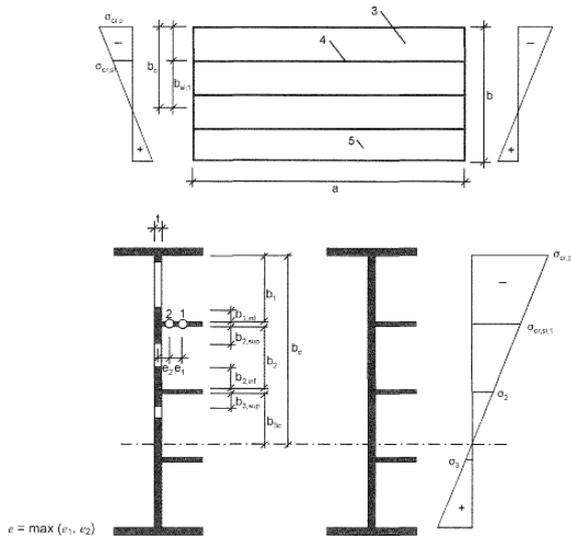
$$b_{1,inf,eff} = \frac{3 - \psi_1}{5 - \psi_1} \cdot b_{1,eff} = \frac{3 - 0,5}{5 - 0,5} \cdot 490,5 = 275,35 \text{ [mm]}$$

$$X_{1,eff} = \bar{b}_1 - b_{1,eff} = 545 - 490,5 = 54,5 \text{ [mm]}$$

Lokales Beulen Stegblech Einzelfeld 2

$$\sigma_{21} = 115,5 \left[\frac{N}{mm^2} \right] = \sigma_{12}$$

$$\sigma_{22} = 0 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$



- Legende**
 1 Schwerlinie der Längssteife
 2 Schwerlinie des Ersatzdruckstabes = Längssteife + mitwirkende Blechteile
 3 Einzelfeld
 4 Längssteife
 5 Blechdicke *t*

	Breite bei Bruttoquerschnittsfläche	Breite bei wirksamen Flächen nach Tabelle 4.1	Bedingung für ψ_i
$b_{1,inf}$	$\frac{3 - \psi_1}{5 - \psi_1} \cdot b_1$	$\frac{3 - \psi_1}{5 - \psi_1} \cdot b_{1,eff}$	$\psi_1 = \frac{\sigma_{cr,sl,1}}{\sigma_{cr,p}} > 0$
$b_{2,sup}$	$\frac{2}{5 - \psi_2} \cdot b_2$	$\frac{2}{5 - \psi_2} \cdot b_{2,eff}$	$\psi_2 = \frac{\sigma_2}{\sigma_{cr,sl,1}} > 0$
$b_{2,inf}$	$\frac{3 - \psi_2}{5 - \psi_2} \cdot b_2$	$\frac{3 - \psi_2}{5 - \psi_2} \cdot b_{2,eff}$	$\psi_2 > 0$
$b_{3,sup}$	$0,4 \cdot b_{3c}$	$0,4 \cdot b_{3c,eff}$	$\psi_3 = \frac{\sigma_3}{\sigma_2} < 0$

Bild 43: Bezeichnungen gemäß Bild A.1 aus DIN EN 1993-1-5:2010

DIN EN 1993-1-5, A.1, Bild A.1

DIN EN 1993-1-5, 4.4, Tab 4.1

$$\bar{b}_2 = 50 - t_{sl} = 50 - 0,6 = 494 \text{ [mm]}$$

$$\psi_2 = \frac{\sigma_{22}}{\sigma_{21}} = 0$$

$$k_{\sigma 2} = \frac{8,2}{1,05 + \psi_2} = \frac{8,2}{1,05 + 0} = 7,81$$

$$\bar{\lambda}_{p2} = \frac{\bar{b}_2/t_w}{28,4 \cdot \epsilon \cdot \sqrt{k_{\sigma 2}}} = \frac{545/12}{28,4 \cdot 0,81 \cdot \sqrt{7,81}} = 0,71$$

$$< 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,05 \cdot \psi_2} = 0,76$$

$$\rho_2 = 1$$

Breite Bruttoquerschnittsfläche

$$b_{2,sup} = \frac{2}{5 - \psi_2} \cdot \bar{b}_2 = \frac{2}{5 - 0} \cdot 545 = 218 \text{ [mm]}$$

$$b_{2,inf} = \frac{3 - \psi_1}{5 - \psi_2} \cdot \bar{b}_2 = \frac{3 - 0,5}{5 - 0} \cdot 545 = 330 \text{ [mm]}$$

Wirksame Breiten

$$b_{2,eff} = \rho_2 \cdot \bar{b}_2 = 1 \cdot 545 = 545 \text{ [mm]}$$

$$b_{2,sup,eff} = \frac{2}{5 - \psi_2} \cdot b_{2,eff} = \frac{2}{5 - 0} \cdot 545 = 218 \text{ [mm]}$$

$$b_{2,inf,eff} = \frac{3 - \psi_2}{5 - \psi_2} \cdot b_{2,eff} = \frac{3 - 0}{5 - 0} \cdot 545 = 327 \text{ [mm]}$$

$$X_{2,eff} = \bar{b}_2 - b_{2,eff} = 545 - 545 = 0 \text{ [mm]}$$

Überprüfung der Querschnittsklasse der Längssteife L 120x80x10 mm

$$A_{steife} = 1910 \text{ [mm}^2\text{]}, I_{steife} = 2760000 \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$b_{sl} = 120 \text{ [mm]}, e_y = 39,2 \text{ [mm]}$$

$$h_{sl} = 80 \text{ [mm]}, t_{sl} = 10 \text{ [mm]}$$

$$\frac{b_{sl}}{t_{sl}} = \frac{120}{10} = 12 \leq 33 \cdot \epsilon = 33$$

$$\frac{h_{sl}}{t_{sl}} = \frac{80}{10} = 8 \leq 10 \cdot \epsilon = 10 \cdot 0,81 = 8,1$$

→ Querschnittsklasse 1 (Querschnitt ist voll wirksam)

DIN EN 1993-1-5, 4.4,
Tab. 4.1

DIN EN 1993-1-5, 4.4(2)

DIN EN 1993-1-5, A.1,
Bild A.1

DIN EN 1993-1-5, 4.4,
Tab. 4.1

Ermittlung der kritischen Plattenbeulspannung $\sigma_{cr,p}$

Liegen 2 Steifen in der Druckzone, werden 3 Versagensfälle untersucht, vgl. Bild 8 bis Bild 11.

- 1) Ausknicken der oberen Längssteife
- 2) Ausknicken der unteren Längssteife
- 3) Ausknicken einer zusammengeführten Ersatzsteife

DIN EN 1993-1-5, Anhang A.2

Querschnittswerte der Längsaussteifungen

1) Querschnittswerte der oberen Längsaussteifung

$$A_{sl,I} = (b_{1,inf} + b_{2,sup} + t_{sl}) \cdot t_w + A_{steife} = (302,8 + 218 + 10) \cdot 12 + 1910 = 8279,6 [mm^2]$$

$$e_{sl} = b_{sl} - e_y + \frac{t_w}{2} = 120 - 39,2 + \frac{12}{2} = 86,8 [mm]$$

$$x_{sl,I} = \frac{A_{steife} \cdot e_{sl}}{A_{sl,I}} = \frac{1910 \cdot 86,8}{8279,6} = 19,98 [mm]$$

$$I_{sl,I} = I_{steife} + \frac{(b_{1,inf} + b_{2,sup} + t_{sl}) \cdot t_w \cdot A_{steife}}{A_{sl,I}} \cdot e_{sl}^2 = 2760000 + \frac{6369,6 \cdot 1910}{8279,6} \cdot 86,8^2 = 13830713,8 [mm^4]$$

2) Querschnittswerte der unteren Längsaussteifung

$$A_{sl,II} = (b_{2,inf} + b_{3,sup} + t_{sl}) \cdot t_w + A_{steife} = (327 + 0 + 10) \cdot 12 + 1910 = 5954 [mm^2]$$

$$e_{sl} = b_{sl} - e_y + \frac{t_w}{2} = 120 - 39,2 + \frac{12}{2} = 86,8 [mm]$$

$$x_{sl,II} = \frac{A_{steife} \cdot e_{sl}}{A_{sl,II}} = \frac{1910 \cdot 86,8}{5954} = 27,78 [mm]$$

$$I_{sl,II} = I_{steife} + \frac{(b_{2,inf} + b_{3,sup} + t_{sl}) \cdot t_w \cdot A_{steife}}{A_{sl,II}} \cdot e_{sl}^2 = 2760000 + \frac{4044 \cdot 1910}{5954} \cdot 86,8^2 = 12530781 [mm^4]$$

3) Querschnittswerte der zusammengeführten Ersatzsteife

$$A_{sl,zus} = A_{sl,I} + A_{sl,II} = 8279,6 + 5954 = 14233,6 [mm^2]$$

$$I_{sl,zus} = I_{sl,I} + I_{sl,II} = 13830713,8 + 12530781 = 26361494,8 [mm^4]$$

$$F_{sl,I} = A_{sl,I} \cdot \sigma_{sl,I} = 8279,6 \cdot (-115,5) = -956293,8 [N]$$

$$F_{sl,II} = A_{sl,II} \cdot \sigma_{sl,II} = 5954 \cdot 0 = 0 [N]$$

$$h_{w,zus} = \frac{F_{sl,II}}{F_{sl,I} + F_{sl,II}} \cdot (h_{w2} - h_{w1}) + h_{w1}$$

$$= 0 + 550 = 550 [mm]$$

kritische Plattenbeulspannung $\sigma_{cr,p}$

Fall 1: Beulen der oberen Längsaussteifung

DIN EN 1993-1-5, A.2.2
(1)

$$b_{l,1}^* = h_{w1} = 550 [mm]$$

$$b_{l,2}^* = h_{w2} - h_{w1} = 550 [mm]$$

$$B_l^* = b_{l,1}^* + b_{l,2}^* = 1100 [mm]$$

$$a_{c,l} = 4,33 \cdot \sqrt[4]{\frac{I_{sl,I} \cdot b_{l,1}^{*2} \cdot b_{l,2}^{*2}}{t_w^3 \cdot B_l^*}}$$

$$= 4,33 \cdot \sqrt[4]{\frac{13830713,8 \cdot 550^2 \cdot 550^2}{12^3 \cdot 1100}}$$

$$= 3911 [mm] \geq a = 3300 [mm]$$

$$\sigma_{cr,sl,I} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl,I}}{A_{sl,I} \cdot a^2} + \frac{E \cdot t_w^3 \cdot B_l^* \cdot a^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot (1 - \nu^2) \cdot A_{sl,I} \cdot b_{l,1}^{*2} \cdot b_{l,2}^{*2}}$$

$$= \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 13830713,8}{8279,6 \cdot 3300^2} + \frac{210000 \cdot 12^3 \cdot 1100 \cdot 3300^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot (1 - 0,3^2) \cdot 8279,6 \cdot 550^2 \cdot 550^2}$$

$$= 477,6 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

$$\sigma_{cr,p,I} = \frac{h_s}{h_s - h_{w,1}} \cdot \sigma_{cr,sl,I} = \frac{1100}{1100 - 550} \cdot 477,6 = 955,3 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

Fall 2: Beulen der unteren Längsaussteifung

$$b_{II,1}^* = 550 \text{ [mm]}$$

$$b_{II,2}^* = 1100 \text{ [mm]}$$

$$B_{II}^* = b_{II,1}^* + b_{II,2}^* = 1650 \text{ [mm]}$$

$$\begin{aligned} a_{c,II} &= 4,33 \cdot \sqrt[4]{\frac{I_{sl,II} \cdot b_{II,1}^{*2} \cdot b_{II,2}^{*2}}{t_w^3 \cdot B_{II}^*}} \\ &= 4,33 \cdot \sqrt[4]{\frac{12530781 \cdot 550^2 \cdot 1100^2}{12^3 \cdot 1650}} \\ &= 4876 \text{ [mm]} \geq a = 3300 \text{ [mm]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{cr,sl,I} &= \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl,II}}{A_{sl,II} \cdot a^2} + \frac{E \cdot t_w^3 \cdot B_{II}^* \cdot a^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot (1 - \nu^2) \cdot A_{sl,II} \cdot b_{II,1}^{*2} \cdot b_{II,2}^{*2}} \\ &= \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 12530781}{5954 \cdot 3300^2} + \frac{210000 \cdot 12^3 \cdot 1650 \cdot 3300^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot (1 - 0,3^2) \cdot 5954 \cdot 550^2 \cdot 1100^2} \\ &= 483,84 \left[\frac{N}{mm^2} \right] \end{aligned}$$

$$\sigma_{cr,p,II} = \frac{h_s}{h_s - h_{w,2}} \cdot \sigma_{cr,sl,II} = \frac{1100}{1100 - 1100} \cdot 483,84 = \text{unendlich} \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

Fall 3: Beulen der zusammengeführten Ersatzsteife

$$b_{zus,1}^* = 550 \text{ [mm]}$$

$$b_{zus,2}^* = h_w - h_{w,zus} = 1650 \text{ [mm]}$$

$$B_{zus}^* = h_w = 2200 \text{ [mm]}$$

$$\begin{aligned} a_{c,zus} &= 4,33 \cdot \sqrt[4]{\frac{I_{sl,zus} \cdot b_{zus,1}^{*2} \cdot b_{zus,2}^{*2}}{t_w^3 \cdot B_{zus}^*}} \\ &= 4,33 \cdot \sqrt[4]{\frac{26361494,8 \cdot 550^2 \cdot 1650^2}{12^3 \cdot 2200}} \\ &= 6693,6 \text{ [mm]} \geq a = 3000 \text{ [mm]} \end{aligned}$$

DIN EN 1993-1-5, A.2.2
(1)DIN EN 1993-1-5, A.2.2
(1)

$$\begin{aligned}\sigma_{cr,sl,zus} &= \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl,zus}}{A_{sl,zus} \cdot a^2} + \frac{E \cdot t_w^3 \cdot B_{zus}^* \cdot a^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot (1 - \nu^2) \cdot A_{sl,zus} \cdot b_{zus,1}^{*2} \cdot b_{zus,2}^{*2}} \\ &= \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 26361494,8}{14233,6 \cdot 3300^2} + \frac{210000 \cdot 12^3 \cdot 2200 \cdot 3300^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot (1 - 0,3^2) \cdot 14233,6 \cdot 1650^2 \cdot 550^2} \\ &= 354,6 \left[\frac{N}{mm^2} \right] \\ \sigma_{cr,p,zus} &= \frac{h_s}{h_s - h_{w,zus}} \cdot \sigma_{cr,sl,zus} = \frac{1100}{1100 - 550} \cdot 354,6 = 709,2 \left[\frac{N}{mm^2} \right]\end{aligned}$$

Kritische Plattenbeulspannung

$$\begin{aligned}\sigma_{cr,p} &= \min(\sigma_{cr,p,I}, \sigma_{cr,p,II}, \sigma_{cr,p,zus}) = \min(955,3 ; 709,2) \\ \rightarrow \sigma_{cr,p} &= 709,2 \left[\frac{N}{mm^2} \right]\end{aligned}$$

Ermittlung des Abminderungsfaktors bei plattenartigem Verhalten

Plattenartiges Verhalten

Abminderungsfaktor nach DIN EN 1993-1-5, 4.4(2)

$$\begin{aligned}A_c &= (h_s - b_{1,edge} - b_{3,edge}) \cdot t_w + 2 \cdot A_{sl} \\ &= (1100 - 242,2 - 0) \cdot 12 + 2 \cdot 1910 = 14113,6 \text{ [mm}^2\text{]} \\ A_{c,eff,loc} &= \sum A_{sl,eff} \\ &+ (b_{1,inf,eff} + b_{2,sup,eff} + b_{2,inf,eff} + b_{3,sup,eff} + 2 \cdot t_{sl}) \cdot t_w \\ &= 3820 + (275,35 + 218 + 327 + 0 + 2 \cdot 10) \cdot 12 = 13904,2 \text{ [mm}^2\text{]}\end{aligned}$$

$$\beta_{A,c}^p = \frac{A_{c,eff,loc}}{A_c} = \frac{13904,2}{14113,6} = 0,98$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\beta_{A,c}^p \cdot f_y}{\sigma_{cr,p}}} = \sqrt{\frac{0,98 \cdot 355}{709,2}} = 0,7 \leq 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,05 \cdot \Psi} = 0,74$$

$$\rightarrow \rho = 1,0$$

DIN EN 1993-1-5, 4.5.2

DIN EN 1993-1-5, 4.5.2(2)

DIN EN 1993-1-5, 4.5.2(1), Gl. (4.7)

Ermittlung der kritischen Knickspannung $\sigma_{cr,c}$

Knickstabähnliches Verhalten

Die obere Längsaussteifung ist maßgebend.

DIN EN 1993-1-5, 4.5.3

$$A_{sl,I,eff} = (b_{1,inf,eff} + t_{sl} + b_{2,sup,eff}) \cdot t_w + \frac{\sum A_{sl,eff}}{2}$$

$$= (275,35 + 10 + 218) \cdot 12 + \frac{1910 \cdot 2}{2} = 7950,2 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$A_{sl,I} = (b_{1,inf} + t_{sl} + b_{2,sup}) \cdot t_w + A_{steife} = (302,8 + 10 + 218) \cdot 12 + 1910$$

$$= 8279,6 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$I_{sl,I} = 13830713,8 \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$\sigma_{cr,sl} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl,I}}{A_{sl,I} \cdot a^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 13830713,8}{8279,6 \cdot 3300^2} = 317,9 \left[\frac{N}{\text{mm}^2} \right]$$

$$\sigma_{cr,c} = \sigma_{cr,sl} \cdot \frac{h_s}{h_s - h_{w,1}} = 317,9 \cdot \frac{1100}{1100 - 550} = 635,9 \left[\frac{N}{\text{mm}^2} \right]$$

$$i = \sqrt{\frac{I_{sl,I}}{A_{sl,I}}} = \sqrt{\frac{13830713,8}{8279,6}} = 40,87 \text{ [mm]}$$

$$e_2 = x_{sl,I} = 19,98 \text{ [mm]}$$

$$e_1 = \frac{\frac{b_{sl}^2}{2} \cdot t_{sl} + (h_{sl} - t_{sl}) \cdot t_{sl} \cdot \left(b_{sl} - \frac{t_{sl}}{2} \right)}{A_{sl}} + \frac{t_w}{2} - e_2$$

$$= \frac{\frac{120^2}{2} \cdot 10 + (80 - 10) \cdot 10 \cdot \left(120 - \frac{10}{2} \right)}{1910} + \frac{12}{2} - 19,98 = 65,86 \text{ [mm]}$$

$$e = \max(e_1, e_2) = 65,86 \text{ [mm]}$$

$$\beta_{A,c} = \frac{A_{sl,I,eff}}{A_{sl,I}} = \frac{7950,2}{8279,6} = 0,96$$

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{\beta_{A,c} \cdot f_y}{\sigma_{cr,c}}} = \sqrt{\frac{0,96 \cdot 355}{635,9}} = 0,73$$

$$\Phi_c = 0,5 \cdot (1 + \alpha_e \cdot (\bar{\lambda}_c - 0,2) + \bar{\lambda}_c^2) = 0,5 \cdot (1 + 0,635 \cdot (0,73 - 0,2) + 0,73^2)$$

$$= 0,934$$

$$\alpha_e = \alpha + \frac{0,09}{i/e} = 0,49 + \frac{0,09}{\frac{40,87}{65,86}} = 0,635$$

$$\chi_c = \frac{1}{\Phi_c + \sqrt{\Phi_c^2 - \bar{\lambda}_c^2}} = \frac{1}{0,934 + \sqrt{0,934^2 - 0,73^2}} = 0,66 \leq 1,0$$

DIN EN 1993-1-5,
4.5.3(2), Gl. (4.9)

DIN EN 1993-1-5,
4.5.3(5), Gl. (4.12)

DIN EN 1993-1-5,
4.5.3(4), Gl. (4.11)

DIN EN 1993-1-5,
4.5.3(5), Gl. (4.12)

DIN EN 1993-1-1, 6.3.1.2

Interpolation zwischen plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten

$$\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1 = \frac{709,2}{635,9} - 1 = 0,115$$

$$\rho_c = (\rho - \chi_c) \cdot \xi \cdot (2 - \xi) + \chi_c = (1,0 - 0,66) \cdot 0,115 \cdot (2 - 0,115) + 0,66 = 0,733$$

$$A_{c,eff} = \rho_c \cdot A_{c,eff,loc} + \sum b_{edge,eff} \cdot t_w = 0,733 \cdot 13904,2 + 218 \cdot 12 = 12807,8 \text{ [mm]}$$

$$t_{w,red} = \rho_c \cdot t_w = 0,733 \cdot 12 = 8,796 \text{ [mm]}$$

$$t_{sl,red} = \rho_c \cdot t_{sl} = 0,733 \cdot 10 = 7,33 \text{ [mm]}$$

$$I_{eff} = 29728319370 \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$Z_{eff} = 1139,2 \text{ [mm]}$$

$$W_{eff} = \frac{I_{eff}}{Z_{eff}} = 26095785 \text{ [mm}^3\text{]}$$

$$\rho_c \cdot f_y = 0,733 \cdot 355 = 260,2 \geq \sigma_{com,Ed} = \frac{M_y \cdot (1100 - 550)}{I_{eff}}$$

$$= \frac{6376,0 \cdot 10^6 \cdot (1100 - 550)}{29728319370} = 122 \left[\frac{N}{\text{mm}^2} \right]$$

$$\eta_1 = \frac{M_{Ed}}{f_{yd} \cdot W_{eff}} = \frac{6376,0 \cdot 10^6}{355 \cdot 26095785} = 0,76$$

2.9.3 Querschnitttragfähigkeit bei Schubspannungen

$$V_{Ed} = 1980 \text{ [kN]}$$

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

Beitrag des Stags

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t_w}{\gamma_{M1} \cdot \sqrt{3}}$$

$$A_{sl} = A_{steife} + 30 \cdot \varepsilon \cdot t_w^2 + t_{sl} \cdot t_w = 1910 + 30 \cdot 0,81 \cdot 12^2 + 10 \cdot 12 = 5529,2 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$e_{sl} = b_{sl} - e_y + \frac{t_w}{2} = 120 - 39,2 + \frac{12}{2} = 86,8 \text{ [mm]}$$

$$I_{sl} = I_{steife} + \frac{(30 \cdot \varepsilon \cdot t_w + t_{sl}) \cdot t_w \cdot A_{steife} \cdot e_{sl}^2}{A_{sl}}$$

$$= 2760000 + \frac{(30 \cdot 0,81 \cdot 12 + 10) \cdot 12 \cdot 1910}{5529,2} \cdot 86,8^2 = 12179397 \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$\alpha = \frac{a}{h_w} = \frac{3300}{2200} = 1,5 < 3$$

DIN EN 1993-1-5, 4.5.4(1)

(Wichtungsfaktor)

DIN EN 1993-1-5, 4.5.4(1), Gl. 4.13

DIN EN 1993-1-5, 4.5.1(7)

DIN EN 1993-1-5, A 2.1(4)

DIN EN 1993-1-5, 5.2(1), Gl. (5.1)

DIN EN 1993-1-5, 5.2(1), Gl. (5.2)

$$k_{\tau} = 4,1 + \frac{6,3 + 0,18 \cdot \frac{\sum I_{sl}}{t_w^3 \cdot h_w}}{\alpha^2} + 2,2 \cdot \sqrt[3]{\frac{\sum I_{sl}}{t_w^3 \cdot h_w}}$$

$$= 4,1 + \frac{6,3 + 0,18 \cdot \frac{2 \cdot 12179397}{12^3 \cdot 2200}}{1,5^2} + 2,2 \cdot \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 12179397}{12^3 \cdot 2200}} = 11,5$$

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{37,4 \cdot t_w \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_{\tau}}} = \frac{2200}{37,4 \cdot 12 \cdot 0,81 \cdot \sqrt{11,5}} = 1,78$$

DIN EN 1993-1-5, A.3, Gl. (A.6)

DIN EN 1993-1-5, 5.3(3), Gl. (5.6)

Einzelfeld:

Das Feld mit dem kleinsten Längsverhältnis bzw. der größten Breite (bei gleichen Längen ist maßgebend).

$$\text{Für } \frac{a}{h_w - h_{w2}} = \frac{3300}{2200 - 1100} = 3 > 1$$

$$k_{\tau} = 5,34 + 4,00 \cdot \left(\frac{h_w - h_{w2}}{a} \right)^2 + k_{\tau,sl} = k_{\tau} = 5,34 + 4,00 \cdot \left(\frac{1100}{3300} \right)^2 + 0 = 5,78$$

$$k_{\tau,sl} = 0$$

DIN EN 1993-1-5, A.3, Gl. (A.5)

$$\bar{\lambda}_{w,1} = \frac{h_w - h_{w2}}{37,4 \cdot t_w \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_{\tau}}} = \frac{1100}{37,4 \cdot 12 \cdot 0,81 \cdot \sqrt{5,78}} = 1,25$$

$$\bar{\lambda}_w = 1,78 > \bar{\lambda}_{w,1} = 1,25$$

$$\bar{\lambda}_w = 1,78 > 1,08$$

$$\chi_w = \frac{1,37}{0,7 + \bar{\lambda}_w} = \frac{1,37}{0,7 + 1,78} = 0,55$$

DIN EN 1993-1-5, 5.3, Tab. 5.1

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t_w}{\gamma_{M1} \cdot \sqrt{3}} = \frac{0,55 \cdot 355 \cdot 2200 \cdot 12}{1,1 \cdot \sqrt{3}} \cdot 10^3 = 2705,5 \text{ [kN]}$$

DIN EN 1993-1-5, 5.2(1), Gl. (5.2)

Beitrag der Flansche

$$M_{f,Rd} = b_f \cdot t_f \cdot \left(h_w + \frac{t_{f1}}{2} + \frac{t_{f2}}{2} \right) \cdot \frac{f_{yf}}{\gamma_{M0}} = 400 \cdot 20 \cdot \left(2200 + \frac{20}{2} + \frac{20}{2} \right) \cdot \frac{355}{1,0} \cdot 10^6$$

$$= 6304,8 \text{ [kNm]}$$

$$M_{Ed} = 6376,0 \text{ [kNm]} > M_{f,Rd} = 6304,8 \text{ [kNm]}$$

der Flanschbeitrag darf nicht zur Schubbeanspruchbarkeit berücksichtigt werden. (DIN EN 1993-1-5, 5.4(1))

DIN EN 1993-1-5, 5.4(1)

$$V_{bf,Rd} = \frac{b_f \cdot t_f^2 \cdot f_{yf}}{c \cdot \gamma_{M1}} \cdot \left(1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right)$$

DIN EN 1993-1-5, 5.4, Gl. (5.8)

$$b_f = \min(30 \cdot \varepsilon \cdot t_f + t_w; b_{f1}) = \min(30 \cdot 0,81 \cdot 20 + 12; 400) = 498$$

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd}$$

$$= 2705,5 + 0 \leq \frac{\eta \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t_w}{\gamma_{M1} \cdot \sqrt{3}} = \frac{1,0 \cdot 355 \cdot 2200 \cdot 12}{1,1 \cdot \sqrt{3}} \cdot 10^{-3} = 4919,0 [kN]$$

$\eta = 1,2$ für den Hochbau und bis S460

$\eta = 1,0$ für den Brückenbau und für den Hochbau ab S460

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{1980,0}{2705,5} = 0,73 \leq 1$$

DIN EN 1993-1-5, 5.2(1),
Gl. (5.1)

NA zu DIN EN 1993-1-5,
5.1(2), Anmerkung 2

DIN EN 1993-1-5, 5.5(1),
Gl. (5.10)

2.9.4 Querschnittstragfähigkeit bei Längs- und Schubspannungen

Interaktion zwischen Biegung und Schub

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) \cdot (2 \cdot \bar{\eta}_3 - 1)^2 \leq 1$$

$$\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} = \frac{6376,0}{11459,4} = 0,556 \geq \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} = \frac{6304,8}{11459,4} = 0,55$$

$$\rightarrow \bar{\eta}_1 = 0,61$$

$$\bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}} = 0,73 > 0,5 \rightarrow \text{Interaktion erforderlich}$$

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) \cdot (2 \cdot \bar{\eta}_3 - 1)^2 = 0,556 + (1 - 0,55) \cdot (2 \cdot 0,73 - 1)^2$$

$$= 0,65 \leq 1$$

Interaktionsnachweis nach Sinur-Vorschlag (SINUR, F. 2011):

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{el,eff,Rd}}\right) \cdot (2 \cdot \bar{\eta}_3 - 1) \leq 1,0$$

$$0,68 + \left(1 - \frac{6304,8}{9264,0}\right) \cdot (2 \cdot 0,73 - 1) = 0,83 \leq 1,0$$

$$\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{el,eff,Rd}} = \frac{6376,0}{9264,0} = 0,68$$

$$M_{el,eff,Rd} = W_{eff} \cdot f_y = 26095785 \cdot 355 \cdot 10^{-6} = 9264,0 [kNm]$$

Plastische Momententragfähigkeit:

Lage der plastischen Nulllinie aus Symmetrie: $z_{pl} = 1100 [mm]$

$$M_{pl,Rd} = (b_{f1} \cdot t_{f1} \cdot \left(\frac{t_{f1}}{2} + z_{pl}\right) + t_w \cdot z_{pl} \cdot \frac{z_{pl}}{2} + t_w \cdot (h_w - z_{pl}) \cdot \frac{h_w - z_{pl}}{2} + b_{f2} \cdot t_{f2} \cdot \left(h_w - z_{pl} + \frac{t_{f2}}{2}\right))$$

$$= (400 \cdot 20 \cdot \left(\frac{20}{2} + 1100\right) + 12 \cdot 1100 \cdot \frac{1100}{2} + 12 \cdot (2200 - 1100) \cdot \frac{2200 - 1100}{2} + 400 \cdot 20 \cdot \left(2200 - 1100 + \frac{20}{2}\right)) = 11459,4 [kNm]$$

$$0,05 \leq \frac{b_1}{a} = \frac{550}{3300} = 0,1667 \leq 0,3$$

DIN EN 1993-1-5, 7

DIN EN 1993-1-5, 7.1(1),
Gl. (7.1)

DIN EN 1993-1-5, 7.1(1)

Siehe Abschnitt 3.3.4
oder TWG8.3 2014-052
(AM-1-5-2013-15)

2.9.5 Querschnitttragfähigkeit bei Querbelastung

$$k_{F,1} = k_F = 6 + 2 \cdot \left(\frac{h_w}{a}\right)^2 + \left(5,44 \cdot \frac{b_1}{a} - 0,21\right) \cdot \sqrt{\gamma_s}$$

$$= 6 + 2 \cdot \left(\frac{2200}{3300}\right)^2 + \left(5,44 \cdot \frac{550}{3300} - 0,21\right) \cdot \sqrt{34,92} = 11,00$$

$$\gamma_s = \min\left(10,9 \cdot \frac{I_{sl}}{h_w \cdot t_w^3}; 13 \cdot \left(\frac{a}{h_w}\right)^3 + 210 \cdot \left(0,3 - \frac{b_1}{a}\right)\right)$$

$$= \min\left(10,9 \cdot \frac{12179397}{2200 \cdot 12^3}; 13 \cdot \left(\frac{3300}{2200}\right)^3 + 210 \cdot \left(0,3 - \frac{550}{3300}\right)\right)$$

$$= \min(34,92; 71,9) = 34,92$$

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

$$= \left[0,8 \cdot \left(\frac{330}{3300}\right) + 0,6\right] \cdot \left(\frac{3300}{550}\right)^{0,6 \cdot \left(\frac{330}{3300}\right) + 0,5} = 1,85$$

$$F_{cr,1} = k_{F,1} \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{t_w^3}{h_w} = 11 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - 0,3^2)} \cdot \frac{12^3}{2200} = 1639,9 \text{ [kN]}$$

$$F_{cr,2} = k_{F,2} \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{t_w^3}{b_1} = 1,85 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - 0,3^2)} \cdot \frac{12^3}{550} = 1103,2 \text{ [kN]}$$

$$F_{cr} = \frac{F_{cr,1} \cdot F_{cr,2}}{F_{cr,1} + F_{cr,2}} = \frac{1639,9 \cdot 1103,2}{1639,9 + 1103,2} = 659514 \text{ [N]}$$

$$l_y = s_s + 2 \cdot t_f \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{f_{yf} \cdot b_f}{f_{yw} \cdot t_w} + m_2}\right) = 330 \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{400}{12} + 0}\right)$$

$$= 2235,3 \text{ [mm]} < 3300 \text{ [mm]}$$

$$\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{l_y \cdot t_w \cdot f_{yw}}{F_{cr}}} = \sqrt{\frac{2235,3 \cdot 12 \cdot 355}{659514}} = 3,8$$

$$\varphi = 0,5 \cdot (1 + 0,21 \cdot (\bar{\lambda}_F - 0,8) + \bar{\lambda}_F)$$

$$= 0,5 \cdot (1 + 0,21 \cdot (3,8 - 0,8) + 3,8) = 2,715$$

$$\chi_F = \frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \bar{\lambda}_F}} = 0,217 \leq 1,0$$

$$F_{Rd} = \frac{f_{yw} \cdot \chi_F \cdot l_y \cdot t_w}{\gamma_{M1}} = \frac{355 \cdot 0,217 \cdot 2235,3 \cdot 12}{1,1} \cdot 10^{-3} = 1878,5 \text{ [kN]}$$

$$\eta_2 = \frac{F_{Ed}}{F_{Rd}} = \frac{432}{1878,5} = 0,23$$

DIN EN 1993-1-5, 6.4(2),
Gl. 6.6

DIN EN 1993-1-5, 6.4(2),
Gl. (6.7)

NA zu DIN EN 1993-1-5,
6.4(2), Anmerkung Gl.
(NA.5)

NA zu DIN EN 1993-1-5,
6.4(2), Anmerkung Gl.
(NA.1), (NA.2), (NA.3)

DIN EN 1993-1-5, 6.5(2),
Gl. (6.10)

DIN EN 1993-1-5, 6.4(1),
Gl. (6.4)

NA zu DIN EN 1993-1-5,
6.4(2), Anmerkung Gl.
(NA.6)

DIN EN 1993-1-5, 6.6(1),
Gl. (6.14)

2.9.6 Querschnitttragfähigkeit bei Querbelastung und Biegemoment und Normalkraft

Bei gemeinsamer Wirkung von Querlasten an den Längsrändern, Biegemoment und Normalkraft ist in der Regel die Beanspruchbarkeit mit der folgenden Interaktionsbeziehung zu prüfen:

$$\eta_2 + 0,8 \cdot \eta_1 \leq 1,4$$

$$0,23 + 0,8 \cdot 0,69 = 0,78 \leq 1,4$$

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

$$\left(\eta_3 \cdot \left(1 - \frac{F_{Ed}}{2 \cdot V_{Ed}} \right) \right)^{1,6} + \eta_2 \leq 1,0$$

$$\left(0,73 \cdot \left(1 - \frac{432}{2 \cdot 1980} \right) \right)^{1,6} + 0,23 = 0,73 \leq 1,0$$

DIN EN 1993-1-5. 7.2(1),
Gl. (7.2)

NA zu DIN EN 1993-1-5,
Gl. (NA.7)

2.9.7 Querschnitttragfähigkeit bei Querbelastung und Biegemoment und Querkraft

$$\eta_1^{3,6} + \left[\eta_3 \cdot \left(1 - \frac{F_{Ed}}{2 \cdot V_{Ed}} \right) \right]^{1,6} + \eta_2 \leq 1,0$$

$$0,61^{3,6} + \left[0,73 \cdot \left(1 - \frac{432}{2 \cdot 1980} \right) \right]^{1,6} + 0,23 = 0,90 \leq 1,0$$

Siehe Abschnitt 1.5
oder TWG8.3 2014-052
(AM-1-5-2013-15)

2.10 Beispiel 3: Vollwandträgersteg mit örtlicher Lasteinleitung Vergleich

Mit dem Verfahren wirksame Breite wurde in diesem Beispiel die Spannungsumlagerung systematisch erfasst. Deswegen sind die Ausnutzungsgrad nach dieser Methode geringer als die Ausnutzungsgrad nach der Methode der reduzierten Spannung.

Tab. 7: Vergleich der Ausnutzungsgrade der Nachweismethode für Beispiel 3

Methode	Ausnutzungsgrad
Methode der wirksamen Breiten (Stegblech als Gesamtsystem)	$\eta_1 = 0,76 < 1,0$
	$\eta_2 = 0,23 < 1,0$
	$\eta_3 = 0,73 < 1,0$
	<i>M – N – V Interak. nach EC: 0,65 < 1,0</i>
	<i>M – N – V Interak. nach Sinur: 0,83 < 1,0</i>
	<i>F – M Interaktion: 0,78 < 1,4</i>
	<i>F – V Interaktion: 0,73 < 1,0</i>
	<i>F – M – V Interaktion: 0,90 < 1,0</i>
Methode der reduzierten Spannungen (Stegblech)	$\eta_{MRS,EF} = 0,98 < 1,0$
	Gesamtfeldnachweis nicht erbracht
DIN 18800-3:2008	$\eta_{DIN,EF} = 0,99 < 1,0$
	$\eta_{DIN,GF} = 1,31 > 1,0$

2.11 Beispiel 4: Steg mit Längssteife (Methode der reduzierten Spannungen)

2.11.1 Einleitung

In diesem Beispiel wird die Interaktion aus Biegemoment, Normalkraft und Querkraft an einem längsausgesteiften I-Träger untersucht. Die starren Quersteifen sind im Abstand von 3000 mm zueinander positioniert und die Längssteife ist im Abstand von 500 mm vom oberen Flansch angeschweißt (Druckspannung im Steg oben). Die Konstruktion besteht aus S 355 und die Beanspruchungen sind im nachfolgenden Abschnitt 2.11.2 Einzelfeldnachweis angegeben.

$$M_{Ed} = 3215 \text{ [kNm]}$$

$$N_{Ed} = 4000 \text{ [kN]}$$

$$V_{Ed} = 3288 \text{ [kN]}$$

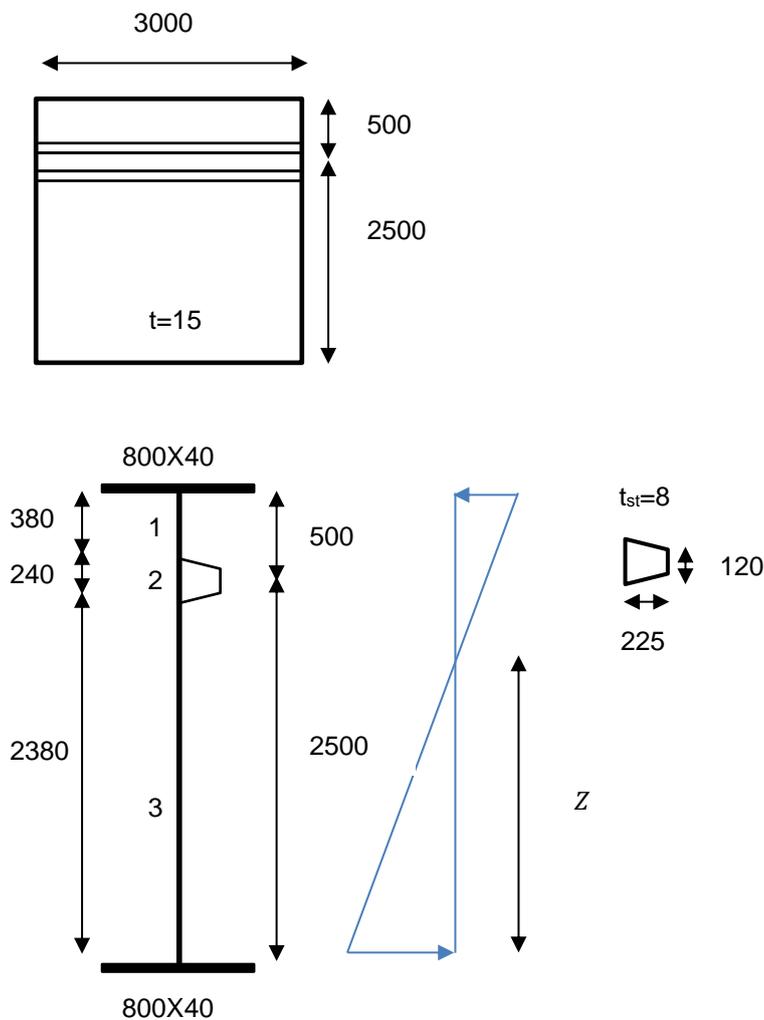


Bild 44:: Beispiel 4 – Abmessungen und Beanspruchungen

2.11.2 Einzelfeldnachweis

Beanspruchungen:

$$\sigma_{11} = \frac{M}{I} \cdot Z_{11} + \frac{N}{A} = 28,7 [\text{kN/cm}^2]$$

$$\sigma_{12} = \sigma_{21} = \frac{M}{I} \cdot Z_{12} + \frac{N}{A} = 22,15 [\text{kN/cm}^2]$$

$$\sigma_{22} = \sigma_{31} = \frac{M}{I} \cdot Z_{31} + \frac{N}{A} = 18,0 [\text{kN/cm}^2]$$

$$\sigma_{32} = \frac{M}{I} \cdot Z_{32} + \frac{N}{A} = -23,1 [\text{kN/cm}^2]$$

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{h_w \cdot t_w} = 7,31 [\text{kN/cm}^2]$$

$$h_s = 1458,78 [\text{mm}] (\text{von UK oberes Flansch})$$

Einzelfeld 1:

Beanspruchungen:

$$\sigma_{11} = 28,7 [\text{kN/cm}^2]$$

$$\sigma_{12} = 22,15 [\text{kN/cm}^2]$$

$$\tau_{Ed} = 73,1 [\text{kN/cm}^2]$$

Überprüfung, ob überhaupt ein Beulnachweis für die Einzelfelder erforderlich ist:

Bedingung 1:

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{86,4 \cdot t \cdot \varepsilon} = \frac{380}{86,4 \cdot 15 \cdot 0,81} = 0,360 \leq 0,83$$

Bedingung 2:

Für die QK der Einzelfelder folgt:

$$b_1 = \frac{380}{15} = 25 < 42 \cdot \varepsilon = 34,02 \Rightarrow QK3$$

Ein Beulnachweis ist nicht erforderlich.

Nachweis Einzelfeld 1:

$$\sqrt{\left(\frac{287,17}{\frac{355}{1,1}}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{73,07}{\frac{355}{1,1}}\right)^2} = 0,97 < 1$$

DIN EN 1993-1-5:2010
5.3.(3)

DIN EN 1993-1-1:2010
Tab.5.2

DIN EN 1993-1-1:2010
6.2.1(5)

Einzelfeld 2:**Beanspruchungen:**

$$\sigma_{21} = 22,15 [kN/cm^2]$$

$$\sigma_{22} = 18,0 [kN/cm^2]$$

$$\tau_{Ed} = 7,31 [kN/cm^2]$$

Überprüfung, ob überhaupt ein Beulnachweis für die Einzelfelder erforderlich ist:

Bedingung 1:

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{86,4 \cdot t \cdot \varepsilon} = \frac{240}{86,4 \cdot 15 \cdot 0,81} = 0,228 \leq 0,83$$

DIN EN 1993-1-5:2010
5.3.(3)

Bedingung 2:

Für die QK der Einzelfelder folgt:

$$b_1 = \frac{240}{15} = 16 < 33 \cdot \varepsilon = 26,8 \Rightarrow QK1$$

DIN EN 1993-1-1:2010
Tab.5.2

Ein Beulnachweis ist nicht erforderlich.

Nachweis Einzelfeld 2:

$$\sqrt{\left(\frac{221,53}{\frac{355}{1,1}}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{73,07}{\frac{355}{1,1}}\right)^2} = 0,79 < 1$$

DIN EN 1993-1-1:2010
6.2.1(5)

Einzelfeld 3:**Beanspruchungen:**

$$\sigma_{31} = 18,0 [kN/cm^2]$$

$$\sigma_{32} = -23,1 [kN/cm^2]$$

$$\tau_{Ed} = 73,1 [kN/cm^2]$$

Überprüfung, ob überhaupt ein Beulnachweis für die Einzelfelder erforderlich ist:

Bedingung 1:

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{86,4 \cdot t \cdot \varepsilon} = \frac{2380}{86,4 \cdot 15 \cdot 0,81} = 2,257 > 0,83$$

DIN EN 1993-1-5:2010
5.3.(3)

Bedingung 2:

Für die QK der Einzelfelder folgt:

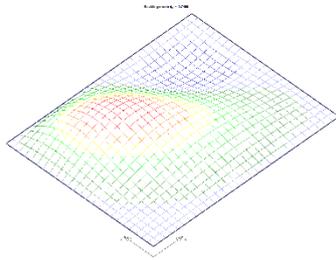
$$b_3 = \frac{2380}{15} = 158 > 42 \cdot \varepsilon \Rightarrow QK4$$

Ein Beulnachweis ist erforderlich.

$$\sigma_{v,3} = \sqrt{(18,0)^2 + 3 \cdot (7,31)^2} = 22,0 \frac{kN}{cm^2}$$

 α -Faktoren:

$$\alpha_{ult,3} = \frac{f_y}{\sigma_{v,3}} = \frac{355}{22,0} = 1,61$$



$$\alpha_{cr,local,3} = 0,7455$$

Plattenschlankheit und Abminderungsbeiwerte:

$$\bar{\lambda}_{P,local,3} = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,3}}{\alpha_{cr,local,3}}} = \sqrt{\frac{1,61}{0,7455}} = 1,47$$

Der endgültige Abminderungsfaktor für das Einzelfeld 3:

$$\rho_3 = \frac{\bar{\lambda}_{P,local,3} - 0,055 \cdot (3 + \psi_3)}{\bar{\lambda}_{P,local,3}^2} = \frac{1,47 - 0,055 \cdot (3 - 1,283)}{1,47^2} = 0,636$$

$$\alpha_3 > 1 \Rightarrow \rho_{cx,3} = 0,636$$

$$\bar{\lambda}_{P,local,3} = 1,47 > 1,08 \Rightarrow \chi_{w,3} = \frac{1,37}{0,7 + 1,47}$$

$$\chi_{w,3} = 0,631$$

Nachweis Einzelfeld 3:

$$\sqrt{\left(\frac{180,07}{0,636 \cdot \frac{355}{1,1}}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{73,07}{0,631 \cdot \frac{355}{1,1}}\right)^2} = 1,07 > 1$$

DIN EN 1993-1-1:2010
6.2.1(5)

DIN EN 1993-1-5:2010
10.(4)

EBPlate 2.01

DIN EN 1993-1-5:2010
10.(3)

DIN EN 1993-1-5:2010,
4.4.(2)

DIN EN 1993-1-5:2010,
4.5.4, Gl. (4.13)

DIN EN 1993-1-5:2010,
5.3.(1) starre Auflager-
steifen

DIN EN 1993-1-5:2010,
Gl. (10.5)

2.11.3 Gesamtfeldnachweis

Beanspruchungen:

$$\sigma_{11} = 28,7 [\text{kN/cm}^2]$$

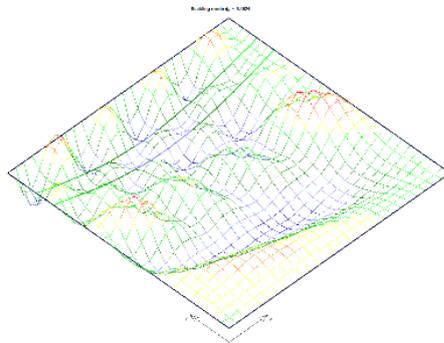
$$\sigma_{32} = -23,1 [\text{kN/cm}^2]$$

$$\tau_{Ed} = 7,31 [\text{kN/cm}^2]$$

$$\sigma_{v,3} = \sqrt{(28,7)^2 + 3 \cdot (7,31)^2} = 33,8 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

α -Faktoren:

$$\alpha_{ult,global} = \frac{f_y}{\sigma_{v,global}} = \frac{35,5}{3,8} = 1,13$$



$$\alpha_{cr,global} = 6,1924$$

Plattenschlankeit und Abminderungsbeiwerte:

$$\bar{\lambda}_{p,global} = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,global}}{\alpha_{cr,global}}} = \sqrt{\frac{1,13}{6,1924}} = 0,427$$

Knickstabähnliches Verhalten:

$$I_{sl} = 95655017,81 [\text{mm}^4]$$

$$A_{sl} = 17544,66 [\text{mm}^2]$$

$$\sigma_{cr,sl} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl,I}}{A_{sl,I} \cdot a^2} = 1255,56 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$$

$$\sigma_{cr,c} = 1795,6 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$$

DIN EN 1993-1-5:2010
10.(4)

EBPlate 2.01

DIN EN 1993-1-5:2010
10.(3)

DIN EN 1993-1-5,
4.5.3.(3)

$$i = \sqrt{\frac{I_{sl}}{A_{sl}}} = 73,84 [\text{mm}]$$

$$e = \max(38,2; 104,84) = 104,84 [\text{mm}]$$

$$\alpha_e = \alpha + \frac{0,09}{i/e} = 0,468$$

$$\begin{aligned} \phi &= 0,5 \cdot (1 + \alpha_e \cdot (\bar{\lambda}_p - 0,2) + \bar{\lambda}_p^2) = 0,5 \cdot (1 + 0,468 \cdot (0,427 - 0,2) + 0,427^2) \\ &= 0,644 \end{aligned}$$

$$\chi_c = \frac{1}{\phi + \sqrt{(\phi^2 - \bar{\lambda}_p^2)}} = \frac{1}{0,644 + \sqrt{(0,644^2 - 0,427^2)}} = 0,888$$

Interpolation zwischen plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten

$$\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1 = \frac{\alpha_{cr,x} \cdot \sigma_{x,Ed}}{\sigma_{cr,c}} - 1 = \frac{6,2185 \cdot 287,2}{1795,6} - 1 < 0 \Rightarrow \xi = 0$$

$$\rho_{c,global} = \chi_c = 0,888$$

$$\bar{\lambda}_{p,global} < 0,83 \Rightarrow \chi_{w,global} = 1,0$$

Nachweis Gesamtfeld:

$$\sqrt{\left(\frac{287,17}{0,888 \cdot \frac{355}{1,1}}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{73,07}{1 \cdot \frac{355}{1,1}}\right)^2} = 1,08 > 1$$

DIN EN 1993-1-5:2010,
4.5.4, Gl. (4.13)

DIN EN 1993-1-5:2010,
5.3.(1)

DIN EN 1993-1-5:2010,
Gl. (10.5)

2.12 Beispiel 4: Steg mit Längssteife (Methode der wirksamen Breiten)

2.12.1 Einleitung

In diesem Beispiel wird die Interaktion aus Biegemoment, Normalkraft und Querkraft an einem längsausgesteiften I-Träger untersucht. Bild 44 zeigt die Abmessungen und Beanspruchungen eines Vollwandträgerstegblechs mit 1 trapezförmigen Längssteifen in der Druckzone.

$$M_{Ed} = 3215 \text{ [kNm]}$$

$$N_{Ed} = 4000 \text{ [kN]}$$

$$V_{Ed} = 3288 \text{ [kN]}$$

Schubbeulen M-N-V-Interaktion

Allgemein bestehen zwei Möglichkeiten nach DIN EN 1993-1-5:2010, diese Querschnittswerte bei der Interaktion aus Biegemoment und Normalkraft zu bestimmen.

Die erste Möglichkeit besteht darin, die wirksame Querschnittsfläche A_{eff} unter Annahme reiner Normalkraftbeanspruchung und das wirksame Widerstandsmoment W_{eff} unter Annahme reiner Biegung zu bestimmen.

Bei der zweiten Möglichkeit werden die Normalkraft und das Biegemoment gleichzeitig angesetzt.

In diesem Beispiel wird die erste Möglichkeit verwendet.

Wirksame Querschnittsfläche

Für den Bruttoquerschnitt gilt:

$$A = 113685,8 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$I = 18593889,04 \text{ [cm}^4\text{]}$$

$$Z = 1581,2 \text{ [mm]}$$

$$\sigma_1 = \sigma_{sl} = \frac{N_{Ed}}{A} = 35,18 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

2.12.2 Querschnittstragfähigkeit bei Längsspannungen

Flansch

$$\frac{c_f}{t_f} = \frac{(b_f - t_w)/2}{t_f} = \frac{(800 - 15)/2}{40} = 6,7 < 42 \cdot \varepsilon = 34,02 \Rightarrow QK3$$

Keine Abminderung erforderlich (Nettoquerschnitt= Bruttoquerschnitt)

Steg

Einzelfeldbeulen

Für die QK der Einzelfelder folgt:

$$b_1 = \frac{380}{15} = 25 < 42 \cdot \varepsilon = 34,02 \Rightarrow QK3$$

$$b_2 = \frac{240}{15} = 22,7 < 42 \cdot \varepsilon = 34,02 \Rightarrow QK3$$

$$b_3 = \frac{2380}{15} = 158 > 42 \cdot \varepsilon \Rightarrow QK4$$

Für das Einzelblech 3 ist lokales Beulen maßgebend, (siehe Bild 44).

$$\bar{\lambda}_{p3} = \frac{\bar{b}_3}{t_w} = \frac{2380}{15} = 158,7 > 28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma} = 3,43$$

$$\rho_3 = \frac{\bar{\lambda}_{p3} - 0,055 \cdot (3 + \psi_3)}{\bar{\lambda}_{p3}^2} = 0,273$$

$$b_{1,eff} = \bar{b}_1 = 380 \text{ [mm]}$$

$$b_{1,edge} = b_{1,edge,eff} = 0,5 \cdot b_{1,eff} = 190 \text{ [mm]}$$

$$b_{1,inf} = b_{1,inf,eff} = 0,5 \cdot b_{1,eff} = 190 \text{ [mm]}$$

$$b_{2,eff} = \bar{b}_2 = 240 \text{ [mm]}$$

$$b_{2,sup} = b_{2,sup,eff} = 0,5 \cdot b_{2,eff} = 120 \text{ [mm]}$$

$$b_{2,inf} = b_{2,inf,eff} = 0,5 \cdot b_{2,eff} = 120 \text{ [mm]}$$

DIN EN 1993-1-5, 4.4(2)

DIN EN 1993-1-5, 4.4,
Tab. 4.1

$$b_{3,eff} = \rho_3 \cdot \bar{b}_{3,c} = 0,273 \cdot 2380 = 649,2 \text{ [mm]}$$

$$b_{3,sup} = 0,5 \cdot \bar{b}_{3,c} = 1190 \text{ [mm]}$$

$$b_{3,edge} = 0,5 \cdot \bar{b}_{3,c} = 1190 \text{ [mm]}$$

$$b_{3,sup,eff} = 0,5 \cdot b_{3,eff} = 324,6 \text{ [mm]}$$

Plattenartiges Verhalten

Ermittlung der kritischen Beulspannung $\sigma_{cr,p}$

$$A_c = A_{trap} + (b_{1,inf} + b_{2,sup} + b_{2,inf} + b_{3,sup}) \cdot t_w = 28985,8 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$I_{sl} = 105763184,4 \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$a_c = 4,33 \cdot \sqrt[4]{\frac{I_{sl} \cdot b_1^2 \cdot b_2^2}{t_w^3 \cdot b}} = 8703,2 > a$$

$$\sigma_{cr,p} = \sigma_{cr,sl} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl}}{A_c \cdot a^2} + \frac{E \cdot t_w^3 \cdot b \cdot a^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot (1 - \nu^2) \cdot A_c \cdot b_1^2 \cdot b_2^2} = 852,04 \left[\frac{N}{\text{mm}^2} \right]$$

$$A_{c,eff,loc} = A_{trap} + (b_{1,inf,eff} + b_{2,sup,eff} + b_{2,inf,eff} + b_{3,sup,eff}) \cdot t_w = 16004,8 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$\beta_{A,c}^p = \frac{A_{c,eff,loc}}{A_c} = \frac{16004,8}{28985,8} = 0,55$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\beta_{A,c}^p \cdot f_y}{\sigma_{cr,p}}} = \sqrt{\frac{0,55 \cdot 355}{852,04}} = 0,4796 < 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,05 \cdot \psi}$$

$$\rho = 1,0$$

Ermittlung der kritischen Knickspannung $\sigma_{cr,c}$

Knickstabähnliches Verhalten

$$\beta_{A,c}^p = \beta_{A,c}^c$$

$$\sigma_{cr,c} = \sigma_{cr,sl} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl}}{A_c \cdot a^2} = 840,3 \left[\frac{N}{\text{mm}^2} \right]$$

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{\beta_{A,c}^p \cdot f_y}{\sigma_{cr,c}}} = \sqrt{\frac{0,55 \cdot 355}{840,3}} = 0,48 > 0,2$$

Für $\alpha = 0,34$ für geschlossene Querschnitte kann mit

DIN EN 1993-1-5, Anhang A

DIN EN 1993-1-5, Anhang A, Gl. (A.4)

DIN EN 1993-1-5, 4.5.2(1), Gl. (4.7)

DIN EN 1993-1-5, 4.5.3

DIN EN 1993-1-5, 4.5.3(3), Gl. (4.9)

DIN EN 1993-1-5, 4.5.3(4), Gl. (4.11)

$$i = \sqrt{\frac{I_{sl}}{A_c}} = 60,41 [mm]$$

$$e = \max(23,12; 119,92) = 119,92 [mm]$$

$$\alpha_e = \alpha + \frac{0,09}{i/e} = 0,518$$

$$\phi = 0,5 \cdot (1 + \alpha_e \cdot (\bar{\lambda}_c - 0,2) + \bar{\lambda}_c^2) = 0,5 \cdot (1 + 0,518 \cdot (0,48 - 0,2) + 0,48^2) = 0,688$$

$$\chi_c = \frac{1}{\phi + \sqrt{(\phi^2 - \bar{\lambda}_c^2)}} = \frac{1}{0,688 + \sqrt{(0,688^2 - 0,48^2)}} = 0,85$$

Interpolation zwischen plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten

$$\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1 = 0,01399$$

$$\rho_c = (\rho - \chi_c) \cdot \xi \cdot (2 - \xi) + \chi_c = 0,85$$

Berechnung der wirksamen geometrischen Bezugsgrößen

Für die Querschnittswerte folgt:

$$t_{w,red} = \rho_c \cdot t_w = 12,7 [mm]$$

$$t_{st,red} = \rho_c \cdot t_{st} = 6,8 [mm]$$

$$A_{c,eff} = \rho_c \cdot A_{c,eff,loc} + \sum b_{edge,eff} \cdot t_w = 21318,6 [mm^2]$$

$$A_{eff} = 85318,6 [mm^2]$$

$$\sigma_{oben} = \frac{M}{I} \cdot Z_{oben} = \frac{321500}{18593889,04} \cdot (3080 - 15810,2) = 25,9 [kNcm]$$

$$\sigma_{11} = \frac{M}{I} \cdot Z_{11} = \frac{321500}{18593889,04} \cdot (3000 + 40 - 15810,2) = 25,2 [kNcm]$$

$$\sigma_{12} = \sigma_{21} = \frac{M}{I} \cdot Z_{12} = \frac{321500}{18593889,04} \cdot (3000 + 40 - 380 - 15810,2) = 18,6 [kNcm]$$

$$\sigma_{22} = \sigma_{31} = \frac{M}{I} \cdot Z_{31} = 14,5 [kNcm]$$

$$\sigma_{32} = \frac{M}{I} \cdot Z_{32} = -26,6 [kNcm]$$

$$h_c = 3040 - 1581,2 = 1458,8 [mm]$$

Steg

Einzelfeldbeulen

Für die QK der Einzelfelder folgt:

$$b_1 = \frac{380}{15} = 25 < 42 \cdot \varepsilon = 34,02 \Rightarrow QK3$$

$$b_2 = \frac{240}{15} = 16 < 42 \cdot \varepsilon = 34,02 \Rightarrow QK3$$

DIN EN 1993-1-5,
4.5.3(5), Gl. (4.12)

DIN EN 1993-1-1, 6.3.1.2

DIN EN 1993-1-5,
4.5.4(1), Gl. (4.13)

DIN EN 1993-1-5,
4.5.1(3), Gl. (4.5)

$$b_3 = \frac{2380}{15} = 158 > 62 \cdot \varepsilon \cdot (1 - \psi_3) \cdot \sqrt{-\psi_3} = 193,96 \Rightarrow QK3$$

Hier ist auf der sicheren Seite QK4 angenommen.

$$k_\sigma = 5,98 \cdot (1 + 1,837)^2 = 48,13$$

$$\bar{\lambda}_{p3} = \frac{\frac{\bar{b}_3}{t_w}}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} = \frac{\frac{2380}{15}}{28,4 \cdot 0,81 \cdot \sqrt{48,13}} = 0,99$$

$$> 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,05 \cdot \psi_3} = 0,47$$

$$\rho_3 = \frac{\bar{\lambda}_{p3} - 0,055 \cdot (3 + \psi_3)}{\bar{\lambda}_{p3}^2} = 0,945$$

$$b_{1,eff} = \bar{b}_1 = 380 [mm]$$

$$b_{1,edge} = b_{1,edge,eff} = \frac{2}{5 - \psi_1} \cdot b_{1,eff} = \frac{2}{5 - 0,74} \cdot b_{1,eff} = 178,4 [mm]$$

$$b_{1,inf} = b_{1,inf,eff} = \frac{3 - \psi_1}{5 - \psi_1} \cdot b_{1,eff} = 201,6 [mm]$$

$$b_{2,eff} = \bar{b}_2 = 240 [mm]$$

$$b_{2,sup} = b_{2,sup,eff} = \frac{2}{5 - \psi_2} \cdot b_{2,eff} = \frac{2}{5 - 0,778} \cdot b_{2,eff} = 113,7 [mm]$$

$$b_{2,inf} = b_{2,inf,eff} = \frac{3 - \psi_2}{5 - \psi_2} \cdot b_{2,eff} = 126,3 [mm]$$

$$b_{3,eff} = \rho_3 \cdot \bar{b}_{3,c} = 0,945 \cdot 838,78 = 792,5$$

$$b_{3,sup} = 0,4 \cdot \bar{b}_{3,c} = 335,5 [mm]$$

$$b_{3,edge} = 0,6 \cdot \bar{b}_{3,c} = 503,3 [mm]$$

$$b_{3,sup,eff} = 0,4 \cdot b_{3,eff} = 317,3 [mm]$$

$$b_{3,edge,eff} = 0,6 \cdot b_{3,eff} = 476 [mm]$$

Plattenartiges Verhalten

Ermittlung der kritischen Beulspannung $\sigma_{cr,p}$

$$A_c = A_{trap} + (b_{1,inf} + b_{2,sup} + b_{2,inf} + b_{3,sup}) \cdot t_w = 16342,75 [mm^2]$$

$$I_{sl} = 93771645 [mm^4]$$

DIN EN 1993-1-5, 4.4,
Tab. 4.1

DIN EN 1993-1-5, 4.4(2)

DIN EN 1993-1-5, A.1,
Bild A.1

DIN EN 1993-1-5, 4.4,
Tab. 4.1

DIN EN 1993-1-5, An-
hang A.2

$$a_c = 4,33 \cdot \sqrt[4]{\frac{I_{sl} \cdot b_1^2 \cdot b_2^2}{t_w^3 \cdot b}} = 8445,2 > a$$

$$\sigma_{cr,sl} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl}}{A_c \cdot a^2} + \frac{E \cdot t_w^3 \cdot b \cdot a^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot (1 - \nu^2) \cdot A_c \cdot b_1^2 \cdot b_2^2} = 1342,23 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

$$\sigma_{cr,p} = 2042,18 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

$$A_{c,eff,loc} = A_{trap} + (b_{1,inf,eff} + b_{2,sup,eff} + b_{2,inf,eff} + b_{3,sup,eff}) \cdot t_w = 16069,96 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$\beta_{A,c}^p = \frac{A_{c,eff,loc}}{A_c} = \frac{16069,96}{16342,75} = 0,98$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\beta_{A,c}^p \cdot f_y}{\sigma_{cr,p}}} = \sqrt{\frac{0,98 \cdot 355}{2042,18}} = 0,417 < 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,05 \cdot \psi}$$

$$\rho = 1,0$$

Ermittlung der kritischen Knickspannung $\sigma_{cr,c}$

Knickstabähnliches Verhalten

Die obere Längsaussteifung ist maßgebend.

$$\beta_{A,c}^p = \beta_{A,c}^c$$

$$\sigma_{cr,sl} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl}}{A_{sl} \cdot a^2} = 1321,4 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

$$\sigma_{cr,c} = 2010,5 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{\beta_{A,c}^p \cdot f_y}{\sigma_{cr,c}}} = \sqrt{\frac{0,98 \cdot 355}{2010,5}} = 0,417$$

Für $\alpha = 0,34$ für geschlossene Querschnitte kann mit

$$i = \sqrt{\frac{I_{sl}}{A_{sl}}} = 75,74 \text{ [mm]}$$

$$e = \max(41,01; 102,03) = 102,03 \text{ [mm]}$$

$$\alpha_e = \alpha + \frac{0,09}{i/e} = 0,461$$

$$\Phi = 0,5 \cdot (1 + \alpha_e \cdot (\bar{\lambda}_c - 0,2) + \bar{\lambda}_c^2) = 0,5 \cdot (1 + 0,461 \cdot (0,417 - 0,2) + 0,417^2) = 0,637$$

$$\chi_c = \frac{1}{\Phi + \sqrt{(\Phi^2 - \bar{\lambda}_c^2)}} = \frac{1}{0,637 + \sqrt{(0,637^2 - 0,417^2)}} = 0,894$$

Interpolation zwischen plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten

$$\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1 = 0,0158$$

DIN EN 1993-1-5,
A.2.2(1)

DIN EN 1993-1-5,
4.5.2(1), Gl. (4.7)

DIN EN 1993-1-5, 4.5.3

DIN EN 1993-1-5,
4.5.3(3), Gl. (4.9)

DIN EN 1993-1-5,
4.5.3(4), Gl. (4.11)

DIN EN 1993-1-5,
4.5.3(5), Gl. (4.12)

DIN EN 1993-1-1, 6.3.1.2

DIN EN 1993-1-5,
4.5.4(1), Gl. (4.13)

$$\rho_c = (\rho - \chi_c) \cdot \xi \cdot (2 - \xi) + \chi_c = 0,898$$

Berechnung der wirksamen geometrischen Bezugsgrößen

Für die Querschnittswerte folgt:

$$t_{w,red} = \rho_c \cdot t_w = 13,46 [mm]$$

$$t_{st,red} = \rho_c \cdot t_{st} = 7,184 [mm]$$

$$A_{c,eff} = \rho_c \cdot A_{c,eff,loc} + \sum b_{edge,eff} \cdot t_w =$$

$$I_{eff} = 18447187,8 [cm^4]$$

$$W_{eff,oben} = \frac{I_{eff}}{z_{oben}} = 123358677,1 [mm^4]$$

Aufgrund der Verschiebung der Hauptachse um den Wert $e_N = 81,18$ mm nach unten kommt es zu einem Zusatzmoment, das in der Berechnung zu berücksichtigen ist.

$$\eta_1 = \frac{N_{Ed}}{\frac{f_y}{\gamma_{M1}} \cdot A_{eff}} + \frac{M_{y,Ed} + e_N \cdot N_{Ed}}{\frac{f_y}{\gamma_{M1}} \cdot W_{eff}}$$

$$= \frac{4000}{\frac{355}{1,1} \cdot 853,2} + \frac{321500 - 8,118 \cdot 4000}{\frac{355}{1,1} \cdot 12335,9} = 0,95 < 1,0$$

2.12.3 Querschnittstragfähigkeit bei Schubspannungen

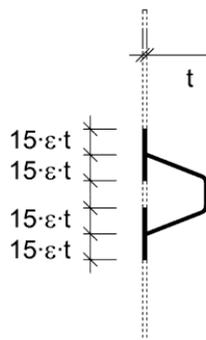
Bemessungswert der Querkraftbeanspruchbarkeit

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

Beitrag des Steges $V_{bw,Rd}$

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t_w}{\gamma_{M1} \cdot \sqrt{3}}$$

Ausgesteiftes Blech



$$A_{sl} = 4685,8 [mm^2]$$

$$I_{sl} = 88653353,4 [mm^4]$$

Für längsausgesteifte Blechfelder mit ein oder zwei Steifen und

DIN EN 1993-1-5,
4.5.1(3), Gl. (4.5)

DIN EN 1993-1-5, 4.6(1),
Gl. (4.14)

DIN EN 1993-1-5, 5.2(1),
Gl. (5.1)

DIN EN 1993-1-5, 5.2(1),
Gl. (5.2)

$$\alpha = \frac{a}{h_w} = \frac{3000}{3000} = 1 < 3$$

und

$$k_\tau = 4,1 + \frac{6,3 + 0,18 \cdot \frac{3 \cdot I_{St}}{t_w^3 \cdot h_w}}{\alpha^2} + 2,2 \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot I_{St}}{t_w^3 \cdot h_w}} = 21,67$$

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{37,4 \cdot t_w \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\tau}} = \frac{3000}{37,4 \cdot 15 \cdot 0,81 \cdot \sqrt{21,67}} = 1,412$$

Einzelfeld

Das Feld mit dem kleinsten Längenverhältnis bzw. der größten Breite (bei gleichen Längen) ist maßgebend

$$\text{Für } \frac{3000}{2500} = 1,2 > 1$$

$$\text{gilt: } k_\tau = 5,34 + 4,00 \cdot \left(\frac{h_w - h_{w2}}{a}\right)^2 + k_{\tau 1, st} = 5,34 + 4,0 \cdot \left(\frac{2500}{3000}\right)^2 + 0 = 8,118$$

$$k_{\tau 1, st} = 0$$

$$\bar{\lambda}_{w,1} = \frac{h_w - b_1}{37,4 \cdot t_w \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\tau}} = 1,922$$

Maßgebende Schlankheit und Abminderungsbeiwert

$$\bar{\lambda}_w = 1,922 > 1,412 = \bar{\lambda}_{w,1}$$

→ Beulen des ausgesteiften Feldes ist maßgebend

$$\bar{\lambda}_w > 1,08$$

$$\rightarrow \chi_w = \frac{1,37}{0,7 + \bar{\lambda}_w} = \frac{1,37}{0,7 + 1,922} = 0,522$$

Beitrag des Steges zur Querkrafttragfähigkeit:

$$V_{bw, Rd} = \frac{\chi_w \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t_w}{\gamma_{M1} \cdot \sqrt{3}} = \frac{0,522 \cdot 3355 \cdot 3000 \cdot 15}{1,1 \cdot \sqrt{3}} = 4818,4 \text{ [kN]}$$

Beitrag der Flansche $V_{bf, Rd}$

$$V_{bf, Rd} = \frac{b_f \cdot t_f^2 \cdot f_{yf}}{c \cdot \gamma_{M1}} \cdot \left(1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f, Rd}}\right)^2\right)$$

$$\text{mit } b_f = \min(30 \cdot \varepsilon \cdot t_f + t_w; b_{f1})$$

$$= \min(30 \cdot 0,81 \cdot 40 + 15; 800) = 800 \text{ [mm]}$$

$$M_{f, Rd} = 28454,4 \text{ [kNm]}$$

$$M_{Ed} = 32150 \text{ [kNm]} > 28454,4 \text{ [kNm]} = M_{f, Rd}$$

Der Beitrag der Flansche darf nicht berücksichtigt werden.

DIN EN 1993-1-5, A.3,
Gl. (A.6)

DIN EN 1993-1-5, 5.3(3),
Gl. (5.6)

DIN EN 1993-1-5, A.3,
Gl. (A.5)

DIN EN 1993-1-5, 5.3(3),
Gl. (5.6)

DIN EN 1993-1-5, 5.3,
Tab. 5.1

DIN EN 1993-1-5, 5.2(1),
Gl. (5.2)

DIN EN 1993-1-5, 5.4,
Gl. (5.8)

$$V_{bf,Rd} = 0$$

Bemessungswert der Querkraftbeanspruchbarkeit:

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} = 4818,4 + 0 = 4818,4 \text{ [kN]}$$

$$\leq \frac{\eta \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t_w}{\gamma_{M1} \cdot \sqrt{3}} = \frac{1,0 \cdot 355 \cdot 3000 \cdot 15}{1,1 \cdot \sqrt{3}} \cdot 10^{-3} = 9223,2 \text{ [kN]}$$

DIN EN 1993-1-5, 5.2(1),
Gl. (5.1)

Nachweis:

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{3288}{4818,4} = 0,68 \leq 1,0$$

DIN EN 1993-1-5, 5.5(1),
Gl. (5.10)

2.12.4 Querschnittstragfähigkeit bei Längs- und Schubspannungen

Interaktion zwischen Biegung und Schub

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) \cdot (2 \cdot \bar{\eta}_3 - 1)^2 \leq 1,0$$

DIN EN 1993-1-5, 7

Plastische Momententragfähigkeit:

$$M_{pl,Rd} = 48049,2 \text{ [kNm]}$$

DIN EN 1993-1-5, 7.1(1)

$$\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} \geq \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}$$

$$= \frac{32150}{48049,2} = 0,669 \geq 0,592 = \frac{28454,4}{48049,2}$$

$$\rightarrow \bar{\eta}_1 = 0,669$$

$$\bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}} = 0,68 > 0,5$$

➔ Interaktion ist erforderlich

DIN EN 1993-1-5, 7.1(1)

Interaktionsnachweis:

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) \cdot (2 \cdot \bar{\eta}_3 - 1)^2$$

$$= 0,669 + (1 - 0,669) \cdot (2 \cdot 0,68 - 1)^2 = 0,7 \leq 1$$

Interaktionsnachweis nach Vorschlag (SINUR, F. 2011):

Siehe Abschnitt 3.3.4
oder TWG8.3 2014-052
(AM-1-5-2013-15)

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{el,eff,Rd}}\right) \cdot (2 \cdot \bar{\eta}_3 - 1) \leq 1,0$$

$$0,73 + \left(1 - \frac{28454,4}{43792,3}\right) \cdot (2 \cdot 0,68 - 1) = 0,86 \leq 1,0$$

DIN EN 1993-1-5, 7.1(1),
Gl. (7.1)

$$\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{el,eff,Rd}} = \frac{32150}{43792,3} = 0,73$$

$$M_{el,eff,Rd} = W_{eff} \cdot f_y = 123358677,1 \cdot 355 \cdot 10^{-6} = 43792,3 \text{ [kNm]}$$

2.13 Beispiel 4: Steg mit Längssteife Vergleich

Mit dem Verfahren reduzierte Spannung wurde in diesem Beispiel die Spannungsumlagerung nicht erfasst. Deswegen sind die Ausnutzungsgrad nach dieser Methode höher als die Ausnutzungsgrad nach der Methode wirksamen Breiten.

Vergleich der Nachweismethode

Methode	Ausnutzungsgrad
Methode der wirksamen Breiten (Stegblech als Teilsystem)	$\eta_1 = 0,95 < 1,0$
	$\eta_3 = 0,68 < 1,0$
	$M - N - V \text{ Interak. nach EC} = 0,7 < 1,0$
	$M - N - V \text{ Interak. nach Sinur} = 0,86 < 1,0$
Methode der reduzierten Spannungen (Stegblech)	$\eta_{MRS} = 1,08 > 1,0$

2.14 Anwendung auf Beispiele aus der Literatur

2.14.1 Einleitung

In den vergangenen Jahren sind in einer ganzen Reihe von Veröffentlichungen, sowohl national wie auch international, einschlägige Rechenbeispiele veröffentlicht worden, die schwerpunktmäßig die Anwendung der Methode der wirksamen Breite nach DIN EN 1993-1-5:2010 Abschnitt 4-7 zeigen, aber auch Vergleichsbeispiele zu Berechnungen nach DIN EN 1993-1-5:2010 Abschnitt 10 enthalten. Zu nennen sind hier: das ECCS Design Manual (BEG, D., et al., 2010), die Handbücher des europäischen Forschungsvorhabens COMBRI+ (KUHLMANN, U., et al., 2008), der Schlussbericht des einschlägigen DAST-Aif (SEDLACEK, G., et al., 2008) Vorhabens und verschiedene Stahlbaukalenderbeiträge (BRAUN, B., KUHLMANN, U., 2009) und (TIMMERS, R., et al. 2015). Man kann also z.T. auch aufzeigen, aus einem noch laufenden RFCS-Forschungsvorhaben OPTBri (das sich mit der optimierten Anwendung von hochfesten Stählen im Brückenbau beschäftigt), wie beiden Methoden u.U. zu anderen Konstruktionslösungen führen.

In diesem Abschnitt werden die Beispiele aus den oben genannten Literaturen zusammengefasst. Es muss beachtet werden, dass das erläuterte Vorgehen im Folgenden auf die Beispiele der Literatur angewendet wird. Daraus ergeben sich ggf. Abweichungen zum ursprünglichen Beispiel der Literatur. Die Abweichung ist mit * gezeigt.

2.14.2 Beispiel aus Stahlbaukalender 2009 (BRAUN, B., KUHLMANN, U., 2009)

Der Querschnitt besteht aus einem Hohlkasten aus Stahl. Bei der Berechnung nach der Methode der wirk- samen Breiten wurde der Gesamtquerschnitt des Kastenquerschnitts betrachtet, deshalb wird die Span- nungsumlagerung berücksichtigt. Bei der Methoden reduzierten Spannungen wurde nur das Stegblech nachgewiesen.

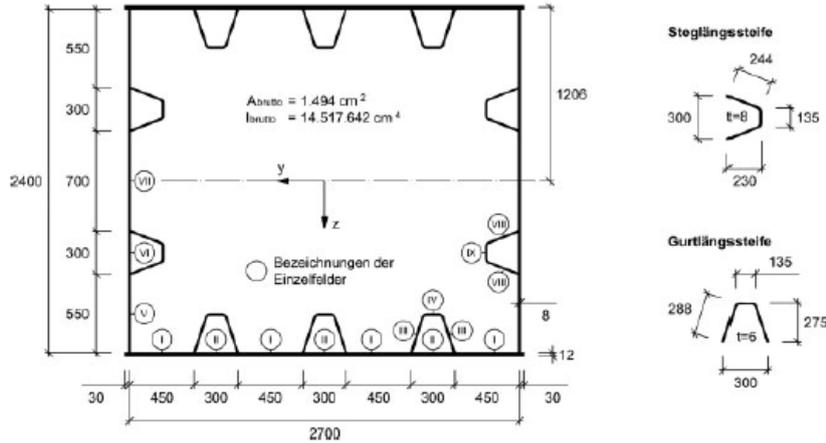


Bild 45: Übersicht Kastenquerschnitt, Maße in [mm] (BRAUN, B., KUHLMANN, U., 2009)

Beanspruchung	Resultierende Spannung im Stegblech
$M_{Ed} = 28 \text{ MNm}$	$\sigma_{x,top,Ed} = -235,5 \text{ MPa (Zug)}$
$V_{Ed} = 3,3 \text{ MN}$	$\sigma_{x,bottom,Ed} = 231,4 \text{ MPa (Druck)}$
$N_{Ed} = 0$	$\tau_{Ed} = 85,8 \text{ MPa}$
Material: $f_y = 355 \text{ MPa}$	Spannungsfeld
Stegblech: $a = 4000 \text{ mm}$ $b = 2400 \text{ mm}$ $t_{pl} = 30 \text{ mm}$	
Steifen: $2 \times \text{Trapez } 230 \times 300 \times 135 \times 8 (h \times b_1 \times b_2 \times t_{st})$	

Tab. 8: Vergleich der Ausnutzungsgrade der Nachweismethode (Beispiel aus Stahlbaukalender 2009)

Methode	Ausnutzungsgrad	γ_M
Methode der wirksamen Breiten (Gesamtquerschnitt)	$\eta_1 = 0,92 < 1,0^*$	1,1
	$\eta_2 = -$	
	$\eta_3 = 0,92 < 1$	1,1
Methode der reduzierten Spannungen (Stegblech)	$\eta_{MRS} = 1,16^{**}$	1,1

* η_1 wurde gemäß DIN EN 1993-2/NA:2012 mit $\gamma_M = 1,1$ multipliziert.

** Die Nachweisführung wurde gemäß dem vorgeschlagenen Vorgehen angepasst.

2.14.3 Beispiele aus Stahlbaukalender 2015 (TIMMERS, R., et al. 2015)

2.14.3.1 I-Profil ohne Steife

Untersucht wird ein Einfeldträger mit doppeltsymmetrischem I-Querschnitt. Auf das Beulfeld wirken ein Biegemoment und eine Drucknormalkraft.

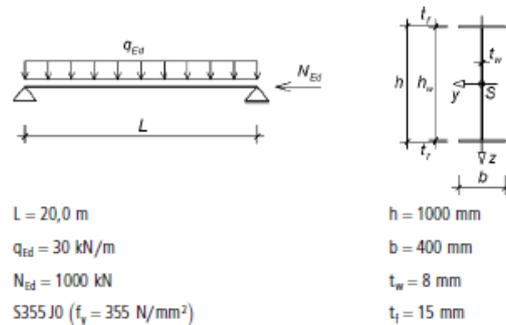


Bild 46: Übersicht Statisches System und Querschnitt (TIMMERS, R., et al. 2015)

Beanspruchung	Resultierende Spannung im Stegblech
$M_{Ed} = 1,5 \text{ MNm}$	$\sigma_{x,top,Ed} = 257 \text{ MPa (Druck)}$
$V_{Ed} = 0 \text{ MN}$	$\sigma_{x,bottom,Ed} = -156 \text{ MPa (Zug)}$
$N_{Ed} = 1 \text{ MN (Druckkraft)}$	$\tau_{Ed} = 0 \text{ MPa}$
Material : $f_y = 355 \text{ MPa}$	Spannungsfeld
Stegblech: $a = 4000 \text{ mm}$ $b = 970 \text{ mm}$ $t_{pl} = 8 \text{ mm}$	
Flanschblech: $a = 4000 \text{ mm}$ $b = 400 \text{ mm}$ $t_{pl} = 15 \text{ mm}$	

In Tab. 9 sind die Ausnutzungsgrade der Nachweismethode zusammengefasst. Außerdem ist der Ausnutzungsgrad nach der FEM angegeben. Bei der Methode der reduzierten Spannungen ist eine Interaktion der einzelnen Bleche nicht vorgesehen. Aus diesem Grund werden die Nachweise gegenüber Beulen getrennt für den Flansch und den Steg geführt.

Tab. 9: Vergleich der Ausnutzungsgrade der Nachweismethode für I-Profil ohne Steife

Methode	Ausnutzungsgrad	γ_M
Methode der wirksamen Breiten (Gesamtquerschnitt)	$\eta_1 = 1,01$	1,1
	$\eta_2 = -$	-
	$\eta_3 = -$	-
Methode der reduzierten Spannungen	$\eta_{Steg,MRS} = 1,26$	1,1
	$\eta_{Flansch,MRS} = 0,96$	1,1
FEM	1,00	1,1

Die Ausnutzungsgrad der Methode wirksamen Breiten mit $\gamma_M = 1,1$ zeigt, gute Übereinstimmung mit FEM Berechnung. Im Vergleich zu den beschriebenen Methoden liefert die Methode der reduzierten Spannungen die konservativsten Ergebnisse, weil bei dieser Methode die Spannungumlagerungen vom Steg auf den nicht beulgefährdeten Flansch nicht berücksichtigt werden und das schwächste Bauteil maßgebend ist. (in diesem Beispiel der Steg).

2.14.3.2 Schubbeulen M-N-V-Interaktion

In diesem Beispiel wird der Stützbereich eines Zweifeldträgers mit doppelsymmetrischem I-Querschnitt untersucht. Wie in Bild 47 dargestellt, wirken auf das Tragwerk gleichzeitig eine Gleichlast und eine Drucknormalkraft.

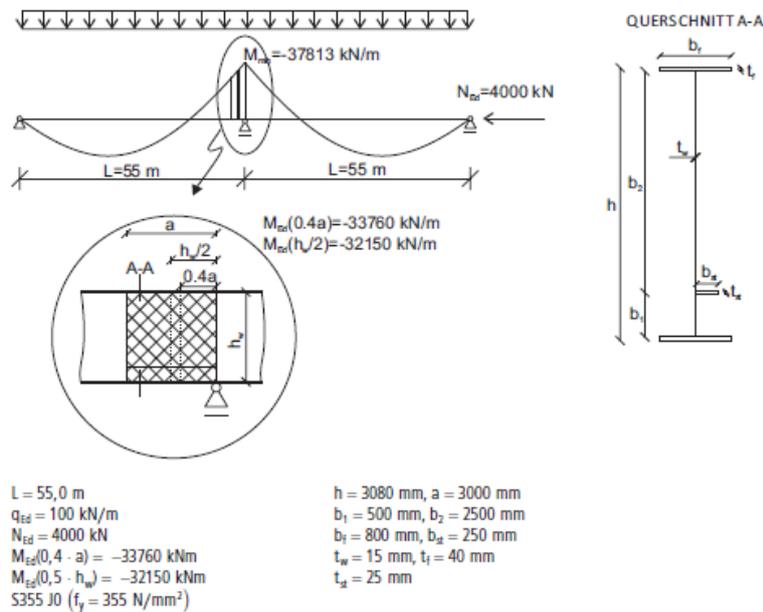


Bild 47: Übersicht Statisches System und Querschnitt (TIMMERS, R., et al. 2015)

Nach DIN EN 1993-1-5:2010 bestehen zwei Möglichkeiten, die Querschnittswerte bei gleichzeitiger Wirkung aus Biegung und Normalkraft zu bestimmen.

- 1- Getrennte Bestimmung der wirksamen Querschnittsfläche A_{eff} unter Annahme reiner Normalkraftbeanspruchung und des wirksamen Widerstandsmoments W_{eff} unter Annahme reiner Biegung
- 2- Direkte Bestimmung der wirksamen Querschnitte unter gleichzeitiger Wirkung von M und N.

Dieses Beispiel wurde im Stahlbaukalender 2015 (TIMMERS, R., et al. 2015) mit der Methode 1 berechnet. Außerdem wurde alternativ das gleiche Beispiel in (TIMMERS, R., 2016) mit der Methode 2 die wirksamen Querschnitte unter gleichzeitiger Wirkung von M und N berechnet.

Beanspruchung	Resultierende Spannung im Stegblech
$M_{Ed} = -33,760 \text{ bzw. } -32,150 \text{ MNm}$	$\sigma_{x,top,Ed} = -236,8 \text{ MPa (Zug)}$
$V_{Ed} = 3,4375 \text{ MN}$	$\sigma_{x,bottom,Ed} = 287,2 \text{ MPa (Druck)}$
$N_{Ed} = 4 \text{ MN (Druckkraft)}$	$\tau_{Ed} = 73,1 \text{ MPa}$
Material: $f_y = 355 \text{ MPa}$	Spannungsfeld
Stegblech: $a = 3000 \text{ mm} \quad b = 3000 \text{ mm} \quad t_{pl} = 15 \text{ mm}$	
Steifen: $1 \times \text{Flachstab } 250 \times 25 (h_{st} \times t_{st})$	

Die Ausnutzungsgrade der Nachweismethode sind in Tab. 10 zusammengefasst. Bei der Methode der wirksamen Breite wird systematisch die Spannungumlagerung berücksichtigt. Aus diesem Grund liefert

sie in diesem Beispiel einem geringeren Ausnutzungsgrad im Vergleich zu der Methode der reduzierten Spannung.

Tab. 10: Vergleich der Ausnutzungsgrade der Nachweismethode für Schubbeulen M-N-V-Interaktion

Methode	Ausnutzungsgrad	γ_M
Methode der wirksamen Breiten (Methode 1)	$\eta_1 = 1,00$	1,1
	<i>Interaktion: $0,77 \leq 1$</i>	-
	$\eta_3 = 0,78$	-
Methode der wirksamen Breiten (Methode 2)	$\eta_1 = 0,99$	
	<i>Interaktion: $0,83 \leq 1$</i>	
	$\eta_3 = 0,78$	
Methode der reduzierten Spannungen	$\eta_{MRS} = 1,32$	1,1

* Für den Nachweis des Einzelfelds 2 (in MRS) wurde Druckspannung eingesetzt.

2.14.4 Beispiele aus AiF-Forschungsprojekt (SEDLACEK, G., et al., 2008)

2.14.4.1 Bahnbrücke Burgweinting

In diesem Beispiel wurde das Stegblech eines Durchlaufträgers aus Stahl untersucht. Das Stegblech ist in Längsrichtung ausgesteift. Als Belastung wurde eine lineare Druck-Normalspannung aufgebracht.

Beanspruchung	Resultierende Spannung im Beulfeld
$M_{Ed} = 4,738 \text{ MNm}$	$\sigma_{x,top,Ed} = 49,1 \text{ MPa (Druck)}$
$V_{Ed} = 6,381 \text{ MN}$	$\sigma_{x,bottom,Ed} = 171,5 \text{ MPa (Druck)}$
$N_{Ed} = 9,3 \text{ MN (Druckkraft)}$	$\tau_{Ed} = 156,4 \text{ MPa}$
Material: $f_y = 355 \text{ MPa}$	Spannungsfeld
Beulfeld: $a = 3206 \text{ mm}$ $b = 2550 \text{ mm}$ $t_{pl} = 16 \text{ mm}$	
Steifen: $4 \times \text{Winkelstahl } 150 \times 102 \times 10 (h \times b \times t_{st})$	

Die Ausnutzungsgrade der Nachweismethode sind in Tab. 11 zusammengefasst.

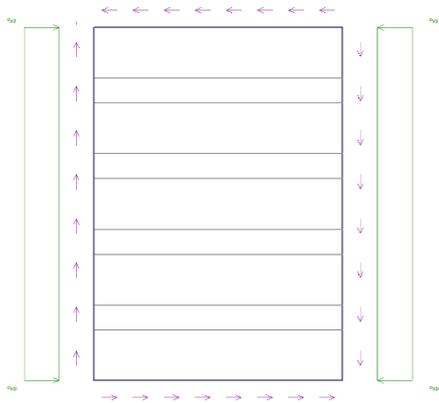
Tab. 11: Vergleich der Ausnutzungsgrade der Nachweismethode für Bahnbrücke Burgweinting

Methode	Ausnutzungsgrad	γ_M
Methode der wirksamen Breiten (Gesamtquerschnitt)	$\eta_1 = 0,81^*$	1,1
	Interaktion: 0,607	-
	$\eta_3 = 0,839$	-
Methode der reduzierten Spannungen	$\eta_{MRS} = 1,06^*$	1,1

* Die Nachweisführung wurde gemäß dem vorgeschlagenen Vorgehen dieses Berichtes angepasst.

2.14.4.2 Donaubrücke Neuötting

In diesem Beispiel wurde das Bodenblech eines Durchlaufträgers aus Stahl untersucht. Das Bodenblech ist mit Trapezprofilen ausgesteift. Als Belastung wurde eine konstante Druck-Normalspannung aufgebracht.

Beanspruchung	Resultierende Spannung im Beulfeld
$M_{Ed} = 0 \text{ MNm}$	$\sigma_{x,top,Ed} = 105 \text{ MPa (Druck)}$
$V_{Ed} = 4,506 \text{ MN}$	$\sigma_{x,bottom,Ed} = 105 \text{ MPa (Druck)}$
$N_{Ed} = 12,637 \text{ MN (Druckkraft)}$	$\tau_{Ed} = 46 \text{ MPa}$
Material: $f_y = 355 \text{ MPa}$ Beulfeld: $a = 4900 \text{ mm}$ $b = 6997 \text{ mm}$ $t_{pl} = 14 \text{ mm}$ Steifen: $4 \times \text{Trapezprofil } 500 \times 275 \times 300 \times 6(b_1 \times b_2 \times h \times t)$	Spannungsfeld 

Tab. 12: Vergleich der Ausnutzungsgrade der Nachweismethode für Bahnbrücke Burgweinting

Methode	Ausnutzungsgrad	γ_M
Methode der wirksamen Breiten (Gesamtquerschnitt)	$\eta_1 = 0,60^*$	1,1
	Interaktion: –	-
	$\eta_3 = 0,299$	-
Methode der reduzierten Spannungen	$\eta_{MRS} = 0,68^*$	1,1

* Die Nachweisführung wurde gemäß dem vorgeschlagenen Vorgehen dieses Berichtes angepasst.

2.14.5 Beispiel aus COMBRI I-Profil ohne Steife unter Längs- und Querdruck (KUHLMANN, U., et al., 2008)

Untersucht wird ein Einfeldträger mit doppelsymmetrischem I-Querschnitt. Auf das Beulfeld wirken ein Längsspannung und eine Querspannung.

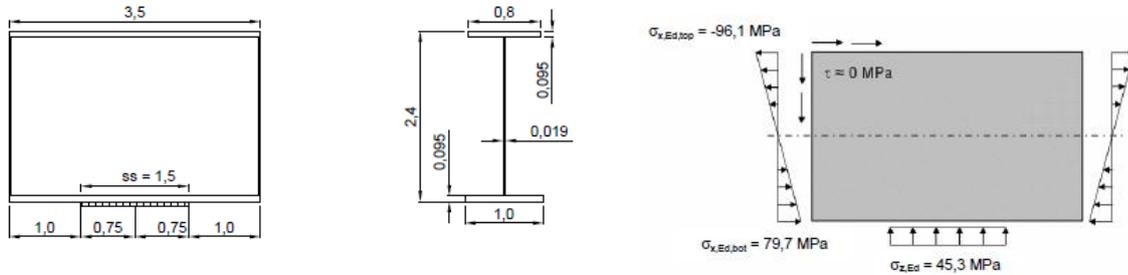


Bild 48: Übersicht Statisches System und Querschnitt (KUHLMANN, U., et al., 2008)

Beanspruchung	Resultierende Spannung im Stegblech
$M_{Ed} = -19,26 \text{ MNm}$	$\sigma_{x,top,Ed} = -96,1 \text{ MPa (Zug)}$
$V_{Ed} = 0 \text{ MN}$	$\sigma_{x,bottom,Ed} = 79,7 \text{ MPa (Druck)}$
$N_{Ed} = 1,46 \text{ MN (Druckkraft)}$	$\tau_{Ed} = 0 \text{ MPa}$
Material :	Spannungsfeld
$f_y = 355 \text{ MPa}$	
Stegblech:	
$a = 3500 \text{ mm} \quad b = 2210 \text{ mm} \quad t_{pl} = 19 \text{ mm}$	
Flanschblech:	
$a = 3500 \text{ mm} \quad b = 800 \text{ bzw. } 1000 \text{ mm} \quad t_{pl} = 95 \text{ mm}$	

Tab. 13: Vergleich der Ausnutzungsgrade der Nachweismethode für I-Profil ohne Steife unter Querdruck

Methode	Ausnutzungsgrad	γ_M
Methode der wirksamen Breiten (Gesamtquerschnitt)	$\eta_1 = 0,292$	1,1
	$\eta_2 = 0,353$	-
	$\eta_3 = 0$	-
Methode der reduzierten Spannungen	$\eta_{Steg,MRS} = 0,472$	1,1

2.14.6 Beispiel aus Design of plated Structures (BEG, D., et al., 2010)

In diesem Beispiel wurde das Stegblech und untenliegende Bodenblech eines Hohlkastens aus Stahl untersucht. Das Bodenblech ist mit Trapezsteifen und das Stegblech mit einem Flachstab in Längsrichtung ausgesteift.

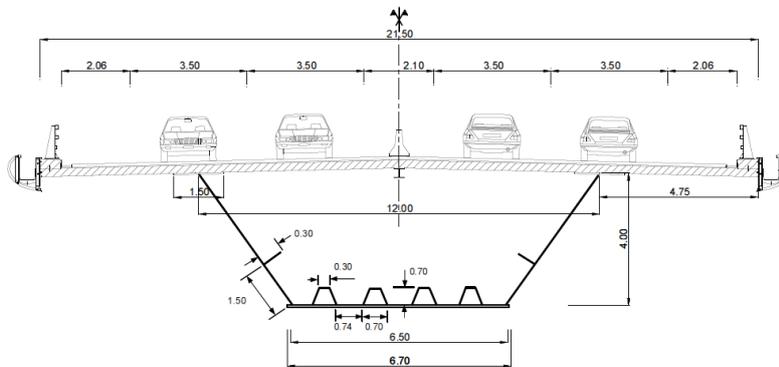


Bild 49: Übersicht und Querschnitt des Hohlkastens (BEG, D., et al., 2010)

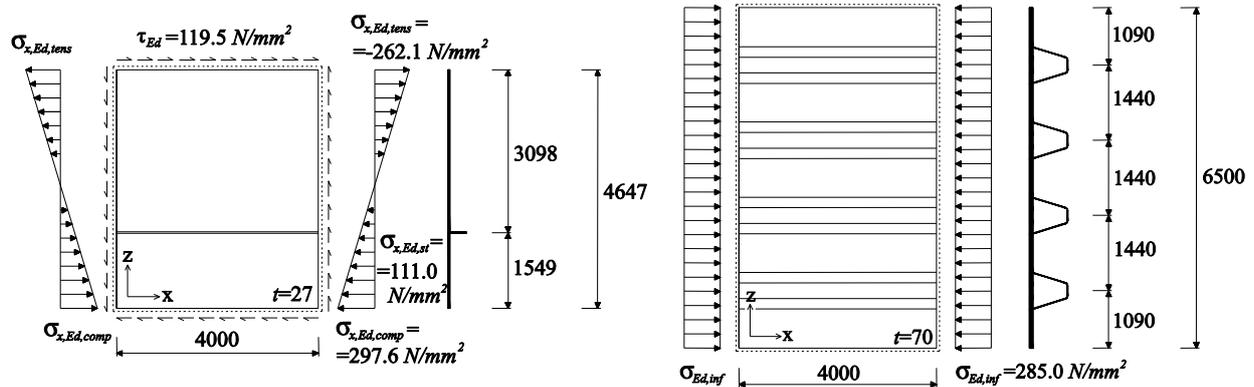
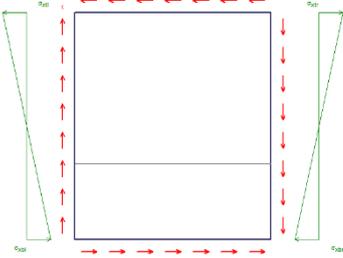


Bild 50: Übersicht Statisches System und Querschnitt des Stags und Bodenblechs (BEG, D., et al., 2010)

Beanspruchung	Resultierende Spannung im Bodenblech
$M_{Ed} = -653,4 \text{ MNm}$	$\sigma_{x,top,Ed} = 285 \text{ MPa (Druck)}$
$V_{Ed} = 15,0 \text{ MN}$	$\sigma_{x,bottom,Ed} = 285 \text{ MPa (Druck)}$
$N_{Ed} = 0 \text{ MN (Druckkraft)}$	$\tau_{Ed} = 0 \text{ MPa}$
Material: $f_y = 325 \text{ MPa}$	Spannungsfeld
Bodenblech: $a = 4000 \text{ mm}$ $b = 6500 \text{ mm}$ $t_{pl} = 70 \text{ mm}$	
Steifen: $4 \times \text{Trapez}700 \times 700 \times 300 \times 15 (h \times b_1 \times b_2 \times t_{st})$	

Beanspruchung	Resultierende Spannung im Stegblech
$M_{Ed} = -653,4 \text{ MNm}$	$\sigma_{x,top,Ed} = -262,1 \text{ MPa (Zug)}$
$V_{Ed} = 15,0 \text{ MN}$	$\sigma_{x,bottom,Ed} = 297,6 \text{ MPa (Druck)}$
$N_{Ed} = 0 \text{ MN (Druckkraft)}$	$\tau_{Ed} = 119,5 \text{ MPa}$
Material: $f_y = 345 \text{ MPa}$	Spannungsfeld 
Stegblech: $a = 4000 \text{ mm}$ $b = 4647 \text{ mm}$ $t_{pl} = 27 \text{ mm}$	
Steifen: $1 \times \text{Flachstab } 300 \times 30 (h_{st} \times t_{st})$	

Der Wert von $\alpha_{ult,k}$ ist bereits kleiner als 1,0, das heißt der Nachweis nach der Methode der reduzierten Spannungen ist nicht erfüllt bzw. nach Abschnitt 10.(2) DIN EN 1993-1-1:2010 nicht erlaubt.

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_x^2 + 3 \cdot \tau^2} = \sqrt{297,6^2 + 3 \cdot 119,5^2} = 362,5 > f_y = 345$$

$$\alpha_{ult,k} = \frac{f_y}{\sigma_v} = \frac{345}{362,5} = 0,952 < 1$$

Der Unterschied zur Methode der wirksamen Breiten basiert auf der Tatsache, dass Abschnitt 10, DIN EN 1993-1-5:2010, eine Spannungsumlagerung nicht berücksichtigt und nur ist und in der elastischen Bemessung erlaubt ist, siehe Abschnitt 6.2.1(5) in DIN EN 1993-1-1:2010. Wenn man die Methode der wirksamen Breiten verwendet, wird das Biegemoment durch die Flansche aufgenommen, sodass der Widerstand des Stegs für die Schubkräfte verwendet werden kann. Im Gegensatz zu dem Interaktionskriterium der Methode der wirksamen Breiten, können Biegemoment und Schubkraft bei der Methode der reduzierten Spannungen nicht auf die Querschnittselemente der Flansche und des Stegs verteilt werden.

Tab. 14: Vergleich der Ausnutzungsgrade der Nachweismethode für Längsausgesteiftes Bodenblech einer Hohlkastenbrücke

Methode	Ausnutzungsgrad	γ_M
Methode der wirksamen Breiten	Interaktion: 0,99	-
	$\eta_3 = 0,96$	-
Methode der reduzierten Spannungen	$\eta_{Boden,MRS} = 1,13$	1,1
	$\eta_{Steg,MRS} = 2,158 > 1$	1,1

2.14.7 Beispiele aus OPTIBRI Forschungsprojekt – I Profil ohne Steife S690 (REIS, A., PEDRO, J.O. et al.)

OPTIBRI (Optimal use of High Strength Steel grades within bridges) ist ein europäisches Forschungsprojekt, das optimale Einsatz der hochfesten Stähle in Brückenbau untersucht. Die Bemessung erfolgt durch das proteische Ingenieurbüro GRID, das überwiegend nach der Methode der wirksame breite rechnet. Das folgende Beispiel ist aus dem vorläufigen Bericht „Design of Bridges Deliverable D1.2 and D2.2“ (REIS, A., PEDRO, J.O. et al.) entnommen. In diesem Beispiel wurde ein I-Querschnitt aus Stahl (S690) untersucht.

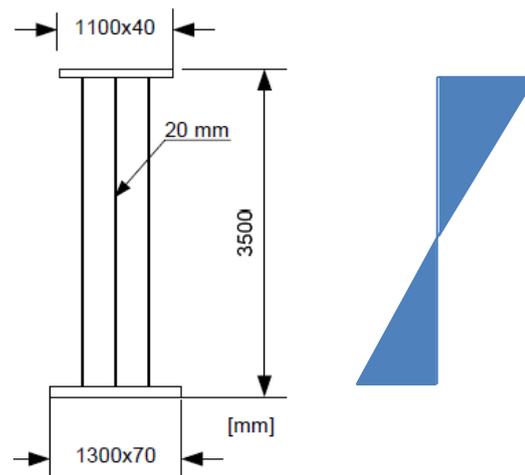


Bild 51: Übersicht Querschnitt und die Spannungsverteilung (REIS, A., PEDRO, J.O. et al.)

Beanspruchung	Resultierende Spannung im Stegblech
$M_{Ed} = -177,4 \text{ bzw. } -167,1 \text{ MNm}$	$\sigma_{x,top,Ed} = -582,1 \text{ MPa (Zug)}$
$V_{Ed} = 12,4 \text{ MN}$	$\sigma_{x,bottom,Ed} = 519,7 \text{ MPa (Druck)}$
$N_{Ed} = 0$	$\tau_{Ed} = 183,2 \text{ MPa}$
Material: $f_y = 690 \text{ MPa}$ Stegblech: $a = 2000 \text{ mm}$ $b = 3390 \text{ mm}$ $t_{pl} = 20 \text{ mm}$	Spannungsfeld

Tab. 15: Vergleich der Ausnutzungsgrade der Nachweismethode (OPTIBRI – I Profil ohne Steife S690)

Methode	Ausnutzungsgrad	γ_M
Methode der wirksamen Breiten (Gesamtquerschnitt)	$\eta_1 = 0,97 < 1,0$	1,1
	$Interaktion = 1,00 \leq 1$	
	$\eta_3 = 0,91 < 1$	1,1
Methode der reduzierten Spannungen (Stegblech)	$\eta_{MRS} = 1,94$	1,1

Um den Nachweis gemäß Abschnitt 10 zu erfüllen, müsste die Dicke des Steges von 20 mm auf 32 mm erhöht werden.

3 Schlussfolgerungen

3.1 Vorbemerkungen

In den nachfolgenden Abschnitten werden zu allen wesentlichen Punkten der Nachweisführung Hinweise und Klarstellungen gegeben, die den aktuellen Stand der Technik wiedergeben. Dieser Stand wird durch DIN EN 1993-1-5:2010 sowie die bereits zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Forschungsberichts (Mai 2016) in den Normengremien verabschiedeten Änderungen definiert.

Die Erläuterungen beziehen sich überwiegend auf die Regelungen für die Methode der reduzierten Spannungen (DIN EN 1993-1-5:2010 Abschnitt 10), die im folgenden Abschnitt 3.2 erläutert und mit MRS abgekürzt werden. Darüber hinaus werden Empfehlungen gegeben, wie mit derzeit noch nicht hinreichend geregelten Sachverhalten umzugehen ist.

Bzgl. des Verfahrens der wirksamen Querschnitte (DIN EN 1993-1-5:2010 Abschnitte 4-7) sei auf Abschnitt 3.3 verwiesen.

3.2 Methode der reduzierten Spannungen MRS gemäß DIN EN 1993-1-5:2010 Abschnitt 10

3.2.1 Einzelfeld- und Gesamtfeldnachweis

In den bisherigen Regelungen in DIN EN 1993-1-5:2010, siehe dort Abschnitt 10(3), wurde α_{cr} als der kleinste Faktor für die Vergrößerung der Bemessungslasten beschrieben, um die elastische Verzweigungslast für das gesamte einwirkende Spannungsfeld zu erreichen. Damit wurde entweder nur ein lokaler oder ein globaler Eigenwert bei der Nachweisführung erfasst. Dies kann dazu führen, dass der Nachweis auf der unsicheren Seite liegt. Dazu hat (TIMMERS, R., 2015) Untersuchungen durchgeführt. Er hat die Traglasten nach zwei Methoden ermittelt:

„Methode 1: Bei dieser Methode wird der kritische Laststeigerungsfaktor numerisch am Gesamtfeld inklusive Einzelfeldbeulen bestimmt. Der Laststeigerungsfaktor folgt somit zu $\alpha_{cr} = \min(\alpha_{cr, global}, \alpha_{cr, lokal})$. Mit diesem Wert werden die Reduktionsbeiwerte ρ und χ_c und anschließend der endgültige Abminderungsbeiwert ρ_c bestimmt. Die Berechnung von ξ erfolgt global am Gesamtbeulfeld. Mit dem errechneten Abminderungsbeiwert wird ein einziger Nachweis für das gesamte Beulfeld geführt.

Methode 2: Hier werden zwei getrennte Nachweise geführt: Einmal der Nachweis für das maßgebende Einzelfeld (mit $\alpha_{cr, lokal}$) und einmal der Nachweis für das Gesamtfeld aber ohne Berücksichtigung des lokalen Beulens der Einzelfelder (mit $\alpha_{cr, global}$). Der endgültige Abminderungsfaktor kann mit $\rho_c = \min(\rho_{c, lokal}, \rho_{c, global})$ bestimmt werde.“ (TIMMERS, R., 2015).

„Die Traglasten nach der MRS (Methode 1) stimmen teilweise sehr gut mit den Traglasten nach der FEM zusammen, zeigen aber in einigen Fällen auch deutliche Abweichungen auf die unsichere Seite.“

„Im Vergleich zu den Traglasten nach der FEM liefert die MRS (Methode 2) in fast allen Fällen geringere Traglasten bzw. Traglasten mit vernachlässigbaren Abweichungen auf die unsichere Seite mit maximal 6.6%“ (TIMMERS, R., 2015).

„Generell erscheint die Vorgehensweise nach der Methode 2 bei Anwendung der MRS nach EN 1993-1-5 mechanisch sinnvoller. Durch direkten Vergleich beider Methoden mit den Traglasten nach der FEM kann festgestellt werden, dass auf der sicheren Seite liegend stets Methode 2 angewendet werden sollte“ (TIMMERS, R., 2015).

Aus diesem Grund sind immer Einzelfeldnachweise und ein Gesamtfeldnachweis zu führen. Eine entsprechende Regelung wurde in dem Normenvorschlag in Abschnitt 4.2 aufgenommen. In diesem Zusammenhang werden die Begrifflichkeiten nachfolgend definiert:

Ein **Einzelfeld** ist ein Teil eines ausgesteiften Gesamtfeldes, dessen Ränder durch Steifen/Gurte o.ä. gehalten sind. Innerhalb eines Einzelfeldes befindet sich keine Steife. In Bezug auf die hierfür erforderliche Steifigkeit der Steife wird auf Abschnitt 3.2.3 verwiesen. Wird bei vorhandener Mindeststeifigkeit der Steife ein Einzelfeldnachweis an einem am Gesamtfeld herausgeschnittenen Einzelfeld mit korrespondierenden Beanspruchungen geführt, so ist für die gelagerten Ränder eine *Naviersche* Lagerung anzunehmen.

Ein **Gesamtfeld** setzt sich aus mehreren Einzelfeldern zusammen, an deren Schnittlinien Steifen/Gurte vorhanden sind. Der Gesamtfeldnachweis beinhaltet den Nachweis der aussteifenden Elemente, d.h. das Einzelfeldbeulen ist auszuschließen bzw. nicht zu berücksichtigen. Empfehlungen, wie der Gesamtfeldnachweis zu führen ist, werden in Abschnitt 3.2.9 b) gegeben.

3.2.2 Bezogener Schlankheitsgrad und Abminderungsbeiwerte

Durch die vorliegende Strukturierung von DIN EN 1993-1-5:2010 wird dort in Abschnitt 10 zu großen Teilen auf die Formeln bzw. die vorhergehenden Abschnitte, die eigentlich das Verfahren der wirksamen Querschnitte regeln, verwiesen. Dadurch konnte z.B. bei Überprüfung des knickstabähnlichen Verhaltens gemäß DIN EN 1993-1-5:2010 Abschnitt 4.5.4 die Fehlinterpretation entstehen, dass entsprechend der dortigen Regel (4) ein Schlankheitsgrad

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,c}}}$$

unter Verwendung der Streckgrenze zu berechnen ist. Dies gilt jedoch nur für das Verfahren der wirksamen Querschnitte. Für die Methode der reduzierten Spannungen ist kein neuer bezogener Schlankheitsgrad zu bestimmen. Eine entsprechende Klarstellung wurde als Anmerkung in dem Normenvorschlag in Abschnitt 4.2 aufgenommen.

Für jedes Einzelfeld und für das Gesamtfeld muss ein bezogener Schlankheitsgrad berechnet werden. Er ist abhängig von α_{ult} und α_{cr} , die auch für jedes Einzelfeld und das Gesamtfeld für die jeweils korrespondierenden Beanspruchungen bestimmt werden müssen.

Der Wert α_{ult} beschreibt den Faktor, mit der die Vergleichsspannung nach *von Mises* für Druck- und ggf. Schubbeanspruchungen multipliziert werden muss, um die Streckgrenze f_y zu erreichen. Bzgl. der Berücksichtigung von Zugbeanspruchungen vgl. Abschnitt 3.2.8.

Der Beiwert α_{cr} beschreibt den Verzweigungsfaktor unter kombinierter Beanspruchung ($\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{z,Ed}$, τ_{Ed}) und kann z.B. mittels FEM, Literatur oder der Näherungsgleichung (10.6) aus DIN EN 1993-1-5:2010 berechnet werden.

Mit dem hieraus jeweils resultierenden bezogenen Schlankheitsgrad werden sämtliche Abminderungsbeiwerte für Längs-, Quer- und Schubbeanspruchung einschl. des evtl. zu berücksichtigenden knickstabähnlichen Verhaltens bestimmt.

Die Abminderungsbeiwerte in DIN EN 1993-1-5:2010 sollten wie folgt berechnet werden:

- $\rho_{p,x}$ gemäß Abschnitt 4.4
- $\rho_{p,z}$ gemäß Anhang B
- χ_w gemäß Abschnitt 5.3, siehe hierzu auch Abschnitt 3.2.5

Die auf der sicheren Seite liegenden Näherungen, wie der Nachweis aller Spannungskomponenten mit dem minimalen Abminderungsbeiwert und die prinzipielle Anwendung der allg. Abminderungsbeiwerte gemäß DIN EN 1993-1-5:2010 Anhang B werden nicht empfohlen, um die Methode der reduzierten Spannungen im Vergleich zum Verfahren der wirksamen Querschnitte nicht noch konservativer ausfallen zu lassen.

3.2.3 Mindeststeifigkeit von Steifen

Prinzipiell sieht DIN EN 1993-1-5:2010 für die Anwendung von Abschnitt 10 keine Mindeststeifigkeit von Steifen vor. Für das Verfahren der wirksamen Querschnitte wurde jedoch eine solche Anforderung zwischenzeitlich ergänzt (vgl. auch Abschnitt 1.5), die eine bezogene Mindeststeifigkeit einer Steife wie folgt definiert:

$$\gamma_{sl,i} = \frac{10,92 \cdot I_{sl,i}}{b \cdot t^3} \geq 25$$

Es wird empfohlen, diese Forderung generell für die Ausbildung von Steifen vorzusehen. Einzelfelder sind nur durch die sie begrenzenden Steifen als gelagert anzunehmen, wenn sie die o.g. Mindeststeifigkeit erfüllen. Andernfalls ist ihre Nachgiebigkeit auch für die Einzelfeldnachweise zwingend zu berücksichtigen.

Sofern die o.g. Anforderung erfüllt ist, darf der Nachweis der Längssteifen gemäß DIN EN 1993-1-5:2010 Abschnitt 9.2.2 durch den Beulnachweis des Gesamtfeldes als erfüllt angesehen werden. Dies gilt jedoch nicht für biaxiale Druckbeanspruchungen, da die auf die Steife wirkenden Abtriebskräfte zu berücksichtigen sind, vgl. Abschnitt 3.2.7.

3.2.4 Knickstabähnliches Verhalten

3.2.4.1 Allgemeines

Mit dem Begriff ‚knickstabähnliches Verhalten‘ werden Beulfälle gekennzeichnet, die nur geringe oder keine überkritischen Tragreserven bzw. Plattentragwirkung haben.

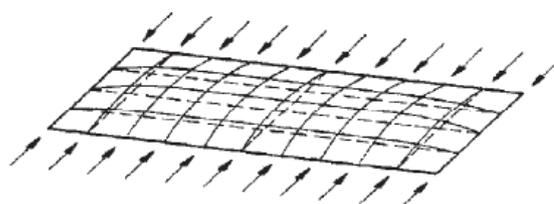


Bild 52: Knickstabähnliches Verhalten eines nicht ausgesteiften Beulfeldes, Auszug aus Bild 4.3b DIN EN 1993-1-5:2010

Bei einer sehr breiten Platte (Seitenverhältnis α sehr klein) unter Längsdruckspannung, wie in Bild 52 dargestellt, liegt knickstabähnliches Verhalten vor. In diesen Fällen kann der mittlere Bereich der Platte nicht von der Lagerung der Längsränder profitieren, sondern verhält sich wie eine Schar nebeneinander liegender Knickstäbe und die Platte hat keine überkritischen Reserven. Beim Ausbeulen ist der mittlere Bereich der Platte nur bzw. nahezu in einer Richtung gekrümmt. Eine Mobilisierung der überkritischen Tragreserven aufgrund durch die Längsränder beeinflusster Membranspannungszustände kann somit nicht erfolgen. Ausgesteifte Platte verhalten sich ähnlich wie eine sehr breite Platte, vgl. Bild 53.

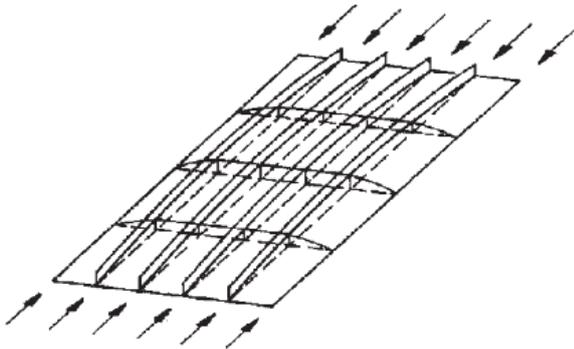


Bild 53: Knickstabähnliches Verhalten eines ausgesteiften Beulfeldes, Auszug aus Bild 4.3c DIN EN 1993-1-5:2010

Um das knickstabähnliche Verhalten abzubilden, gilt daher der Grundsatz, dass die zur Beanspruchung korrespondierenden Längsränder (parallel zur Beanspruchungsrichtung) freizusetzen sind, vgl. DIN EN 1993-1-5:2010 Abschnitt 4.5.3(1). Die Handhabung dieses Grundsatzes, z.B. bei biaxialer Beanspruchung oder bei ausgesteiften Beulfeldern, wird in den nachfolgenden Abschnitten erläutert.

Grundsätzlich gilt dabei auch die Regel, dass die Randbedingungen zur Bestimmung der elastischen kritischen Beul- und Knickspannung bei plattenartigem bzw. knickstabähnlichem Verhalten identisch sein müssen. Dies gilt sowohl im Hinblick auf die Lagerungsbedingungen (i.d.R. Platten-Querränder gelenkig gelagert bzw. Knickstab als Eulerfall II) als auch in Bezug auf die Randbeanspruchungen (i.d.R. gleiche Beanspruchung an den gegenüberliegenden Plattenrändern bzw. konst. Druckkraft für den Eulerfall II).

Insbesondere für einseitige Querdruckbeanspruchungen, wie sie z.B. bei Einschubzuständen von

Brücken am unteren Stegrand auftreten, ist diese für die Längsrichtung sinnvolle Annahme konstanter Beanspruchungen nicht mehr gegeben. In derartigen Fällen ergibt sich eine über die Steghöhe veränderliche Beanspruchung in vertikaler Richtung, vgl. hierzu auch Abschnitt 3.2.1. Für die i.d.R. anzuwendende Nachweisführung der Einzelfelder mit *Navierscher* Lagerung (aus dem Gesamtfeld herausgeschnitten, vgl. Abschnitt 3.2.6 und Bild 52) und der Annahme eines linearen Beanspruchungsverlaufs (nicht für punktförmige bzw. kleine Lasteinleitungslängen), kann die ideale Knickspannung des Stabes unter Verwendung der nachfolgenden Gleichung zur Bestimmung der Knicklänge ℓ_{cr} angewendet werden:

$$\sigma_{cr,c} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot t^2}{10,92 \cdot \ell_{cr}^2}$$

$$\text{mit: } \ell_{cr} = \ell \cdot \sqrt{(1 + 0,88 \cdot N_i/N_{i+1})/1,88}$$

Dieser Ansatz korrespondiert zu der oben beschriebenen Nachweisführung und steht im Einklang mit den zuvor benannten Grundsätzen zur Modellierung. Die Wahl der Randbedingungen bzw. ihre Konsistenz ist insofern von Bedeutung, als dass nur so eine zutreffende Interpolation für die Abminderungsbeiwerte zwischen plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten möglich ist. Eine zu konservative Berechnung der idealen Knickspannung führte **nicht** zu einer auf der sicheren Seite liegenden Bemessung, da der Wichtungsfaktor ξ überschätzt und somit der Abminderungsbeiwert bzw. die Tragfähigkeit überschätzt wird.

3.2.4.2 Getrennte Betrachtung von x- und z-Richtung

Grundsätzlich und im Unterschied zu DIN 18800-3:2008 sieht DIN EN 1993-1-5:2010 vor, dass die Abminderungsbeiwerte für die verschiedenen Beanspruchungen mit **einem** bezogenen (Gesamt-) Schlankheitsgrad berechnet werden und nicht für jede Beanspruchung unterschiedliche Schlankheiten bestimmt werden. Diese Methodik gilt jedoch nicht für die Bestimmung des Wichtungsfaktors ξ , der die Gewichtung der Abminderungsbeiwerte zwischen plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten gemäß DIN EN 1993-1-5:2010 Abschnitt 4.5.4 beschreibt. Definitionsgemäß erhält man das knickstabähnliche Verhalten, wenn man die zur betrachteten Beanspruchungsrichtung korrespondierenden Längsränder freisetzt. Bei biaxialer, gleichzeitiger Beanspruchung wären somit alle Ränder freizusetzen. Ersatzweise wird deshalb jede Beanspruchungsrichtung für sich betrachtet und somit je ein Wert ξ_x und ξ_z bestimmt.

Dies wiederum erfordert, dass zusätzlich zu dem Verzweigungsfaktor unter kombinierter Beanspruchung auch die Verzweigungsfaktoren unter alleiniger Berücksichtigung der jeweiligen Beanspruchungsrichtung für plattenartiges und knickstabähnliches Verhalten berechnet werden müssen, sodass die Wichtungsfaktoren ξ_x und ξ_z bestimmt werden können.

3.2.4.3 Randbedingungen bei vorh. Steifen

Wie bereits mehrfach erläutert wird das knickstabähnliche Verhalten i.Allg. dadurch abgebildet, dass man die zur betrachteten Beanspruchungsrichtung korrespondierenden Längsränder freisetzt. Dies ist jedoch nicht dahingehend zu verstehen, dass man auch die Lagerungen der Steifen freisetzt. Exemplarisch erläutert sei dieses am Beispiel eines längsausgesteiften Beulfeldes unter Querdruck. Setzt man die parallel zum Querdruck verlaufenden Ränder vollständig, d.h. einschließlich der Lagerung der Längssteifen frei, wirkte der Querdruck auf ein zweiseitig gelenkig gelagertes Blechfeld. Die Steifen wären im Prinzip vollkommen wirkungslos, was somit zu einer sehr kleinen idealen Knickspannung führte und infolge dessen zu einem sehr großen Wichtungsfaktor ξ_z . Dieses ist gleichzusetzen mit reinem plattenartigem Verhalten und liegt deshalb **nicht** auf der sicheren Seite.

Das Freisetzen der Längsränder ist also i.d.R. nur auf die Plattenränder, nicht aber auf die dort befindlichen Lagerungen der stabförmigen Aussteifungselemente zu beziehen. Eine entsprechende Regelung wurde in dem Normenvorschlag gemäß Abschnitt 4.2 aufgenommen.

3.2.4.4 Korrespondierende Eigenformen

Abschnitt 4.5.4(1) in DIN EN 1993-1-5:2010 beschränkt den Wichtungsfaktor ξ auf Werte zwischen 0 und 1. Null bedeutet dabei reines knickstabähnliches Verhalten und eins reines plattenartiges Verhalten. Rechnerisch kann sich ein Wert kleiner 1 ergeben, wenn die ideale Plattenbeulspannung kleiner als die Knickspannung ist. Das kann aber prinzipiell nicht der Fall sein bzw. ist dies ein Indiz dafür, dass nicht zueinander korrespondierende ideale Verzweigungsspannungen/-werte bzw. Eigenformen ins Verhältnis gesetzt wurden. Beispielsweise weil im Zuge des Gesamtfeldnachweises der kleinste Beulwert verwendet wurde, der jedoch nicht zu einer globalen Eigenform korrespondiert, sondern ein Einzelfeldbeulen beschreibt (vgl. hierzu u.a. Beispiel 1).

3.2.4.5 Wahl der Knickspannungslinie

Gemäß DIN EN 1993-1-5:2010 Abschnitt 4.5.3(5) darf bei nicht ausgesteiften Blechfeldern die Knickspannungslinie a ($\alpha = 0,21$) für das knickstabähnliche Verhalten zugrunde gelegt werden. Dies gilt für den Nachweis unausgesteifter Einzelfelder und für aus einem Gesamtfeld herausgeschnittene unausgesteifte Einzelfelder, wenn für diese eine gelenkige (*Naviersche*) Lagerung angenommen wird.

In anderen Fällen, wenn also z.B. der Einzelfeldnachweis unter Berücksichtigung der Durchlaufwirkung und unter Ausschluss des Gesamtfeldbeulens geführt wird, d.h. keine *Naviersche* Lagerung der diversen Einzelfelder sondern nur des Gesamtfeldes angesetzt wird, muss je nach vorhandener Steifenart (geschlossen oder offen) die Knickspannungslinie b oder c ($\alpha = 0,34$ oder $\alpha = 0,49$) angesetzt werden. Dies dient dazu die größeren Imperfektionen ausgesteifter Blechfelder infolge der aufgeschweißten Steifen zu berücksichtigen.

Wird das knickstabähnliche Verhalten im Rahmen eines Gesamtfeldnachweises untersucht, ist bei der Bestimmung des Abminderungsbeiwertes für Stabknicken der Beiwert α_e anzusetzen. Hierbei wird der o.g. Grundwert α für die verschiedenen Knickspannungslinien um einen Steifenanteil $0,09 e / i$ vergrößert. Dies gilt nur, wenn in der für das knickstabähnliche Verhalten maßgebenden Richtung auch eine Steife vorhanden ist, ansonsten sind die zuvor genannten Grundwerte zu berücksichtigen.

3.2.4.6 Äquivalente orthotrope Platten

In älteren Normenwerken, wie z.B. DIN 18800-3:2008 oder DASt-Richtlinie 012 (SCHEER, J., NÖLKE, H., und GENTZ, E., 1979), gab es zur Bestimmung des knickstabähnlichen Verhaltens äquivalenter orthotroper Platten folgenden Ausdruck:

$$\frac{\sigma_{Pi}}{\sigma_{Ki}} = k_{\sigma} \cdot \alpha^2 \cdot \frac{1 + \sum \delta^L}{1 + \sum \gamma^L}$$

Eine entsprechende Regelung fehlte bislang in DIN EN 1993-1-5:2010, wobei die zuvor genannte Formel auch nicht mehr verwendet werden sollte. In DIN EN 1993-1-5:2010 wurde deshalb zwischenzeitlich ein Verbesserungsvorschlag aufgenommen, der diese Lücke füllt.

Die Interpolation zwischen plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten erfolgt durch den sogenannten Wichtungsfaktor ξ . Die Berechnung des Wichtungsfaktors erfordert die Verwendung verschiedener Abschnitte aus DIN EN 1993-1-5:2010, nämlich Abschnitt 4.5.3, Anhang A.1, Anhang A.2.1

und Anhang 2.2. Aus diesem Grund wurde die Formel vereinfacht und zusammengefasst, damit der Wichtungsfaktor direkt durch eine Formel bestimmt werden kann, siehe Abschnitt 1.5.

Für längsausgesteifte Blechfelder **mit mindestens drei Längssteifen in der Druckzone** darf der Wichtungsfaktor direkt aus der folgenden Gleichung bestimmt werden:

$$\xi = k_{\sigma,p} \alpha^2 \frac{b_{sl} 1 + \delta}{b_c \gamma} \quad \text{für } \psi \neq 1$$

und

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

Alle Parameter sind in DIN EN 1993-1-5:2010 Anhang A.1 bzw. Bild A.1 angegeben.

Grundsätzlich gilt dabei die Begrenzung auf Werte zwischen null und eins entsprechend DIN EN 1993-1-5:2010 Abschnitt 4.5.4(1):

$$0 \leq \xi \leq 1$$

Für längsausgesteifte Blechfelder **mit nur einer oder zwei Längssteifen in der Druckzone** gilt für den Wichtungsfaktor folgender Zusammenhang:

$$\xi = k_{\sigma,p} \alpha^2 \frac{b_{sl,1}}{b_c} \frac{A_{sl,1} \cdot t^2}{I_{sl,1} \cdot 12 (1 - \nu^2)} - 1$$

Der Beulwert $k_{\sigma,p}$ kann dabei mithilfe von Abschnitt A.2.2 aus Anhang A von DIN EN 1993-1-5:2010 aus der maßgebenden kritischen Beulspannung $\sigma_{cr,sl}$ berechnet werden.

Für den dort angegebenen Anwendungsbereich $a \leq a_c$ ergibt sich der Wichtungsfaktor zu:

$$\xi = \frac{a^4 \cdot b \cdot t^3}{4 \cdot \pi^4 \cdot (1 - \nu^2) \cdot b_1^2 \cdot b_2^2 \cdot I_{sl,1}} \quad \text{für } a \leq a_c$$

Bei dem in DIN EN 1993-1-5:2010 Anhang A.2 beschriebenen Ersatzmodell, sollte ξ für die drei Fälle, die dort in Bild A.3 beschrieben sind, berechnet werden. Dabei ist der minimale Wert für die weitere Nachweisführung zu berücksichtigen. Sofern der maßgebende Wert derjenige der zusammengeführten Ersatzsteife ist (vgl. DIN EN 1993-1-5:2010 Bild A.3 rechts), muss für $I_{sl,1}$ die Summe der Werte für die Steifen I und II eingesetzt werden. Falls der Anwendungsbereich $a \leq a_c$ nicht erfüllt wird, z.B. im Sinne von DIN EN 1993-1-5:2010 Gl. (A.4), kann auf den zuvor genannten allgemeineren Fall für ein oder zwei Steifen im Druckbereich zurückgegriffen werden. Auch dort sind für die Werte $A_{sl,1}$ und $I_{sl,1}$ diejenigen Werte des maßgebenden Falls einzusetzen, d.h. ggf. die Summe der Steifenwerte im Falle der maßgebenden Ersatzsteife.

3.2.5 Steifigkeit von Steifenquerschnitten bei Schubbeanspruchung

Die Steifigkeit offener Längssteifen ist bei der Ermittlung des Verzweigungswertes $\alpha_{cr,\tau}$ bzw. des Beulwertes k_τ gemäß DIN EN 1993-1-5:2010 Abschnitt 5.3(4) auf 1/3 seines wirklichen Wertes zu reduzieren. Dieser Abschnitt gilt allgemein, d.h. sowohl für die Methode der wirksamen Breiten als auch für die Methode der reduzierten Spannungen. Andererseits wird für die Methode der reduzierten Spannungen in DIN EN 1993-1-5:2010 Abschnitt 10(3) Anmerkung 1 festgelegt, dass auf diese Abminderung bei Ermittlung des Verzweigungsfaktors α_{cr} für das gesamte einwirkende Spannungsfeld verzichtet werden kann. Dies bedeutet für die Methode der reduzierten Spannungen, dass die eingangs erwähnte Abminderung de facto nicht zu berücksichtigen ist, weil sie nur für reine Schubbeanspruchung ausgesteifter Beulfelder gilt.

Grundsätzlich gilt eine Abminderung auf 1/3 der Steifigkeit der Steifen nicht für geschlossene Steifen. Das Projekt COMBRI: RFCS-Forschungsprojekt 2007 hatte gezeigt, dass eine höhere Schubtragfähigkeit bei geschlossener Längssteife existiert, was dann auch durch das Amendment CEN/TC 250/SC 3; N 1824: (AM-1-5-2011-03c) im SC3 anerkannt wurde. Diese Regelung wird in Deutschland schon über den nationalen Anhang genutzt. Der Nationale Anhang schränkt diesen begrenzten Anwendungsbereich noch weiter ein, indem dort festgelegt ist, dass die Abminderung für geschlossene Längssteifen aufgrund der hohen Torsionssteifigkeit nicht vorzunehmen ist, vgl. DIN EN 1993-1-5/NA:2010-12.

3.2.6 Scheibenspannungen unter Querdruck

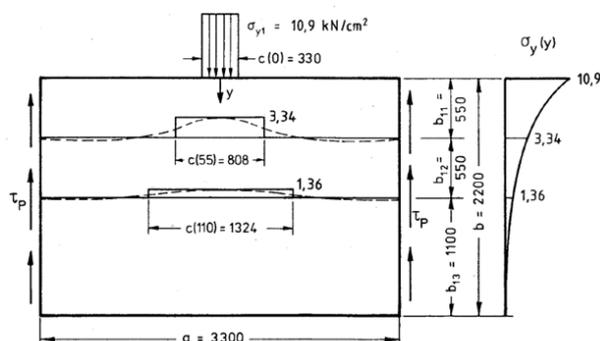
Falls die Scheibenbeanspruchungen infolge Querdruck an dem gesamten Beulfeld z.B. mittels FEM ermittelt werden, ist es zweckmäßig dieses Modell auch für die Ermittlung der Verzweigungslasten zu nutzen. Es handelt sich in diesem Fall im Hinblick auf den Einzelfeldnachweis um die Vorgehensweise a2) gemäß Bild 52, vgl. Abschnitt 3.2.9.

Sofern und alternativ zu der zuvor beschriebenen Vorgehensweise bei vorhandenen Querdruckbeanspruchungen die Einzelfeldnachweise an diversen aus dem Gesamtfeld herausgeschnittenen Einzelfeldern geführt werden, vgl. a1) in Bild 52, sind für jedes Einzelfeld die an ihren Rändern vorhandenen Querdruckbeanspruchungen anzusetzen.

Für einseitigen Querdruck zeigt Bild 54 einen möglichen Ansatz aus der Literatur, der alternativ zu einer FEM-Berechnung für die Verteilung der Querdrukspannungen näherungsweise verwendet werden kann. An dieser Stelle sei angemerkt, dass der in DIN EN 1993-1-5:2010 Abschnitt 3.2.3 dargestellte Ansatz hiermit nicht ohne Weiteres vergleichbar ist, da dort die im Gleichgewicht stehenden Spannungskomponenten nicht in Abzug gebracht werden (Lastausbreitungsansatz).

3.2.7 Gesamtfeldnachweis unter biaxialer Beanspruchung

Der Gesamtfeldnachweis im Sinne von Gl. (10.5) aus DIN EN 1993-1-5:2010 ist für den Fall biaxialen Druck z.Zt. nicht hinreichend durch Versuchsdaten abgesichert.



Die Spannungen werden im Schnitt $x = 0$ durch folgende Funktion näherungsweise beschrieben:

$$\sigma_y(y) = \frac{\sigma_{y1}}{\pi} \left[2 \arctan \frac{c}{2y} - 2 \arctan \frac{c}{4b-2y} + \frac{4cy}{c^2+4y^2} - \frac{4c(2b-y)}{c^2+(4b-2y)^2} \right]$$

Hinweise zu Gl. (3 - 11.1):

- Für $y = 0$ hat die Gleichung keine Lösung, da $\arctan \infty$ unbestimmt ist. Am Plattenrand ($y = 0$) ist für $\sigma_y(y = 0) = \sigma_{y1}$ zu setzen.
- \arctan ist im Bogenmaß (nicht in Grad) zu ermitteln.

Die Belastungslänge c ist von der Koordinate y abhängig. Mit der Näherung

$$\tau_p = F_p / (2bt) = \sigma_{y1} c(0) / (2bt)$$

folgt aus der Gleichgewichtsbedingung $\Sigma V = 0$

$$\sigma_{y1} c(0) = 2 \tau_p y + \sigma_y(y) c(y)$$

und daraus

$$c(y) = \frac{\sigma_{y1}}{\sigma_y(y)} c(0) (1 - y/b)$$

Aus den Gl. (3 - 11.1) und (3 - 11.2) erhält man im Schnitt $x = 0$

- für $y = 0$ cm: $\sigma_y(0) = \sigma_{y1} = 10,9$ kN/cm² und $c(0) = 330$ cm
- für $y = 55$ cm: $\sigma_y(55) = 3,34$ kN/cm² und $c(55) = 808$ cm
- für $y = 110$ cm: $\sigma_y(110) = 1,36$ kN/cm² und $c(110) = 1324$ cm

Bild 54: Bild 3-11.8 aus „Stahlbauten – Erläuterungen zu DIN 18800-3“

Überträgt man den für Quersteifen in DIN EN 1993-1-5:2010 Abschnitt 9.2.1 dargestellten Ansatz auf Längssteifen, ergeben sich aufgrund von

$$w_0 = \text{MIN}(a_1; a_2; b) / 300$$

sehr kleine geometrische Ersatzimperfectionen in der Größenordnung von 1-3 mm, die sich in der Ausführung der Bauteile kaum bzw. nur sehr schwer realisieren lassen. Diese sehr kleinen Werte stehen in Korrespondenz zu den Abminderungsbeiwerten für das Beulen und damit im Widerspruch zu den in DIN EN 1993-1-5:2010 Anhang C, Tabelle C.2 angegebenen Werten. Hier besteht somit noch Forschungsbedarf, um die Regelungen widerspruchsfrei zu formulieren und versuchstechnisch abzusichern.

Bis auf weiteres wird deshalb empfohlen, den Gesamtfeldnachweis, d.h. die Überprüfung der Steifentragfähigkeit unter biaxialer Beanspruchung mit einem Stabwerksmodell analog zu Beispiel 3 und Abschnitt 2.8.2 nach Th.II.O. durchzuführen.

Der Stich der geometrischen Ersatzimperfection sollte dabei gemäß DIN EN 1993-1-5:2010 Anhang C, Tabelle C.2 zu

$$w_{0p} = \frac{\text{MIN}(a; b)}{400} \quad (a, b: \text{Gesamtfeldabmessung})$$

angenommen werden. Ist knickstabähnliches Verhalten zu berücksichtigen, kann die Amplitude w_{0pc} wie folgt linear zwischen plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten interpoliert werden:

$$w_{0pc} = w_{0c} - (w_{0c} - w_{0p}) \cdot \xi$$

In Analogie zur Gl. (4.13) aus DIN EN 1993-1-5:2010 für ρ_c wäre hier u.U. auch eine entsprechende Interpolation denkbar. Aufgrund der Tatsache, dass der in Frage stehende Sachverhalt aber noch nicht hinreichend untersucht ist, wird eine konservativere lineare Interpolation bis auf weiteres empfohlen. Im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit sind die Auswirkungen dieser Empfehlung begrenzt, da sie sich i.W. auf das unmittelbar betroffene Bauteil, nämlich die Ausbildung der Steife selbst, und nicht auf das Beulfeld an sich (z.B. Stegblech), auswirken.

Für die Ermittlung der Vorkrümmung w_{0c} für knickstabähnliches Verhalten werden für die Knickspannungslinien b , c und d die Vorkrümmungen gemäß DIN EN 1993-1-1 und NDP zu Abschnitt 5.3.2(3) bzw. Tabelle NA.1 für eine elastische Querschnittsausnutzung zugrunde gelegt. Diese sind etwas günstiger als die in DIN EN 1993-1-1 Tabelle 5.1 ausgewiesenen Werte und als blaue Rauten in Bild 55 dargestellt.

Da für knickstabähnliches Verhalten der Beiwert α_e unter Berücksichtigung eines Steifenanteils $0,09 e / i$ vergrößert werden muss, siehe DIN EN 1993-1-5:2010 Abschnitt 4.5.3, können Zwischenwerte entsprechend Bild 55 quadratisch interpoliert werden. Der Stich der Ersatzimperfektion, die Interpolationsformel für den Divisor d_c und ihr Gültigkeitsbereich sind wie folgt definiert:

$$w_{0c} = a / d_c$$

mit: $d_c = 705 \cdot \alpha_e^2 - 1250 \cdot \alpha_e + 690$

für: $0,3 < \alpha_e < 0,9$

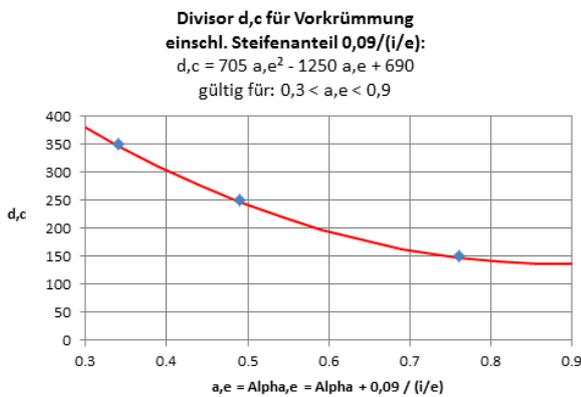


Bild 55: Divisor d_c zur Ermittlung der Vorkrümmung in Abhängigkeit von α_e

Modellierungsbedingt ist das knickstabähnliche Verhalten dabei nicht – wie ansonsten üblich – für jede Beanspruchungsrichtung getrennt, sondern unter kombinierter Beanspruchung zu berechnen. Im Hinblick auf die Details der Modellierung bzw. Berechnung wird auf die Ausführungen in Beispiel 3 gemäß Abschnitt 2.8.2 verwiesen.

Der eigentliche Nachweis erfolgt dann durch den Nachweis der Biegespannungen der Steife infolge der Schnittgrößen nach Th.II.O. und der in der Steife vorhandenen Spannung infolge der Randspannungen des Beulfeldes.

$$res. \sigma_{sl} = \sigma_{sl} + M_{sl}^{Th.II.O.} / W_{sl} \leq red. f_y$$

Da das o.g. Stabwerksmodell ohne weiteres keine Berücksichtigung der Schubspannungen erlaubt, werden diese näherungsweise durch eine Reduktion der Streckgrenze erfasst:

$$red. f_y = \sqrt{f_y^2 - 3 \cdot (\tau_{Ed} / \chi_w)^2}$$

Der Abminderungsbeiwert für Schub kann dabei, wie sonst auch üblich, unter Verwendung eines bezogenen Gesamtschlankheitsgrades berechnet

werden. Hierzu wird der Verzweigungsfaktor des Stabwerksmodell (mit Plattentragwirkung bzw. elastischer Bettung) für die kombinierte Längs- und Querbeanspruchung und der Verzweigungswert für alleinige Schubbeanspruchung (z.B. Formel, FE-Berechnung, EBPlate o.ä.) näherungsweise mithilfe von Gl. (10.6) gemäß DIN EN 1993-1-5:2010 bestimmt, vgl. auch Beispiel 3 in Abschnitt 2.8.2 c).

Darüber hinaus wird in Anlehnung an DIN EN 1993-1-5:2010 Abschnitt 9.2.1 eine Beschränkung der zusätzlichen Auslenkung zu der Imperfektion von

$$w_{sl}^{Th.II.O.} \leq a / 300$$

empfohlen.

Mit dieser Vorgehensweise sind die Abtriebskräfte infolge biaxialer Beanspruchung der Steife hinreichend nachgewiesen.

3.2.8 Zugbeanspruchung/Vorzeichen

In der aktuellen Fassung von DIN EN 1993-1-5:2010 wird in Abschnitt 10(5) Anmerkung 2 bei Zug- und Druckspannungen empfohlen, den Nachweis gemäß Gl. (10.5) unter Vernachlässigung der Zugspannungen zu führen. Dabei wird über die Berücksichtigung der Zugspannungen bei der Ermittlung des Verzweigungsfaktors nichts explizit ausgesagt. Bei dieser Vorgehensweise wird die Vergleichsspannung, gegen die die Nachweisgleichung (10.5) aus DIN EN 1993-1-5:2010 auch ohne Abminderungsbeiwerte bzw. Beuleinfluss konvergiert, unterschätzt. Es wird deshalb empfohlen, die Zugspannungen bei der Ermittlung der Verzweigungswerte zu vernachlässigen, jedoch bei der Nachweisgleichung (10.5) unter Berücksichtigung des Vorzeichens (s.u.) zu erfassen, vgl. auch Normenvorschlag in Abschnitt 4.2.

Alternativ dazu, d.h. wenn man den Einfluss der Zugspannungen vollständig berücksichtigen möchte, sollte dies sowohl bei dem Verzweigungsfaktor als auch beim Nachweis erfolgen. Dabei muss gewährleistet sein, dass die günstig wirkenden Zugspannungen auch tatsächlich vorhanden sind (zugehörige Spannungen).

Für den Nachweis unter Berücksichtigung der Zugspannungen schlägt Zizza in seiner Dissertation eine Variation des Faktors V vor, der für biaxialen Druck bereits in den Normenvorschlag gemäß Abschnitt 4.2 eingegangen ist:

$$V = 1 / (\rho_{c,x} \cdot \rho_{c,z}^{2-\xi_z}) \text{ falls } \sigma_{x,Ed} \text{ und/oder } \sigma_{z,Ed} \text{ Zug}$$

Da in der Nachweisgleichung (10.5) aus DIN EN 1993-1-5:2010 bei dem gemischten Term von $\sigma_{x,Ed}$ und $\sigma_{z,Ed}$ auch die Vorzeichen eine entscheidende Rolle spielen, sei darauf hingewiesen, dass Druckspannungen positiv und Zugspannungen negativ einzusetzen sind.

3.2.9 Empfehlungen zur Berechnung

Bild 56 fasst die grundsätzliche und empfohlene Vorgehensweise für den allgemeinen Fall eines ausgesteiften Beulfeldes und biaxialer Beanspruchung einschließlich Schub zusammen. Die Nachweisführung gliedert sich in zwei Schritte:

- a) Nachweis aller (unausgesteiften) Einzelfelder
- b) Nachweis des Gesamtfeldes bzw. der aussteifenden Elemente

zu a) Einzelfeldnachweise

Grundsätzlich bestehen zwei alternative Möglichkeiten zum Nachweis der Einzelfelder. Bei der Variante a1), vgl. Bild 56, werden alle Einzelfelder mit ihren korrespondierenden Beanspruchungen aus dem Gesamtfeld herausgeschnitten. Ihre Ränder (Begrenzung durch Steifen, Querrahmen, etc.) werden dabei als gelenkig gelagert angenommen (*Naviersche Lagerung*). Sofern knickstabähnliches Verhalten zu berücksichtigen ist, sollte die Knickspannungslinie a (KSL, $\alpha = 0,21$) angesetzt werden, vgl. Abschnitt 3.2.4.5. Die Ermittlung der Randspannungen in Querrichtung kann z.B. gemäß der in Bild 54 gezeigten Näherung oder mittels einer Scheibenberechnung erfolgen.

Dieses Vorgehen bietet den Vorteil in vielen Fällen auf eine FE-Berechnung verzichten zu können, da die Beulwerte mittels Formeln für jede Komponente aus DIN EN 1993-1-5:2010 Tabellen 4.1 und 4.2, Anhang A.3 oder aus der Literatur bestimmt werden können.

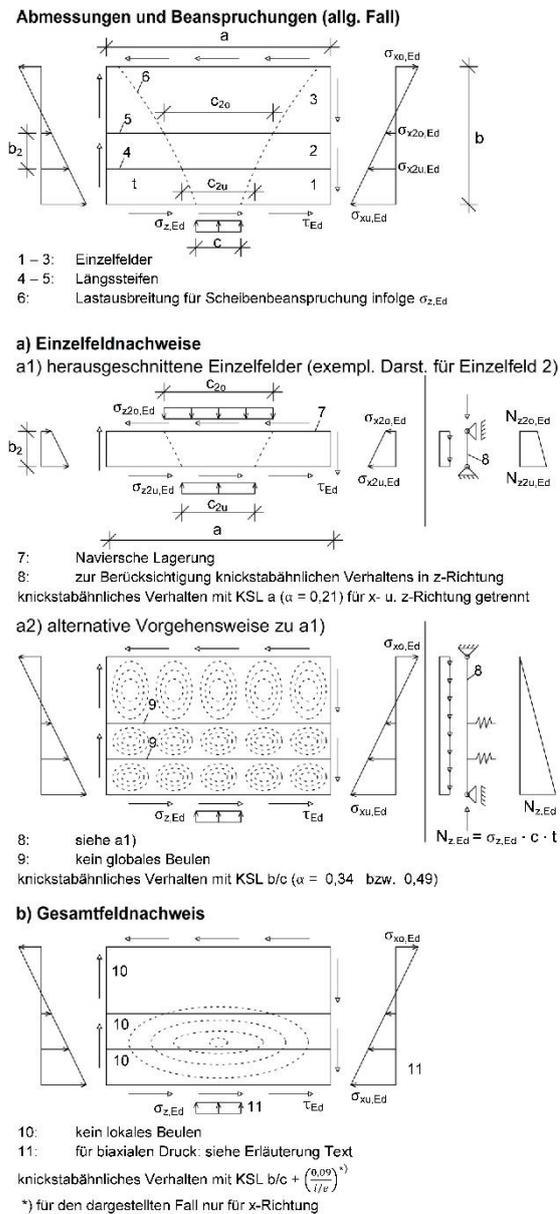


Bild 56: Übersicht über Nachweisführung

Mithilfe von DIN EN 1993-1-5:2010 Gl. (10.6) kann darüber hinaus auch der Verzweigungsfaktor unter kombinierter Beanspruchung ermittelt werden. Für derartige Fälle stellt die Gl. (10.6) oft eine gute Näherung dar. Ferner bieten Programme, wie z.B. EBPlate 2.01, die Möglichkeit auch genauere Verzweigungsfaktoren zu bestimmen. In solchen Fällen ist immer der kleinste Verzweigungsfaktor maßgebend und die Ermittlung des knickstabähnlichen Verhaltens kann ohne größeren Aufwand erfolgen, vgl. Abschnitt 3.2.4.1. Die beschriebene Vorgehensweise bietet für baupraktische Anwendungen mit vielen unterschiedlichen Beulfeldern und Beanspruchungen den Vorteil einer rationellen Bearbeitung durch Tabellenkalkulationsprogramme.

Alternativ zu diesem Vorgehen kann der Einzelfeldnachweis auch am Gesamtsystem, wie in Bild 56 a2) gezeigt, erfolgen. Hierdurch kann z.B. die günstige Durchlaufwirkung der unterschiedlichen Einzelfelder erfasst werden. Dabei ist darauf zu achten, dass die zu wählenden Eigenformen ein lokales Beulen der Einzelfelder abbilden. Sofern knickstabähnliches Verhalten zu berücksichtigen ist, muss die Knickspannungslinie b ($\alpha = 0,34$ bei Hohlsteifenquerschnitten) oder c ($\alpha = 0,49$ bei offenen Steifenquerschnitten) angesetzt werden, wobei der Anteil für die Steifen ($0,09 e / i$) aufgrund des Einzelfeldnachweises entfällt. Des Weiteren ist beim knickstabähnlichen Verhalten wichtig, dass zwar die zur betrachteten Richtung (z.B. z-Richtung) korrespondierenden Ränder freigesetzt werden, um die Plattentragwirkung auszuschalten, dabei allerdings nicht auch die Längssteifen (stabförmige Bauteile) freigesetzt werden, vgl. Abschnitt 3.2.4.3. Da plattenartiges- und knickstabähnliches Verhalten an möglichst ähnlichen Systemen mit identischen Randbedingungen zu ermitteln sind, ist z.B. die Nachgiebigkeit der Steifen bei dem stabförmigen Ersatzsystem zu berücksichtigen, vgl. Bild 56 a2) rechts.

zu b) Gesamtfeldnachweis

Sofern mindestens drei Steifen gleicher Art im Druckbereich vorhanden sind, sollte eine Berechnung als äquivalente orthotrope Platte durchgeführt werden, z.B. gemäß DIN EN 1993-1-5:2010 Anhang A.1 oder mittels einer FEM-Berechnung (ohne Einzelfeldbeulen). Kann Einzelfeldbeulen nicht ausgeschlossen werden, ist bei der Auswahl der maßgebenden Eigenform darauf zu achten, dass es sich um eine globale Eigenform handelt.

In allen anderen Fällen, d.h. mit nur einer oder zwei Steifen im Druckbereich, ist ein geeignetes diskretes Modell zu verwenden. Für Fälle von Längssteifen unter Druckbeanspruchung (ohne Querdruck) gibt DIN EN 1993-1-5:2010 Anhang A.2 eine Empfehlung zur Modellierung und Berechnung.

In Bezug auf Schubbeanspruchungen finden sich Hinweise in DIN EN 1993-1-5:2010 Anhang A.3.

Für den Sonderfall des Gesamtfeldnachweises eines längsversteiften Beulfeldes unter biaxialer Beanspruchung und ggf. Schub wird auf das in Abschnitt 3.2.7 erwähnte und am Beispiel 3 in Abschnitt 2.8.2 vorgestellte Stabwerksmodell verwiesen.

Falls knickstabähnliches Verhalten zu berücksichtigen ist, muss in Abhängigkeit der Steifenart (offen/geschlossen) die Knickspannungslinie b oder c

angewendet werden, wobei für die jeweils betrachtete Richtung und die evtl. vorhandene Steife der Anteil $0,09 e / i$ bei der Bestimmung des Beiwertes α_e zusätzlich zu berücksichtigen ist.

3.2.10 Symbol ρ_x in Nachweisformat Kapital 10

Um den Reduktionsbeiwert ρ_x oder ρ_z berechnen zu können, wird in DIN EN 1993-1-5:2010 Abschnitt 10 auf Abschnitt 4.5.4(1) verwiesen. Folgt man diesem Querverweis nach Abschnitt 4.5.4(1) findet man die Interaktionsgleichung zu Berücksichtigung des knickstabähnlichen Verhaltens. Hier wiederum wird man zur Ermittlung von ρ (plattenartiges Verhalten) auf Abschnitt 4.4(1) verwiesen, während z.B. für χ_c lediglich den Hinweis „Abminderungsbeiwert zur Berücksichtigung knickstabähnlichen Verhaltens“ vorfindet. Es sei an dieser Stelle kurz darauf hingewiesen, dass in Abschnitt 10 der Reduktionsbeiwert mit Berücksichtigung des knickstabähnlichen Verhaltens mit ρ_x oder ρ_z bezeichnet wird, während dieser in Abschnitt 4 ρ_c genannt ist und mit ρ lediglich das plattenartige Verhalten gemeint ist.

3.3 Methode der wirksamen Breiten

3.3.1 Beulwerte aus Tabellen 4.1 und 4.2

Die Skizzen der Spannungsverteilung in Tabellen 4.1 und 4.2 DIN EN 1993-1-5:2010 sind nicht einfach zu verwenden und könnten zu Verwirrung führen. Deswegen sollten die Randbedingungen und Definition von Druck- und Zugspannung klarer sein. In Bild 57 ist durch den Spiegelausschuss im Systematic review CEN/TC 250/SC 3; N 2223 die neue vorgeschlagene Skizze der Spannungsverteilung mit der Randbedingungen gezeigt.

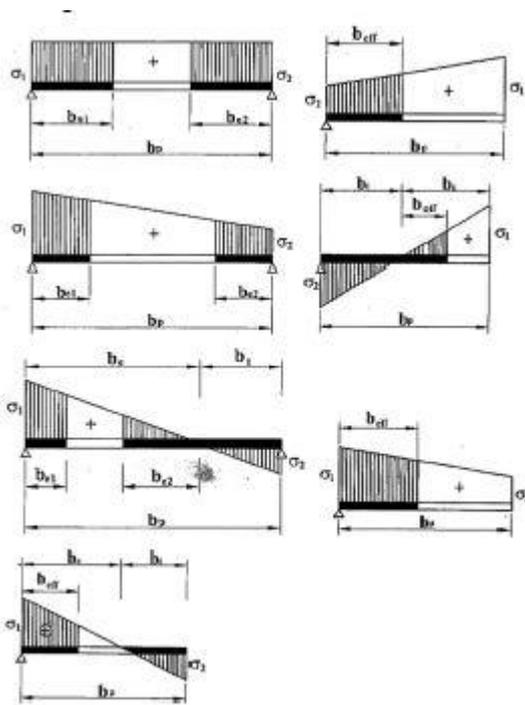


Bild 57: Neue vorgeschlagene Skizzen der Spannungsverteilung (CEN/TC 250/SC 3; N 2223)

3.3.2 Symbol $\sigma_{cr,sl}$

Das Symbol $\sigma_{cr,sl}$ wird zweimal in DIN EN 1993-1-5:2010 für zwei verschiedene kritische Spannungen verwendet. $\sigma_{cr,sl}$ wird sowohl für die kritische Knickspannung in Gl. (4.9) DIN EN 1993-1-5:2010 als auch für die kritische Beulspannung mit ein oder zwei Längssteife (Anhang A) verwendet. Es sollte ein Symbol $\sigma_{cr,p,sl}$ für die kritische Beulspannung in DIN EN 1993-1-5:2010 Anhang A verwendet werden, um das oben genannte Missverständnis zu vermeiden (CEN/TC 250/SC 3; N 2223).

3.3.3 γ_{M0} und γ_{M1} in Abschnitt 4

„In DIN EN 1993-1-5:2010 sind die Teilsicherheitsbeiwerte auf der Widerstandsseite mit $\gamma_{M0} = 1,0$ und $\gamma_{M1} 1,1$ nicht konsistent definiert, obwohl es sich um eine Bemessung von Beulgefährdeten Querschnitten der Klassen 4 handelt. In Hinblick auf das Nachweiskonzept wird der Wert $\gamma_{M0} = 1,0$ in der Regel für den Festigkeitsnachweis und $\gamma_{M1} = 1,1$ für Stabilitätsnachweise verwendet. Bedingt durch die Herleitung auf Grundlage eines Festigkeitsnachweises wurde daher für das Verfahren mit wirksamen Breiten, bei dem das Stabilitätsphänomen durch eine einfache Reduktion der geometrischer Querschnittsfläche gekennzeichnet ist, ein Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma_{M0} = 1,0$ festgelegt. Die Verfahren für Querkraft- und Querlasttragfähigkeit

sind hingegen direkt von Stabilitätskonzept abgeleitet, sodass der Nachweis mit einem Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma_{M1} = 1,1$ erfolgt (BRAUN, B., KUHLMANN, U., 2009).“

Die numerischen Untersuchungen zeigen, dass die Traglast durch das Ansetzen $\gamma_{M0} = 1,0$ überschätzt werden könnte. Dazu wird in DIN EN 1993-2/NA:2012 explizit darauf hingewiesen, dass bei der Berechnung nach der Methode der wirksamen Breiten für unausgesteifte Brückenquerschnitte $\gamma_{M1} = 1,1$ anzuwenden ist.

3.3.4 Interaktion zwischen Schubkraft, Biegemoment und Axialkraft. TWG8.3 2014-052 (AM-1-5-2013-15)

Es wurde eine erweiterte experimentelle, theoretische und numerische Untersuchung durchgeführt, bei der längsausgesteifte Träger einer Wechselwirkung aus Moment M und Querkraft V unterworfen wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass mit der aktuellen Interaktionsformel zwischen M und V die Sicherheitsanforderungen von DIN EN 1990:2010 nicht immer gegeben sind.

Der Abschnitt 7.1(1) von DIN EN 1993-1-5:2010 soll folgendermaßen ersetzt werden:

Vorausgesetzt $\bar{\eta}_3$ (siehe unten) überschreitet einen Wert von 0,5 nicht, brauchen der Bemessungswiderstand des Biegemoments und der Axialkraft nicht reduziert zu werden um die Querkraft zu berücksichtigen. Wenn jedoch $\bar{\eta}_3$ größer als 0,5 ist, sollte die Kombination der Effekte aus Biegung und Querkraft im Steg eines I-Profiles oder Hohlkastenprofils folgende Gleichung einhalten:

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,eff,Rd}}{M_{el,eff,Rd}}\right) \cdot (2 \cdot \bar{\eta}_3 - 1) \leq 1,0$$

mit

$M_{f,eff,Rd}$: ist der plastische Bemessungswiderstand des Querschnitts bestehend aus der wirksamen Fläche der Flansche

$M_{el,eff,Rd}$: ist der elastische Bemessungswiderstand des wirksamen Querschnitts bestehend aus der wirksamen Fläche der Flansche und des Steges

$$\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{el,eff,Rd}}$$

$$\bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}}$$

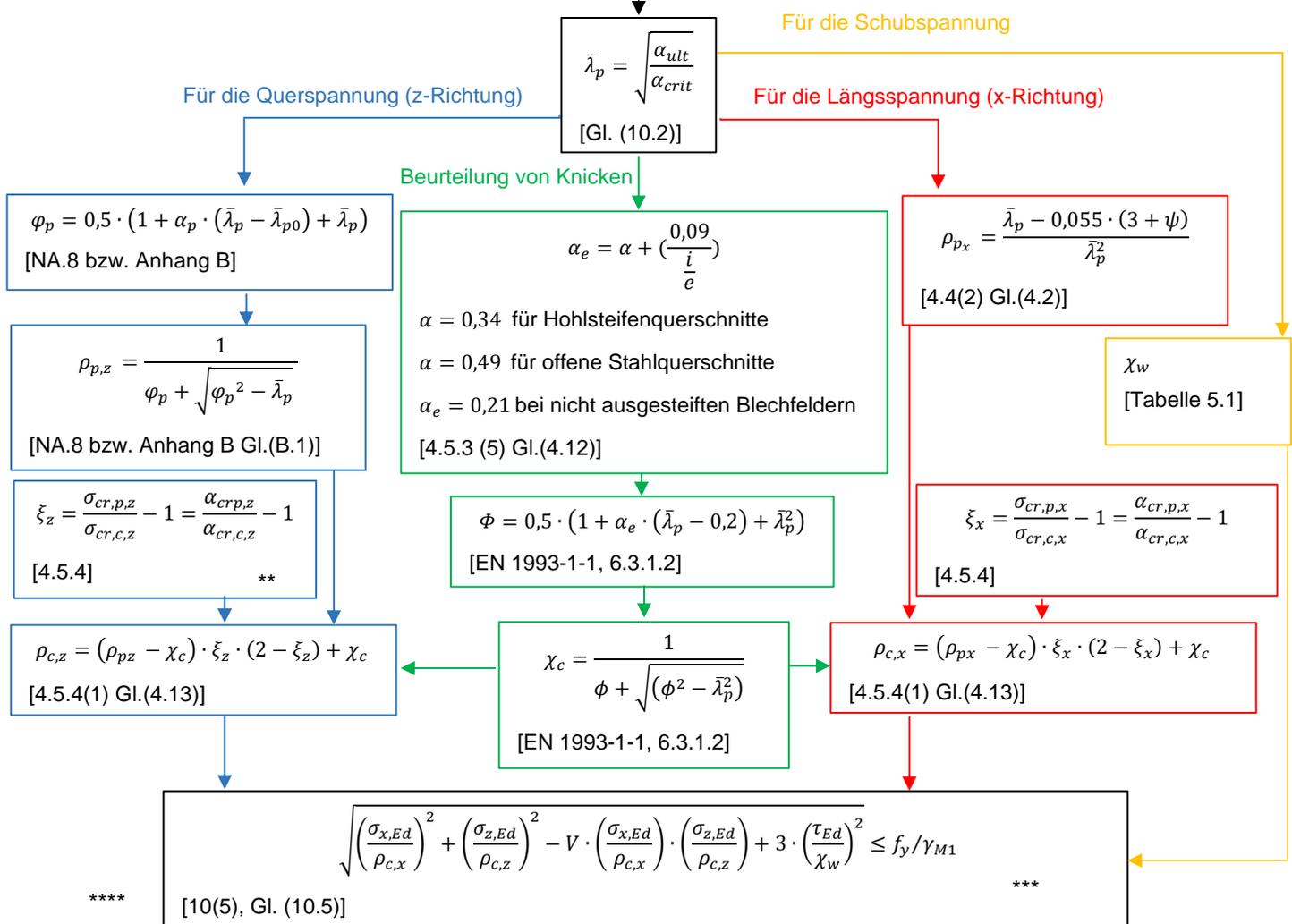
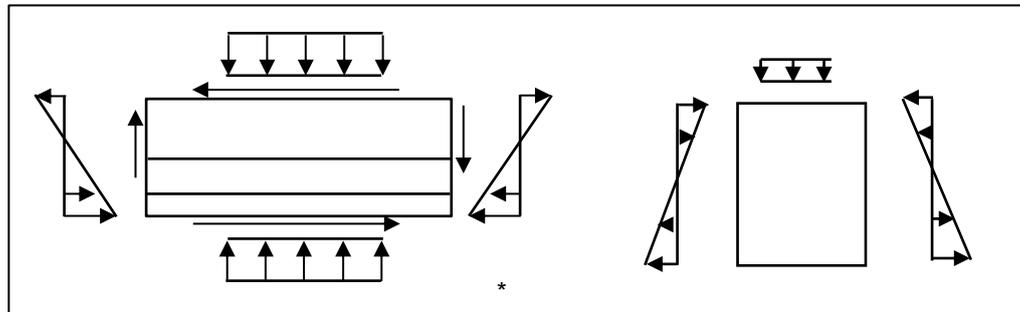
Darüber hinaus sollten die Anforderungen in den Abschnitten 4.6 und 5.5 erfüllt werden.

Die Auswirkung sollte globale Effekte zweiter Ordnung beinhalten, wenn sie benötigt werden.

Diese Beziehung ist zurzeit aber in TC250/SC3/W5 in der Diskussion, da sie für einige Anwendungsbereiche zu konservativ erscheint.

3.4 Flussdiagramm für die Anwendung von DIN EN 1993-1-5 Abschnitt 10

Abschnitt 10: Reduzierte Spannung mit oder ohne Querspannung



Anmerkungen zu dem Flussdiagramm:

- * Es sind für ein ausgesteiftes Bleches immer Einzelfeldnachweise und ein Gesamtfeldnachweis zu führen.
- ** Bei Querdruck siehe Abschn. 3.2.4 und 3.2.6.
- *** V Faktor ist in Abschn. 1.5 (Beitrag zu Abschnitt 10, (Gleichung 10.5)) definiert.
- **** Bei Querdruck muss die Längssteifen, wie in Abschn. 3.2.7 beschrieben wurde, nachgewiesen werden.

4 Ausarbeitung einer verbesserten Version von DIN EN 1993-1-5 Abschnitt 10

4.1 Einleitung

Um Fehlanwendungen von Abschnitt 10 zu vermeiden und um die Anwenderfreundlichkeit, Sicherheit, Übersichtlichkeit und Klarheit der Regeln in DIN EN 1993-1-5 Abschnitt 10 zu gewährleisten, ist eine redaktionelle Überarbeitung von DIN EN 1993-1-5 dringend notwendig. Von Europäischer Seite ist nicht mit Verbesserungsvorschlägen zu rechnen, es besteht im Gegenteil eher die Gefahr der Abschaffung von Abschnitt 10. Aus diesem Grund ist tatsächlich eine Überarbeitung von deutscher Seite erforderlich.

Der Entwurf des Abschnitts 10 gemäß dem deutschen Spiegelausschusses und systematic review (**NA 005-08-16AA Stahlbrücken N1928**) wurde hierzu als Basis genommen und zur größeren Klarheit entsprechend dem Flussdiagramm umstrukturiert und in einigen Absätzen detailliert.

4.2 Normenvorschlag (englisch)

10. General method

10.1. General

(1) This method is an alternative to the effective width method specified in section 4 to 7. It can be used for unstiffened or stiffened panels.

(2) Stiffeners and detailing of plate panels should be designed according to section 9.

(3) The resistance of the plate is determined under the corresponding complete stress field, which means that $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{z,Ed}$ and τ_{Ed} are considered as acting together. It can be used for all kinds of cross section with stiffened and unstiffened plates by determining the stress limits, see 10.2.

NOTE: Applying this method, the stress limits of the weakest part of the cross section may govern the resistance of the full cross section.

(4) For plates with stiffeners the global buckling of the stiffened panel and the local buckling of the various subpanels between the stiffeners should be verified, see 10.2

NOTE: Global buckling also involves the buckling of the stiffeners and panel.

10.2. Buckling verification

(1) The buckling verification of unstiffened and stiffened panels should be satisfied by the following equation:

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\rho_{c,x}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{\rho_{c,z}}\right)^2 - V \cdot \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\rho_{c,x}}\right)\left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{\rho_{c,z}}\right) + 3\left(\frac{\tau_{Ed}}{\chi_w}\right)^2} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (10.1)$$

where

$V = \rho_{c,x} \cdot \rho_{c,z}$ when $\sigma_{x,Ed}$ and $\sigma_{z,Ed}$ are both compression, else $V = 1$

γ_{M1} the partial factor applied to this method.

$\rho_{c,x}$, $\rho_{c,z}$, χ_w reduction factors based on the relevant plate slenderness $\bar{\lambda}_p$, see 10.4.

(2) In case of panels with tension the effect should be neglected for determining α_{cr} and α_{ult} . However, it should be considered in the verification equation (10.1), if not a more detailed verification is done.

NOTE: The National Annex may give further information on how to consider tension effects.

Drafting note: new rules have been developed for considering tension. These might be included if accepted by WG5 and SC3.

10.3. Plate slenderness

(1) The plate slenderness $\bar{\lambda}_p$ should be taken for the global or respective local buckling from:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}} \quad (10.2)$$

where

$\alpha_{ult,k}$ minimum load amplifier for the design loads to reach the characteristic value of resistance of the most critical point, see 10.3(2).

α_{cr} load amplifier for the design loads to reach the relevant elastic critical load under the corresponding complete stress field, see 10.3(3).

(2) In determining $\alpha_{ult,k}$ the yield criterion may be used for resistance:

$$\alpha_{ult,k} = \frac{f_y}{\sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + \sigma_{z,Ed}^2 - \sigma_{x,Ed} \cdot \sigma_{z,Ed} + 3 \cdot \tau_{Ed}^2}} \quad (10.3)$$

where

$\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{z,Ed}$ and τ_{Ed} are the components of the stress field in the ultimate limit state.

NOTE: By using the equation (10.3), it is assumed that the resistance is reached when yielding occurs without plate buckling.

NOTE: if $\sigma_{x,Ed}$ and $\sigma_{z,Ed}$ are compression stresses, they should be calculated with positive sign. For considering the tension stresses, see 10.2(2).

(3) The critical load amplifier α_{cr} can be obtained from appropriate buckling charts or relevant computer simulations.

Where α_{cr} values for the complete stress field are not available and only $\alpha_{cr,i}$ values for the various components of the stress field $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{z,Ed}$ and τ_{Ed} can be used, the α_{cr} value may be determined from:

$$\alpha_{cr} = \frac{1}{\frac{1+\psi_x}{4\alpha_{cr,x}} + \frac{1+\psi_z}{4\alpha_{cr,z}} + \sqrt{\left(\frac{1+\psi_x}{4\alpha_{cr,x}} + \frac{1+\psi_z}{4\alpha_{cr,z}}\right)^2} + \frac{1-\psi_x}{2\alpha_{cr,x}^2} + \frac{1-\psi_z}{2\alpha_{cr,z}^2} + \frac{1}{\alpha_{cr,\tau}^2}} \quad (10.4)$$

where

$$\alpha_{cr,x} = \frac{\sigma_{cr,x}}{\sigma_{x,Ed}}$$

$$\alpha_{cr,z} = \frac{\sigma_{cr,z}}{\sigma_{z,Ed}}$$

$$\alpha_{cr,\tau} = \frac{\tau_{cr}}{\tau_{\tau,Ed}}$$

For definition of critical stresses $\sigma_{cr,x}$, $\sigma_{cr,z}$, τ_{cr} and stress ratio ψ_x , ψ_z see section 4 and 5.

NOTE: For calculating α_{cr} for the complete stress field, the stiffened plate may be modelled without reduction of the second moment of area of longitudinal stiffeners as specified in 5.3(4).

(4) For unstiffened panels only one plate slenderness has to be determined. In this case, the used load amplifier α_{cr} corresponds to the first eigenmode of the plate. For stiffened panels at least the first local $\alpha_{cr,local}$ for the subpanels and the first global eigenmode $\alpha_{cr,global}$ for the whole panel have to be calculated.

10.4.Reduction factors

- (1) The relevant reduction factors should be obtained using the same slenderness $\bar{\lambda}_p$ for the determination of the individual reduction factors for each component

$\rho_{c,x}$	reduction value for longitudinal stresses taking into account column-like behaviour where relevant, see 10.4(2).
$\rho_{c,z}$	reduction value for transverse stresses taking into account column-like behaviour where relevant, see 10.4(3).
χ_w	reduction value for shear stresses, see 10.4(4).

- (2) The reduction value $\rho_{c,x}$ for buckling for longitudinal stresses may be determined according to 4.4(2). Column-like behaviour has to be considered according to 4.4(6) for unstiffened panels or subpanel and 4.5.4 for the interaction between plate and column buckling in general, see 10.4(5).

NOTE: Instead of the buckling curves given in 4.4(2), the general buckling curve in Annex B.1 can be used.

- (3) The reduction value $\rho_{c,z}$ for transverse stresses should be determined from B.1(3). Column-like behavior has to be considered according to 4.4(6) for unstiffened panels or subpanel and 4.5.4 for the interaction between plate and column buckling in general, see 10.4(5).

NOTE: For consistency, section 6 should not be applied.

- (4) The reduction value χ_w for buckling for shear stresses may be determined according to 5.2(1).

NOTE: Instead of the buckling curves given in 5.2(1), the general buckling curve in Annex B.1 can be used.

- (5) For the determination of the reduction factor $\rho_{c,x}$ and $\rho_{c,z}$ acc. to 4.5.4(1) the value for χ_c of column like buckling behaviour should be calculated according to 4.5.3 under the complete corresponding stress field using the same plate slenderness $\bar{\lambda}_p$ acc. to formula (10.2) as taken for determination of ρ_x and ρ_z . The weighting factor ξ has then to be calculated via $\sigma_{cr,p}$ and $\sigma_{cr,c}$ obtained from the particular static sub-system of the panel under unidirectional loading (only $\sigma_{x,Ed}$ or $\sigma_{z,Ed}$, resp.).

NOTE: For global buckling of stiffened panel under biaxial compression for calculation of $\sigma_{cr,c}$ in the transverse direction the support of longitudinal stiffeners should not be set free as mentioned in 4.5.3 (1).

- (6) For local buckling of subpanels the same column buckling curve may be used as in unstiffened panels ($\alpha=0,21$ (curve a)).

In calculation of $\chi_{c,z}$ in transverse direction for local buckling under considering of the stiffeners, the corresponding column buckling curve b or c ($\alpha=0,34$ (curve b) for closed and $\alpha=0,49$ (curve c) for open section stiffeners) should be used.

4.3 Vorschläge für Amendments CEN TC250/SC3

In Rahmen dieser Arbeit werden zwei Ergänzungen zur Norm DIN EN 1993-1-5:2010 als Amendments vorgeschlagen.

AM-1-5-2016-XXX						
Subject	Application limits for Annex					
Clause No./ Subclause No./ Annex	Annex B, B.1(3)					
Reason for amendment	Due to missing application limits equation (B.1) may have negative values in the root.					
Proposed change	<p>Add the following sentence within the Note of clause B.1(3)</p> <p>NOTE: The reduction factor ρ may be obtained as follows:</p> <p>For $\bar{\lambda}_p \leq \bar{\lambda}_{p0}$ then $\rho = 1$ otherwise:</p> $\rho = \frac{1}{\phi_p + \sqrt{\phi_p^2 - \bar{\lambda}_p}} \quad (\text{B.1})$ <p>where $\phi_p = \frac{1}{2}(1 + \alpha_p(\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_{p0}) + \bar{\lambda}_p)$</p> <p>and $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}}$</p>					
Background information / Literature	Due to missing application limits equation (B.1) may have negative values in the root.					
Responsible EG Members	U. Kuhlmann					
Stage	Under discussion in WG	Ready for vote in WG	Vote in WG	Sent to CEN/TC250 SC3	Remarks CEN/TC250 SC3	Vote CEN/TC250 SC3
	X					

AM-1-5-2016-XXX	
Subject	Minimum requirements for longitudinal stiffeners.
Clause No./ Subclause No./ Annex	Section 9.2.2
Reason for amendment	Currently no information or note for verification of the longitudinal stiffeners under transverse stresses is given in the section 9.2.2.

Proposed change	<p>Add the following clause in section 9.2.2</p> <p>(4) The deviation forces induced by transverse plate loading have to be considered for the verification of the longitudinal stiffeners.</p>					
Background information / Literature	Currently no information or note for verification of the longitudinal stiffeners under transverse stresses is given in the section 9.2.2.					
Responsible EG Members	<i>U. Kuhlmann</i>					
Stage	Under discussion in WG	Ready for vote in WG	Vote in WG	Sent to CEN/TC250 SC3	Remarks CEN/TC250 SC3	Vote CEN/TC250 SC3
	X					

5 Zusammenfassung

Die Bemessung schlanker plattenförmiger Bauteile erfolgt nach DIN EN 1993-1-5:2010, die dem Tragwerksplaner grundsätzlich zwei unterschiedliche Nachweiskonzepte für die Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit zur Auswahl stellt. Ein Nachweisformat „Methode der wirksamen Breiten“ (MWB) weist die Einzelbeanspruchungen nach, wobei es für die Einzelbeanspruchungen die Ausnutzung über-kritischer Tragreserven zulässt, und unterwirft dann die Ausnutzungsgrade in einem zweiten Schritt einem Interaktionskriterium zur Berücksichtigung verschiedener Einwirkungen.

Das zweite Nachweisformat „Methode der reduzierten Spannungen“ (MRS) ist ein klassisches Konzept, das die Spannungen im Blech begrenzt und diese nach neueren Regelwerken wieder einer Art von von-Mises Vergleichsspannung gegenüberstellt. Dieses Berechnungsverfahren gilt aus der Entstehungsgeschichte heraus als das in Deutschland traditionell angewendete. Allerdings wird die Spannungsumlagerung in weniger ausgenutzte Querschnittsteile im Gegensatz zur Methode der wirksamen Breiten nicht berücksichtigt, was tendenziell zu konservativeren Ergebnissen führt. Andererseits handelt es sich bei der Methode der reduzierten Spannungen um ein „allgemeines Verfahren“, das es z.B. auch für veränderliche Querschnitte anwendbar macht und die Überlagerung komplexer mehraxialer Spannungszustände erlaubt.

In dieser Arbeit wurde zuerst der aktuelle Stand der Normung und wiedergegeben. Dabei wurde auf die Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen der Methode der wirksamen Breiten und der Methode der reduzierten Spannungen eingegangen. Es wurde dabei sowohl die neuen Entwicklungen in DIN EN 1993-1-5:2010, Abschnitt 4 – 7 bzw. Abschnitt 10, wie sie in den Beschlüssen von TC250/SC3 ((NA005-08-23AA) Stahlbrücken N0604 (2015)) vorliegen, berücksichtigt, wie auch die Regelungen des nationalen Anhangs zu DIN EN 1993-1-5/NA:2010.

Neue Entwicklungen bzw. Änderungen zu EN 1993-1-5 wurden in der Arbeitsgruppe TC250/SC3/WG5 ausführlich diskutiert und in dem für Eurocode 3 zuständigen Gremium TC250/SC3 beschlossen. Diese Änderungen sind im Rahmen dieser Forschungsvorhaben zusammengefasst und ihre Anwendung an Beispielen gezeigt.

Um die Nachweiskonzepte zu vergleichen, sind Beispiele aus (SCHEER, J, GENTZ, E, 1994) von Interesse ausgewählt, da diese Standardbeispiele der früheren Normengenerationen sind und hierzu auch die Ergebnisse bzw. Nachweise auf Grundlage von

DAST-Richtlinie 012 (SCHEER, J., NÖLKE, H., und GENTZ, E., 1979) und DIN 18800-3:2008: vorliegen. Somit wäre auch eine Vergleichbarkeit mit den früheren Regelungen gegeben. In diesem Zusammenhang sind Fälle für Steg- und Bodenblechnachweise durchgeführt. Diese beinhalten alle wesentlichen und diskussionswürdigen Fragestellungen im Zusammenhang mit der Auslegung und Anwendung der geltenden Vorschriften. Bei der Bearbeitung der Beispiele wurden beide Nachweiskonzepte MWB und MRS detailliert dargestellt und Annahmen für den Nachweis der kritischen Punkte ausführlich diskutiert.

Darüber hinaus sind In den vergangenen Jahren in einer ganzen Reihe von Veröffentlichungen, einschlägige Rechenbeispiele veröffentlicht worden, die Anwendung der Methode der wirksamen Breite und Methode der reduzierten Spannung nach DIN EN 1993-1-5:2010 enthalten. Zu nennen sind hier: das ECCS Design Manual (BEG, D., et al., 2010), die Handbücher des europäischen Forschungsvorhabens COMBRI+ (KUHLMANN, U., et al., 2008), der Schlussbericht des einschlägigen DAST-Aif Vorhabens (SEDLACEK, G., et al., 2008) und verschiedene Stahlbaukalenderbeiträge (TIMMERS, R., et al. 2015) und (BRAUN, B., KUHLMANN, U., 2009) und aus einem noch laufenden RFCS-Forschungsvorhaben OPTBri (REIS, A., PEDRO, J.O. et al.).

Anhand von o.g. Beispielen wurden die beiden oben erwähnten Bemessungsmethoden miteinander verglichen und ihre Anwendung detailliert erläutert. Hierbei wurden Unterschiede in den Ausnutzungen untersucht und mögliche Defizite oder (Fehl-) Interpretationen aufgezeigt.

In Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden zu allen wesentlichen Punkten der Nachweisführung Hinweise und Klarstellungen gegeben. Dieser Stand wird durch DIN EN 1993-1-5:2010 sowie die bereits zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Forschungsberichts (Mai 2016) in den Normengremien verabschiedeten Änderungen definiert. Die Erläuterungen beziehen sich überwiegend auf die Regelungen in Bezug auf die Methode der reduzierten Spannungen (DIN EN 1993-1-5:2010 Abschnitt 10). Es seien an dieser Stelle einige Klarstellungen beispielhaft genannt:

- Einzelfeld- und Gesamtfeldnachweis
- Bezogener Schlankheitsgrad und Abminderungsbeiwerte
- Mindeststeifigkeit von Steifen
- Knickstabähnliches Verhalten
- Steifigkeit offener Steifenquerschnitte bei Schubbeanspruchung
- Scheibenspannungen unter Querdruck

- Gesamtfeldnachweis unter biaxialer Druckbeanspruchung
- Gesamtfeldnachweis unter biaxialer Druckbeanspruchung
- Berücksichtigung der Zugbeanspruchung

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden anschließend Konzepte entwickelt und beschrieben, um die Anwenderfreundlichkeit, Sicherheit, Übersichtlichkeit und Klarheit der Regeln in DIN EN 1993-1-5:2010 Abschnitt 10 zu gewährleisten und um Fehlanwendungen zu vermeiden sowie die Akzeptanz dieser Methode im Ausland zu fördern. Hierfür wurde der Abschnitt 10 deutlich erläutert und textlich überarbeitet. Ein Vorschlag wurde redaktioneller Änderungen für eine verbesserte Version dieses Abschnittes ausgearbeitet, der im Rahmen der Überarbeitung der Eurocodes in die kommende Generation von DIN EN 1993-1-5 einfließen kann.

6 Danksagung

Das Forschungsprojekt „Untersuchungen zum Beulnachweis nach DIN EN 1993-1-5“ (FE 89.0313/2015) wurde im Namen des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) erarbeitet. Die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) hat die Arbeiten fachlich und organisatorisch begleitet.

Die Autoren danken der BASt und dem BMVI für die Unterstützung.

7 Literaturverzeichnis

7.1 Normen

DIN 4114-2:1953: Stahlbau; Stabilitätsfälle (Knickung, Kippung, Beulung), Berechnungsgrundlagen, Richtlinien.

DIN 18800-3:2008: Stahlbauten – Teil 3: Stabilitätsfälle – Plattenbeulen.

DIN EN 1990:2010, Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002+A1:2005+A1:2005/AC2010.

DIN EN 1993-1-1:2010: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1993-1-1:2005+AC:2009

DIN EN 1993-1-5:2010: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile; Deutsche Fassung EN 1993-1-5:2006+AC:2009

DIN EN 1993-1-5/NA:2010, Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile.

DIN EN 1993-1-5/NA:2016, Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile.

DIN EN 1993-1-8:2010, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen; Deutsche Fassung EN 1993-1-8:2005 + AC:2009.

DIN EN 1993-1-9:2010: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-9: Ermüdung; Deutsche Fassung EN 1993-1-9:2005 + AC:2009.

DIN EN 1993-2:2010: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 2: Stahlbrücken; Deutsche Fassung EN 1993-2:2006+AC:2009.

DIN EN 1993-2/NA:2012: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 2: Stahlbrücken, Nationaler Anhang

DIN EN 1993-6:2010: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 6: Kranbahnen; Deutsche Fassung EN 1993-6:2007 + AC:2009.

7.2 Bücher, Beiträge etc.

(BEG, D., et al., 2010): Design of plated structures. Eurocode 3: design of steel structures, part 1 - 5:

design of plated structures. 1st ed. Berlin, Brüssel: Ernst; ECCS European Convention for Constructional Steelwork. ECCS eurocode design manuals. ISBN 3433029806.

(BRAUN, B., KUHLMANN, U., 2009): Braun, B.; Kuhlmann, U.: Bemessung und Konstruktion von aus Blechen zusammengesetzten Bauteilen. In: Kuhlmann U. (Hrsg.): Stahlbau-Kalender 2009, Ernst & Sohn, 2009.

(BRAUN, B., 2010): Stability of steel plates under combined loading. Mitteilung des Instituts für Konstruktion und Entwurf Nr. 2010-3, Dissertation Universität Stuttgart, 2010.

COMBRI: RFCS-Forschungsprojekt 2007: Competitive Steel and Composite Bridges by Improved Steel Plated Structures. Schlussbericht. RFS-CR-03018.

(Erläuterungen zu DIN 18800-3):(SCHEER, J, GENTZ, E, 1994): Erläuterung zu DIN 18800 Teil 3. In LINDNER, J (ed.): Stahlbauten. Erläuterungen zu DIN 18800 Teil 1 bis Teil 4. Berlin, Wien, Zürich, Berlin: Beuth; Ernst. ISBN 3-410-13024-1.

(JOHANSSON, B., et al. 2007): Commentary and worked examples to EN 1993-1-5 "Plated structural elements".

(KLÖPPEL, SCHEER): Beulwerte ausgesteifter Rechteckplatten; Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1960.

(KUHLMANN, U., et al., 2008): Forschungsprojekt RFS-CR-03018 „Competitive Steel and Composite Bridges by Improved Steel Plated Structures, COMBRI-HANDBUCH BRÜCKEN. Teil I: Anwendung von Eurocode-Regelungen. 1st ed. www.stb.rwth-aachen.de/projekte/2007/COMBRI+/docs/COMBRI_Design_Manual_Part_I_German.pdf (12.09.2016).

(Leitfaden zu DIN-FB 103): Stahlbrücken, Sedlacek, G.; Eisel, H.; Hensen, W.; Kühn, B.; Paschen, M.; Ernst & Sohn 2003.

(MÜLLER, C., 2003): Zum Nachweis ebener Tragwerke aus Stahl gegen seitliches Ausweichen. Dissertation.

(REIS, A., PEDRO, J.O. et al.); Forschungsprojekt RFCS-CT-2014-00026: OPTIBri - Optimal use of High Strength Steel grades within bridges. Deliverable D1.1 Report on Design A and Deliverable D1.1 Report on Pre-Design B- European Commission Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel Technical Group: TGS8

(SCHEER, J., NÖLKE, H., 2001a): Neuer Vorschlag zum Nachweis der Beulsicherheit von Platten unter mehreren Randspannungen. Festschrift G. Valtinat: 261–274.

(SCHEER, J., NÖLKE, H., 2001b): Zum Nachweis der Beulsicherheit von Platten bei gleichzeitiger Wirkung mehrerer Randspannungen. Stahlbau, 70, 9: 718–729

(SCHEER, J., GENTZ, E., 1994): Erläuterung zu DIN 18800 Teil 3. In LINDNER, J (ed.): Stahlbauten. Erläuterungen zu DIN 18800 Teil 1 bis Teil 4. Berlin, Wien, Zürich, Berlin: Beuth; Ernst. ISBN 3-410-13024-1.

(SCHEER, J., NÖLKE, H., und GENTZ, E., 1979): DAST-Richtlinie 012, Beulsicherheitsnachweise für Platten. Grundlagen, Erläuterungen, Beispiele. Köln: Stahlbau Verlags-GmbH.

(SEDLACEK, G., et al., 2008): Entwicklung und Aufbereitung wirtschaftlicher Bemessungsregeln für Stahl- und Verbundträger mit schlanken Stegblech im Hoch- und Brückenbau.

(SEITZ, M., 2005): Tragverhalten längsversteifter Blechträger unter querverstärkter Krafteinleitung. Mitteilung des Instituts für Konstruktion und Entwurf Nr. 2005-2, Dissertation Universität Stuttgart, 2005.

(SINUR, F. 2011): Vzdržljivo ojačani polnostenski nosilci pri interakciji velikih upogibnih in strižnih obremenitev : doktorska disertacija = Behaviour of longitudinally stiffened plate girders subjected to bending-shear interaction : Dissertation; Ljubljana.

(TIMMERS, R., et al. 2015) Stabilitätsnachweise nach EN 1993-1-5 – Theorie und Beispiele. In KUHLMANN, U (ed.): Stahlbau-Kalender 2015. Berlin: Ernst, Wilhelm & Sohn. ISBN 3433031045

(TIMMERS, R., 2015): Zur direkten Bestimmung der Traglastkurve nicht ausgesteifter und ausgesteifter Beulfelder durch Anwendung der Fließlinientheorie. DISSERTATION. Innsbruck.

(TIMMERS, R., 2016): Anwendung und Vergleich der Nachweiskonzepte zum Plattenbeulen nach EN 1993-1-5. Stahlbauseminar der Hochschule Biberach.

(ZIZZA, A., 2016): Buckling behaviour of unstiffened and stiffened steel plates under multiaxial stress states. Dissertation in Bearbeitung. Universität Stuttgart.

7.3 Sonstige Veröffentlichungen

EBPlate 2.01: Im Rahmen des COMBRI-Forschungsprojekts entwickelte Software zur Ermittlung der elastischen kritischen Spannungen in Platten. EBPlate steht unter der Internetadresse von CTICM als kostenloser Download zur Verfügung: www.cticm.com. CTICM, 2013.

RSTAB 8.04: Dlubal Software GmbH, Am Zellweg 2, 93464 Tiefenbach

7.4 Amendments CEN TC250/SC3

(CEN/TC 250/SC 3; N 2128 (2015)): AM-1-5-2015-02 -Amendment for EN 1993-1-5_Chapter 10 Biaxial Compression incl. background.

Dokument aus NABau Spiegelausschuss (NA005-08-16AA Stahlbrücken N1846) (2015): Kommentare Systematic review 1993-1-5 von PRB. CEN/TC 250.

Dokument aus NABau Spiegelausschuss (NA 005-08-16AA Stahlbrücken N1928) (2015): Annex to German Systematic review, Proposal for the general improvement of section 10 in EN 1993-1-5.

Dokument aus NABau Spiegelausschuss (NA005-08-23AA) Stahlbrücken N0604 (2015): Beschlossene Amendments für 1993-1-5. CEN/TC 250/SC 3.

CEN/TC 250/SC 3; N 1881: (AM-1-5-2011-02) - Amendment on EN 1993-1-5: Resistance of longitudinally stiffened plates subjected to direct stresses; Interaction between plate and column buckling.

CEN/TC 250/SC 3; N 1881: (AM-1-5-2011-03b) - Amendment on EN 1993-1-5: Shear resistance of longitudinally stiffened girders; Closedsection stiffeners.

CEN/TC 250/SC 3; N 1881: (AM-1-5-2011-07) - Amendment on EN 1993-1-5: Corrugated web girders; Transverse bending moment

CEN/TC 250/SC 3; N 1881: (AM-1-5-2011-08) - Amendment on EN 1993-1-5: Allowable panel curvature.

CEN/TC 250/SC 3; N 1881: AM-1-5-2012-13) - Amendment on EN 1993-1-5: Definition of A_{si} .

CEN/TC 250/SC 3; N 1881: (AM-1-5-2011-09) - Amendment on EN 1993-1-5: Corrugated web girders; Patch loading resistance.

CEN/TC 250/SC 3; N 1933: (AM-1-5-2013-16) - Amendment on EN 1993-1-5: Interaction between transverse force, bending moment and shear force.

CEN/TC 250/SC 3; N 1950: (AM-1-5-2011-03c) - Amendment on EN 1993-1-5: Shear resistance of longitudinally stiffened girders; 1/3-reduction for open-section stiffeners.

CEN/TC 250/SC 3; N 2127: (AM-1-5-2015-1) - Amendment on EN 1993-1-5: Effective loaded length for patch loading type c).

CEN/TC 250/SC 3; N 2128: (AM- 1-5-2015-02) - Amendment on EN 1993-1-5: Effective loaded length for patch loading type c).

CEN/TC 250/SC 3; N 2040: (AM-1-5-2011-07) - Amendment on EN 1993-1-5: Corrugated web girders.

CEN/TC 250/SC 3; N 2040: (AM-1-5-2013-14) - Amendment on EN 1993-1-5: Definition of stiffeners cross-sections in chapter 9.

CEN/TC 250/SC 3; N 2040: (AM-1-5-2014-01) - Amendment on EN 1993-1-5: Shear buckling coefficients.

CEN/TC 250/SC 3; N 2040: (AM-1-5-2014-02) - Amendment on EN 1993-1-5: Calculation of effective width for stress levels below the yield strength.

CEN/TC 250/SC 3; N 2040: (AM-1-5-2014-03) - Amendment on EN 1993-1-5: Welding of the longitudinal stiffeners.

CEN/TC 250/SC 3; N 1824: (AM-1-5-2011-03a) - Amendment on EN 1993-1-5: Shear resistance of longitudinally stiffened girders; Requirement of hinged boundary conditions for the use of shear buckling curves.

CEN/TC 250/SC 3; N 1824: (AM-1-5-2011-03c) - Amendment on EN 1993-1-5: Shear resistance of longitudinally stiffened girders; 1/3-reduction for open-section stiffeners.

CEN/TC 250/SC 3; N 1824: (AM-1-5-2011-04) - Amendment on EN 1993-1-5: Resistance of longitudinally stiffened plates subjected to direct stresses; Effective area.

CEN/TC 250/SC 3; N 1824: (AM-1-5-2011-06) - Amendment on EN 1993-1-5: Resistance of steel plate girders subjected to patch loading.

CEN/TC 250/SC 3; N 2223: systematic review of EN 1993-1-5:2006 Design of steel structures - Plated structural elements.

TWG8.3 2014-052 (AM-1-5-2013-15) Amendment on EN 1993-1-5: Interaction between shear force, bending moment and axial force.

Abbildungsverzeichnis

Bild 1: Definition der Blechkrümmung.....	18
Bild 2: <i>Bild 9.5: Ausschnitt in Quersteifen</i>	21
Bild 3: <i>Bild D.2: Belastungstyp</i>	21
Bild 4: <i>Bild D.1: Bezeichnungen</i>	21
Bild 5: <i>Querlasten infolge Einleitung des Schubflusses in die Gurte</i>	21
Bild 6: Beispiel 1 – Abmessungen und Beanspruchungen (Bild 3-11.3 aus (Erläuterungen zu DIN 18800-3)	25
Bild 7: Bezeichnungen gemäß Bild A.1 aus DIN EN 1993-1-5:2010.....	30
Bild 8: Schwerpunktlage des Winkelprofils ohne mitwirkendes Blech (RSTAB 8.04)	31
Bild 9: Querschnittswerte der Steife 1 einschl. mitwirkendem Blech RSTAB 8.04	31
Bild 10: Querschnittswerte der Steife 2 einschl. mitwirkendem Blech (RSTAB 8.04).....	32
Bild 11: Bezeichnungen für ein Blechfeld mit zwei Steifen in der Druckzone (Bild A.3 aus DIN EN 1993-1-5:2010)	32
Bild 12: Querschnittswerte Steife 1 (oben) mit modifizierter Dicke [EBPlate 2.01].....	36
Bild 13: Querschnittswerte Steife 2 (unten) mit modifizierter Dicke [EBPlate 2.01].....	36
Bild 14: Verzweigungsfigur für 1. Eigenwert (1,9107, nur $\sigma_{x,Ed}$) [EBPlate 2.01]	37
Bild 15: Verzweigungsfigur für 10. Eigenwert (2,8169, nur $\sigma_{x,Ed}$) [EBPlate 2.01]	37
Bild 16: Verzweigungsfigur für 1. Eigenwert (1,9709, nur τ_{Ed}) [EBPlate 2.01].....	38
Bild 17: Verzweigungsfigur für 1. Eigenwert (1,8192, $\sigma_{x,Ed} + \tau_{Ed}$) [EBPlate 2.01].....	38
Bild 18: Beulwerttafel für Längsspannungen (<i>Klöppel/Scheer</i>).....	40
Bild 19: Beulwerttafel für Schub (<i>Klöppel/Scheer</i>)	41
Bild 20: Längsausgesteiftes Blechfeld unter konstanter Druckbeanspruchung (Bild 4.4 aus DIN EN 1993-1-5:2010)	55
Bild 21: Beispiel 2 – Abmessungen und Beanspruchungen (Bild 3-11.4 aus „Stahlbauten - Erläuterungen zu DIN 18800-3“)	60
Bild 22: Querschnittswerte einer Trapezsteife einschl. mitwirkendem Blech [RSTAB 8.04].....	61
Bild 23: Schwerpunkt einer Trapezsteife ohne mitwirkendes Blech [RSTAB 8.04]	63
Bild 24: Steifengeometrie-Beispiel 2	65
Bild 25: Beispiel 3 – Abmessungen und Beanspruchungen (Bild 3-11.7 aus Erläuterungen zu DIN 18800-3)	71
Bild 26: Spannungsverteilung für σ_y (Bild 3-11.8 aus Erläuterungen zu DIN 18800-3)	71
Bild 27: Feld 1: Eigenform für kombinierte Wirkung $\sigma_{x,Ed} + \sigma_{z,Ed} + \tau_{ED}$ ($\alpha_{cr} = 1,5065$) [EBPlate 2.01]	72
Bild 28: Feld 1: Eigenform für alleinige Wirkung von $\sigma_{x,Ed}$ ($\alpha_{cr,x} = 2,0833$) [EBPlate 2.01].....	73
Bild 29: Feld 1: Eigenform für alleinige Wirkung von $\sigma_{z,Ed}$ ($\alpha_{cr,z} = 2,8205$) [EBPlate 2.01].....	73
Bild 30: Feld 1: Eigenform für alleinige Wirkung τ_{ED} ($\alpha_{cr,\tau} = 6,6002$) [EBPlate 2.01].....	74
Bild 31: Feld 3: $\alpha_{cr} = 1,5700$ bei kombinierter Wirkung von $\sigma_{z,Ed} + \tau_{ED}$ ($\alpha_{cr} = 3,4610$) [EBPlate 2.01].....	77
Bild 32: Feld 3: $\alpha_{cr,z} = 4,6545$ unter alleiniger Wirkung von $\sigma_{z,Ed}$ ($\alpha_{cr,z} = 14,937$) [EBPlate 2.01].....	78
Bild 33: Feld 3: $\alpha_{cr,\tau} = 1,7589$ unter alleiniger Wirkung von τ_{ED} ($\alpha_{cr} = 4,4864$) [EBPlate 2.01].....	78
Bild 34: Schwerpunktlage der Steife ohne mitwirkendes Blech [RSTAB 8.04]	83
Bild 35: Querschnittswerte der Steife 1 einschl. mitwirkendem Blech [RSTAB 8.04]	84
Bild 36: Querschnittswerte der Steife 2 einschl. mitwirkendem Blech [RSTAB 8.04]	84
Bild 37: Stabwerksmodell für Gesamtfeldnachweis [RSTAB 8.04]	85
Bild 38: Eigenform für $\alpha_{cr,c,xz} = 1,348$ ohne Bettung (mit Bettung: $\alpha_{cr,p,xz} = 1,949$) [RSTAB 8.04].....	86
Bild 39: 1. Eigenform mit EBPlate unter Längs- u. Querdruck ($\alpha_{cr,c,xz} = 1,7985$) [EBPlate 2.01]	87
Bild 40: 3. Eigenform mit EBPlate unter Längs- u. Querdruck ($\alpha_{cr,c,xz} = 2,3080$) [EBPlate 2.01]	87
Bild 41: Biegemoment nach Theorie II. Ordnung: $M_{sl1} = 34,72$ kNm [RSTAB 8.04].....	89
Bild 42: Gesamtfeld: $\alpha_{cr,\tau} = 1,7882$ bei alleiniger Wirkung von τ_{Ed} [EBPlate 2.01]	90
Bild 43: Bezeichnungen gemäß Bild A.1 aus DIN EN 1993-1-5:2010	93
Bild 44: Beispiel 4 – Abmessungen und Beanspruchungen	105
Bild 45: Übersicht Kastenquerschnitt, Maße in [mm] (BRAUN, B., KUHLMANN, U., 2009).....	122
Bild 46: Übersicht Statisches System und Querschnitt (TIMMERS, R., et al. 2015)	123
Bild 47: Übersicht Statisches System und Querschnitt (TIMMERS, R., et al. 2015)	124
Bild 48: Übersicht Statisches System und Querschnitt (KUHLMANN, U., et al., 2008).....	128
Bild 49: Übersicht und Querschnitt des Hohlkastens (BEG, D., et al., 2010)	129

Bild 50: Übersicht Statisches System und Querschnitt des Stegs und Bodenblechs (BEG, D., et al., 2010)	129
Bild 51: Übersicht Querschnitt und die Spannungsverteilung (REIS, A., PEDRO, J.O. et al.)	131
Bild 52: Knickstabähnliches Verhalten eines nicht ausgesteiften Beulfeldes, Auszug aus Bild 4.3b DIN EN 1993-1-5:2010	135
Bild 53: Knickstabähnliches Verhalten eines ausgesteiften Beulfeldes, Auszug aus Bild 4.3c DIN EN 1993-1-5:2010	135
Bild 54: Bild 3-11.8 aus „Stahlbauten – Erläuterungen zu DIN 18800-3“	138
Bild 55: Divisor d_c zur Ermittlung der Vorkrümmung in Abhängigkeit von α_e	139
Bild 56: Übersicht über Nachweisführung	141
Bild 57: Neue vorgeschlagenen Skizzen der Spannungsverteilung (CEN/TC 250/SC 3; N 2223)	142

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Beschlossene Amendments für EN 1993-1-5, Stand Oktober 2015	17
Tab. 2: Übersicht Verzweigungsfaktoren (EF: Einzelfeld, GF: Gesamtfeld)	42
Tab. 3: Vergleich der Ausnutzungsgrade der Nachweismethode für Beispiel 1	59
Tab. 4: Vergleich der Ausnutzungsgrade der Nachweismethode für Beispiel 2	70
Tab. 5: Vergleich der Verzweigungswerte $\alpha_{cr,j}$	74
Tab. 6: Vergleich der Verzweigungswerte $\alpha_{cr,i}$ für Einzelfeld 3	76
Tab. 7: Vergleich der Ausnutzungsgrade der Nachweismethode für Beispiel 3	104
Tab. 8: Vergleich der Ausnutzungsgrade der Nachweismethode (Beispiel aus Stahlbaukalender 2009).....	122
Tab. 9: Vergleich der Ausnutzungsgrade der Nachweismethode für I-Profil ohne Steife	123
Tab. 10: Vergleich der Ausnutzungsgrade der Nachweismethode für Schubbeulen M-N-V-Interaktion	125
Tab. 11: Vergleich der Ausnutzungsgrade der Nachweismethode für Bahnbrücke Burgweinting	126
Tab. 12: Vergleich der Ausnutzungsgrade der Nachweismethode für Bahnbrücke Burgweinting	127
Tab. 13: Vergleich der Ausnutzungsgrade der Nachweismethode für I-Profil ohne Steife unter Querdruck.....	128
Tab. 14: Vergleich der Ausnutzungsgrade der Nachweismethode für Längsausgesteiftes Bodenblech einer Hohlkastenbrücke	130
Tab. 15: Vergleich der Ausnutzungsgrade der Nachweismethode (OPTIBRI – I Profil ohne Steife S690)	131

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

2013

B 91: Priorisierung und Nachrechnung von Brücken im Bereich der Bundesfernstraßen – Einfluss der Einwirkungen aus Verkehr unter besonderer Berücksichtigung von Restnutzungsdauer und Verkehrsentwicklung
Freundt, Böning € 15,00

B 92: Kriterien für die Anwendung von unbewehrten Innenschalen für Straßentunnel
Kaundinya € 14,00

B 93: Querkrafttragfähigkeit von Fahrbahnplatten – Anpassung des DIN-Fachberichtes „Betonbrücken“ an die endgültige Eurocodes und nationale Anhänge einschließlich Vergleichsabrechnungen
Hegger, Reiß € 17,50

B 94: Baulicher Brandschutz für Tunnel in offener Bauweise – Rechnerischer Nachweis
Peter, Knief, Schreyer, Piazzola
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 95: Erfahrungen mit selbstverdichtendem und hochfestem Beton im Brücken- und Ingenieurbau an Bundesfernstraßen
Tauscher € 17,00

B 96: Geothermischen Anlagen bei Grund- und Tunnelbauwerken
Adam € 17,00

B 97: Einfluss der veränderten Verkehrsführung bei Ertüchtigungsmaßnahmen auf die Bauwerksbeanspruchungen
Freundt, Böning € 15,00

2014

B 98: Brückenseile – Gegenüberstellung von vollverschlossenen Seilen und Litzenbündelseilen
Friedrich
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 99: Intelligente Brücke – Zuverlässigkeitsbasierte Bewertung von Brückenbauwerken unter Berücksichtigung von Inspektions- und Überwachungsergebnissen
Fischer, Schneider, Thöns, Rücker, Straub
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 100: Roadtraffic Management System (RTMS)
Freundt, Vogt, Böning, Pierson, Ehrle € 15,00

B 101: Adaptive Spannbetonstruktur mit lernfähigem Fuzzy-Regelungssystem
Schnellenbach-Held, Fakhouri, Steiner, Kühn € 18,50

B 102: Adaptive ‚Tube-in-Tube‘-Brücken
Empelmann, Busse, Hamm, Zedler, Girmscheid € 18,00

B 103: Umsetzung des Eurocode 7 bei der Bemessung von Grund- und Tunnelbauwerken
Briebrecher, Städing € 14,00

B 104: Intelligente Brücke – Konzeption eines modular aufgebauten Brückenmodells und Systemanalyse
Borrmann, Fischer, Dori, Wild
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 105: Intelligente Brücke – Machbarkeitsstudie für ein System zur Informationsbereitstellung und ganzheitlichen Bewertung in Echtzeit für Brückenbauwerke
Schnellenbach-Held, Karczewski, Kühn
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 106: Einsatz von Monitoringsystemen zur Bewertung des Schädigungszustands von Brückenbauwerken
Freundt, Vogt, Böning, Michael, Könke, Beinersdorf € 17,00

B 107: Materialeigenschaften von Kunststoffdichtungsbahnen bestehender Straßentunnel
Robertson, Bronstein, Brummermann € 16,00

B 108: Fahrzeug-Rückhaltesysteme auf Brücken
Neumann, Rauert € 18,50

B 109: Querkrafttragfähigkeit bestehender Spannbetonbrücken
Hegger, Herbrand € 17,00

B 110: Intelligente Brücke – Schädigungsrelevante Einwirkungen und Schädigungspotenziale von Brückenbauwerken aus Beton
Schnellenbach-Held, Peeters, Miedzinski
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 111: Erarbeitung von Modellen zur Bestimmung der Schadensumfangsentwicklung an Brücken
Müller € 15,00

2015

B 112: Nachhaltigkeitsberechnung von feuerverzinkten Stahlbrücken
Kuhlmann, Maier, Ummenhofer, Zinke, Fischer, Schneider € 14,00

B 113: Versagen eines Einzelelementes bei Stützkonstruktionen aus Gabionen
Placzek, Pohl
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 114: Auswirkungen von Lang-Lkw auf die sicherheitstechnische Ausstattung und den Brandschutz von Straßentunneln
Mayer, Brennerberger, Großmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 115: Auswirkungen von Lang-Lkw auf die sicherheitstechnische Ausstattung und den Brandschutz von Straßentunneln
Mayer, Brennerberger, Großmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 116: Überwachungskonzepte im Rahmen der tragfähigkeitsrelevanten Verstärkung von Brückenbauwerken aus Beton
Schnellenbach-Held, Peeters, Brylka, Fickler, Schmidt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 117: Intelligente Bauwerke – Prototyp zur Ermittlung der Schadens- und Zustandsentwicklung für Elemente des Brückenmodells
Thöns, Borrmann, Straub, Schneider, Fischer, Bügler
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 118: Überwachungskonzepte für Bestandsbauwerke aus Beton als Kompensationsmaßnahme zur Sicherstellung von Standesicherheit und Gebrauchstauglichkeit
Siegert, Holst, Empelmann, Budelmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 119: Untersuchungen zum Brandüberschlag in Straßentunneln
Schmidt, Simon, Guder, Juknat, Hegemann, Dehn € 16,00

B 120: Untersuchungen zur Querkrafttragfähigkeit an einem vorgespannten Zweifeldträger
Maurer, Gleich, Heeke, Zilch, Dunkelberg
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 121: Zerstörungsfreie Detailuntersuchungen von vorgespannten Brückenplatten unter Verkehr bei der objektbezogenen Schadensanalyse
Diersch, Taffe, Wöstmann, Kurz, Moryson
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 122: Gussasphalt mit integrierten Rohrregistern zur Temperierung von Brücken
Eilers, Friedrich, Quaas, Rogalski, Staack
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2016

B 123: Nachrechnung bestehender Stahl- und Verbundbrücken – Restnutzung
Geißler, Krohn € 15,50

B 124: Nachrechnung von Betonbrücken – Systematische Datenauswertung nachgerechneter Bauwerke
Fischer, Lechner, Wild, Müller, Kessner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 125: Entwicklung einheitlicher Bewertungskriterien für Infrastrukturbauwerke im Hinblick auf Nachhaltigkeit
Mielecke, Kistner, Graubner, Knauf, Fischer, Schmidt-Thrö
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 126: Konzeptionelle Ansätze zur Nachhaltigkeitsbewertung im Lebenszyklus von Elementen der Straßeninfrastruktur
Mielecke, Graubner, Roth
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 127: Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-2-Schäden
Kuhlmann, Hubmann € 21,50

B 128: Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-3-Schäden
Ungermann, Brune, Giese € 21,00

B 129: Weiterentwicklung von Verfahren zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Verkehrsinfrastrukturen
Schmellekamp
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 130: Intelligente Straßenverkehrsinfrastruktur durch 3D-Modelle und RFID-Tags
Tulke, Schäfer, Brakowski, Braun
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 132: Pre-Check der Nachhaltigkeitsbewertung für Brückenbauwerke
Graubner, Ramge, Hess, Ditter, Lohmeier
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 133: Anforderungen an Baustoffe, Bauwerke und Realisierungsprozesse der Straßeninfrastrukturen im Hinblick auf Nachhaltigkeit
Mielecke, Graubner, Ramge, Hess, Pola, Caspari
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 134: Nachhaltigkeitsbewertung für Erhaltungs- und Ertüchtigungskonzepte von Straßenbrücken
Gehrein, Lingemann, Jungwirth
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2017

B 135: Wirksamkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln
Kohl, Kammerer, Leucker, Leismann, Mühlberger, Gast
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 136: HANV als Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-1-Schäden
Stranghöner, Lorenz, Raake, Straube †, Knauff
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 137: Verstärkung von Stahlbrücken mit hochfestem Beton
Mansperger, Lehmann, Hofmann, Krüger, Lehmann € 14,50

B 138: Rückhaltesysteme auf Brücken – Einwirkungen aus Fahrzeuganprall und Einsatz von Schutzeinrichtungen auf Bauwerken
Mayer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 139: Unterstützung der Bauwerksprüfung durch innovative digitale Bildauswertung – Pilotstudie
Sperber, Gößmann, Reget, Müller, Nolden, Köhler, Kremkau in Vorbereitung

B 140: Untersuchungen zum Beulnachweis nach DIN EN 1993-1-5
U. Kuhlmann, Chr. Schmidt-Rasche, J. Frickel, V. Pouroustad
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fordern Sie auch unser kostenloses Gesamtverzeichnis aller lieferbaren Titel an! Dieses sowie alle Titel der Schriftenreihe können Sie unter der folgenden Adresse bestellen:

Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel. + (0)421/3 69 03-53 · Fax + (0)421/3 69 03-63

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de