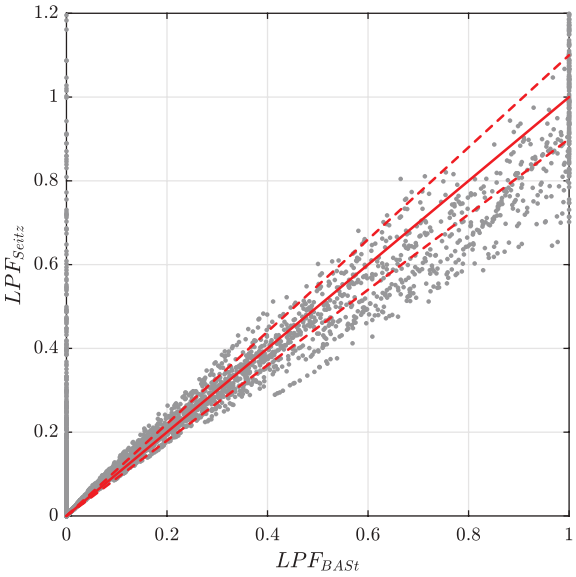


Abbildung 4.8.:
Direkter Vergleich der Ergebnisse des Längssteifen-Nachweises nach den Vorschlägen von SEITZ (LPF_{Seitz}) und des BASt-Hefts B140 (LPF_{BASt}). (——): $LPF_{Seitz} = LPF_{BASt}$. (- - -): ±10 % -Abw.

4.2.2. Untersuchung des ausgesteiften Beulfelds

Einzelfeld-Nachweis

Abb. 4.9(a) (S. 87) zeigt die numerischen *Einzelfeldnachweise* aus der EBPlate-Berechnung, in Kombination mit den *Einzelnachweisen nach Pourostad* (siehe Kap. 2.4.2) und der vorgeschlagenen Interpolationsgleichung nach POUROSTAD [43, 45, 46, 47]. Die Mehrheit der Ergebnisse ist dabei auffällig im unsicheren Bereich (überschätzte Tragfähigkeit).

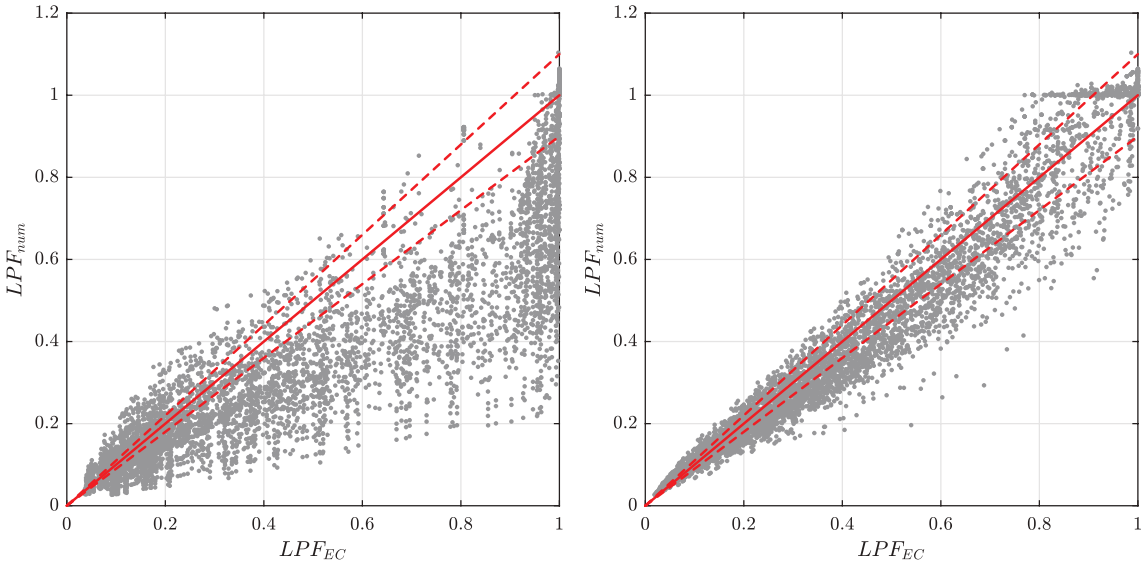
Gesamtfeld-Nachweis

In Abb. 4.9(b) sind die Ergebnisse aus dem *Gesamtfeldnachweis* zu sehen. Zu sehen sind weiterhin sehr viele unsichere Ergebnisse. Ein erster Vergleich aus den Abbildungen des Einzelfeld- und Gesamtfeldnachweises zeigt, dass das Gesamtfeld maßgebend zu sein scheint.

Einzelfeld- und Gesamtfeldnachweis

In Abb. 4.10 sind die Ergebnisse aus dem *Gesamtfeld- und Einzelfeldnachweis* in Kombination mit den *Einzelnachweisen nach Pourostad* (siehe Kap. 2.4.2) und der vorgeschlagenen Interpolationsgleichung nach POUROSTAD, aufgezeigt. Es sind weiterhin einige *unsichere Werte* zu sehen.

In Anhang A.3.2 (S. 156) sind weitere Untersuchungen der Laststeigerungsfaktoren (LPF_{num}) in Abhängigkeit der globalen Plattenschlankheit $\bar{\lambda}_p$ des *Gesamtfeldnachweises* wiedergegeben.



(a) Einzelfeld-Nachweis. **(b)** Gesamtfeld-Nachweis.

Abbildung 4.9.: Ergebnisse der Laststeigerungsfaktoren (LPF) der jeweilig maßgebenden Einzelfeld- und Gesamtfeld-Nachweise nach prEN 1993-1-5. Diese sind in Relation mit den numerischen Werten (LPF_{num}) dargestellt. (——): $LPF_{num} = LPF_{EC}$. (- - -): ±10 % -Abweichung.

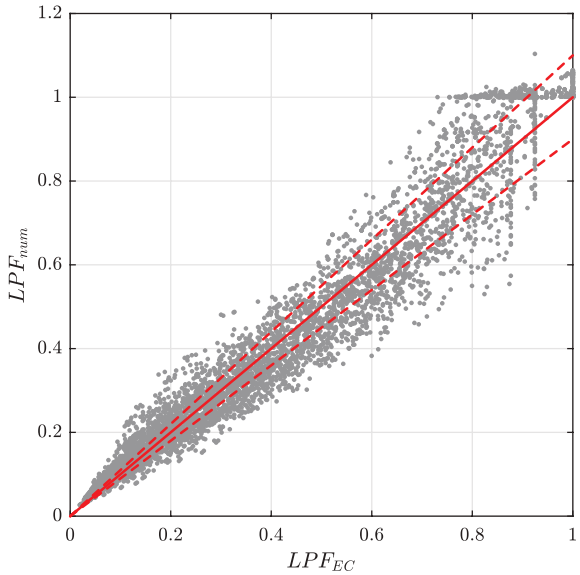
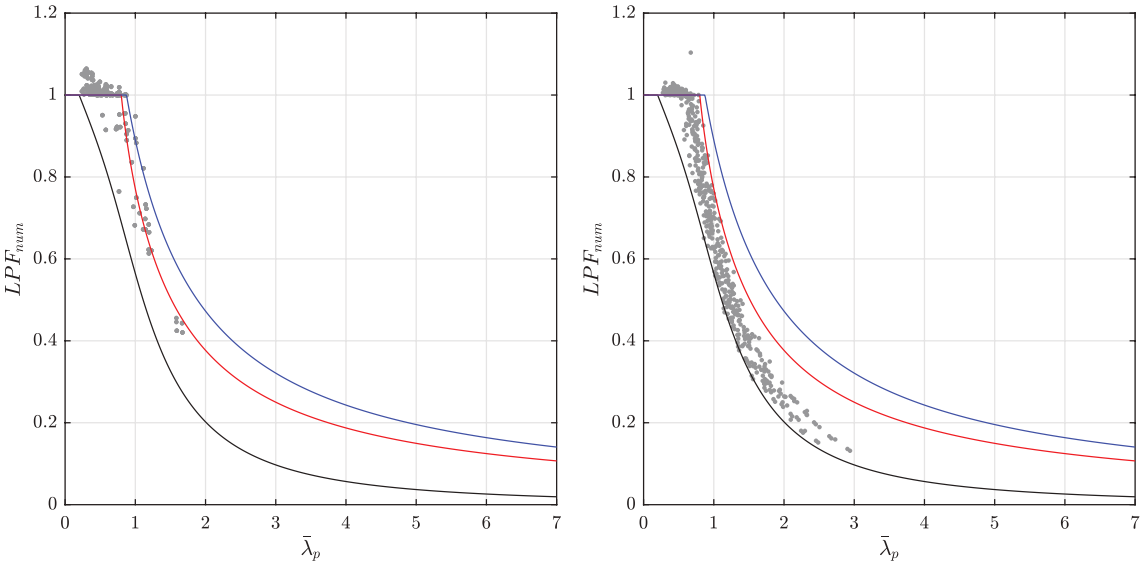


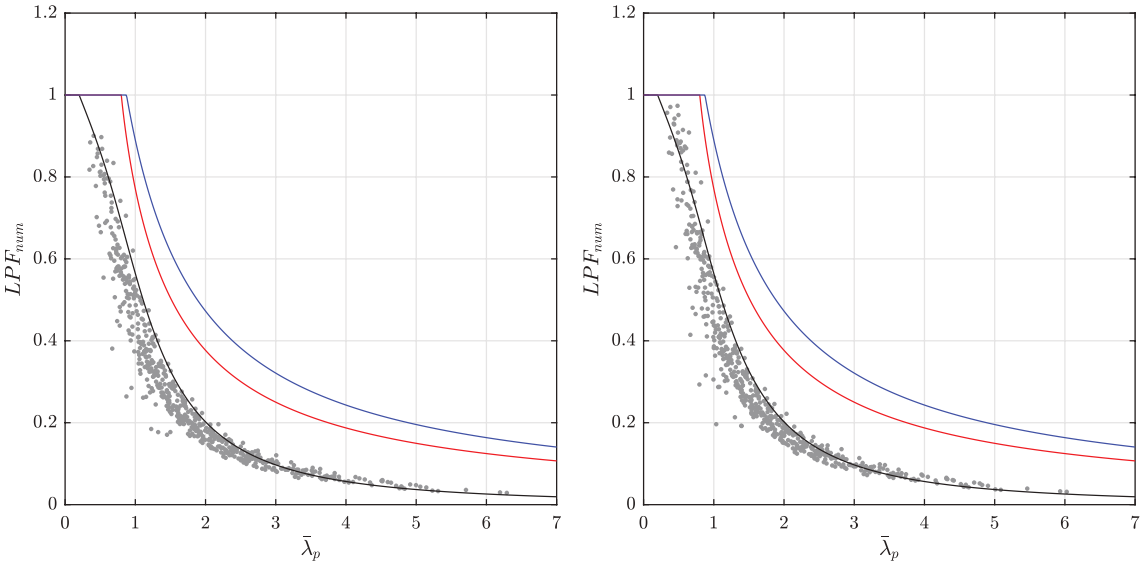
Abbildung 4.10.:
Ergebnisse der Laststeigerungsfaktoren (LPF) aus den maßgebenden Einzelfeld- und Gesamtfeld-Nachweisen nach prEN 1993-1-5. Diese sind in Relation mit den numerischen Werten (LPF_{num}) dargestellt. (——): $LPF_{num} = LPF_{EC}$. (- - -): ±10 % -Abw.

Bei reiner Längsspannung σ_x ($\theta = 0°$) (Abb. 4.11(a)) sind die Werte im Plateaubereich verteilt. Bei kleinem Interaktionswinkel ($\theta = 10°$) (Abb. 4.11(b)) sind die Werte *zwischen* der Abminderungskurve des prEN 1993-1-5 Abschn. 12.4(5) [15] im *oberen* Bereich und der Abminderungskurve zur Berücksichtigung knickstabähnlichen Verhaltens eines ausgesteiften Beulfeldes nach DIN EN 1993-1-1 Abschn. 6.3.1.2 [12], im *unteren* Bereich verteilt (vgl. dazu Abb. 4.11(a) und Abb. 4.11(b)).



(a) Interaktionswinkel $\theta = 0°$. **(b)** Interaktionswinkel $\theta = 10°$.

Abbildung 4.11.: Laststeigerungsfaktoren LPF_{num} der numerischen Ergebnisse des *Gesamtfeldnachweises* in Abhängigkeit der Schlankheit $\bar{\lambda}_p$ und des Interaktionswinkels θ. Weiterhin sind dargestellt: Die *Winterkurve* (——), die Abminderungskurve nach prEN 1993-1-5 Abschn. 12.4(5) mit $\bar{\lambda}_p = 0{,}8$ (——) und die Abminderungskurve $\chi_c(\bar{\lambda}_p)$ nach DIN EN 1993-1-1 Abschn. 6.3.1.2 mit $\alpha_{e,max} = 0{,}4563$ eines *geschlossenen* Steifenquerschnitts (——).



(a) Interaktionswinkel $\theta = 80°$. **(b)** Interaktionswinkel $\theta = 90°$.

Abbildung 4.12.: Laststeigerungsfaktoren LPF_{num} der numerischen Ergebnisse des *Gesamtfeldnachweises* in Abhängigkeit der Schlankheit $\bar{\lambda}_p$ und des Interaktionswinkels θ. Weiterhin sind dargestellt: Die *Winterkurve* (——), die Abminderungskurve nach prEN 1993-1-5 Abschn. 12.4(5) mit $\bar{\lambda}_p = 0{,}8$ (——) und die Abminderungskurve $\chi_c(\bar{\lambda}_p)$ nach DIN EN 1993-1-1 Abschn. 6.3.1.2 mit $\alpha_{e,max} = 0{,}4563$ eines *geschlossenen* Steifenquerschnitts (——).

Bei größerem Interaktionswinkel θ zeigt sich, dass die Werte allmählich *unter* der Abminderungskurve zur Berücksichtigung knickstabähnlichen Verhaltens fallen. Dies zeigt sich vor allem bei Schlankheitsgraden von $\bar{\lambda}_p \leq 3{,}5$ (siehe Abb. 4.12(a) und 4.12(b) auf S. 88 mit $\theta = 80°$ und $90°$).

4.2.3. Ermittlung des Vergrößerungsfaktors f_λ bzw. Vergrößerungsfunktion $f_\lambda(\bar{\lambda}_p)$ für den globalen Schlankheitsgrad $\bar{\lambda}_p$

Es ist aufgrund der aufgezeigten Parameterstudie (Kap. 4.2.2) zu schließen, dass die Querbelastung σ_z zur Verschiebung der Werte unter besagter Abminderungskurve, beiträgt.

Es gibt mehrere Ansätze, um eine Anpassung an die numerisch ermittelten Daten (FE-Berechnung) zu erreichen. Es werden im Folgenden zwei mögliche Varianten erläutert. Der erste besteht in dem Auffinden einer *neuen* Abminderungskurve. Eine Alternative besteht in dem weiteren Gebrauch der Abminderungskurve $\chi_c(\bar{\lambda}_p)$ nach DIN EN 1993-1-1 Abschn. 6.3.1.2 [12], jedoch mit der Vergrößerung des bezogenen Schlankheitsgrades $\bar{\lambda}_p$.

Im Folgenden soll die zweite Option untersucht werden. Für diese Untersuchung werden die LPF_{num} in Abhängigkeit des Schlankheitsgrades $\bar{\lambda}_p$ und einem Interaktionswinkel von $\theta = 90°$ herangezogen. Anschließend wird ein Vergrößerungsfaktor f_λ gesucht, der folgende Bedingung erfüllt:

$$f_{\lambda,i} \cdot \bar{\lambda}_{p,i} = \chi_c(\bar{\lambda}_{p,i}) \tag{4.13}$$

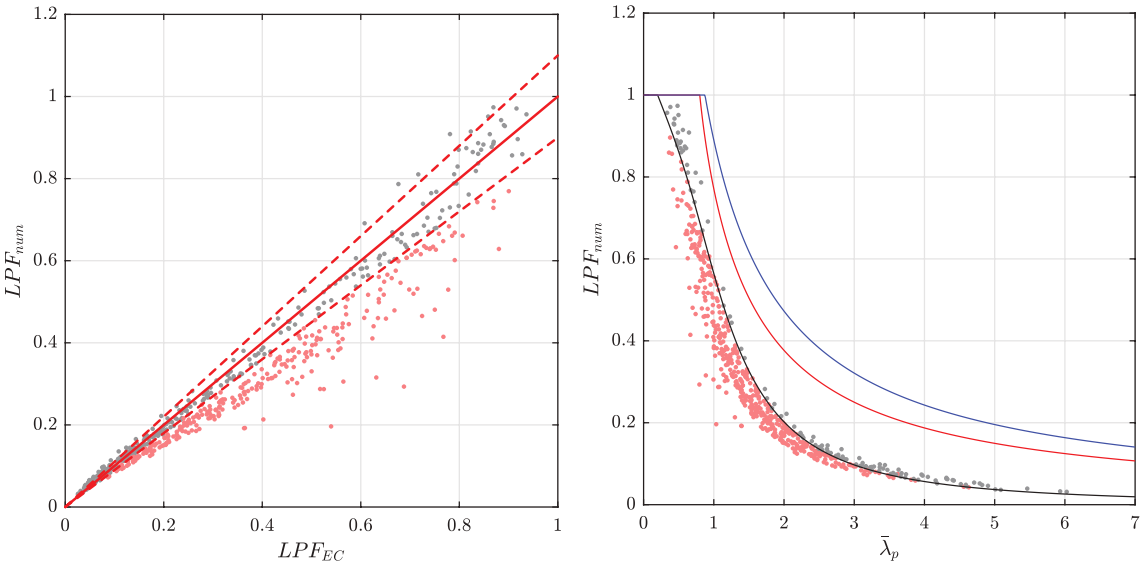
bzw. nach $f_{\lambda,i}$ aufgelöst:

$$f_{\lambda,i} = \frac{\chi_c(\bar{\lambda}_{p,i})}{\bar{\lambda}_{p,i}} \tag{4.14}$$

D.h. es wird ein Vergrößerungsfaktor $f_{\lambda,i}$ zu jedem $LPF_{num,i}$ und zugewiesenen Schlankheitsgrad $\bar{\lambda}_{p,i}$ ermittelt. Untersucht werden dabei nur die maßgebenden Werte des Gesamtfeldnachweises, die im unsicheren Bereich liegen. Maßgebend sind dabei die Verhältnisse von $LPF_{EC}/LPF_{num} \leq 0{,}9$ mit einem Interaktionswinkel von $\theta = 90°$ des Gesamtfeldnachweises (siehe Abb. 4.13(a)). Weiterhin sind die Werte $f_{\lambda,i} > 1{,}0$ von der Betrachtung ausgenommen, da sich diese Werte bereits über der Abminderungskurve $\chi_c(\bar{\lambda}_p)$ befinden(siehe Abb. 4.13(b)).

In der kommenden Untersuchung wird ein konstanter Vergrößerungsfaktor $f_{\lambda,i}$ hergeleitet, der die Schlankheitsgrade $\bar{\lambda}_p$ der maßgebenden Werte *vergrößert* und dadurch die Abminderungsfaktoren abmindert. Dieser Vergrößerungsfaktor dient der Anpassung der Daten des Gesamtfeld-Nachweises.

Im Anschluss soll dieser Faktor für einen erneuten Gesamtfeldnachweis herangezogen werden. Des Weiteren werden zwei Ansätze für Vergößerungsfunktionen $f_\lambda(\bar{\lambda}_p)$ vorgestellt, die die Plattenparameter berücksichtigen.



(a) Betrachteten Werte (•) im Bereich $LPF_{EC}/LPF_{num} \leq 0{,}9$.
(——): $LPF_{num} = LPF_{EC}$. (- - -): ±10 % -Abw.

(b) Betrachteten Werte (•) im Bereich unter der Abminderungskurve $\chi_c(\bar{\lambda}_p)$ des DIN EN 1993-1-1 Abschn. 6.3.1.2 [12] (——).

Abbildung 4.13.: Hervorhebung der betrachteten Werte (•) mit einem Interaktionswinkel von $\theta = 90°$. Die Punkte (•) sind die aus der Betrachtung entfernten Werte.

Konstanter Vergrößerungsfaktor f_λ

In diesem Abschnitt geht es um die Ermittlung des konstanten Vergrößerungsfaktors f_λ. Dabei werden die o.g. maßgebenden Werte untersucht, die sich im unsicheren Bereich (überschätzte Tragfähigkeit) befinden. Wenn der ermittelte Faktor die *unsicheren* Werte durch den vergrößerten Schlankheitsgrad $\bar{\lambda}_p$ auf die *sichere* Seite bringt, dann wirkt sich dieser Faktor auch günstig auf die bereits *sicheren* Werte.

Für diese Ermittlung bedient man sich der *Methode der kleinsten Fehlerquadrate*. Bei dieser Methode werden die quadrierten Residuen aufsummiert [20]. Bei den Residuen handelt es sich um die Differenzen (Fehler) aus Messwerten (hier: LPF_{num}) und dem Modell (hier: $LPF_{EC}(\bar{\lambda}_p)$). Dabei gilt es die Zielwertfunktion

$$f(f_\lambda) = \sum_{i=1}^{m} r_i(f_\lambda)^2 = \sum_{i=1}^{m} \left(LPF_{EC,i}(f_\lambda) - LPF_{num,i}\right)^2 \rightarrow \min \tag{4.15}$$

zu minimieren. Die Modellwerte werden dabei für den Intervallbereich $1{,}0 \leq f_\lambda \leq 2{,}0$ ausgewertet. Die untere Intervallgrenze ist mit 1,0 gewählt, da die erwartete Schlankheit $\bar{\lambda}_p$ größer oder gleich der Ausgangs-Schlankheit sein sollte. Die obere Intervallgrenze ist mit 2,0 angesetzt, weil der höchste Vergrößerungsfaktor $f_{\lambda,i}$ aus allen maßgebenden Werten, in etwa 2,0 entspricht und eine Überschreitung dieser nicht zu vermuten ist. Abb. 4.14 zeigt die Zielwertfunktion $f(f_\lambda)$ in Abhängigkeit des Vergrößerungsfaktors f_λ. Das Minimum der Zielwertfunktion ist bei $f_\lambda = 1{,}21$ zu erkennen.

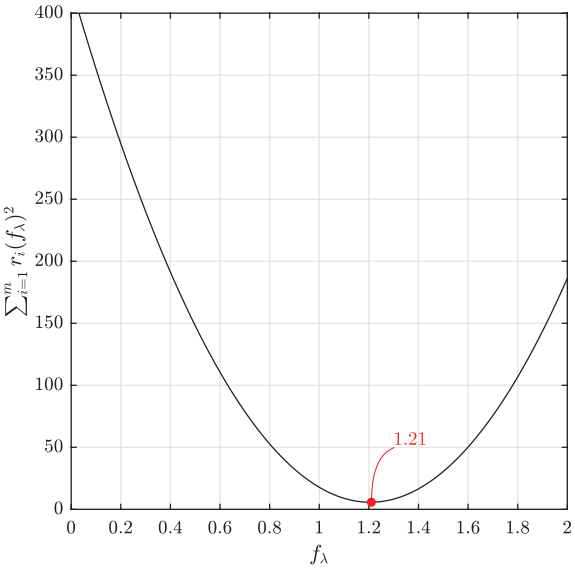


Abbildung 4.14.:
Darstellung der *Summe der Fehlerquadrate* in Abhängigkeit des Vergrößerungsfaktors f_λ. Die Auswertug zeigt das Minimum der Zielwertfunktion $f(f_\lambda)$ bei $f_\lambda = 1{,}21$.

Erster Ansatz: Variable Vergrößerungsfunktion $f_\lambda(\bar{\lambda}_p)$

Alternativ wurde statt eines konstanten Vergrößerungsfaktors f_λ, eine Vergrößerungsfunktion $f_\lambda(\bar{\lambda}_p)$ in Abhängigkeit des Schlankheitsgrades $\bar{\lambda}_p$ ermittelt und untersucht.

Dabei werden die numerischen Werte in den Bereichen von $\bar{\lambda}_p \leq 3{,}5$ in größeren Maße berücksichtigt, da sich in diesen Bereichen die meisten Abweichungen zeigen (siehe dazu Abb. 4.13(b)).

Abb. 4.15 zeigt die Verteilung der Vergrößerungsfaktoren $f_{\lambda,i}$ in Abhängigkeit der Schlankheit $\bar{\lambda}_p$. Die größte Anhäufung zeigt sich, wie bereits genannt, bei $\bar{\lambda}_p \leq 3{,}5$. Man erkennt auch, dass die Werte zu den „größeren“ Schlankheiten hin, schrittweise abnehmen.

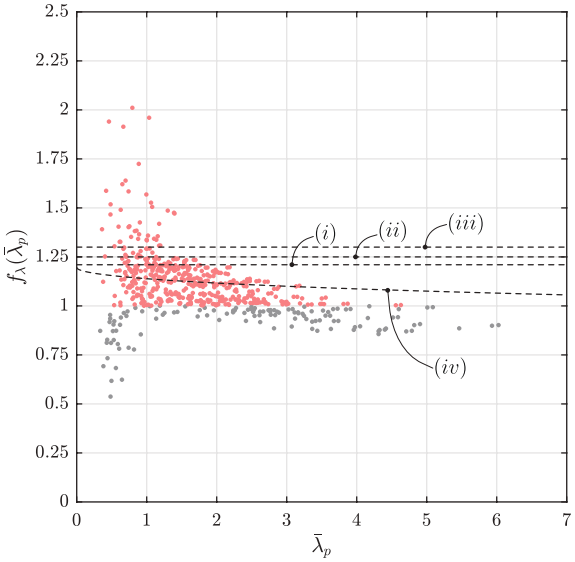


Abbildung 4.15.:
In der Abbildung sind die einzelnen *maßgebenden* Vergrößerungsfaktoren (∘) für den Interaktionswinkel $\theta = 90°$ und in Abhängigkeit von $\bar{\lambda}_p$, dargestellt. Außerdem sind die Vergrößerungsfaktoren f_λ und der Verlauf der Vergößerungsfunktion $f_\lambda(\bar{\lambda}_p)$ dargestellt:

- (i) $f_\lambda = 1{,}21$,
- (ii) $f_\lambda = 1{,}25$,
- (iii) $f_\lambda = 1{,}3$
- (iv) $f_\lambda(\bar{\lambda}_p) = 0{,}5865 \cdot \exp(-0{,}1031 \cdot \bar{\lambda}_p) + 0{,}6097$.

Die Punkte (∗) sind die aus der Betrachtung entfernten Werte.

Es ist anzumerken, dass es sich auch hier um die unsicheren Werte handelt, die ein Verhältnis von $LPF_{num}/LPF_{EC} \leq 0{,}9$ aufweisen. Darauf aufbauend wird ein Ansatz für die Verteilung gemacht:

$$f(x) = a \cdot e^{\,b \cdot x} + c \tag{4.16}$$

bzw. in Abhängigkeit von $\bar{\lambda}_p$ ($x \equiv \bar{\lambda}_p$):

$$f_\lambda(\bar{\lambda}_p) = a \cdot e^{\,b \cdot \bar{\lambda}_p} + c \tag{4.17}$$

Die Anpassung der Parameter erfolgt dabei mit der MATLAB-*Curve Fitting Toolbox* [40]. Die Software verwendet dabei die oben beschriebene Methode der kleinsten Fehlerquardate (engl.: *method of least sqaures*) zur Anpassung der Daten [42]. Die Anpassung ergab für die Konstanten (in Gl. 4.17 eingesetzt):

$$f_\lambda(\bar{\lambda}_p) = 0{,}5865 \cdot e^{\,-0{,}1031 \cdot \bar{\lambda}_p} + 0{,}6097 \tag{4.18}$$

Der einfachen Handhabung wegen, werden die ermittelten Konstanten vereinfacht zu:

$$f_\lambda(\bar{\lambda}_p) = 0{,}6 \cdot e^{\,-0{,}1 \cdot \bar{\lambda}_p} + 0{,}6 \tag{4.19}$$

Zweiter Ansatz: Variable Vergrößerungsfunktion $f_\lambda(\bar{\lambda}_p)$

Im Folgenden wird ein zweiter Ansatz vorgestellt, eine Vergrößerungsfunktion herzuleiten.

Bei diesem Ansatz wird die Verteilung von f_λ in Abhängigkeit anderer Parameter untersucht. Aus allen untersuchten Parametern zeigte sich eine Auffälligkeit bei der Vertielung von f_λ in Abhängigkeit des Seitenverhältnisses α, der Lasteinleitungslänge c/a und die hier eingeführte *bezogene Gesamtsteifigkeit* Γ_{St}, die das Produkt aus Steifenzahl n_{St} und bezogener Steifigkeit γ darstellt ($\Gamma_{St} = n_{St} \cdot \gamma$).

Abb. 4.16 (S. 93) zeigt die Verteilung von f_λ in Abhängigkeit dieser Parameter. Hier wurde eine anderer Ansatz vorgenommen, indem die Extremwerte f_λ zu jedem α und c/a herausgefiltert wurden und die Anpassung der Parameter mit der *Curve-Fitting Toolbox* [40] vorgenommen wurde.

Das erste *Schnittbild* (rot gestrichelte Linie in Abb. 4.16) zeigt im Bereich von $\alpha = 1{,}0$ die höchsten Werte und bei steigendem α wird die Verteilung dichter (vgl. auch Abb. A.43 auf S. 174). Bei steigendem c/a-Verhältnis *flacht* die Verteilung in allen α allmählich ab, bis die Verteilung im letzten Teilbild eine geringe Abweichung der Maximalwerte aufweist.

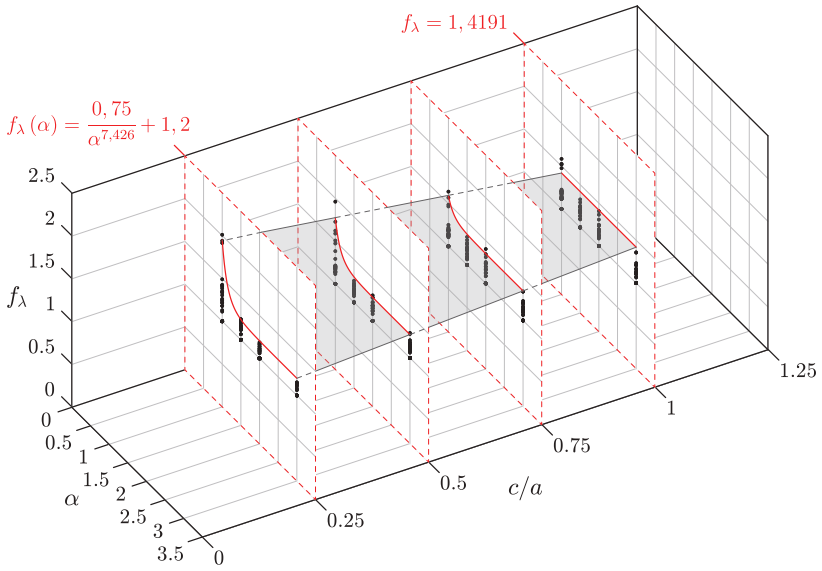


Abbildung 4.16.: Verteilung der Vergrößerungsfaktoren f_λ (•) in Abhängigkeit des Seitenverhältnisses α, des Lasteinleitungsverhältnisses c/a und der *bezogenen Gesamtsteifigkeit* Γ_{St}. Für $c/a = 0{,}25$ ist eine Näherung der Verteilung in Abhängigkeit von α gegeben (——). Für $c/a = 1{,}0$ sind die Werte mit einem konstanten Faktor angegeben (——). In Hellgrau ist die *Hüllfläche* der interpolierten Werte zwischen $c/a = 0{,}25$ und $c/a = 1{,}0$, gezeigt.

Zwischen dem ersten und letzten Teilbild wird ein linearer Verlauf angenommen, wobei im letzten Teilbild von einem konstanten Verlauf ausgegengen wird. Der verwendete Ansatz bei $c/a = 0{,}25$ lautet:

$$f_\lambda\left(\alpha, \frac{c}{a} = 0{,}25\right) = \frac{0{,}75}{\alpha^A} + B \tag{4.20}$$

Die Anpassung der Parameter an die Maximalwerte ergab:

$$f_\lambda\left(\alpha, \frac{c}{a} = 0{,}25\right) = \frac{0{,}75}{\alpha^{7{,}426}} + 1{,}2 \tag{4.21}$$

Bei $c/a = 1{,}0$ wurde ein konstanter Faktor von $f_\lambda = 1{,}4191$ hergeleitet. Aus der Annahme eines linearen Verlaufs zwischen $c/a = 0{,}25$ und $1{,}0$ ergibt sich:

$$f_\lambda\left(\alpha, \frac{c}{a}\right) = \frac{1}{\alpha^{7{,}426}} \cdot \left(1 - \frac{c}{a}\right) + 1{,}2 + 0{,}2191 \cdot \left(\frac{4}{3} \cdot \left(\frac{c}{a}\right) - \frac{1}{3}\right) \tag{4.22}$$

In Abb. 4.16 ist die Fläche (in Hellgrau) der Funktion zu sehen, die die *gestreuten* Werte von f_λ hüllt.

Nachweisführung mit den ermittelten Vergrößerungsfaktoren f_λ bzw. Vergrößerungsfunktionen $f_\lambda(\bar{\lambda}_p)$

Anhand des ermittelten *konstanten* Vergrößerungsfaktors f_λ soll nun erneut der Gesamtfeldnachweis durchgeführt werden. Anschließend wird, wie zuvor, der Vergleich aus Einzel- und Gesamtfeldnachweis gemacht. Dies wird weiterhin in Kombination mit den Einzelnachweisen und der vorgeschlagenen Interpolationsgleichung nach Pourostad durchgeführt.

Die Verwendung erfolgt durch Multiplikation des Faktors mit der Schlankheit. Es gilt:

$$\bar{\lambda}_p = f_\lambda \cdot \bar{\lambda}_{p,0} \tag{4.23}$$

mit:

$$\bar{\lambda}_{p,0} = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}}$$

Abb. 4.17(a) (S. 95) zeigt die Ergebnisse aus Einzelfeld- und Gesamtfeldnachweis mit dem Vergrößerungsfaktor $f_\lambda = 1{,}21$. Zu sehen ist eine gute Anpassung der numerischen Werte. Der einfacheren Handhabung wegen, wird der Vergrößerungsfaktor mit $f_\lambda = 1{,}25$ angesetzt. In Abb. 4.17(b) ist der Nachweis mit dem genannten Faktor gezeigt.

Tabelle 4.3.: Ermittelte Teilsicherheitsbeiwerte γ_M der jeweiligen Nachweise mit eingesetzten Vergrößerungsfaktoren f_λ gemäß Gl. 4.23.

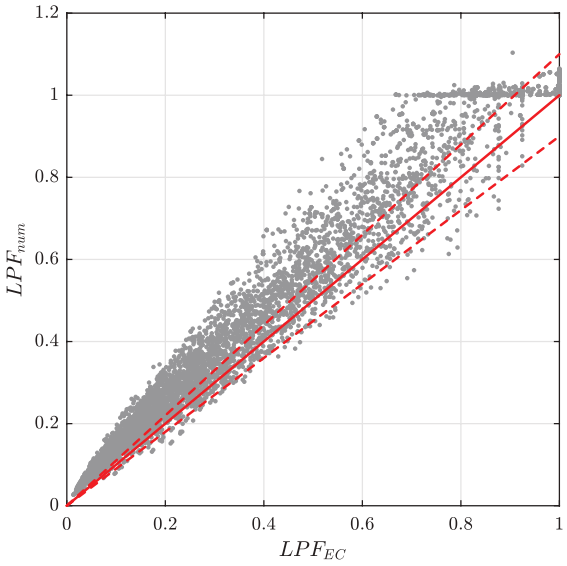
f_λ	γ_M
1,21	1,13
1,25	1,13
1,30	1,12

Pourostad [43, 45] untersuchte die gegeben Faktoren ($f_\lambda = 1{,}21$ und $f_\lambda = 1{,}25$) statistisch. Des Weiteren untersuchte er einen möglichen dritten Faktor $f_\lambda = 1{,}30$ (siehe Abb. 4.18 und Tab. 4.3). Die statistische Untersuchung erfolgte dabei nach dem Widerstandsmodell gemäß DIN EN 1990, Anhang D.8 [11]. Für eine nähere Erläuterung dieser Methode, ist auf [11] und auf die Dissertation von Zizza [56] zu verweisen.

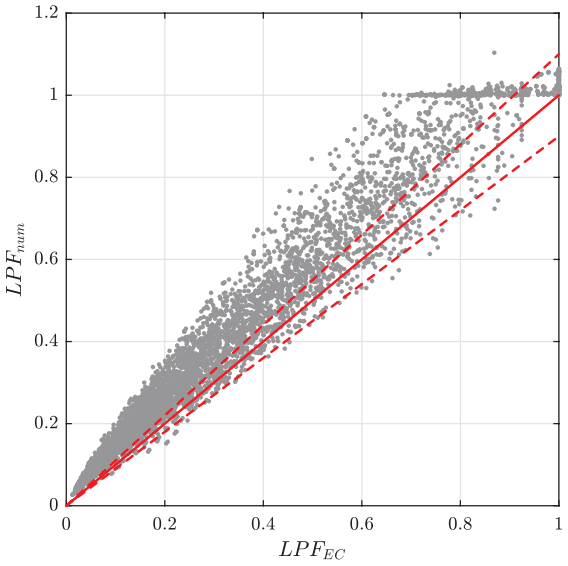
Pourostad zeigte, dass die Anwendung des Faktors $f_\lambda = 1{,}30$ zu der geringsten Abweichung vom Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_M = 1{,}1$ führt. Die Auswertung zeigte eine geringe Abweichung von $\gamma_M = 1{,}12$ (siehe Tab. 4.3), die zu akzeptieren ist, da sich die Werte im sicheren Bereich befinden.

Abb. 4.17(c) und 4.17(d) (S. 95) zeigen den Einzelfeld- und Gesamtfeldnachweis in Kombination mit den Vergrößerungsfunktionen $f_\lambda(\bar{\lambda}_p)$ des *ersten* und *zweiten* Ansatzes.

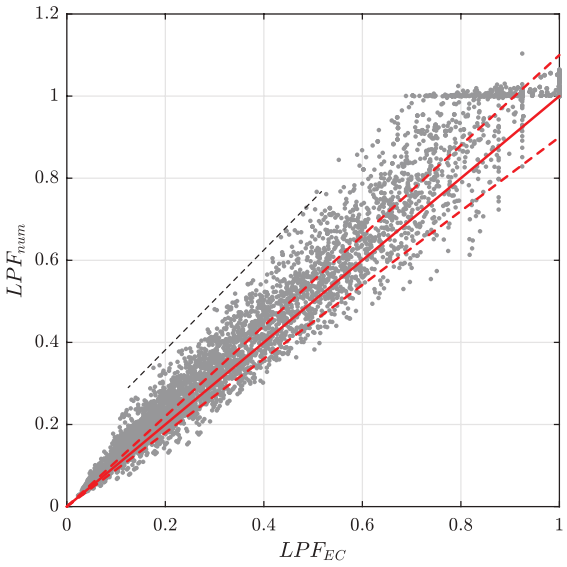
Der *erste Ansatz* (Abb. 4.17(c)) zeigt einige Werte im unsicheren Bereich. Der *zweite Ansatz* (Abb. 4.17(d)) ist aufgrund der gewählten Vorgehensweise zur Anpassung der Maximalwerte, auffällig konservativ.



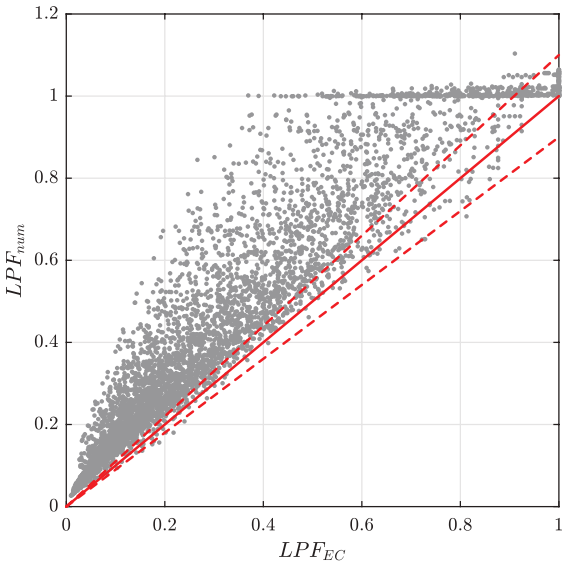
(a) Ergebnisse mit Anwendung des Vergrößerungsfaktors $f_\lambda = 1{,}21$.



(b) Ergebnisse mit Anwendung des Vergrößerungsfaktors $f_\lambda = 1{,}25$.



(c) Ergebnisse mit Anwendung der Vergrößerungsfunktion $f_\lambda(\bar{\lambda}_p)$ des *ersten* Ansatzes. Die Gerade (- - -) deutet die Verteilungsform der *sicheren* Werte an.



(d) Nachweis mit der Vergößerungsfunktion $f_\lambda(\bar{\lambda}_p)$ aus dem *zweiten* Ansatz.

Abbildung 4.17.: Nachweise mit eingesetzten Vergrößerungsfaktoren f_λ und der Vergößerungsfunktion $f_\lambda(\bar{\lambda}_p)$. Es sind die maßgebenden Werte aus dem Einzelfeld- und Gesamtfeld-Nachweis mit den *Einzelnachweisen nach Pourostad* (Kap. 2.4.2), dargestellt. (——): $LPF_{num} = LPF_{EC}$. (- - -): ±10 % -Abweichung.

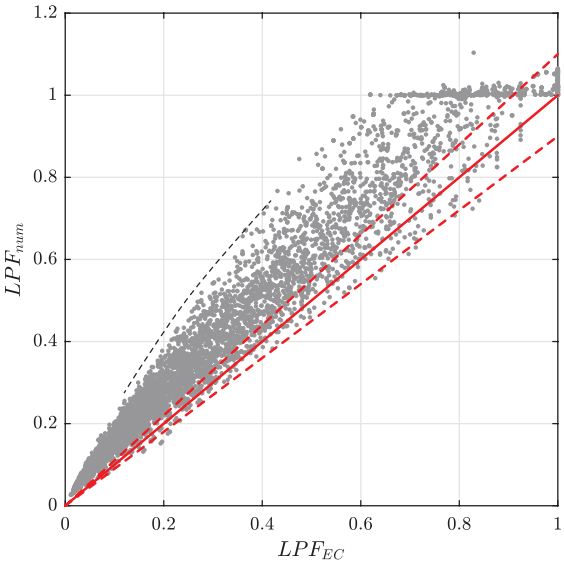


Abbildung 4.18.:
Ergebnisse der maßgebenden Werte aus dem Einzelfeld- und Gesamtfeld-Nachweis mit den *Einzelnachweisen nach Pourostad* (Kap. 2.4.2), mit Anwendung des Vergrößerungsfaktors $f_\lambda = 1{,}30$. Die Kurve (- - -) deutet die Verteilungsform der *sicheren* Werte an. (——): $LPF_{num} = LPF_{EC}$. (- - -): ±10 % -Abw.

4.3. Schlussfolgerung/Empfehlungen

4.3.1. Zu den Längssteifen-Nachweisen (4.2.1)

Aufgrund der Ähnlichkeit der Ergebnisse der Längssteifen-Nachweise nach Seitz [51] und dem BASt-Heft [33], wird für beide Methoden dieselbe Schlussfolgerung gezogen.

Die Ähnlichkeit der verteilten Werte liegt an der theoretischen Grundlage beider Methoden. Bei beiden Methoden werden Verformungen infolge der Imperfektionen angesetzt und die daraus resultierenden *vergrößerten* Momente II. Ordnung ermittelt. In der Methode nach Seitz [51] geschieht dies auf Basis einer theoretischen Herangehensweise. Im BASt-Heft B140 [33] wird dies durch das implementierte Stabwerksmodell bewerkstelligt.

Im Vergleich ist die Herangehensweise des BASt-Heft B140 umständlich und bedarf einer relativ aufwändigen Modellierung. Seitz' Methode kann hingegen als Handrechnung durchgeführt werden und liefert dabei ähnliche Ergebnisse.

Die ermittelten Werte sind, wie oben bereits beschrieben, auffällig konservativ. Da diese Vorschläge in Zusammenhang mangelnder Versuchsdaten für den Gesamtfeldnachweis nach prEN 1993-1-5 [15] erstellt wurden, ist deren Anwendung auch gerechtfertigt gewesen. Jedoch sind einige Punkte zu bemängeln. Die angesetzte Bettungssteifigkeit scheint in beiden Ansätzen, begrenzt in der realen Modellierung eines ausgesteiften Beulfeldes, zu sein. Jedoch zeigte der direkte Vergleich beider Methoden eine *bessere* Auslastung der Steife, durch Anwendung der Methode des BASt-Heftes. Denn die Nachweismethode nach Seitz berücksichtigt lediglich die maßgebende Steife, wohingegen bei der Nachweismethode des BASt-Heftes, der Einfluss des Gesamttragwerks eine gewisse Wirkung besitzt und das System zuzüglich versteift.

Durch die genannten Punkte werden einige Tragreserven außer Acht gelassen, wodurch sich konservative Nachweise mit unwirtschaftlichen Querschnitten ergeben.

4.3.2. Zu dem Einzelfel- und Gesamtfeldnachweis (4.2.2)

Der Nachweis der Einzel- und Gesamtfelder ergab für einige Werte eine Verteilung im *unsicheren* Bereich. Diese Abweichung ist auf die einseitig eingeleitete Querspannung σ_z zurückzuführen. Diese verursacht, wie mehrmals erwähnt, längsgerichtete Spannungen, die in Feldmitte $(a/2)$ ihr Maximum annehmen und das Beulen des Feldes zusätzlich begünstigen. Diese zusätzlichen Längsspannungen werden nicht den Randspannungen σ_x hinzugerechnet, weshalb die angesetzten Spannungen in Längsrichtung kleiner ausfallen als in der Realität. Die alternative, bei der die zusätzlichen Längsspannungen infolge Querbelastung den Randspannungen σ_x hinzugerechnet werden, *brachte* bei einer Untersuchung von POUROSTAD [47] die Ergebnisse zwar auf die *sichere Seite*, jedoch waren auffällig viele konservative Ergebnisse festzustellen. Auf das *Hinzurechnen* dieser zusätzlich Spannungen kann verzichtet werden, da Beulfelder in der Realität angeschweißte Flanschen an beiden (*oberen* und *unteren*) Längsrändern besitzen. Diese nehmen einen Teil der zusätzlichen Längsspannung infolge der Querlast σ_z auf.

4.3.3. Zu den ermittelten Vergrößerungsfaktoren / Vergrößerungsfunktionen (4.2.3)

Die Verwendung eines konstanten Vergrößerungsfaktors f_λ zeigte eine vergleichsweise einfache und direkte Methode zur Anpassung der numerischen Daten an die „Methode der reduzierten Spannungen“ [15]. Wie bereits erwähnt, geht aus der statistischen Auswertung hervor, dass die Anwendung von $f_\lambda = 1{,}30$ die vergleichsweise *besten* Ergebnisse hervorbringen. Zwar zeigt sich eine zu starke Verteilung der Werte hin zum *sicheren* Bereich (vgl. schwarz gestrichelte Kurve in Abb. 4.18), zeigt die Verwendung dieses Faktors jedoch die kleinste Anzahl an *unsicheren* Ergebnissen.

Die Verwendung der *ersten* Vergrößerungsfunktion $f_\lambda(\bar{\lambda}_p)$ zeigte einige unsichere (überschätzte Tragfähigkeit) Ergebnisse, jedoch zeigen sich im *sicheren* Bereich, im Vergleich zu den zuvor ermittelten konstanten Faktoren bessere Anpassungen der numerischen Werte (durch Kurve in Abb. 4.18 bzw. Gerade in Abb. 4.17(c) angedeutet).

Angewandt zeigt der zweite Ansatz zwar auffällig konservative Ergebnisse (siehe Abb. 4.17(d)), da wir uns auf die Anpassung der Parameter auf die Extremwerte beschränkt haben, besitzt jedoch diese Methode Potential und kann in Zukunft evtl. aufgegriffen und verbessert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird jedoch darauf verzichtet.

Es lässt sich schlussfolgern, dass die untersuchte Methode mit vergrößerten Schlankheiten $\bar{\lambda}_p$ die bessere Alternative zum Längssteifen-Nachweis nach Theorie II. Ordnung darstellt und daher deren Anwendung, anstatt dieser, zu empfehlen ist. In diesem werden auch die zusätzlichen Längsspannungen infolge der Querspannung berücksichtigt. Aus den untersuchten Vergrößerungsfaktoren bzw. der Vergrößerungsfunktion empfiehlt sich, aus den oben aufgeführten Gründen, die Verwendung des konstanten Vergrößerungsfaktors $f_\lambda = 1{,}3$ für die globale Beulschlankheit $\bar{\lambda}_p$.

5. Zusammenfassung und Ausblick

5.1. Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Tragverhalten *nichtausgesteifter* Einzelfelder unter asymmetrischer Querbelastung und *längsausgesteifter* Beulfelder unter biaxialer Beanspruchung (Biegebeanspruchung in Längsrichtung und einseitiger quergerichteter Druckbeanspruchung) untersucht.

Im Einzelnen sollte bei der Einzelfelduntersuchung die Spannungsverteilung infolge einseitig eingeleiteter Querspannungen anhand unterschiedlicher Methoden untersucht und beurteilt werden. Beim längsausgesteiften Beulfeld sollte nach der *Methode reduzierter Spannungen* (MRS) gemäß prEN 1993-1-5 [15] die Tragfähigkeit unter Berücksichtigung der Torsionssteifigkeit der Trapezsteifen und Einbeziehung der Interpolationsfunktion nach Pourostad, untersucht werden. Dabei sollten die Vorzüge der vorgeschlagenen Methode gegenüber den Längssteifen-Nachweisen aufgezeigt werden.

Einleitend wurden anhand einer Literaturrecherche die theoretischen Grundlagen vorgestellt. Inhalt dieser Literaturrecherche waren die allgemeinen Grundlagen zum Stabilitätsproblem des Plattenbeulens, gefolgt vom Beulsicherheitsnachweis gemäß prEN 1993-1-5. Im Fokus vorhandener Nachweise stand dabei die Methode reduzierter Spannungen (MRS), die umfassend beschrieben wurde. Gekoppelt an diese Nachweismethode wurden verschiedene Vorschläge zur Interpolation zwischen knickstabähnlichem und plattenartigen Verhalten vorgestellt. Des Weiteren wurde der Einfluss der Torsionssteifigkeit anhand von Forschungsschriften ausgeführt und diesbezüglich die aktuelle Situation in prEN 1993-1-5 dargelegt. Im Anschluss daran wurde die Vorgehensweise zweier Methoden zum Längssteifen-Nachweis vorgestellt, um abschließend in umfassender Form, unterschiedliche Methoden der Spannungs- und Lastausbreitung zu beschrieben.

In den darauffolgenden Parameterstudien konnte gezeigt werden, dass die Methode zur Ermittlung der Spannungsverteilung und -ausbreitung nach dem COMBRI-Forschungsprojekt gute Ergebnisse lieferte. Als weitere ist die analytische Methode zu empfehlen, die mittels Software wie Excel oder Matlab numerisch implementiert werden kann.

Darauf aufbauend konnte festgestellt werden, dass die Tragfähigkeit des Einzelfeldes mit den angesetzten quergerichteten Randspannungen und der Interpolationsfunktion nach Pourostad zu einer guten Übereinstimmung an die numerisch ermittelten Werten (aus GMNIA) führen. Außerdem konnte die Gl.(6.14) gemäß prEN 1993-1-5 Abschn. 6.4.2(5), zur Ermittlung der modifizierten Knicklänge a_{cr} bei variierenden Randspannungen überprüft und deren Verwendung empfohlen werden.

Pourostad führte am Bodenblech des Kastenquerschnitts den Gesamtfeld-Nachweis gemäß der Methode reduzierter Spannungen durch. Im Rahmen dieser Untersuchung hatte Pourostad die Anwendung einer neuen Interpolationsgleichung vorgeschlagen. Des Weiteren empfahl er die Anwendung der Abminderungskurve gemäß prEN 1993-1-5 Abschn. 12.4(5) für den Faktor $\rho_{c,x}$ und die *Knickspannungskurve* nach DIN EN 1993-1-1 Abschn. 6.3.1.2 für $\rho_{c,z}$. Weiter schlägt er die Nutzung der *Einzelnachweise* (Kap. 2.4.2) vor, bei dem jede Spannungskomponente separat nachzuweisen ist.

Die Arbeit konzentrierte sich unter anderem auch auf die Untersuchung des ausgesteiften Stegblechs. Beim Stegblech wurde, wie eingangs erwähnt, das ausgesteifte Beulfeld unter längsgerichteter Biegung und quergerichteter konstanter Belastung untersucht. Dabei wurde die Belastung von reiner Längsspannung (σ_x) bis zu reiner Querspannung (σ_z) variiert. Übereinstimmend mit dem Vorgehen von Pourostad beim Bodenblech wurden die Abminderungskurven gemäß prEN 1993-1-5 Abschn. 12.4(5) für $\rho_{c,x}$ und die *Knickspannungskurve* für $\rho_{c,z}$ für den *Gesamtfeldnachweis* verwendet. Bei reinem Querdruck (σ_z) war zu beobachten, dass die numerischen Werte im *unsicheren* Bereich und daher *unter* der Knickspannungskurve verteilt sind. Aus diesem Grund war die Anpassung der Knickspannungskurve notwendig. Aus den verschiedenen Lösungen, die sich darboten, zeigte sich abschließend die Modifizierung (Erhöhung) der bezogenen Schlankheit $\bar{\lambda}_p$ als die vorteilhafteste und zugleich einfachste Methode.

Im Falle des *Gesamtfeldnachweises* des ausgesteiften Stegblechs war zu erkennen, dass die Anwendung der Methode reduzierter Spannungen gemäß prEN 1993-1-5 in Kombination mit den von Pourostad [43] vorgeschlagenen Einzelnachweisen, der vorgeschlagenen Interpolationsgleichung und eines Faktors von $f_\lambda = 1{,}3$ zur Vergrößerung der bezogenen Schlankheit $\bar{\lambda}_p$, zu *sicheren* Ergebnissen führt und deren Anwendung daher zu empfehlen ist. Weiter erwies die Verwendung der Abminderungskurve nach prEN 1993-1-5 Abschn. 12.4(5) für $\rho_{c,x}$ und die *Knickspannungskurve* nach DIN EN 1993-1-1 Abschn. 6.3.1.2, für die Ermittlung des Abminderungsfaktors $\rho_{c,z}$ als empfehlenswert.

Die Untersuchung der Längssteifen-Nachweise nach Seitz und dem BASt-Heft B140 zeigten eine auffällig konservative Verteilung der Werte. Beim direkten Vergleich beider Methoden erwies sich die Methode des BASt-Heftes als die wirtschaftlichere.

Die Berücksichtigung der Torsionssteifigkeit (der Längssteifen) und deren traglaststeigernde Effekt konnte, auf dieser Studie aufbauend, bestätigt werden. Diese alternative Vorgehensweise zeigte vielversprechende Resultate und es kann daher auf dem Längssteifen-Nachweis verzichtet werden.

5.2. Ausblick

Anhand der analytischen Methode zur Ermittlung der Spannungsverteilung infolge einseitiger konstanter Spannungen, ist eine exakte Lösung vorgestellt worden. Daran anknüpfend könnten Formel für die Spannungsverteilung und Lastausbreitungslänge entwickelt werden, die einen genaueren Ansatz als die des COMBRI-Forschungsprojekts liefern.

Die Untersuchung des ausgesteiften Feldes (mit geschlossenen Steifenprofilen) erfolgte bei biaxialer Belastung, bestehend aus einer längsgerichteten Biegespannung mit einem Spannungsverhältnis von $\psi_x = -1$ und einer einseitig quergerichteten konstanten Belastung. Die Auswertung und Anpassung der Daten sind auf die genannte Situation begrenzt. Es ist in zukünftigen Studien zu prüfen, ob die untersuchte Vorgehensweise und der ermittelte Vergrößerungsfaktor $f_\lambda = 1{,}3$ auch für andere Spannungsverhältnisse ψ_x, noch die erwünschten Ergebnisse liefert.

Weiterhin sollte untersucht werden, wie sich die Benutzung *offener* Steifenquerschnitte auf die Nachweisführung mit dem vorgeschlagenen Vergrößerungsfaktor auswirkt und ob gegebenenfalls eine *Justierung* des Faktors erforderlich ist. Daran anknüpfend können evtl. Erkenntnisse und Zusammenhänge gewonnen werden um die vorgeschlagene Vergrößerungsfunktion $f_\lambda(\bar{\lambda}_p)$ auszubessern bzw. neu zu formulieren.

Des Weiteren sind die Ergebnisse dieser vorliegenden Untersuchung mit der Methode der wirksamen Breiten (MWB) nach prEN 1993-1-5 zu vergleichen.

Literatur

1. American Institute of Steel Construction (AISC): *Design Manual for Orthotropic Steel Plate Deck Bridges*. New York: AISC, 1963 (siehe S. 37, 38, 50).
2. Betten, J. und C. H. Shin: „Elastic-plastic buckling analysis of rectangular plates subjected to biaxial loads“. *Forschung im Ingenieurwesen* (2000), Bd. 65(9): S. 273–278. doi: 10.1007/s100109900023 (siehe S. 9).
3. Braun, Benjamin: „Stability of steel plates under combined loading“. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2010. Stuttgart: Inst. für Konstruktion und Entwurf, 2010. doi: 10.18419/opus-349 (siehe S. 44, 46, 47).
4. Centre Technique Industriel de la Construction Métallique: *EBPlate-Software*. url: https://www.cesdb.com/ebplate.html (siehe S. 15, 24, 78).
5. Dassault Systèmes: *ABAQUS Analysis User's Manual: Version 6.7 Documentation*. url: http://130.149.89.49:2080/v6.7/books/usb/default.htm (besucht am 10. 08. 2021) (siehe S. 44).
6. Dassault Systèmes: *ABAQUS Scripting Reference Manual: Version 6.6 Documentation*. url: https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.6/books/ker/default.htm (besucht am 18. 03. 2021) (siehe S. 43).
7. Dassault Systèmes: *ABAQUS Scripting User's Manual: Version 6.6 Documentation*. url: https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.6/books/cmd/default.htm (besucht am 18. 03. 2021) (siehe S. 43).
8. Dassault Systèmes: *ABAQUS/CAE-Software*. url: https://www.3ds.com/de/produkte-und-services/simulia/produkte/abaqus/ (besucht am 10. 08. 2021) (siehe S. 43, 44, 71, 79).
9. Dassault Systèmes: *Getting Started with ABAQUS: Version 6.6 Documentation*. url: https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.6/books/gsa/default.htm?startat=ch05s01.html (besucht am 10. 08. 2021) (siehe S. 44).
10. Deutsches Institut für Normung: *DIN 18800-3:2008-11: Stahlbauten - Teil 3: Stabilitätsfälle - Plattenbeulen*. November 2008 (siehe S. 8, 20, 26).
11. Deutsches Institut für Normung - Europäische Norm: *DIN EN 1990: Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung*. Dezember 2010 (siehe S. 94).
12. Deutsches Institut für Normung - Europäische Norm: *DIN EN 1993-1-1: Eurocode 3 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. Dezember 2010 (siehe S. 87, 89, 90).
13. Deutsches Institut für Normung - Europäische Norm: *DIN EN 1993-1-5:2019-10: Eurocode 3 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile*. Oktober 2019 (siehe S. 20, 24, 26, 30).

14. Deutsches Institut für Normung - Europäische Norm: *prEN 1993-1-14:2020: Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1-14: Design assisted by.* Juli 2019 (siehe S. 12, 46–48, 75, 79).

15. Deutsches Institut für Normung - Europäische Norm: *prEN 1993-1-5: Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-5: Plated structural.* September 2020 (siehe S. 2, 3, 7, 11–15, 17–21, 25–27, 30, 35, 44, 45, 59, 60, 62, 67, 68, 76, 79, 84, 87, 96, 97, 99).

16. Dlubal Software GmbH: *4.17 Stäbe.* URL: https://www.dlubal.com/de/downloads-und-infos/dokumente/online-handbuecher/rfem-5/04/17 (besucht am 11. 08. 2021) (siehe S. 72).

17. Dlubal Software GmbH, Hrsg.: *RF-STABIL: Verzweigungslastfaktoren, Knicklängen und Eigenformen: Programm-Beschreibung.* Januar 2020 (siehe S. 32, 33, 81).

18. Dlubal Software GmbH: *RFEM 5-Software.* URL: https://www.dlubal.com/de/produkte/fem-statik-software-rfem/was-ist-rfem (besucht am 10. 08. 2021) (siehe S. 31, 32, 43, 55, 71, 81, 125).

19. Dlubal Software GmbH: *RFEM-/RSTAB-Zusatzmodul RF-COM/RS-COM.* URL: https://www.dlubal.com/de/produkte/rfem-und-rstab-zusatzmodule/sonstige/rf-com (besucht am 10. 08. 2021) (siehe S. 71).

20. Ehret, Gerd: *Optimierungsverfahren für nicht linearisierbare Modelle: Elfte Vorlesung zu Messdatenauswertung und Messunsicherheit (MDA): Vorlesung.* 15.01.2018 (siehe S. 90).

21. Fischer, M., R. Grube, H. Rieger und P. Wenk: „Messung der Vorverformungen von beulgefährdeten Stahlblechen mit und ohne Steifen: Bericht aus dem Fachgebiet Stahlbau". *Konstruktiver Ingenieurbau Universität Dortmund* (Dezember 1989), Bd. (6) (siehe S. 48, 62).

22. Geissler, Karsten: *Handbuch Brückenbau: Entwurf, Konstruktion, Berechnung, Bewertung und Ertüchtigung.* Berlin: Ernst & Sohn, 2014 (siehe S. 1, 2, 15, 18).

23. Gross, Dietmar: *Technische Mechanik 4: Hydromechanik Elemente der Höheren Mechanik Numerische Methoden.* SpringerLink Bücher. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. DOI: 10.1007/978-3-642-16828-4 (siehe S. 37, 50).

24. Hake, Erwin und Konstantin Meskouris: *Statik der Flächentragwerke: Einführung mit vielen durchgerechneten Beispielen.* 2., korr. Aufl. Berlin, Heidelberg und New York: Springer, 2007 (siehe S. 6, 37, 50).

25. Heidt, Matthias: „Längsausgesteifte Beulfelder mit geschlossenen Steifen unter mehrachsiger Druckbeanspruchung". Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie, Juni 2019 (siehe S. 10, 20, 21, 24, 46, 47, 71, 79).

26. Kindmann, Rolf: *Stahlbau: Teil 2: Stabilität und Theorie II. Ordnung.* 4., vollständig überarbeitete Auflage. Bauingenieur-Praxis. Berlin: Ernst, Wilhelm & Sohn, 2008 (siehe S. 5–11, 24).

27. Klöppel, Kurt und Joachim Scheer: *Beulwerte ausgesteifter Rechteckplatten: Kurventafeln zum direkten Nachweis der Beulsicherheit für verschiedene Steifenanordnungen und Belastungen*. Bd. 1. Berlin, München: Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, 1960 (siehe S. 9).

28. Klöppel, Kurt, Joachim Scheer und Karl Heinrich Möller: *Beulwerte ausgesteifter Rechteckplatten: Zweiter Band*. Bd. 2. Band. Berlin, München: Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, 1968 (siehe S. 9).

29. Kövesdi, Balázs, Muhammad Ziad Haffar und Sándor Ádány: „Buckling resistance of longitudinally stiffened plates: Eurocode-based design for column-like and interactive behavior of plates with closed-section stiffeners“. *Thin-Walled Structures* (2021), Bd. 159: S. 107266. doi: 10.1016/j.tws.2020.107266 (siehe S. 21).

30. Kuhlmann, Ulrike: „Schlanke Tragwerke: Stabilität“. Vorlesungsskript. Universität Stuttgart, 2019 (siehe S. 12, 16, 17, 19).

31. Kuhlmann, Ulrike: „Stahlflächentragwerke: 2. Plattenbeulen“. Vorlesungsskript. Universität Stuttgart, 2020 (siehe S. 5, 6, 9).

32. Kuhlmann, Ulrike: „Stahlflächentragwerke: 3. Schalenbeulen“. Vorlesungsskript. Universität Stuttgart, 2020 (siehe S. 46).

33. Kuhlmann, Ulrike, Christina Schmidt-Rasche, Jörg Frickel und Vahid Pourostad: *Untersuchungen zum Beulnachweis nach DIN EN 1993-1-5: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen*. Hrsg. von Bundesanstalt für Strassenwesen. Bergisch Gladbach, Oktober 2017 (siehe S. 3, 12–14, 20, 26, 30, 33, 37, 55, 57, 62, 67, 79, 81, 84, 85, 96, 125).

34. Kuhlmann, Ulrike u. a., Hrsg.: *Combri - valorisation of knowledge for competitive steel and composite bridges: Contract no RFS2-CT-2007-00031, 1 July 2007 to 31 December 2008 ; final report*. Luxembourg, 2010. doi: 10.2777/75697 (siehe S. 62, 78).

35. Kuhlmann, Ulrike u. a., Hrsg.: *COMBRI-Handbuch Brücken: Teil I: Anwendung von Eurocode-Regelungen*. Handbuch. 2008 (siehe S. 62).

36. Kuhlmann, Ulrike u. a., Hrsg.: *COMBRI-Handbuch Brücken: Teil II: Stand der Technik und Entwurf von Stahl- und Verbundbrücken*. Handbuch. 2008 (siehe S. 62).

37. Kuhlmann, Ulrike u. a., Hrsg.: *Competitive steel and composite bridges by innovative steel-plated structures*. Luxembourg, 2008. doi: 10.2777/57906 (siehe S. 33, 35–37, 56, 62, 67, 78).

38. Lindner, Joachim, Hrsg.: *Stahlbauten: Erläuterungen zu DIN 18800 Teil 1 bis Teil 4*. 3. Aufl. Beuth-Kommentare. Berlin, Köln und Berlin: Beuth und Ernst, 1998 (siehe S. 33).

39. Martin, Pierre-Olivier, Tien Minh Nguyen und Laurence Davaine: „Effect of the torsional stiffness of closed-section stiffeners on plate buckling in Eurocode 3, Part 1-5“. *Steel Construction* (2019), Bd. 12(1): S. 10–22. doi: 10.1002/stco.201800001 (siehe S. 24).

40. MathWorks: *Curve Fitting Toolbox*. URL: https://de.mathworks.com/products/curvefitting.html (besucht am 26. 08. 2021) (siehe S. 92).

41. MathWorks: *MATLAB*. URL: https://de.mathworks.com/products/matlab.html (besucht am 26. 08. 2021) (siehe S. 80, 83).

42. MathWorks: *Matlab: Documentation*. URL: https://de.mathworks.com/help/matlab/index.html (besucht am 26. 08. 2021) (siehe S. 65, 92).

43. Pourostad, Vahid: „Stabilitätsverhalten von nichtrechteckigen Beulfeldern und ausgesteiften Beulfeldern unter mehrachsigen Beanspruchungen (vorläufig)“. Dissertation. Universität Stuttgart, in Bearbeitung (siehe S. 22, 23, 60, 62, 67, 71, 76, 78, 84, 86, 94, 100).

44. Pourostad, Vahid, Matthias Heidt, Peter Knödel, Ulrike Kuhlmann und Thomas Ummenhofer: „Über den Einfluss der Torsionssteifigkeit von Längssteifen bei Beulfeldern unter biaxialen Druckspannungen“. *Stahlbau* (2020), Bd. 89(2): S. 117–128. DOI: 10.1002/stab.201900111 (siehe S. 77, 79).

45. Pourostad, Vahid und Ulrike Kuhlmann: „Interpolation of plate- and column-like behaviour: WG 5 21st Official Meeting / ECCS-TWG 8.3, 32nd Official Meeting“. Präsentation. Universität Stuttgart, 2021 (siehe S. 22, 23, 25, 60, 62, 67, 79, 84, 86, 94).

46. Pourostad, Vahid, Ulrike Kuhlmann, Martin Mensinger und Nadine Maier: „Längsausgesteifte Beulfelder unter mehrachsiger Beanspruchung: PbA-Sitzung am Dienstag, 28.07.2020“. Präsentation. Universität Stuttgart und Technische Universität München, Juli 2020 (siehe S. 22, 23, 25, 60, 62, 67, 71, 78, 79, 84, 86).

47. Pourostad, Vahid, Ulrike Kuhlmann, Martin Mensinger und Nadine Maier: „Längsausgesteifte Beulfelder unter mehrachsiger Beanspruchung: PbA-Sitzung am Mittwoch, 28.04.2021“. Präsentation. Universität Stuttgart und Technische Universität München, April 2021 (siehe S. 22, 23, 25, 60, 62, 67, 79, 84, 86, 97).

48. Preussler, Thomas: „Finite-Elemente-Methode II: 4. Nichtlineare FEM“. Vorlesungsskript. Fachhochschule Trier , Umwelt-Campus Birkenfeld, 2021 (siehe S. 47).

49. Rusch, A. und J. Lindner: „Überprüfung der grenz (b/t)-Werte für das Verfahren Elastisch-Plastisch“. *Stahlbau* (2001), Bd. 70(11): S. 857–868. DOI: 10.1002/stab.200102840 (siehe S. 47).

50. Scheer, Joachim, Heinz Nölke und Eberhard Gentz: *Beulsicherheitsnachweise für Platten: DASt-Richtlinie 012 ; Grundlagen, Erl., Beisp.* Köln: Stahlbau-Verlags-GmbH, 1979 (siehe S. 12).

51. Seitz, Martin Paul: „Tragverhalten längsversteifter Blechträger unter quergerichteter Krafteinleitung“. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2005. Stuttgart: Inst. für Konstruktion und Entwurf, 2005. DOI: 10.18419/opus-225 (siehe S. 1, 3, 20–22, 27, 29, 46, 79, 84, 85, 96).

52. Timmers, Ralph, Gerhard Lener, Franc Sinur, Balázs Kövesdi und Rolando Chacón: „Stabilitätsnachweise nach EN 1993–1–5 – Theorie und Beispiele“. *Stahlbau Kalender 2015*. Hrsg. von Kuhlmann, Ulrike. Wiley, 2015: S. 209–286. doi: 10.1002/9783433605219.ch3 (siehe S. 12, 46).

53. Vasios, Nikolaos: „Nonlinear Analysis of Structures: The Arc Length Method: Formulation, Implementation and Applications“. Skript. Harvard University, 2015 (siehe S. 46, 47).

54. Wikipedia contributors: *IEEE 754*. Juli 2021. url: https://de.wikipedia.org/wiki/IEEE_754 (besucht am 02. 09. 2021) (siehe S. 65).

55. Wikipedia contributors: *NaN*. März 2021. url: https://de.wikipedia.org/wiki/NaN (besucht am 19. 08. 2021) (siehe S. 65).

56. Zizza, Antonio: „Buckling behaviour of unstiffened and stiffened steel plates under multiaxial stress states“. Dissertation. Stuttgart: Universität Stuttgart. doi: 10.18419/opus-8994 (siehe S. 21, 74, 76, 94).

Abbildungsverzeichnis

1.1. Schematische Darstellung des Taktschiebeverfahrens mit den Schnittgrößenverläufen (nach [51]). 1
1.2. Beulfelder eines Kastenquerschnitts mit den Belastungen infolge Biegung und der örtlich eingeleiteten Auflagerkraft q_A (nach [22]). 2

2.1. Beulfiguren infolge Druckspannung σ_x und Schubspannung τ (nach [26]). Die Ränder sind dabei gelenkig gelagert (- - -). 5
2.2. Einzelfeld unter konstanter Längsbelastung (σ_x) und *Navierscher* Lagerung (- - -) (nach [31]). 6
2.3. Verlauf der Beulwerte $k_{\sigma\alpha}$ in Abhängigkeit der Anzahl der Halbwellen m und des Seitenverhältnisses α (——) für ein Beulfeld mit konstanter Längsspannung σ_x. Kurve (——) ist die *Hüllkurve* aus den Minimalwerten aller Beulwertkurven. Die Übergänge zwischen der minimalen Anzahl an Halbwellen sind gekennzeichnet durch (- - -). Kurve (- - -) zeigt die Näherung des Beulwertes bei $k_{\sigma\alpha} = 4{,}0$. 7
2.4. Darstellung verschiedener Steifenquerschnitte (nach [26]). 7
2.5. Beulflächen von Beulfeldern mit den Seitenverhältnissen $\alpha = 1$, 2, und 4 bei konstanter Längsspannung σ_x (nach [26]). Des Weiteren sind die Knotenlinien (——) dargestellt. 8
2.6. Einfluss der bezogenen Biegesteifigkeit γ, eines längsversteiften Beulfeldes mit längsgerichteter Spannung σ_x, auf die resultierende Beulfigur (nach [26]). 9
2.7. Verlauf der Beulwerte (——) k_τ für *Schubbelastung* in Abhängigkeit des Seitenverhältnisses α. Markiert ist der Übergang (- - -) der Abschnittsweisen Funktion. 10
2.8. Darstellung möglicher Fälle von knickstabähnlichem Verhalten ((*ii*) und (*iii*)). In (*ii*) ist knickstabähnliches Verhalten infolge gelöster Lagerungen der nichtbelasteten Ränder dargestellt. (*iii*) zeigt zum einen knickstabähnliches Verhalten infolge eines großes Seitenverhältnisses α und quergerichteter Spannungen, zum anderen infolge längsgerichteter Spannungen eines längsausgesteiften Feldes. In (*i*) ist zum Vergleich plattenartiges Verhalten dagestellt (nach [26]). 11
2.9. Flussdiagramm zur Anwendung der *Methode der reduzierten Spannungen* (MRS) (nach [15]). 13
2.10. Darstellung zweier Optionen zur Durchführung von Einzelfeld-Nachweisen (nach [33]). *Option* 1 (*ii*) zeigt das isoliert zu betrachtende Einzelfeld. In *Option* 2 (*iii*) ist der Einzelfeldnachweis am Gesamtfeld durchzuführen. In (*iii*) sind die Eigenformen zu wählen, die lokales Beulen hervorrufen, weshalb in der Abbildung lokale Beulformen (- - -) angedeutet sind (weitere Erläuterung sind im Text). 14

2.11. Dargestellt sind: Die *Eulerhyperbel* (——), die *Winterkurve* (- - -), die Abminderungskurve nach prEN 1993-1-5 Abschn. 12.4(5) mit $\bar{\lambda}_p = 0{,}8$ (——) und die Abminderungskurve $\chi_c(\bar{\lambda}_p)$ nach DIN EN 1993-1-1 Abschn. 6.3.1.2 mit $\alpha_{e,max} = 0{,}4563$ eines *geschlossenen* Steifenquerschnitts. (——). Die *graue Fläche* zeigt die *überkritischen Trageserven* in den Bereichen $\bar{\lambda}_p \geq 1{,}220$, die die Anwendung der *Winterkurve* im Vergleich zur *Eulerhyperbel* besitzt. Die Gerade (- - -) zeigt den Schnittpunkt der genannten Kurven. 16
2.12. Definition der Exzentrizitäten e_1 und e_2 in Gl. 2.20 (nach [30]). 17
2.13. Dargestellt ist die Interpolationsfunktion nach prEN 1993-1-5. Markiert ist außerdem der Interpolationsbereich zwischen knickstabähnlichen Verhalten (χ_c) bei $f = 0$ und plattenartigen Verhalten (ρ_p) bei $f = 1{,}0$. 18
2.14. Interpolationsfunktionen nach Seitz für die einseitig (——) und beidseitig (- - -) quergerichtete Belastung und nach Kövesdi (——). Des Weiteren ist die Interpolationsfunktion nach prEN 1993-1-5 (——) dargestellt. Markiert ist außerdem der Interpolationsbereich zwischen knickstabähnlichen Verhalten (χ_c) bei $f = 0$ und plattenartigen Verhalten (ρ_p) bei $f = 1{,}0$. 22
2.15. Interpolationsfunktion nach Pourostad für den *nicht ausgesteiften* Fall mit längsgerichteter (——) und quergerichteter (- - -) Belastung und für den *ausgesteiften* Fall mit einer bezogenen Schlankheit von $\bar{\lambda}_p = 1{,}0$ (——) und $\bar{\lambda}_p = 4{,}0$ (- - -). Des Weiteren ist die Interpolationsfunktion nach prEN 1993-1-5 (——) dargestellt. Markiert ist außerdem der Interpolationsbereich zwischen knickstabähnlichen Verhalten (χ_c) bei $f = 0$ und plattenartigen Verhalten (ρ_p) bei $f = 1{,}0$. 23
2.16. Bild eines aufgetrennten Steifenflanschs zur Simulierung einer Steife mit geringer Torsionssteifigkeit θ_{St} (nach [25]). 24
2.17. Flussdiagramm zur Anwendung der *Methode der reduzierten Spannungen* (MRS) für die Nachweisführung des Gesamtfeldes unter biaxialer konstanter Druckbelastung, mit den Vorschlägen nach Pourostad. 25
2.18. In der linken Bildhälfte ist ein einfach längsversteiftes Beulfeld mit längsgerichteter Biegebelastung und einseitig quergerichteter, konstanter Belastung, dargestellt. In der rechten Bildhälfte ist die Beanspruchung der Längssteife infolge dieser Belastung dargestellt. Weiterhin ist die geometrische Ersatzimperfektion $w_{0,St}$ in Form einer Vorkrümmung illustriert (nach [51]). 27
2.19. Abtriebskräfte $p_a(x)$ infolge der quergerichteten Spannungen $\sigma_{z,St}$ auf Höhe der Steife (nach [51]). 27
2.20. Dargestellt sind die Abtriebskräfte $p_a(x)$, die Steifen-Längskräfte $N_{x,St}$ und die daraus resultierende elastische Verformung w_{el} in Addition zur Vorkrümmung w_0 (nach [51]). 27
2.21. Flussdiagramm zur Vorgehensweise beim Längssteifen-Nachweis nach dem BASt-Heft B140. Es sind die Stabwerksmodelle mit den jeweiligen Belastungen und Lagerungsbedingungen gemäß der Darstellung der Software RFEM [18] illustriert. 31

2.22. Geometrie und Belastung einer ausgesteiften Platte mit den Benennungen nach dem BASt-Heft B140. Gezeigt werden der Spannungsverlauf $\sigma_z(z)$ und der Verlauf der Lastausbreitung $c_u(z)$. Außerdem sind exemplarisch $\sigma_{z,u}$ und c_u im Bereich der zweiten Steife illustriert. 34

2.23. Geometrie und Belastung einer ausgesteiften Platte mit den Benennungen nach dem COMBRI-Forschungsprojekt. Gezeigt werden der Spannungsverlauf $\sigma_{z,finite}(z)$ und der Verlauf der Lastausbreitung $c_u(z)$. Außerdem sind exemplarisch $\sigma_{z,u}$ und c_u im Bereich der zweiten Steife illustriert. 35

2.24. Geometrie und Belastung einer ausgesteiften Platte mit den Benennungen gemäß analytischer Lösung [24]. Gezeigt werden der Spannungsverlauf $\sigma_z(z)$ und der Verlauf der Lastausbreitung $c_u(z)$. Außerdem sind exemplarisch $\sigma_{z,u}$ und c_u im Bereich der zweiten Steife illustriert. 37

2.25. Dargestellt ist in (i) die Belastung einer Platte mit einer abschnittsweisen konstanten Randlast p_0. In (ii) sind die einzelnen *Fourierglieder* mit den unterschiedlichen Phasen (Anzahl Sinus-Halbwellen) und Amplituden zu sehen. Für $p_1(x)$ ist exemplarisch die maximale Amplitude p_1 gegeben. In (iii) ist die Funktion aus der Summe von $n = 19$ Elementen dargestellt (——), die sich mit steigender Elementzahl n, allmählich dem rechteckigen *Last* -Verlauf (- - -) annähert (nach [1]). 38

2.26. Auswertung der Gl. 2.88, 2.89 und 2.90 für eine Platte mit dem Seitenverhältnis $\alpha = 1{,}0$, dem Lasteinleitungsverhältnis von $c/a = 0{,}25$ und einer *Einheits*-Belastung $p_0 = 1{,}0$. 40

3.1. Dargestellt sind die zwei Varianten zur Modellierung von Schalenelementen in Abaqus. Weiterhin sind die Freiheitsgrade an die jeweiligen Elementknoten illustriert (nach [5]). 44

3.2. Modellierung des Werkstoffverhaltens warmgewalzter Stähle *ohne Wiederverfestigung* (nach [14]). (ii) zeigt die Spannungs-Dehnungskurve des verwendeten Modells. 46

3.3. Darstellung des (i) *Newton-Raphson-Verfahren* und des (ii) *modifizierten Riks-Verfahren* anhand der Last-Verschiebungskurve (nach [3]). 47

3.4. Modellierung geometrischer Ersatzimperfektionen (nach [14]). Angegeben sind in (i) und (ii) die maximale Amplitude aus der Vorkrümmung e_0 und in (iii) die Steifenverdrehung $\varphi_e = 1/50$. 48

3.5. Darstellung der Geometrie, Belastung und Lagerungsbedingungen der Modelle A, B und C (von (i) bis (v)). In (vi) sind die verwendeten Lager dargestellt. 49

3.6. Spannungsverlauf $\sigma_z(z)$ und Verlauf der Lastausbreitungslänge $c_u(z)$ (—) der analytischen Lösung in Abhängigkeit des Lasteinleitungsverhältnisses c/a und einem Seitenverhältnis von $\alpha = 1{,}0$. Weiterhin sind bei $z/b = 0{,}2;\ 0{,}4;\ 0{,}6$ und $0{,}8$ die Verläufe der Querspannungen in Längsrichtung $\sigma_z(x)$ dargestellt. Das Rechteck (- - -) zeigt den äquivalenten, konstanten Spannungsverlauf in den betrachteten z/b-*Schnitten*. Weiterhin sind die Vorzeichen der jeweiligen Spannungen gegeben. Der besseren Sichtbarkeit wegen sind die Spannungsverläufe $\sigma_z(z)$ und $\sigma_z(x)$ mit einem Skalierungsfaktor ($f_{scale} = 3{,}0$) vergrößert worden. 51

3.7. Spannungsverlauf $\sigma_z(z)$ gemäß analytischer Lösung für $\alpha = 1{,}0$, in Abhängigkeit der Elementzahl n und des Lasteinleitungsverhältnisses c/a. Der Rand der *grauen Fläche* zeigt die genaue Lösung mit einer großen Anzahl an Fourierelementen ($n = 99$). Des Weiteren sind abgebildet: *Kurve* (—) mit $n = 1$, *Kurve* (- - -) mit $n = 7$, *Kurve* (—) mit $n = 13$ und *Kurve* (- - -) mit $n = 19$. 52

3.8. Spannungsverlauf $\sigma_z(z)$ gemäß analytischer Lösung für $\alpha = 1{,}0$, in Abhängigkeit der Elementzahl n und des Lasteinleitungsverhältnisses c/a. Der Rand der *grauen Fläche* zeigt die genaue Lösung mit einer großen Anzahl an Fourierelementen ($n = 99$). Des Weiteren sind abgebildet: *Kurve* (—) mit $n = 25$, *Kurve* (- - -) mit $n = 31$, *Kurve* (—) mit $n = 37$ und *Kurve* (- - -) mit $n = 43$. Der *rote Pfeil* zeigt den Bereich der Verbesserung infolge höherer Anzahl an Fourierelementen. 53

3.9. Darstellung der Spannungsverläufe $\sigma_x(z)$, $\sigma_z(z)$ bei $x = 0{,}5\,a$ und $\tau_{xz}(z)$ bei $x = a$, anhand eines Feldes des Seitenverhältnisses von $\alpha = 1{,}0$ und des Lasteinleitungsverhältnisses $c/a = 1{,}0$. Weiterhin sind die Vorzeichen der jeweiligen Spannungen gegeben. Der besseren Sichtbarkeit wegen sind die Spannungsverläufe mit einem Skalierungsfaktor ($f_{scale} = 3{,}0$) vergrößert worden. 54

3.10. Abbildungen des für die Untersuchung verwendeten *ausgesteiften* und *nicht ausgesteiften* Modells, gemäß dem Beispiel im BASt-Heft (nach [33]). Alle Maßangaben in mm. 55

3.11. Vergleich des Spannungsverlaufs $\sigma_z(z)$ der analytischen Lösung mit den Spannungsverläufen der numerischen Lösung des *nicht ausgesteiften* und *ausgesteiften* Beulfeldes. 55

3.12. Vergleich der Spannungsverläufe $\sigma_z(z)$ des analytischen Ansatzes (—) mit dem Ansatz des COMBRI-Forschungsprojekts (- - -), in Abhängigkeit des c/a-Verhältnisses. Das betrachtete Seitenverhältnis ist $\alpha = 1{,}0$. 56

3.13. Vergleich der Spannungsverläufe $\sigma_z(z)$ des analytischen Ansatzes (—) mit dem Ansatz des BASt-Heftes B140 (- - -), in Abhängigkeit des c/a-Verhältnisses. Das betrachtete Seitenverhältnis ist $\alpha = 1{,}0$. 57

3.14. Lastausbreitungslänge $c_u(z)$ in Abhängigkeit unterschiedlicher Lasteinleitungsverhältnisse c/a und einem Seitenverhältnis von $\alpha = 1{,}0$. Dargestellt sind: Analytische Lösung (- - -), Lösung nach dem COMBRI-Forschungsprojekt (- - -), Lösung nach dem BASt-Heft (- - -) und die kombinierten Lösung (·····) aus dem Spannungsverlauf $\sigma_z(z)$ des COMBRI-Forschungsprojekts und der Lastausbreitungslänge $c_u(z)$ des BASt-Heftes. 58

3.15. Dargestellt sind die Verhältnisse $\sigma_{cr,c,num}/\sigma_{cr,c,EC}$ aus den numerischen und theoretischen Werten gemäß prEN 1993-1-5 Abschn. 6.4.2(3) [15]. Diese wurden für einen Intervallbereich von $1{,}0 \leq \alpha \leq 10$ untersucht. . . 59

3.16. LBA Untersuchung des *Modells A*. In der rechten Bildhälfte sind die Interpolationskurven nach dem prEN 1993-1-5 (——) und dem Vorschlag von Pourostad (- - -) dargestellt. In der linken Bildhälfte sind die Ergebnisse in Abhängigkeit der Verhältnisse α und c/a abgebildet. Gezeigt werden: Der Bereich des knickstabähnlichen Verhaltens (χ_c), des plattenartigen Verhaltens (ρ_p) und den dazwischenliegenden *Interpolationsbereich*. 61

3.17. LBA Untersuchung des *Modells B*. In der rechten Bildhälfte sind die Interpolationskurven nach dem prEN 1993-1-5 (——) und dem Vorschlag von Pourostad (- - -) dargestellt. In der linken Bildhälfte sind die Ergebnisse in Abhängigkeit der verhältnisse α und c/a abgebildet. Gezeigt werden: Der Bereich des knickstabähnlichen Verhaltens (χ_c), des plattenartigen Verhaltens (ρ_p) und den dazwischenliegenden *Interpolationsbereich*. 62

3.18. Ergebnisse der GMNIA-Untersuchung des *Modells C*, mit Verwendung der **analytischen** Lösung zur Ermittlung des Spannungsverlaufs $\sigma_z(z)$ und der Lastausbreitung $c_u(z)$. Dargestellt sind jeweils die Untersuchungen zweier Imperfektionsamplituden. Des Weiteren sind die Ergebnisse aus der Interpolationsfunktion des prEN 1993-1-5 (•) und dem Vorschlag von Pourostad (•) abgebildet. Es sind außerdem die *unsicheren Ergebnisse* (- - -) mit deren Seitenverhältnissen α umkreist. (——): $LPF_{num} = LPF_{EC}$. (- - -): ±10 % -Abweichung. 63

3.19. Ergebnisse der GMNIA-Untersuchung des *Modells C*, mit Verwendung des Ansatzes des **COMBRI-Forschungsprojekts** zur Ermittlung des Spannungsverlaufs $\sigma_z(z)$ und der Lastausbreitung $c_u(z)$. Dargestellt sind jeweils die Untersuchungen zweier Imperfektionsamplituden. Des Weiteren sind die Ergebnisse aus der Interpolationsfunktion des prEN 1993-1-5 (•) und dem Vorschlag von Pourostad (•) abgebildet. Es sind außerdem die *unsicheren Ergebnisse* (- - -) mit deren Seitenverhältnissen α umkreist. (——): $LPF_{num} = LPF_{EC}$. (- - -): ±10 % -Abweichung. 63

3.20. Ergebnisse der GMNIA-Untersuchung des *Modells C*, mit Verwendung der **kombinierten** Lösung zur Ermittlung des Spannungsverlaufs $\sigma_z(z)$ und der Lastausbreitung $c_u(z)$. Dargestellt sind jeweils die Untersuchungen zweier Imperfektionsamplituden. Des Weiteren sind die Ergebnisse aus der Interpolationsfunktion des prEN 1993-1-5 (•) und dem Vorschlag von POUROSTAD (•) abgebildet. Es sind außerdem die *unsicheren Ergebnisse* (- - -) mit deren Seitenverhältnissen α umkreist. (——): $LPF_{num} = LPF_{EC}$. (- - -): ±10 % -Abweichung. 64

3.21. Exemplarische Darstellung der Deformationsfiguren bei einem Beulfeld mit *großem* Seitenverhältnis (hier mit $\alpha = 10$) und asymmetrischer Belastung ($\sigma_{z,o} > \sigma_{z,u}$). (0) zeigt die Ausgangslage. Bei (1) biegt sich das Beulfeld anfänglich, wodurch zusätzliche, längsgerichtete Spannungen entstehen, die die Beulgefährdung des Feldes (2 bis 5) begünstigen. 64

3.22. Abgebildet sind die Hyperbelfunktionen $f(z) = \sinh z$ und $f(z) = \cosh z$ (——). Die Funktionswerte $f(z)$ sind auf der logarithmischen Skala abgebildet, um den großen Wertebereich abbilden zu können. Bei dargestellter Größenordnung verdecken sich beide Kurven, weshalb nur die cosh-Funktion sichtbar ist. Weiterhin ist der Wert markiert ($z \approx 710$), dessen Funktionswert, ein Datenverarbeitungsprogramm maximal verarbeiten kann. . . . 65

3.23. In (*i*) ist Geometrie und Belastung des alternativen Modells dargestellt. Zu bemerken ist, dass die Querspannung $\sigma_{z,o}$ im Vergleich zu *Modell C*, lediglich einseitig eingeleitet wird. (*ii*) und (*iii*) zeigen zwei alternative Lagerungsmöglichkeiten mit einer starren (*ii*) und einer elastischen (*iii*) Stützung des unbelasteten Längsrandes. 68

3.24. Ergebnisse der GMNIA-Untersuchung des *ersten alternativen Modells* mit Verwendung der **analytischen** Lösung zur Ermittlung des Spannungsverlaufs $\sigma_z(z)$ und der Lastausbreitung $c_u(z)$. Dargestellt sind jeweils die Untersuchungen zweier Imperfektionsamplituden. Des Weiteren sind die Ergebnisse aus der Interpolationsfunktion des prEN 1993-1-5 (•) und dem Vorschlag von POUROSTAD (•) abgebildet. (——): $LPF_{num} = LPF_{EC}$. (- - -): ±10 % -Abweichung. 69

4.1. Abbildungen der Beulfelder für die (*i*) LBA-Untersuchung (ohne Quersteifen) und (*ii*) GMNIA-Untersuchung (mit Quersteifen). Die Breite der verwendeten Steifen ist $d_{QS} = 250$ mm. In (*iii*) sind die verwendeten Lager dargestellt. Zu den verwendeten Lager des ausgesteiften Feldes (($u_1 = 0$), ($u_2 = 0$) und ($u_3 = 0$)) sind die Ränder der Quersteifen gegen eine Rotation um dessen Längsachse, gelagert ($\varphi_1 = 0$). 72

4.2. Lagerungsbedingungen und Belastung des Stabwerksmodells des Längssteifen-Nachweises nach dem BASt-Heft B140. Es ist hier exemplarisch das *Modell* 1 mit der elastischen Bettung der maßgebenden Steife gezeigt (vgl. dazu Abb. 2.21). Rechts sind die Auflager mit den jeweiligen Freiheitsgraden aufgelistet, deren Angaben sich an das globale Koordinatensystem (KOS) orientieren. Weiterhin sind die lokalen Koordinaten der jeweiligen Stabgruppe abgebildet. 73

4.3. Definition des Interaktionswinkels θ mit $\theta = 0°$ für reine Längsspannung σ_x und $\theta = 90°$ für reine Querspannung σ_z (nach [56]). Die Kurve (—) zeigt den Verlauf der *Vergleichsspannung* nach VON MISES. Weiterhin sind in Schrittweiten von $\Delta\theta = 10°$ die Interaktionswinkel entlang der Kurve markiert (•). 74

4.4. Darstellung der in der Untersuchung des *ausgesteiften Beulfeldes* verwendeten Imperfektionen und deren Unterteilung in globale (i) und lokale ((ii) und (iii)) Imperfektionen. 76

4.5. Darstellung der in der Untersuchung des *ausgesteiften Beulfeldes* verwendeten Modelle. Diese sind nach Anzahl der Steifen im Druckbereich ($n_{St,D} = 1, 2, 3$) unterteilt ((i), (ii) und (iii)) (nach [43, 46]). In (iv) ist exemplarisch ein Ausschnitt der Trapezsteifen mit festen und variablen Parametern, dargestellt. Alle Maßangaben in mm. 78

4.6. Dargestellt sind exemplarisch die Verläufe der Funktion $f(x)$ (siehe Gl. 4.11) mit Unterschiedlichen Eingabeparametern. Punkt (i) markiert in 4.6(a) die Nullstelle (LPF) und in 4.6(b) den Grenzwert, den x maximal annehmen kann. Punkt (ii) markiert in beiden Abbildungen eine Polstelle mit Vorzeichenwechsel, die die Gl. 4.11 annimmt, wenn der Divisor 0 (Null) wird. Des Weiteren ist in der unteren, linken Seite jedes Graphen der Intervallbereich von x abgebildet. Der Verlauf der Funktion außerhalb dieses Intervalls ist mit (·····) dargestellt. 82

4.7. Ergebnisse der Laststeigerungsfaktoren (LPF) der maßgebenden Einzelfeld-Nachweise nach prEN 1993-1-5 und den Längssteifen-Nachweisen nach den Vorschlägen von SEITZ und dem BASt-Heft B140. Diese sind in Relation mit den numerisch ermittelten Werten (LPF_{num}) dargestellt. Die Kurve (- - -) deutet den Bereich der „*unsicheren Werte*“, an. (—): $LPF_{num} = LPF_{Seitz}$ bzw. $LPF_{num} = LPF_{BASt}$. (- - -): ±10 % -Abweichung. 85

4.8. Direkter Vergleich der Ergebnisse des Längssteifen-Nachweises nach den Vorschlägen von SEITZ (LPF_{Seitz}) und des BASt-Hefts B140 (LPF_{BASt}). (—): $LPF_{Seitz} = LPF_{BASt}$. (- - -): ±10 % -Abw. 86

4.9. Ergebnisse der Laststeigerungsfaktoren (LPF) der jeweilig maßgebenden Einzelfeld- und Gesamtfeld-Nachweise nach prEN 1993-1-5. Diese sind in Relation mit den numerischen Werten (LPF_{num}) dargestellt. (—): $LPF_{num} = LPF_{EC}$. (- - -): ±10 % -Abweichung. 87

4.10. Ergebnisse der Laststeigerungsfaktoren (LPF) aus den maßgebenden Einzelfeld- und Gesamtfeld-Nachweisen nach prEN 1993-1-5. Diese sind in Relation mit den numerischen Werten (LPF_{num}) dargestellt. (—): $LPF_{num} = LPF_{EC}$. (- - -): ±10 % -Abw. 87

4.11. Laststeigerungsfaktoren LPF_{num} der numerischen Ergebnisse des *Gesamtfeldnachweises* in Abhängigkeit der Schlankheit $\bar{\lambda}_p$ und des Interaktionswinkels θ. Weiterhin sind dargestellt: Die *Winterkurve* (—), die Abminderungskurve nach prEN 1993-1-5 Abschn. 12.4(5) mit $\bar{\lambda}_p = 0{,}8$ (—) und die Abminderungskurve $\chi_c(\bar{\lambda}_p)$ nach DIN EN 1993-1-1 Abschn. 6.3.1.2 mit $\alpha_{e,max} = 0{,}4563$ eines *geschlossenen* Steifenquerschnitts (—). 88

4.12. Laststeigerungsfaktoren LPF_{num} der numerischen Ergebnisse des *Gesamtfeldnachweises* in Abhängigkeit der Schlankheit $\bar{\lambda}_p$ und des Interaktionswinkels θ. Weiterhin sind dargestellt: Die *Winterkurve* (—), die Abminderungskurve nach prEN 1993-1-5 Abschn. 12.4(5) mit $\bar{\lambda}_p = 0{,}8$ (—) und die Abminderungskurve $\chi_c(\bar{\lambda}_p)$ nach DIN EN 1993-1-1 Abschn. 6.3.1.2 mit $\alpha_{e,max} = 0{,}4563$ eines *geschlossenen* Steifenquerschnitts (—). 88

4.13. Hervorhebung der betrachteten Werte (·) mit einem Interaktionswinkel von $\theta = 90°$. Die Punkte (•) sind die aus der Betrachtung entfernten Werte. . . 90

4.14. Darstellung der *Summe der Fehlerquadrate* in Abhängigkeit des Vergrößerungsfaktors f_λ. Die Auswertug zeigt das Minimum der Zielwertfunktion $f(f_\lambda)$ bei $f_\lambda = 1{,}21$. 91

4.15. In der Abbildung sind die einzelnen *maßgebenden* Vergrößerungsfaktoren (·) für den Interaktionswinkel $\theta = 90°$ und in Abhängigkeit von $\bar{\lambda}_p$, dargestellt. Außerdem sind die Vergrößerungsfaktoren f_λ und der Verlauf der Vergößerungsfunktion $f_\lambda(\bar{\lambda}_p)$ dargestellt: (i) $f_\lambda = 1{,}21$, (ii) $f_\lambda = 1{,}25$, (iii) $f_\lambda = 1{,}3$ (iv) $f_\lambda(\bar{\lambda}_p) = 0{,}5865 \cdot \exp(-0{,}1031 \cdot \bar{\lambda}_p) + 0{,}6097$. Die Punkte (•) sind die aus der Betrachtung entfernten Werte. 91

4.16. Verteilung der Vergrößerungsfaktoren f_λ (•) in Abhängigkeit des Seitenverhältnisses α, des Lasteinleitungsverhältnisses c/a und der *bezogenen Gesamtsteifigkeit* Γ_{St}. Für $c/a = 0{,}25$ ist eine Näherung der Verteilung in Abhängigkeit von α gegeben (—). Für $c/a = 1{,}0$ sind die Werte mit einem konstanten Faktor angegeben (—). In Hellgrau ist die *Hüllfläche* der interpolierten Werte zwischen $c/a = 0{,}25$ und $c/a = 1{,}0$, gezeigt. . . 93

4.17. Nachweise mit eingesetzten Vergrößerungsfaktoren f_λ und der Vergößerungsfunktion $f_\lambda(\bar{\lambda}_p)$. Es sind die maßgebenden Werte aus dem Einzelfeld- und Gesamtfeld-Nachweis mit den *Einzelnachweisen nach Pourostad* (Kap. 2.4.2), dargestellt. (—): $LPF_{num} = LPF_{EC}$. (- - -): ±10 % -Abweichung. 95

4.18. Ergebnisse der maßgebenden Werte aus dem Einzelfeld- und Gesamtfeld-Nachweis mit den *Einzelnachweisen nach Pourostad* (Kap. 2.4.2), mit Anwendung des Vergrößerungsfaktors $f_\lambda = 1{,}30$. Die Kurve (- - -) deutet die Verteilungsform der *sicheren* Werte an. (—): $LPF_{num} = LPF_{EC}$. (- - -): ±10 % -Abw. 96

A.1. Darstellung der *Beulformen* des Modells B. In der linken Bildhälfte ist dies für ein Seitenverhältnis von $\alpha = 10$ und in der rechten Bildhälfte für $\alpha = 2{,}86$ dargestellt. Für beide Bildhälften sind von oben nach unten die Lasteinleitungsverhältnisse $c_o/a = 0{,}1;\ 0{,}5$ und $1{,}0$ illustriert. Die Spannung $\sigma_{z,u}$ und Lastausbreitungslänge c_u wurden mittels *analytischer Methode* ermittelt. Die Farbskala (unten im Bild) zeigt die relative Verschiebung (u_{min} bis u_{max}) des FE-Netzes. 130

A.2. Vergleich der Spannungsverläufe $\sigma_z(z)$ des analytischen Ansatzes (——) mit dem Ansatz des **COMBRI-Forschungsprojekts** (- - -) in Abhängigkeit des c/a-Verhältnisses. Betrachtet werden die Seitenverhältnisse $\alpha = 2{,}0;\ 3{,}0;\ 4{,}0$. 132

A.3. Vergleich der Spannungsverläufe $\sigma_z(z)$ des analytischen Ansatzes (——) mit dem Ansatz des **BASt-Heftes B140** (- - -) in Abhängigkeit des c/a-Verhältnisses. Betrachtet werden die Seitenverhältnisse $\alpha = 2{,}0;\ 3{,}0;\ 4{,}0$. . 133

A.4. Spannungsverlauf $\sigma_z(z)$ gemäß eines *geschlossenen* Steifenquerschnitts Lösung für $\alpha = 2{,}0$, in Abhängigkeit der Elementzahl n und des Lasteinleitungsverhältnisses c/a. Der Rand der *grauen Fläche* zeigt die genaue Lösung mit einer großen Anzahl an Fourierelementen ($n = 1,\ 3,\ 5\ \ldots\ 99$). Des Weiteren sind abgebildet: *Kurve* (——) mit $n = 1$, *Kurve* (- - -) mit $n = 7$, *Kurve* (——) mit $n = 13$ und *Kurve* (- - -) mit $n = 19$. 134

A.5. Spannungsverlauf $\sigma_z(z)$ gemäß **analytischer** Lösung für $\alpha = 3{,}0$, in Abhängigkeit der Elementzahl n und des Lasteinleitungsverhältnisses c/a. Der Rand der *grauen Fläche* zeigt die genaue Lösung mit einer großen Anzahl an Fourierelementen ($n = 1,\ 3,\ 5\ \ldots\ 99$). Des Weiteren sind abgebildet: *Kurve* (——) mit $n = 1$, *Kurve* (- - -) mit $n = 7$, *Kurve* (——) mit $n = 13$ und *Kurve* (- - -) mit $n = 19$. 135

A.6. Spannungsverlauf $\sigma_z(z)$ gemäß **analytischer** Lösung für $\alpha = 4{,}0$, in Abhängigkeit der Elementzahl n und des Lasteinleitungsverhältnisses c/a. Der Rand der *grauen Fläche* zeigt die genaue Lösung mit einer großen Anzahl an Fourierelementen ($n = 1,\ 3,\ 5\ \ldots\ 99$). Des Weiteren sind abgebildet: *Kurve* (——) mit $n = 1$, *Kurve* (- - -) mit $n = 7$, *Kurve* (——) mit $n = 13$ und *Kurve* (- - -) mit $n = 19$. 136

A.7. Darstellung der Spannungen $\sigma_x(z)$, $\sigma_z(z)$ bei $c/a = 0{,}5$ und $\tau_{xz}(z)$ bei $c/a = 1{,}0$, anhand eines Feldes des Seitenverhältnisses von $\alpha = 1{,}0$ und verschiedener Lasteinleitungsverhältnisse c/a. Weiterhin sind die Vorzeichen der jeweiligen Spannungen gegeben. Der besseren Sichtbarkeit wegen sind die Spannungsverläufe $\sigma_z(z)$ und $\sigma_z(x)$ mit einem Skalierungsfaktor ($f_{scale} = 3{,}0$) vergrößert worden. 137

A.8. Lastausbreitungslänge $c_u(z)$ in Abhängigkeit des Seitenverhältnisses α und des Lasteinleitungsverhältnisses c/a. Ausgewertet ist dies für $\alpha = 1{,}25;\ 1{,}5;\ 2{,}0;\ 3{,}0$ und $c/a = 1/6;\ 2/6; \ldots\ 6/6$ (siehe dazu (v)). 138

A.9. Ergebnisse der GMNIA-Untersuchung des *Modells C*, mit Verwendung der **analytischen** Lösung zur Ermittlung des Spannungsverlaufs $\sigma_z(z)$ und der Lastausbreitung $c_u(z)$. Außerdem wurde die kritische Knickspannung $\sigma_{cr,c}$ ***ohne*** die modifizierte Beullänge b_{cr} berechnet. Dargestellt sind jeweils die Untersuchungen zweier Imperfektionsamplituden. Des Weiteren sind die Ergebnisse aus der Interpolationsfunktion des prEN 1993-1-5 (•) und dem Vorschlag von POUROSTAD (•) abgebildet. (—): $LPF_{num} = LPF_{EC}$. (- - -): ±10 % -Abweichung. 139

A.10. Ergebnisse der GMNIA-Untersuchung des *Modells C*, mit Verwendung des Ansatzes des **COMBRI-Forschungsprojekts** zur Ermittlung des Spannungsverlaufs $\sigma_z(z)$ und der Lastausbreitung $c_u(z)$. Außerdem wurde die kritische Knickspannung $\sigma_{cr,c}$ ***ohne*** die modifizierte Beullänge b_{cr} berechnet. Dargestellt sind jeweils die Untersuchungen zweier Imperfektionsamplituden. Des Weiteren sind die Ergebnisse aus der Interpolationsfunktion des prEN 1993-1-5 (•) und dem Vorschlag von POUROSTAD (•) abgebildet. (—): $LPF_{num} = LPF_{EC}$. (- - -): ±10 % -Abweichung. 139

A.11. Teil 1: Laststeigerungsfaktoren LPF_{num} der numerischen Ergebnisse des *Gesamtfeldnachweises* im Vergleich mit den Ergebnissen des Längssteifen-Nachweises nach **Seitz** und in Abhängigkeit des Interaktionswinkels θ. Dargestellt sind: $\theta = 0°$ bis $40°$. (—): $LPF_{num} = LPF_{Seitz}$. (- - -): ±10 % -Abweichung. 141

A.12. Teil 2: Laststeigerungsfaktoren LPF_{num} der numerischen Ergebnisse des *Gesamtfeldnachweises* im Vergleich mit den Ergebnissen des Längssteifen-Nachweises nach **Seitz** und in Abhängigkeit des Interaktionswinkels θ. Dargestellt sind: $\theta = 50°$ bis $90°$. (—): $LPF_{num} = LPF_{Seitz}$. (- - -): ±10 % -Abweichung. 142

A.13. Laststeigerungsfaktoren LPF_{num} der numerischen Ergebnisse des *Gesamtfeldnachweises* im Vergleich mit den Ergebnissen des Längssteifen-Nachweises nach **Seitz** und in Abhängigkeit des Seitenverhältnisses α. (—): $LPF_{num} = LPF_{Seitz}$. (- - -): ±10 % -Abweichung. 143

A.14. Laststeigerungsfaktoren LPF_{num} der numerischen Ergebnisse des *Gesamtfeldnachweises* im Vergleich mit den Ergebnissen des Längssteifen-Nachweises nach **Seitz** und in Abhängigkeit des Verhältnisses b/t aus Feldbreite b und Stegdicke t. (—): $LPF_{num} = LPF_{Seitz}$. (- - -): ±10 % -Abweichung. 144

A.15. Laststeigerungsfaktoren LPF_{num} der numerischen Ergebnisse des *Gesamtfeldnachweises* im Vergleich mit den Ergebnissen des Längssteifen-Nachweises nach **Seitz** und in Abhängigkeit des Lasteinleitungsverhältnisses c/a. (—): $LPF_{num} = LPF_{Seitz}$. (- - -): ±10 % -Abweichung. 145

A.16. Laststeigerungsfaktoren LPF_{num} der numerischen Ergebnisse des *Gesamtfeldnachweises* im Vergleich mit den Ergebnissen des Längssteifen-Nachweises nach **Seitz** und in Abhängigkeit der bezogenen Steifigkeit γ. (—): $LPF_{num} = LPF_{Seitz}$. (- - -): ±10 % -Abweichung. 146

A.17. Laststeigerungsfaktoren LPF_{num} der numerischen Ergebnisse des *Gesamtfeldnachweises* im Vergleich mit den Ergebnissen des Längssteifen-Nachweises nach **Seitz** und in Abhängigkeit der Anzahl der Steifen in der Druckzone $n_{St,D}$. (—): $LPF_{num} = LPF_{Seitz}$. (- - -): ±10 % -Abweichung. . 147
A.18. Teil 1: Laststeigerungsfaktoren LPF_{num} der numerischen Ergebnisse des *Gesamtfeldnachweises* im Vergleich mit den Ergebnissen des Längssteifen-Nachweises nach dem **BASt-Heft B140** und in Abhängigkeit des Interaktionswinkels θ. Dargestellt sind: $\theta = 0°$ bis 40°. (—): $LPF_{num} = LPF_{BASt}$. (- - -): ±10 % -Abweichung. 148
A.19. Teil 2: Laststeigerungsfaktoren LPF_{num} der numerischen Ergebnisse des *Gesamtfeldnachweises* im Vergleich mit den Ergebnissen des Längssteifen-Nachweises nach dem **BASt-Heft B140** und in Abhängigkeit des Interaktionswinkels θ. Dargestellt sind: $\theta = 50°$ bis 90°. (—): $LPF_{num} = LPF_{BASt}$. (- - -): ±10 % -Abweichung. 149
A.20. Laststeigerungsfaktoren LPF_{num} der numerischen Ergebnisse des *Gesamtfeldnachweises* im Vergleich mit den Ergebnissen des Längssteifen-Nachweises nach dem **BASt-Heft B140** und in Abhängigkeit des Seitenverhältnisses α. (—): $LPF_{num} = LPF_{BASt}$. (- - -): ±10 % -Abweichung. . 150
A.21. Laststeigerungsfaktoren LPF_{num} der numerischen Ergebnisse des *Gesamtfeldnachweises* im Vergleich mit den Ergebnissen des Längssteifen-Nachweises nach dem **BASt-Heft B140** und in Abhängigkeit des Verhältnisses b/t aus Feldbreite b und Stegdicke t. (—): $LPF_{num} = LPF_{BASt}$. (- - -): ±10 % -Abweichung. 151
A.22. Laststeigerungsfaktoren LPF_{num} der numerischen Ergebnisse des *Gesamtfeldnachweises* im Vergleich mit den Ergebnissen des Längssteifen-Nachweises nach dem **BASt-Heft B140** und in Abhängigkeit des Lasteinleitungsverhältnisses c/a. (—): $LPF_{num} = LPF_{BASt}$. (- - -): ±10 % -Abweichung. 152
A.23. Laststeigerungsfaktoren LPF_{num} der numerischen Ergebnisse des *Gesamtfeldnachweises* im Vergleich mit den Ergebnissen des Längssteifen-Nachweises nach dem **BASt-Heft B140** und in Abhängigkeit der bezogenen Steifigkeit γ. (—): $LPF_{num} = LPF_{BASt}$. (- - -): ±10 % -Abweichung. 153
A.24. Laststeigerungsfaktoren LPF_{num} der numerischen Ergebnisse des *Gesamtfeldnachweises* im Vergleich mit den Ergebnissen des Längssteifen-Nachweises nach **BASt-Heft B140** und in Abhängigkeit der Anzahl der Steifen in der Druckzone $n_{St,D}$. (—): $LPF_{num} = LPF_{BASt}$. (- - -): ±10 % -Abweichung. 154
A.25. Teil 1: Laststeigerungsfaktoren LPF_{num} der numerischen Ergebnisse des *Gesamtfeldnachweises* in Abhängigkeit der Schlankheit $\bar{\lambda}_p$ und des Interaktionswinkels θ. Dargestellt sind: $\theta = 0°$ bis 40°. Weiterhin sind dargestellt: Die *Winterkurve* (—), die Abminderungskurve nach prEN 1993-1-5 Abschn. 12.4(5) mit $\bar{\lambda}_p = 0{,}8$ (—) und die Abminderungskurve $\chi_c(\bar{\lambda}_p)$ nach DIN EN 1993-1-1 Abschn. 6.3.1.2 mit $\alpha_{e,max} = 0{,}4563$ eines *geschlossenen* Steifenquerschnitts (—). 156

A.26. Teil 2: Laststeigerungsfaktoren LPF_{num} der numerischen Ergebnisse des *Gesamtfeldnachweises* in Abhängigkeit der Schlankheit $\bar{\lambda}_p$ und des Interaktionswinkels θ. Dargestellt sind: $\theta = 50°$ bis $90°$. Weiterhin sind dargestellt: Die *Winterkurve* (——), die Abminderungskurve nach prEN 1993-1-5 Abschn. 12.4(5) mit $\bar{\lambda}_p = 0{,}8$ (——) und die Abminderungskurve $\chi_c(\bar{\lambda}_p)$ nach DIN EN 1993-1-1 Abschn. 6.3.1.2 mit $\alpha_{e,max} = 0{,}4563$ eines *geschlossenen* Steifenquerschnitts (——). 157

A.27. Teil 1: Laststeigerungsfaktoren LPF_{num} der numerischen Ergebnisse des *Gesamtfeldnachweises* im Vergleich mit den nach prEN 1993-1-5 ermittelten Werten (LPF_{EC}) und in Abhängigkeit des Interaktionswinkels. Dargestellt sind: $\theta = 0°$ bis $40°$. (——): $LPF_{num} = LPF_{EC}$. (- - -): ± 10 % -Abweichung. 158

A.28. Teil 2: Laststeigerungsfaktoren LPF_{num} der numerischen Ergebnisse des *Gesamtfeldnachweises* im Vergleich mit den nach prEN 1993-1-5 ermittelten Werten (LPF_{EC}) und in Abhängigkeit des Interaktionswinkels. Dargestellt sind: $\theta = 50°$ bis $90°$. (——): $LPF_{num} = LPF_{EC}$. (- - -): ± 10 % -Abweichung. 159

A.29. Laststeigerungsfaktoren LPF_{num} der numerischen Ergebnisse des *Gesamtfeldnachweises* in Abhängigkeit der Schlankheit $\bar{\lambda}_p$ und des Seitenverhältnisses α. Weiterhin sind dargestellt: Die *Winterkurve* (——), die Abminderungskurve nach prEN 1993-1-5 Abschn. 12.4(5) mit $\bar{\lambda}_p = 0{,}8$ (——) und die Abminderungskurve $\chi_c(\bar{\lambda}_p)$ nach DIN EN 1993-1-1 Abschn. 6.3.1.2 mit $\alpha_{e,max} = 0{,}4563$ eines *geschlossenen* Steifenquerschnitts (——). 160

A.30. Laststeigerungsfaktoren LPF_{num} der numerischen Ergebnisse des *Gesamtfeldnachweises* im Vergleich mit den nach prEN 1993-1-5 ermittelten Werten (LPF_{EC}) und in Abhängigkeit des Seitenverhältnisses α. (——): $LPF_{num} = LPF_{EC}$. (- - -): ± 10 % -Abweichung. 161

A.31. Laststeigerungsfaktoren LPF_{num} der numerischen Ergebnisse des *Gesamtfeldnachweises* in Abhängigkeit der Schlankheit $\bar{\lambda}_p$ und des Verhältnisses b/t aus Feldbreite b und Stegdicke t. Weiterhin sind dargestellt: Die *Winterkurve* (——), die Abminderungskurve nach prEN 1993-1-5 Abschn. 12.4(5) mit $\bar{\lambda}_p = 0{,}8$ (——) und die Abminderungskurve $\chi_c(\bar{\lambda}_p)$ nach DIN EN 1993-1-1 Abschn. 6.3.1.2 mit $\alpha_{e,max} = 0{,}4563$ eines *geschlossenen* Steifenquerschnitts (——). 162

A.32. Laststeigerungsfaktoren LPF_{num} der numerischen Ergebnisse des *Gesamtfeldnachweises* im Vergleich mit den nach prEN 1993-1-5 ermittelten Werten (LPF_{EC}) und in Abhängigkeit des Verhältnisses b/t, aus Feldbreite b und Stegdicke t. (——): $LPF_{num} = LPF_{EC}$. (- - -): ± 10 % -Abweichung. 163

A.33. Laststeigerungsfaktoren LPF_{num} der numerischen Ergebnisse des *Gesamtfeldnachweises* in Abhängigkeit der Schlankheit $\bar{\lambda}_p$ und der bezogenen Steifigkeit γ. Weiterhin sind dargestellt: Die *Winterkurve* (——), die Abminderungskurve nach prEN 1993-1-5 Abschn. 12.4(5) mit $\bar{\lambda}_p = 0{,}8$ (——) und die Abminderungskurve $\chi_c(\bar{\lambda}_p)$ nach DIN EN 1993-1-1 Abschn. 6.3.1.2 mit $\alpha_{e,max} = 0{,}4563$ eines *geschlossenen* Steifenquerschnitts (——). 164

A.34. Laststeigerungsfaktoren LPF_{num} der numerischen Ergebnisse des *Gesamtfeldnachweises* im Vergleich mit den nach prEN 1993-1-5 ermittelten Werten (LPF_{EC}) und in Abhängigkeit der bezogenen Steifigkeit γ. (—): $LPF_{num} = LPF_{EC}$. (- - -): ± 10 % -Abweichung. 165
A.35. Laststeigerungsfaktoren LPF_{num} der numerischen Ergebnisse des *Gesamtfeldnachweises* in Abhängigkeit der Schlankheit $\bar{\lambda}_p$ und des Seitenverhältnisses α bei $\theta = 90°$. Weiterhin sind dargestellt: Die *Winterkurve* (—), die Abminderungskurve nach prEN 1993-1-5 Abschn. 12.4(5) mit $\bar{\lambda}_p = 0{,}8$ (—) und die Abminderungskurve $\chi_c(\bar{\lambda}_p)$ nach DIN EN 1993-1-1 Abschn. 6.3.1.2 mit $\alpha_{e,max} = 0{,}4563$ eines *geschlossenen* Steifenquerschnitts (—). . 166
A.36. Laststeigerungsfaktoren LPF_{num} der numerischen Ergebnisse des *Gesamtfeldnachweises* in Abhängigkeit der Schlankheit $\bar{\lambda}_p$ und der bezogenen Steifigkeit γ bei $\theta = 90°$. Weiterhin sind dargestellt: Die *Winterkurve* (—), die Abminderungskurve nach prEN 1993-1-5 Abschn. 12.4(5) mit $\bar{\lambda}_p = 0{,}8$ (—) und die Abminderungskurve $\chi_c(\bar{\lambda}_p)$ nach DIN EN 1993-1-1 Abschn. 6.3.1.2 mit $\alpha_{e,max} = 0{,}4563$ eines *geschlossenen* Steifenquerschnitts (—). . 167
A.37. Laststeigerungsfaktoren LPF_{num} der numerischen Ergebnisse des *Gesamtfeldnachweises* in Abhängigkeit der Schlankheit $\bar{\lambda}_p$ und der Anzahl der Steifen in der Druckzone $n_{St,D}$ bei $\theta = 90°$. Weiterhin sind dargestellt: Die *Winterkurve* (—), die Abminderungskurve nach prEN 1993-1-5 Abschn. 12.4(5) mit $\bar{\lambda}_p = 0{,}8$ (—) und die Abminderungskurve $\chi_c(\bar{\lambda}_p)$ nach DIN EN 1993-1-1 Abschn. 6.3.1.2 mit $\alpha_{e,max} = 0{,}4563$ eines *geschlossenen* Steifenquerschnitts (—). 168
A.38. Verteilung der Vergrößerungsfaktoren f_λ in Abhängigkeit des Seitenverhältnisses α bei $\theta = 90°$. Die Gerade (—) markiert $f_\lambda = 1{,}0$. 169
A.39. Verteilung der Vergrößerungsfaktoren f_λ in Abhängigkeit des Verhältnisses b/t aus Feldbreite b und Stegdicke t bei $\theta = 90°$. Die Gerade (—) markiert $f_\lambda = 1{,}0$. 170
A.40. Verteilung der Vergrößerungsfaktoren f_λ in Abhängigkeit des Lasteinleitungsverhältnisses c/a bei $\theta = 90°$. Die Gerade (—) markiert $f_\lambda = 1{,}0$. . . 171
A.41. Verteilung der Vergrößerungsfaktoren f_λ in Abhängigkeit der bezogenen Steifigkeit γ bei $\theta = 90°$. Die Gerade (—) markiert $f_\lambda = 1{,}0$. 172
A.42. Verteilung der Vergrößerungsfaktoren f_λ in Abhängigkeit der Anzahl der Steifen in der Druckzone $n_{St,D}$ bei $\theta = 90°$. Die Gerade (—) markiert $f_\lambda = 1{,}0$. 173
A.43. Verteilung der Vergrößerungsfaktoren f_λ (•) in Abhängigkeit des Seitenverhältnisses α, des Lasteinleitungsverhältnisses c/a und der *bezogenen Gesamtsteifigkeit* Γ_{St}. Für $c/a = 0{,}25$ ist eine Näherung der Verteilung in Abhängigkeit von α gegeben (—). Für $c/a = 1{,}0$ sind die Werte mit einem konstanten Faktor angegeben (—). Bei $c/a = 0{,}5$ und 0,75 ist die Funktion 4.22 für die jeweiligen Schnitte ausgewertet. 174

Tabellenverzeichnis

2.1. Werte bzw. Gleichung zur Ermittlung der Parameter V und P in Abhängigkeit des Beulfeldaufbaus (*nicht ausgesteift* und *ausgesteift*) und der Spannungsrandbedingungen (*Längs-* und *Querspannung*). 23

3.1. Parameterbereich des **Modells A**. 48
3.2. Parameterbereich der **Modelle B** und **C**. 48

4.1. Für die GMNIA-Untersuchung verwendete Imperfektionskombinationen. Die jeweiligen Imperfektion sind der Abb. 4.4 zu entnehmen. 77
4.2. Parameterbereich der **ausgesteiften Beulfelder**. 77
4.3. Ermittelte Teilsicherheitsbeiwerte γ_M der jeweiligen Nachweise mit eingesetzten Vergrößerungsfaktoren f_λ gemäß Gl. 4.23. 94

A.1. Relevante Modellparameter. 125
A.2. Ermittelte Laststeigerungsfaktoren $\boldsymbol{\alpha_{cr,p,xz}}$ des *ersten* und $\boldsymbol{\alpha_{cr,c,xz}}$ des *zweiten* Modells. Es stehen außerdem die alternativen Bezeichnungen $\boldsymbol{f_1}$ und $\boldsymbol{f_2}$ aus der Software RFEM [18]. 125
A.3. Weitere Untersuchungen der *Momenten II. Ordnung* aus der numerischen Modellierung ($\boldsymbol{M^{II}_{y,num}}$) und der alternativen Vorgehensweise ($\boldsymbol{M^{II}_{y,alt}}$). In der letzten Spalte sind die Differenzen (nach Gl. A.1) aus den Momenten beider Varianten aufgelistet. 127

A. Anhang

A.1. Zahlenbeispiel (zu Kap. 2.5.2)

Nach dem Vorschlag des Längssteifen-Nachweises gemäß BASt-Heftes B140 [33], wird nach Ermittlung der Laststeigerungsfaktoren $\alpha_{cr,p,xz}$ und $\alpha_{cr,c,xz}$, ein drittes Modell herangezogen, das eine Ersatzimperfektion aus der errechneten Verschiebung $w_{0,pc}$ an der maßgebenden Steife besitzt. Das *dritte* Modell weist dabei den gleichen Aufbau wie das *Zweite* (*ohne Bettung* der maßgebenden Steife). Damit kann anschließend das erforderliche Moment II. Ordnung $M^{II}_{y,St}$ berechnet werden.

Alternativ kann auf ein drittes Modell verzichetet werden und das erforderliche Moment II. Ordnung mittels einer *Ersatz*-Streckenlast q_{ers}, in maßgebender Richtung auf die Steife aufgetragen werden (siehe dazu Kap. 2.5.2).

Im Folgenden soll exemplarisch anhand eines Rechenbeispiels gezeigt werden, dass die Anwendung des alternativen Vorschlags zu gleichen bzw. ähnlichen Ergebnissen führt und die Verwendung eines dritten Modells dadurch überflüssig macht. Weitere Untersuchungen sind in Tab. A.3 aufgelistet. Dort werden die Differenzen einiger ausgewählter numerischer Modelle mit der alternativen Vorgehensweise gezeigt.

A.1.1. Modellparameter

In Tab. A.1 sind die *relavanten* Modellparameter[1] für die vergleichende Untersuchung aufgelistet.

Tabelle A.1.: Relevante Modellparameter.

n_{St} [–]	a [mm]	$w_{0,c}$ [mm]	$w_{0,p}$ [mm]	$N_{x,St}$ [N]	A_{St} [mm^2]	W_{St} [mm^3]
1	1800	6,334	4,5	300780	8885	184200

Aus dem *ersten* und *zweiten* Modell werden die Laststeigerungsfaktoren $\alpha_{cr,p,xz}$ und $\alpha_{cr,c,xz}$ ermittelt, die für die kommenden Rechenschritte gebraucht werden (Tab. A.2).

Tabelle A.2.: Ermittelte Laststeigerungsfaktoren $\alpha_{cr,p,xz}$ des *ersten* und $\alpha_{cr,c,xz}$ des *zweiten* Modells. Es stehen außerdem die alternativen Bezeichnungen f_1 und f_2 aus der Software RFEM [18].

$f_1 = \alpha_{cr,p,xz}$ [–]	$f_2 = \alpha_{cr,c,xz}$ [–]
2,49013	2,44161

1 Daten-CD: Die Modellparameter sind in der Datei „`RFEM_Modelle.xlsm`“, in *Zeile* 25 des *Arbeitsblatts* „nst = 1“ aufzufinden. Die entsprechende Modellnummer in MATLAB ist in der *Spalte* A aufgelistet.

A.1.2. Ermittlung der Momente II. Ordnung M_y^{II}

Aus den ermittelten Laststeigerungsfaktoren[1] in Tab. A.2 lässt sich anschließend mithilfe des Interpolationsbeiwertes ξ, die Verschiebung $w_{0,pc}$ aus $w_{0,c}$ und $w_{0,p}$ linear interpolieren:

$$\xi = \frac{\alpha_{cr,p,xz}}{\alpha_{cr,c,xz}} - 1 = \frac{f_1}{f_2} - 1 = \frac{2{,}49013}{2{,}44161} - 1 = 0{,}01987$$

$$w_{0,pc} = w_{0,c} - (w_{0,c} - w_{0,p}) \cdot \xi = 6{,}334 - (6{,}334 - 4{,}5) \cdot 0{,}01987 = 6{,}298 \text{ mm}$$

Daraus lässt sich eine Vorkrümmung von $a/286$ ermitteln, die auf die maßgebende Steife des *dritten* Modells[1] aufgetragen wird. Im Anschluss daran soll das maximale Moment $M_{y,num}^{II}$ der maßgebenden Steife ermittelt werden. Die *numerische* Berechnung ergab einen Maximalwert von:

$$M_{y,num}^{II} = \underline{\underline{3{,}27 \text{ kNm}}}$$

Im Folgenden wird das maximale Moment $M_{y,alt}^{II}$ der *alternativen* Vorgehensweise ermittelt. Dies ermittelt man durch die Multiplikation des Vergrößerungsfaktors (Gl. 2.61) mit dem Moment I. Ordnung (Gl. 2.63):

$$\begin{aligned} M_{y,alt}^{II} &= \alpha_v \cdot \frac{q_{ers} \cdot a^2}{8} = \frac{f_2}{f_2 - 1} \cdot N_{x,St} \cdot w_{0,pc} \\ &= \left(\frac{2{,}44161}{2{,}44161 - 1} \cdot 300780 \text{ N} \cdot 6{,}298 \text{ mm} \right) \cdot 10^{-6} = \underline{\underline{3{,}21 \text{ kNm}}} \end{aligned}$$

A.1.3. Untersuchungen weiterer Modelle

Im Folgenden sind einige ausgewählte Beispiele aufgelistet. Es werden in Tab. A.3 die Differenzen aus den numerischen Modellen mit der alternativen Vorgehensweise aufgezeigt.

$$\Delta = \left(\frac{M_{y,alt}^{II}}{M_{y,num}^{II}} - 1 \right) \cdot 100 \ \ [\%] \tag{A.1}$$

Die jeweiligen RFEM-Modelle werden nach folgendem Muster bezeichnet:

`Modell_i_2_nstj.rf5`

`i` entspricht dabei den Einträgen unter „**Nr.**“ der ersten Spalte der Tabelle A.3. `j` entspricht den Einträgen unter „$\boldsymbol{n_{St}}$“ der zweiten Spalte der genannten Tabelle.

1 Daten-CD: Untersuchte RFEM-Modelle für die *exemplarische Berechnung*: „`Modell_24_1_nst1.rf5`“, „`Modell_24_2_nst1.rf5`“, „`Modell_24_3_nst1_Vorkrümmung.rf5`“.

Tabelle A.3.: Weitere Untersuchungen der *Momenten II. Ordnung* aus der numerischen Modellierung ($M^{II}_{y,num}$) und der alternativen Vorgehensweise ($M^{II}_{y,alt}$). In der letzten Spalte sind die Differenzen (nach Gl. A.1) aus den Momenten beider Varianten aufgelistet.

Nr.	n_{St}	a	$w_{0,c}$	$w_{0,p}$	$N_{x,St}$	f_1	f_2	$w_{0,pc}$	$a/w_{0,pc}$	$M^{II}_{y,alt}$	$M^{II}_{y,num}$	Δ
	[–]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[–]	[–]	[mm]	[–]	[kNm]	[kNm]	[%]
57	1	1800	6,25	4,50	3 771 967	9,440	9,179	6,20	290	26,23	26,34	−0,41
63	1	1800	6,25	4,50	1 447 884	9,520	9,267	6,20	290	10,06	10,11	−0,49
64	1	1800	6,25	4,50	665 100	12,016	11,707	6,20	290	4,51	4,52	−0,25
72	1	1800	6,76	4,50	489 715	2,324	2,008	6,40	281	6,24	6,31	−1,04
129	1	1800	6,28	4,50	2 109 763	2,106	2,012	6,20	290	26,00	26,53	−1,99
276	1	1800	6,27	4,50	2 327 499	2,056	2,008	6,23	289	28,89	29,14	−0,87
73	2	3000	10,70	7,50	11 949 274	8,394	7,171	10,16	295	141,03	141,80	−0,55
169	2	3000	10,70	7,50	11 949 274	7,416	6,350	10,16	295	144,17	144,70	−0,37
265	2	3000	10,70	7,50	11 949 274	7,041	6,036	10,17	295	145,64	145,97	−0,22
56	2	3000	10,56	7,50	1 121 249	2,533	2,254	10,18	295	20,53	20,17	1,76
187	2	3000	10,45	7,50	10 150 671	2,726	2,145	9,65	311	183,54	181,4	1,18
553	2	4500	16,05	7,50	11 949 274	3,629	2,150	10,17	442	227,24	227,42	−0,08
73	3	3900	14,38	9,75	22 768 565	7,837	5,497	12,41	314	345,33	347,54	−0,64
169	3	3900	14,38	9,75	22 768 565	6,536	4,717	12,59	310	363,87	364,35	−0,13
265	3	3900	14,38	9,75	22 768 565	6,068	4,426	12,66	308	372,43	371,53	0,24
91	3	3900	14,04	9,75	18 456 607	2,962	2,053	12,14	321	436,72	430,96	1,34
172	3	3900	14,38	9,75	22 633 600	2,574	2,001	13,05	299	590,70	560,53	5,38
363	3	3900	14,38	9,75	24 210 446	2,733	2,119	13,04	299	597,77	567,71	5,30

A.1.4. Fazit

Der Vergleich der *alternativen* Vorgehensweise mit den *ausgewählten numerischen Modellen* zeigt eine geringe Abweichung der ermittelten Momente II. Ordnung von $\Delta_{min} = -2{,}0\,\%$ für die *unterschätzten* und $\Delta_{max} = +5{,}38\,\%$ für die *überschätzten* Werte.

Es ist beim alternativen Verfahren ein geringerer Arbeits- und (Computer-) Rechenaufwand als Vorteile zu nennen und daher die Anwendung dieser Alternative zu empfehlen.

A.2. Anhang zur Parameterstudie des nicht ausgesteiften Beulfeldes

A.2.1. Anhang zu den Untersuchungen des *Modells B*

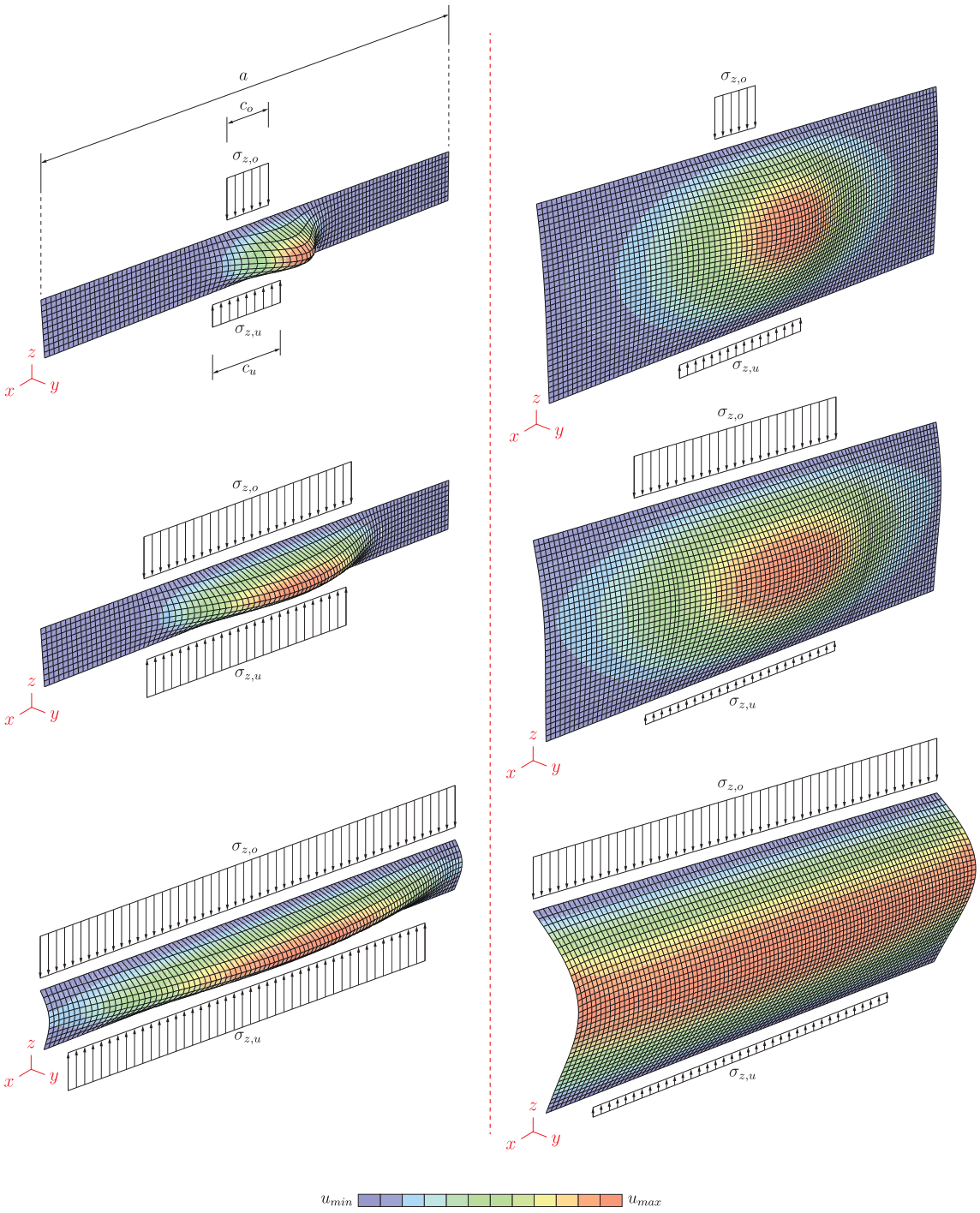
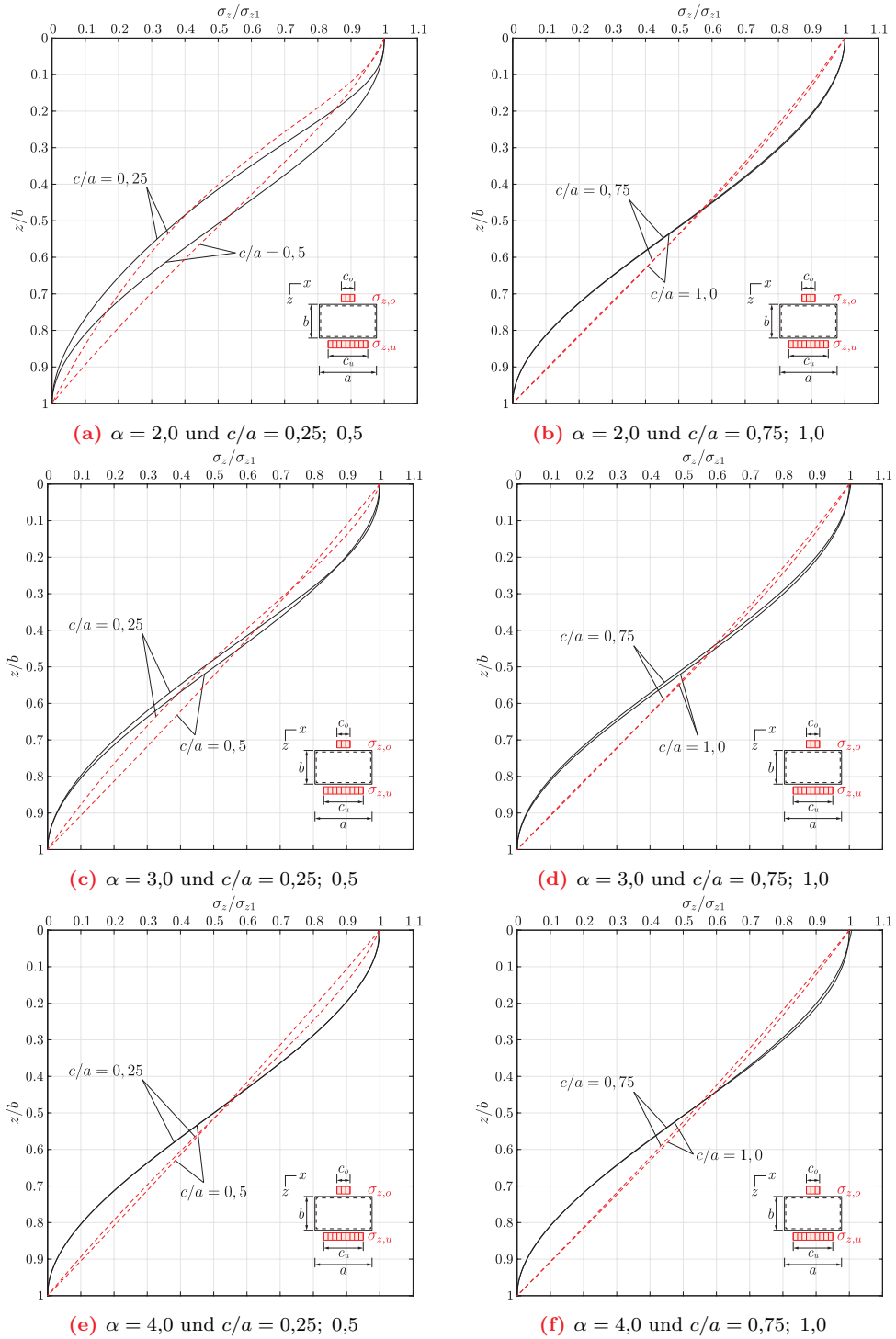


Abbildung A.1.: Darstellung der *Beulformen* des Modells B. In der linken Bildhälfte ist dies für ein Seitenverhältnis von $\alpha = 10$ und in der rechten Bildhälfte für $\alpha = 2{,}86$ dargestellt. Für beide Bildhälften sind von oben nach unten die Lasteinleitungsverhältnisse $c_o/a = 0{,}1;\ 0{,}5$ und $1{,}0$ illustriert. Die Spannung $\sigma_{z,u}$ und Lastausbreitungslänge c_u wurden mittels *analytischer Methode* ermittelt. Die Farbskala (unten im Bild) zeigt die relative Verschiebung (u_{min} bis u_{max}) des FE-Netzes.

A.2.2. Anhang zu den Untersuchungen der Spannungsverteilung und der Lastausbreitungslänge (3.2.1, 3.2.2, 3.2.3 und 3.2.4)

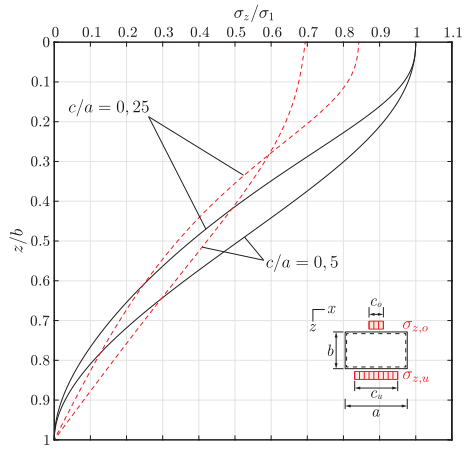


(a) $\alpha = 2{,}0$ und $c/a = 0{,}25;\ 0{,}5$ **(b)** $\alpha = 2{,}0$ und $c/a = 0{,}75;\ 1{,}0$

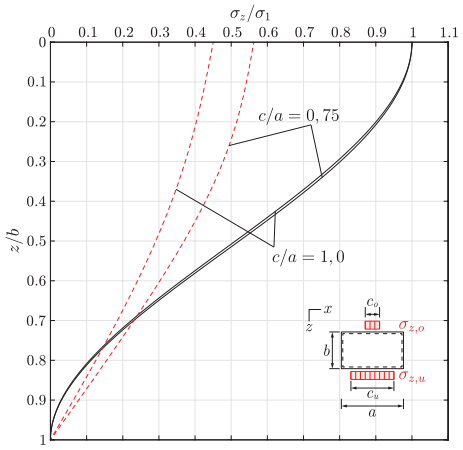
(c) $\alpha = 3{,}0$ und $c/a = 0{,}25;\ 0{,}5$ **(d)** $\alpha = 3{,}0$ und $c/a = 0{,}75;\ 1{,}0$

(e) $\alpha = 4{,}0$ und $c/a = 0{,}25;\ 0{,}5$ **(f)** $\alpha = 4{,}0$ und $c/a = 0{,}75;\ 1{,}0$

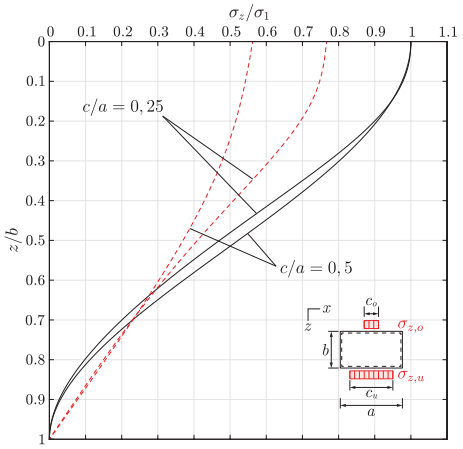
Abbildung A.2.: Vergleich der Spannungsverläufe $\sigma_z(z)$ des analytischen Ansatzes (——) mit dem Ansatz des **COMBRI-Forschungsprojekts** (- - -) in Abhängigkeit des c/a-Verhältnisses. Betrachtet werden die Seitenverhältnisse $\alpha = 2{,}0;\ 3{,}0;\ 4{,}0$.



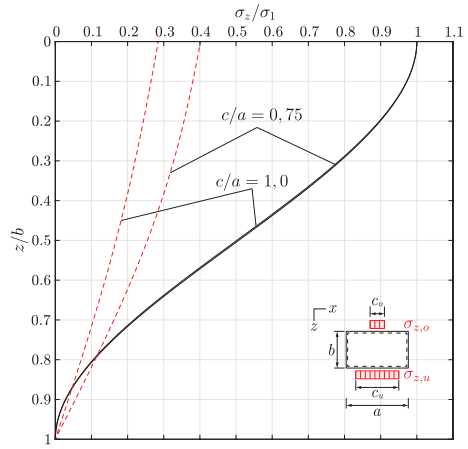
(a) $\alpha = 2{,}0$ und $c/a = 0{,}25;\ 0{,}5$



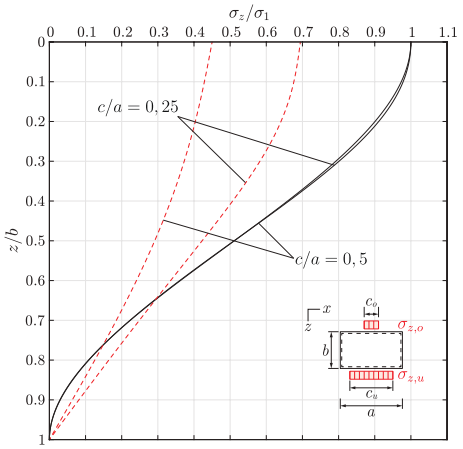
(b) $\alpha = 2{,}0$ und $c/a = 0{,}75;\ 1{,}0$



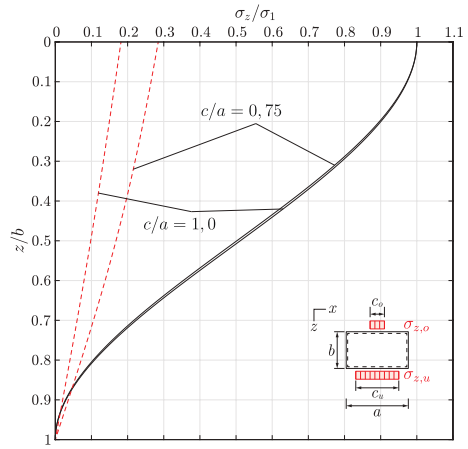
(c) $\alpha = 3{,}0$ und $c/a = 0{,}25;\ 0{,}5$



(d) $\alpha = 3{,}0$ und $c/a = 0{,}75;\ 1{,}0$

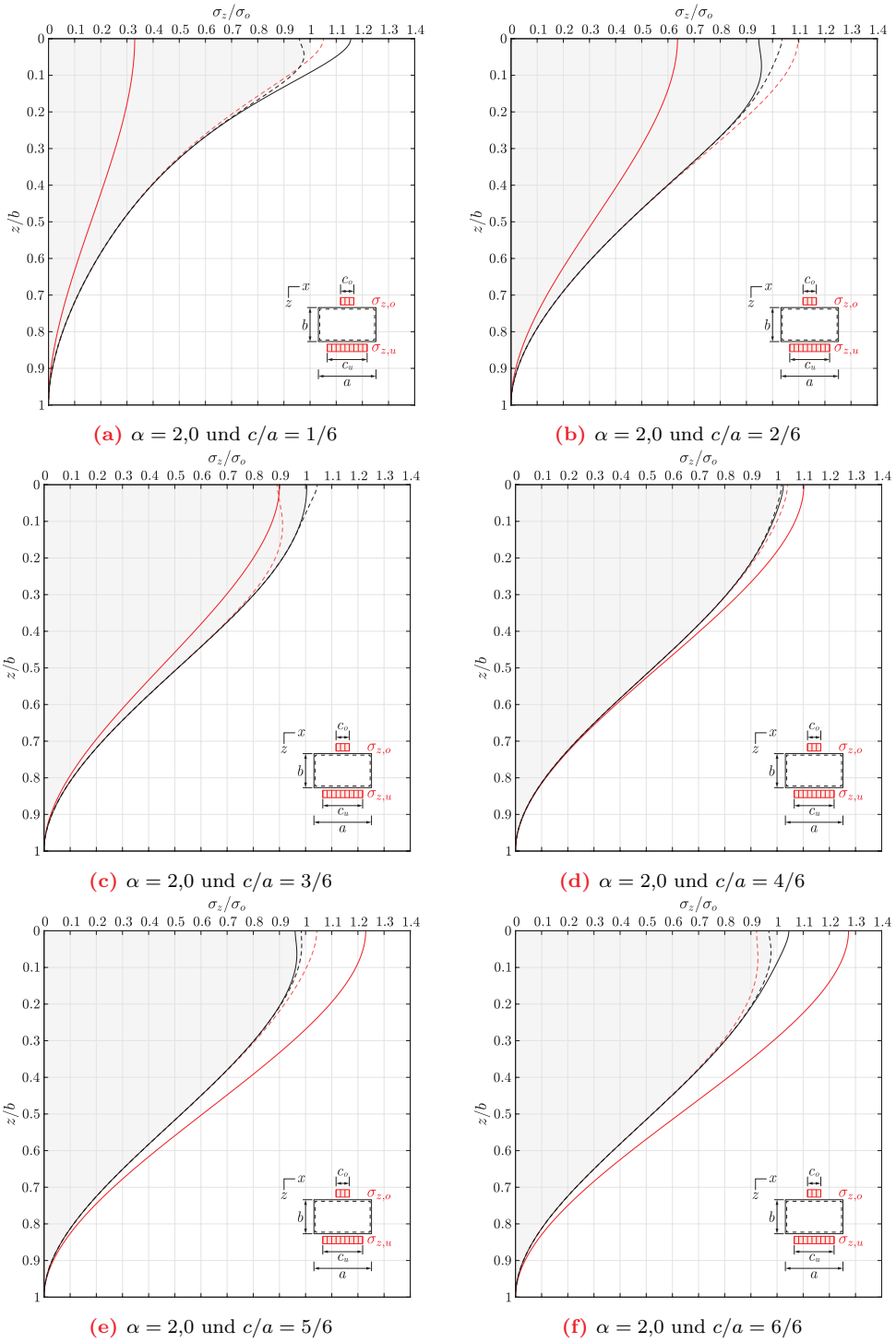


(e) $\alpha = 4{,}0$ und $c/a = 0{,}25;\ 0{,}5$



(f) $\alpha = 4{,}0$ und $c/a = 0{,}75;\ 1{,}0$

Abbildung A.3.: Vergleich der Spannungsverläufe $\sigma_z(z)$ des analytischen Ansatzes (——) mit dem Ansatz des **BASt-Heftes B140** (- - -) in Abhängigkeit des c/a-Verhältnisses. Betrachtet werden die Seitenverhältnisse $\alpha = 2{,}0;\ 3{,}0;\ 4{,}0$.

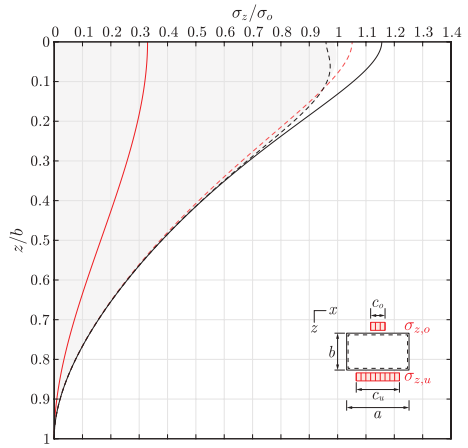


(a) $\alpha = 2{,}0$ und $c/a = 1/6$ **(b)** $\alpha = 2{,}0$ und $c/a = 2/6$

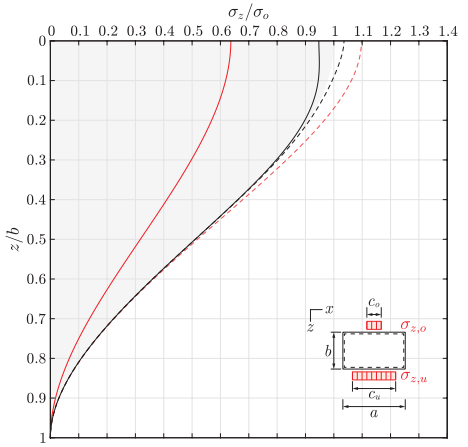
(c) $\alpha = 2{,}0$ und $c/a = 3/6$ **(d)** $\alpha = 2{,}0$ und $c/a = 4/6$

(e) $\alpha = 2{,}0$ und $c/a = 5/6$ **(f)** $\alpha = 2{,}0$ und $c/a = 6/6$

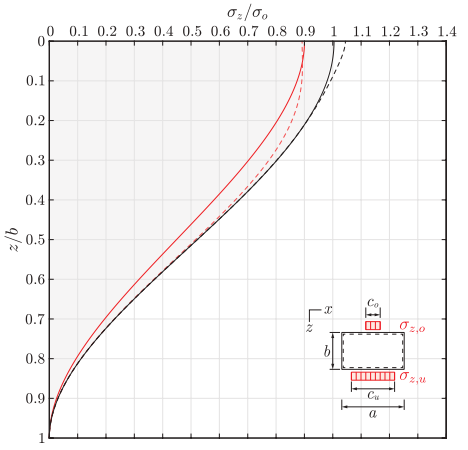
Abbildung A.4.: Spannungsverlauf $\sigma_z(z)$ gemäß eines *geschlossenen* Steifenquerschnitts Lösung für $\alpha = 2{,}0$, in Abhängigkeit der Elementzahl n und des Lasteinleitungsverhältnisses c/a. Der Rand der *grauen Fläche* zeigt die genaue Lösung mit einer großen Anzahl an Fourierelementen ($n = 1,\ 3,\ 5\ \ldots\ 99$). Des Weiteren sind abgebildet: *Kurve* (——) mit $n = 1$, *Kurve* (- - -) mit $n = 7$, *Kurve* (——) mit $n = 13$ und *Kurve* (- - -) mit $n = 19$.



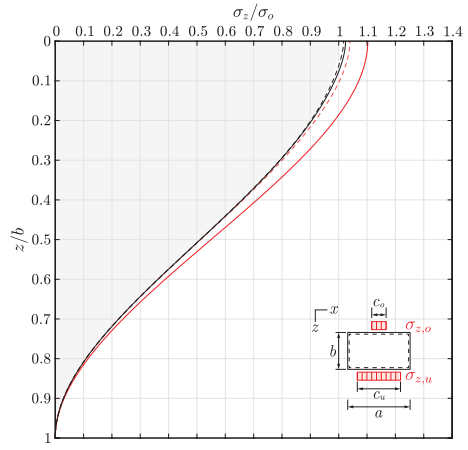
(a) $\alpha = 3{,}0$ und $c/a = 1/6$



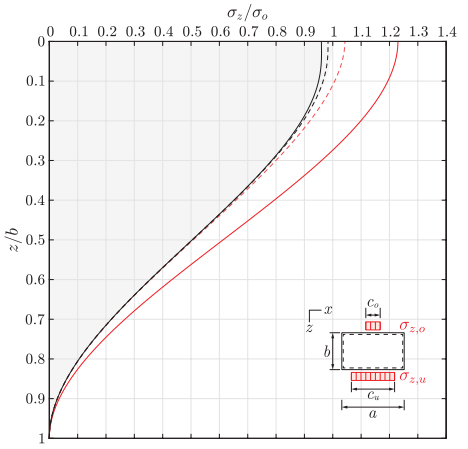
(b) $\alpha = 3{,}0$ und $c/a = 2/6$



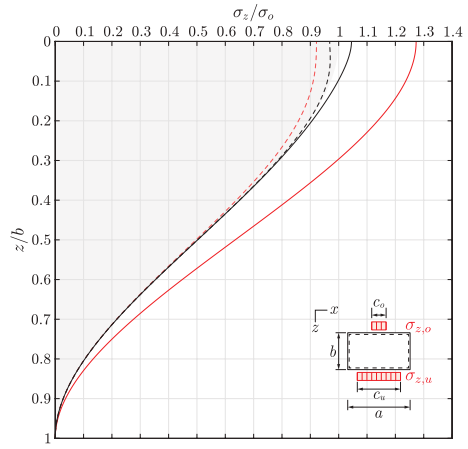
(c) $\alpha = 3{,}0$ und $c/a = 3/6$



(d) $\alpha = 3{,}0$ und $c/a = 4/6$

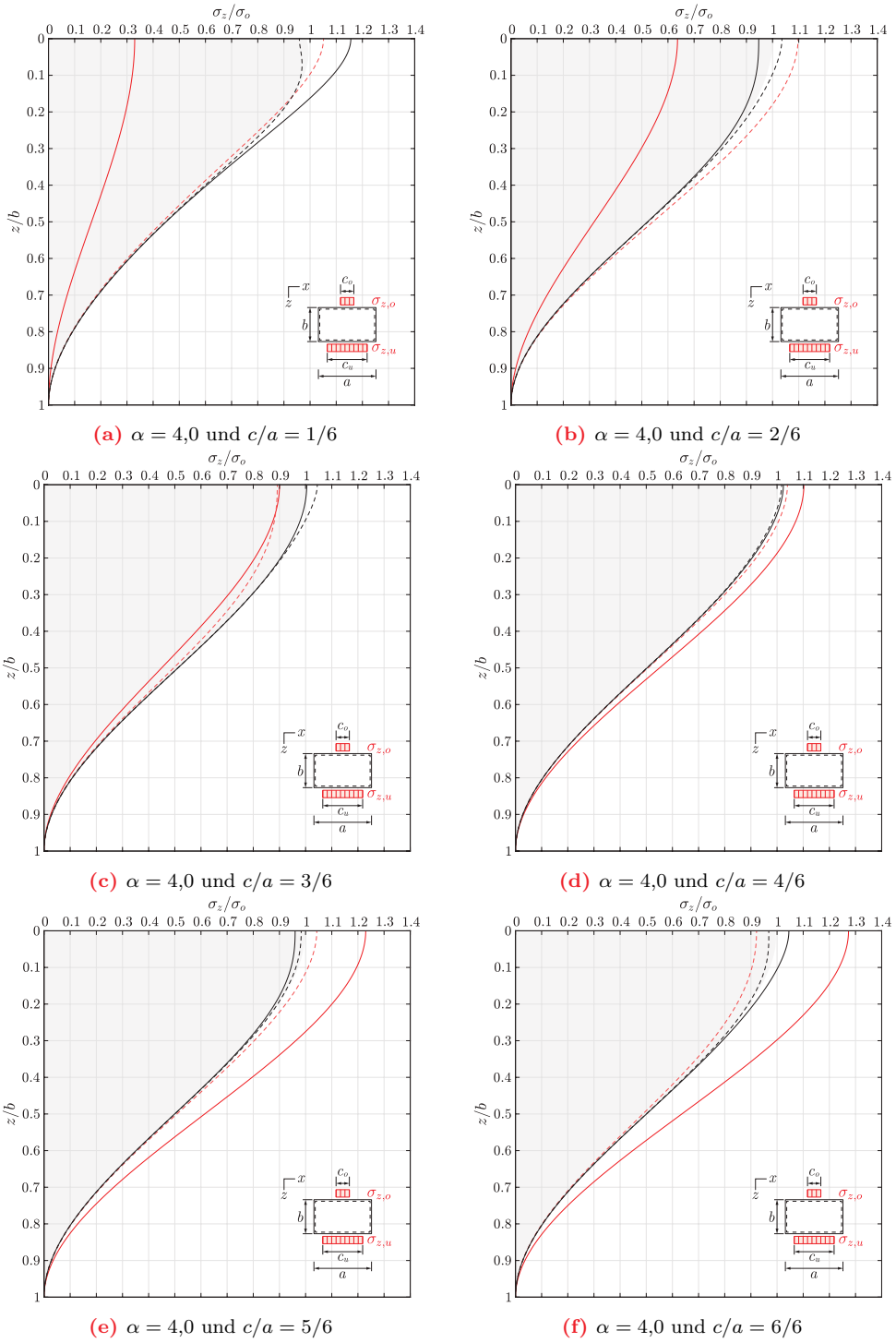


(e) $\alpha = 3{,}0$ und $c/a = 5/6$



(f) $\alpha = 3{,}0$ und $c/a = 6/6$

Abbildung A.5.: Spannungsverlauf $\sigma_z(z)$ gemäß **analytischer** Lösung für $\alpha = 3{,}0$, in Abhängigkeit der Elementzahl n und des Lasteinleitungsverhältnisses c/a. Der Rand der *grauen Fläche* zeigt die genaue Lösung mit einer großen Anzahl an Fourierelementen ($n = 1,\ 3,\ 5\ \ldots\ 99$). Des Weiteren sind abgebildet: *Kurve* (——) mit $n = 1$, *Kurve* (- - -) mit $n = 7$, *Kurve* (——) mit $n = 13$ und *Kurve* (- - -) mit $n = 19$.



(a) $\alpha = 4{,}0$ und $c/a = 1/6$ **(b)** $\alpha = 4{,}0$ und $c/a = 2/6$

(c) $\alpha = 4{,}0$ und $c/a = 3/6$ **(d)** $\alpha = 4{,}0$ und $c/a = 4/6$

(e) $\alpha = 4{,}0$ und $c/a = 5/6$ **(f)** $\alpha = 4{,}0$ und $c/a = 6/6$

Abbildung A.6.: Spannungsverlauf $\sigma_z(z)$ gemäß **analytischer** Lösung für $\alpha = 4{,}0$, in Abhängigkeit der Elementzahl n und des Lasteinleitungsverhältnisses c/a. Der Rand der *grauen Fläche* zeigt die genaue Lösung mit einer großen Anzahl an Fourierelementen ($n = 1,\ 3,\ 5\ \ldots\ 99$). Des Weiteren sind abgebildet: *Kurve* (——) mit $n = 1$, *Kurve* (- - -) mit $n = 7$, *Kurve* (——) mit $n = 13$ und *Kurve* (- - -) mit $n = 19$.