

**Fassung  
April 2015**

**Programm**

# **FE-BEUL**

**Beulsicherheitsnachweis für  
unversteifte und versteifte Platten  
nach EN 1993-1-5 und DIN 18800-3**

## **Programm- Beschreibung**

Alle Rechte, auch das der Übersetzung, vorbehalten.

Ohne ausdrückliche Genehmigung der DLUBAL SOFTWARE GMBH ist es nicht gestattet, diese Programmbeschreibung oder Teile daraus auf jedwede Art zu vervielfältigen.

© **Dlubal Software GmbH**  
**Am Zellweg 2 D-93464 Tiefenbach**

Tel.: +49 9673 9203-0  
Fax: +49 9673 9203-51  
E-Mail: [info@dlubal.com](mailto:info@dlubal.com)  
Web: [www.dlubal.de](http://www.dlubal.de)

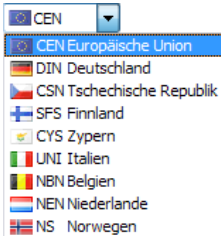


# Inhalt

	Inhalt	Seite		Inhalt	Seite
<b>1.</b>	<b>Einleitung</b>	<b>4</b>	8.2.4	Verformungsnachweis der Steifen	38
1.1	Über FE-BEUL	4	8.2.5	Nachweis der Drillknicksicherheit	38
1.2	FE-BEUL-Team	5	<b>9.</b>	<b>Beispiele</b>	<b>39</b>
1.3	Gebrauch des Handbuchs	6	9.1	DIN 18800	39
1.4	Aufruf des FE-BEUL-Moduls	6	9.1.1	Unversteiftes Beulfeld mit knickstabähnlichem Verhalten	39
<b>2.</b>	<b>Eingabedaten</b>	<b>8</b>	9.1.2	Ausgesteiftes Beulfeld	42
2.1	Basisangaben	8	9.2	EN 1993-1-5	45
2.2	Beulsteifen	11	9.2.1	Unversteiftes Beulfeld mit knickstabähnlichem Verhalten	45
2.3	Belastung	14	9.2.2	Ausgesteiftes Beulfeld	48
<b>3.</b>	<b>Berechnung</b>	<b>17</b>	<b>A</b>	<b>Literatur</b>	<b>52</b>
3.1	Berechnungsdetails DIN 18800	17	<b>B</b>	<b>Index</b>	<b>53</b>
3.2	Berechnungsdetails EN 1993-1-5	19			
<b>4.</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>22</b>			
4.1	Maßgebender Lastfall	22			
4.2	Nachweise lastfallweise	23			
4.3	Nachweise eigenwertweise	24			
4.4	Alle Nachweise	24			
4.5	Verzweigungslastfaktoren	25			
<b>5.</b>	<b>Ergebnisauswertung</b>	<b>26</b>			
5.1	Ergebnismasken	26			
5.2	Visualisierung der Beulfiguren	27			
<b>6.</b>	<b>Ausdruck</b>	<b>28</b>			
6.1	Ausdruckprotokoll	28			
6.2	FE-BEUL-Grafikausdruck	28			
<b>7.</b>	<b>Allgemeine Funktionen</b>	<b>30</b>			
7.1	Bemessungsfälle	30			
7.2	Einheiten und Dezimalstellen	32			
7.3	Export der Ergebnisse	32			
<b>8.</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>34</b>			
8.1	DIN 18800-3	34			
8.1.1	Definitionen und Begriffe	34			
8.2	EN 1993-1-5	36			
8.2.1	Ermittlung der kritischen Beulspannungen	37			
8.2.2	Interaktionsnachweis	37			
8.2.3	Elastischer Spannungsnachweis der Steifen	38			

# 1. Einleitung

## 1.1 Über FE-BEUL



Der Eurocode 3 (EN 1993-1-5:2010-12 + NA 2010-12) regelt die Bemessung und Konstruktion von plattenförmigen Bauteilen aus Stahl in den Mitgliedsstaaten der Europäischen Union. Mit dem Programm FE-BEUL bietet DLUBAL ein leistungsstarkes Werkzeug zur Bemessung plattenförmiger Bauteile an. Länderspezifische Regelungen können durch verschiedene Nationale Anhänge berücksichtigt werden. Die Liste links zeigt die aktuell verfügbaren Anhänge. Daneben können eigene Grenzwerte in Form benutzerdefinierter Anhänge erstellt werden.

FE-BEUL kann sowohl als eigenständig lauffähiges Programm als auch als Zusatzmodul in der RSTAB- bzw. RFEM-Umgebung genutzt werden. Im Zusatzmodul können die bemessungsrelevanten Eingabedaten sowie die Schnittgrößen aus dem aktuellen RSTAB- bzw. RFEM-Modell übernommen werden.

Nach der Bemessung lassen sich die Nachweise von den Eingabedaten bis zur Bemessung im zentralen Ausdruckprotokoll von RSTAB bzw. RFEM dokumentieren.

FE-BEUL führt alle typischen Stabilitätsnachweise sowie den Spannungs- und Verformungsnachweis und die Nachweise der Drillknicksicherheit für die Steifen. Der Stabilitätsnachweis erfolgt nach der Methode der reduzierten Spannungen mittels Interaktionskriterium. Weiterhin sind die analytischen Formeln zur Berechnung der kritischen Beulspannungen des Anhangs A implementiert, wodurch eine Berechnung mittels Eigenwertlösung möglich ist.

Wir wünschen Ihnen viel Freude und Erfolg mit FE-BEUL.

Ihr DLUBAL-Team

## 1.2 FE-BEUL-Team

An der Entwicklung von FE-BEUL waren beteiligt:

### **Programmkoordinierung**

Dipl.-Ing. Georg Dlubal  
Dipl.-Ing. (FH) Steffen Clauß

Dipl.-Ing. Pavel Bartoš  
Ing. Marek Posch

### **Programmierung**

Ing. Martin Deyl

Ing. Marek Posch

### **Querschnitts- und Materialdatenbank**

Ing. Ph.D. Jan Rybín

Jan Brnušák

### **Programmdesign, Dialogbilder und Icons**

Dipl.-Ing. Georg Dlubal

MgA. Robert Kolouch

### **Programmkontrolle**

Dipl.-Ing. (FH) Steffen Clauß

Ing. Marek Posch

### **Lokalisierung, Handbuch**

Dipl.-Ing. (FH) Steffen Clauß  
Dipl.-Ing. (FH) Robert Vogl

MA SKT Anton Mitleider  
Mgr. Petra Pokorná

### **Technische Unterstützung und Endkontrolle**

Dipl.-Ing. (BA) Markus Baumgärtel  
Dipl.-Ing. Moritz Bertram  
Dipl.-Ing. (FH) Steffen Clauß  
Dipl.-Ing. Frank Faulstich  
Dipl.-Ing. (FH) René Flori  
Dipl.-Ing. (FH) Stefan Frenzel  
Dipl.-Ing. (FH) Walter Fröhlich  
Dipl.-Ing. (FH) Bastian Kuhn

Dipl.-Ing. (FH) Ulrich Lex  
Dipl.-Ing. (BA) Sandy Matula  
Dipl.-Ing. (FH) Alexander Meierhofer  
M.Eng. Dipl.-Ing. (BA) Andreas Niemeier  
M.Eng. Dipl.-Ing. (FH) Walter Rustler  
M.Sc. Dipl.-Ing. (FH) Frank Sonntag  
Dipl.-Ing. (FH) Christian Stautner  
Dipl.-Ing. (FH) Robert Vogl

## 1.3 Gebrauch des Handbuchs

Da die Themenbereiche Installation, Benutzeroberfläche, Ergebnisauswertung und Ausdruck im RSTAB- bzw. RFEM-Handbuch ausführlich erläutert sind, wird hier auf eine Beschreibung verzichtet. Der Schwerpunkt dieses Handbuchs liegt auf den Besonderheiten, die sich im Rahmen der Arbeit mit dem Zusatzmodul FE-BEUL ergeben.



Dieses Handbuch orientiert sich an der Reihenfolge und am Aufbau der Eingabe- und Ergebnismasken. Im Text sind die beschriebenen **Schaltflächen** (Buttons) in eckige Klammern gesetzt, z. B. [Sichtmodus]. Gleichzeitig sind sie am linken Rand abgebildet. Die **Begriffe**, die in Dialogen, Tabellen und Menüs erscheinen, sind in *Kursivschrift* hervorgehoben, sodass die Erläuterungen gut nachvollzogen werden können.

Am Ende des Handbuchs befindet sich ein Stichwortverzeichnis. Sollten Sie dennoch nicht fündig werden, so können Sie die Suchfunktion auf unserer Website [www.dlubal.de](http://www.dlubal.de) nutzen, um in der umfangreichen Liste aller *Fragen und Antworten* das Problem nach bestimmten Kriterien einzuzugrenzen.

## 1.4 Aufruf des FE-BEUL-Moduls

Es bestehen folgende Möglichkeiten, das Zusatzmodul FE-BEUL zu starten.

### Menü

Sie können das Zusatzmodul aufrufen mit dem RSTAB- bzw. RFEM-Menü

**Zusatzmodule → Stahlbau → FE-BEUL.**

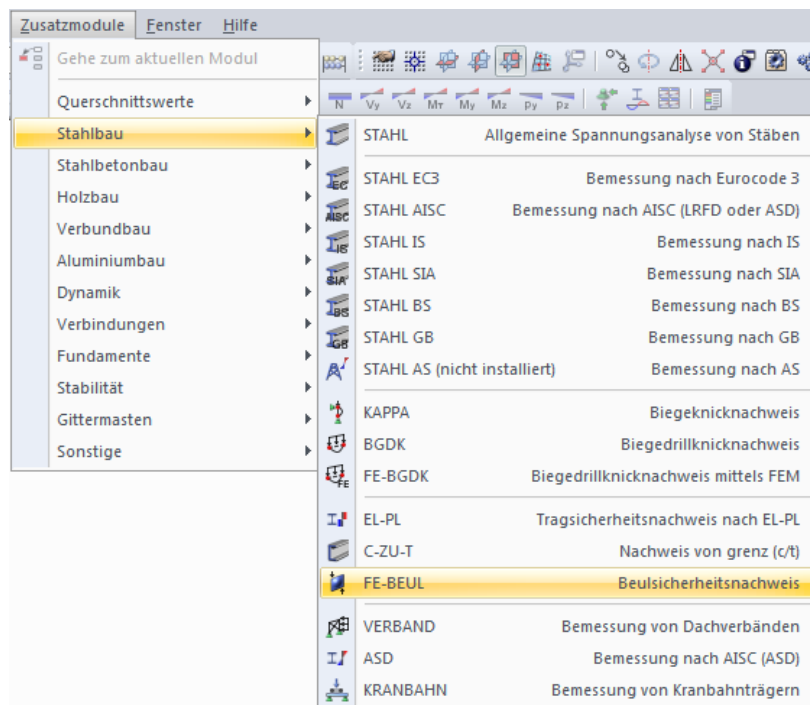


Bild 1.1: Menü: *Zusatzmodule* → *Stahlbau* → *FE-BEUL*

## Navigator

Alternativ rufen Sie das Zusatzmodul im *Daten*-Navigator auf durch Anklicken des Eintrags

**Zusatzmodule** → **FE-BEUL**.

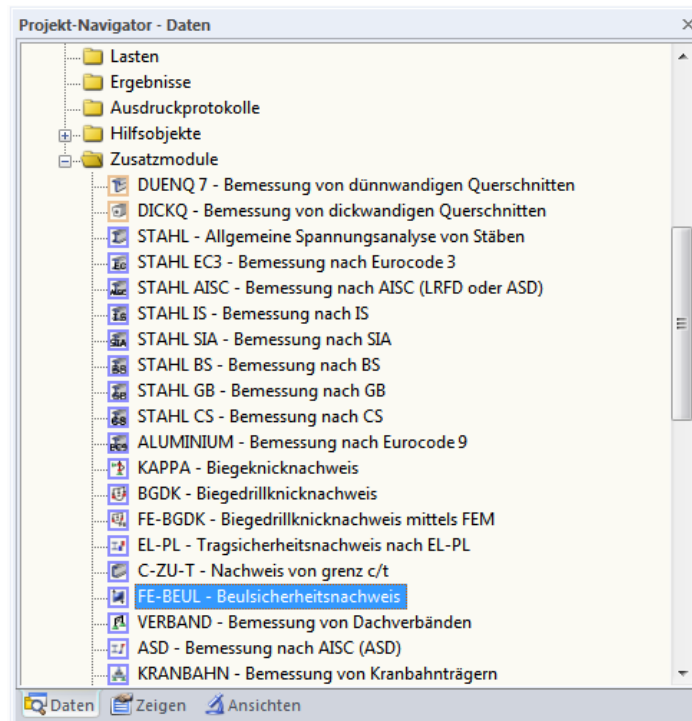


Bild 1.2: Daten-Navigator: Zusatzmodule → FE BEUL

## 2. Eingabedaten

Nach dem Aufruf von FE-BEUL wird in einem neuen Fenster links ein Navigator angezeigt, der alle aktuell anwählbaren Masken verwaltet. Darüber befindet sich eine Pull-downliste mit den eventuell bereits vorhandenen Bemessungsfällen.



Die Ansteuerung der Masken erfolgt entweder durch Anklicken eines bestimmten Eintrags im Navigator von FE-BEUL oder durch Blättern mit den beiden links gezeigten Schaltflächen. Die Funktionstasten [F2] und [F3] blättern ebenfalls eine Maske vorwärts bzw. zurück.

Durch die animierte Grafikdarstellung im Infofeld werden alle Eingaben unterstützt. Über die Schaltfläche [Grafik] ist es zudem möglich, die Eingabedaten anschaulich darzustellen und zu kontrollieren.

OK

Abbrechen

Berechnung

Mit [OK] werden die getroffenen Eingaben gesichert und das Modul FE-BEUL verlassen. Die Schaltfläche [Abbrechen] beendet das Zusatzmodul, ohne die Daten zu speichern.

Mit der Schaltfläche [Berechnung] wird nach Abschluss aller Eingaben das in FE-BEUL definierte statische System generiert und mit Hilfe von RFEM bzw. RSTAB und RF-STABIL/RSKNICK berechnet. Anschließend werden die Ergebnisse der Eigenwertanalyse wieder von FE-BEUL ausgewertet, um die entsprechenden Nachweise zu führen und in den Ergebnismasken auszugeben.

### 2.1 Basisangaben

In Maske 1.1 *Basisangaben* sind die zu bemessenden Beulfelder mit ihrer Geometrie sowie die Materialeigenschaften und die Randbedingungen einzugeben. Weiterhin ist festzulegen, nach welcher Norm der Beulnachweis geführt werden soll.

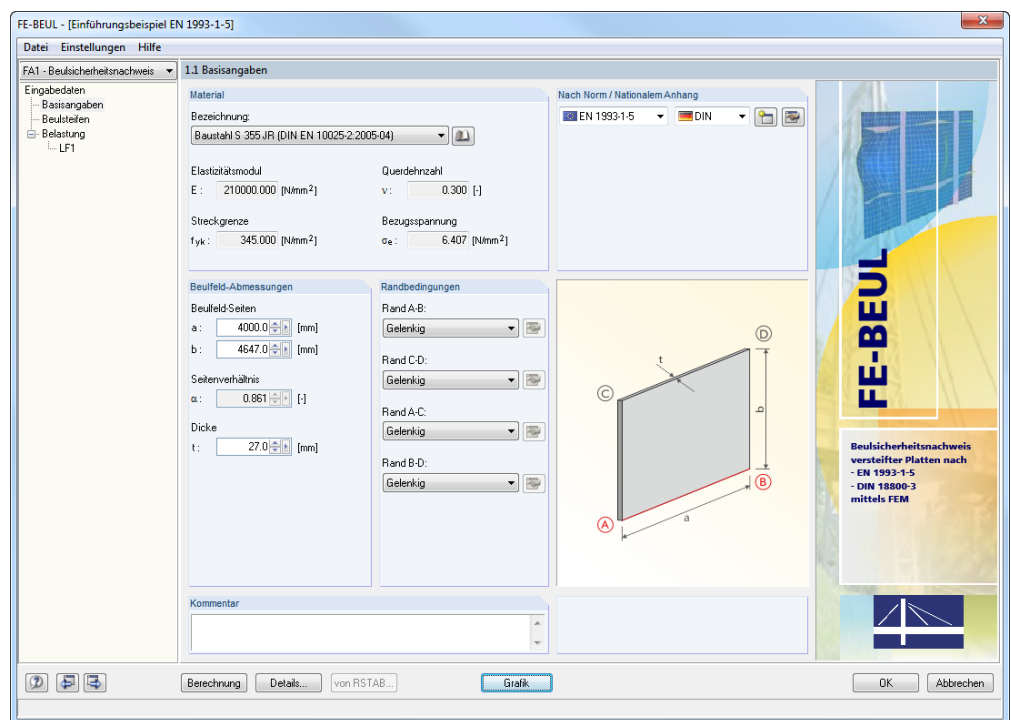


Bild 2.1: Maske 1.1 *Basisangaben*

### Material



Aus der Liste lässt sich eines der im Programm hinterlegten Materialien auswählen. Es stehen die nach der gewählten Norm zulässigen Stahl-Materialien zur Verfügung. Die entsprechenden Stahlsorten sind mit ihren Kennwerten in der Bibliothek hinterlegt. Die Bibliothek der Stahlsorten kann über die Schaltfläche [Bibliothek] aufgerufen werden. Nach Auswahl des Materials wird mit [OK] dieses in die Maske 1.1 übernommen.

Nach Angabe der Beulfeldabmessungen  $a$ ,  $b$  und  $t$  wird die Bezugsspannung errechnet.

Nach EN 1993-1-5:

$$\sigma_e = \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2$$

Nach DIN 18800-3:

$$\sigma_e = \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2$$

### Norm / Nationaler Anhang

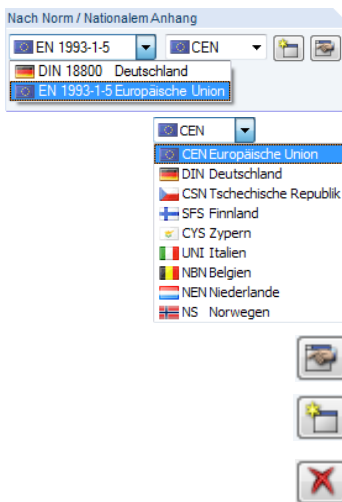
In den Listen können die Norm, die zur Bemessung verwendet wird, und ggf. der Nationale Anhang (NA) ausgewählt werden. Es stehen die Normen *DIN 18800-3* und *EN 1993-1-5* zur Auswahl.

Bei der Bemessung nach EN 1993-1-5 kann über die Liste des Auswahlfeldes der Nationale Anhang festgelegt werden, dessen Parameter für die Bemessung anzusetzen sind. Die links dargestellte Liste zeigt die aktuell verfügbaren Nationalen Anhänge.

Über die Schaltfläche [Bearbeiten] lassen sich die voreingestellten Parameter des aktuellen Nationalen Anhangs bzw. Norm überprüfen und ggf. anpassen. Hierbei handelt es sich hauptsächlich um die Teilsicherheitsbeiwerte für die Bemessung.

Mit [Neu] kann ein eigendefinierter Nationaler Anhang erstellt werden.

Ein benutzerdefinierter Nationaler Anhang lässt sich wieder [Löschen].



### Beulfeld-Abmessungen

Im Teilbereich *Beulfeld-Abmessungen* werden geometrische Angaben zu der untersuchten Platte gemacht. Gemäß Skizze sind die Längen der *Beulfeld-Seiten*  $a$ ,  $b$  und die *Blechedicke*  $t$  anzugeben. Aus diesen Eingaben wird der Verhältniswert  $\alpha$  ermittelt.

$$\alpha = a/b$$

Bild 2.2: *Beulfeld-Abmessungen*

### Randbedingungen

Durch die Eingaben in diesem Abschnitt wird die Lagerung des Beulfeldes definiert. Es ist dabei zwischen *Gelenkig*, *Eingespannt*, *Frei* und *Gelenkig Elastisch* zu unterscheiden.

Die bei der Berechnung zu berücksichtigenden Randbedingungen hängen von der Beschaffenheit der Plattenränder ab und werden durch den Anschluss angrenzender Teile beeinflusst. Vollständig gelenkige oder eingespannte Ränder existieren in der Praxis nicht, da die Platten im allgemeinen Flansche und Stege von Trägern bilden. Durch die Option *Gelenkig - Elastisch* kann die reale Lagerung durch die Eingabe einer Federsteifigkeit, die aus den angrenzenden Bauteilen resultiert, berücksichtigt werden.

Häufig wird vereinfachend angenommen, dass die Platten entlang ihrer Ränder gelenkig gelagert sind. Diese Annahme liegt auf der sicheren Seite. Diese geometrischen Randbedingungen sind in FE-BEUL für die Verschiebungen, Verdrehungen und Verwölbungen an den Knoten vier Plattenränder des Gesamtbeulfeldes anzugeben. Dabei gilt:

- Eingespannter Rand (Verdrehung verhindert)
- Gelenkig gelagerter Rand (Verdrehung frei)
- Freier Rand (Verdrehung und Verschiebung senkrecht zur Plattenebene möglich)
- Gelenkig elastischer Rand (Verdrehung teilweise verhindert)



Bild 2.3: Randbedingungen

Im Falle einer Bemessung nach DIN 18800-3 steht folgende Option zur Verfügung:

- Konstante Randverschiebung  $u$  nach Tabelle 1, Zeile 5

Mit dieser Option treffen Sie die Entscheidung darüber, wie der Abminderungsfaktor  $\kappa$  bei dreiseitig gelagerten Beulfeldern zu berechnen ist.

### Kommentar

Dieses Eingabefeld steht für eine benutzerdefinierte Anmerkung zur Verfügung.



Bild 2.4: Kommentar

## 2.2 Beulsteifen

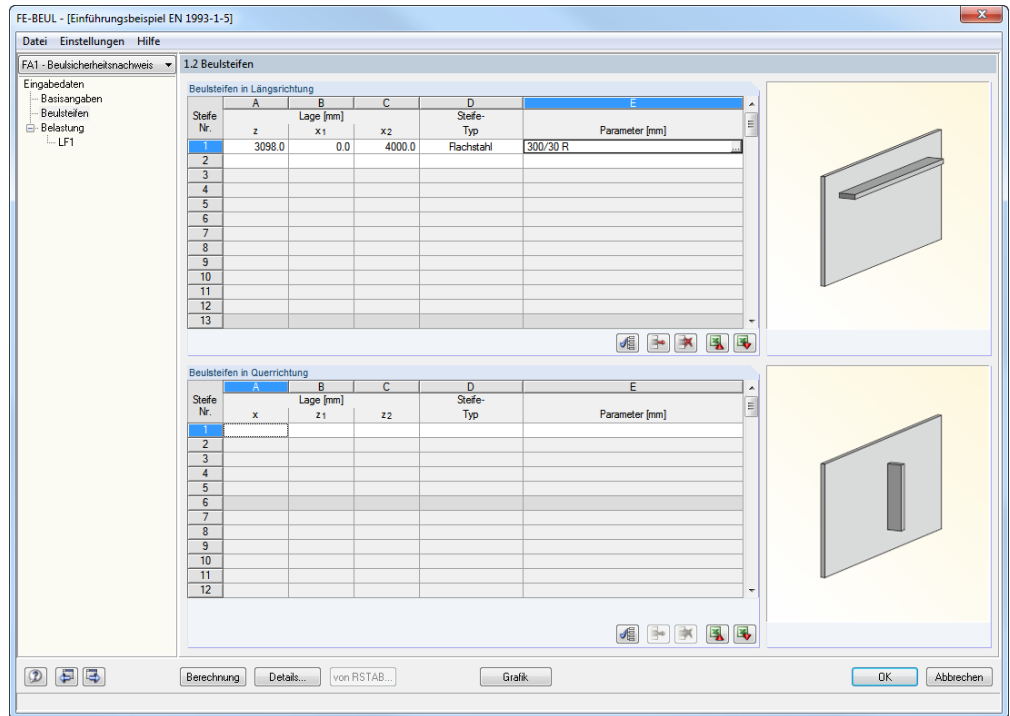


Bild 2.5: Maske 1.2 Beulsteifen

In dieser zweiteiligen Eingabemaske sind im oberen Abschnitt *Beulsteifen in Längsrichtung* die in Längsrichtung angeordneten Steifen angegeben, die in die Berechnung berücksichtigt werden sollen. Die untere Tabelle bietet die gleichen Eingabemöglichkeiten für die *Beulsteifen in Querrichtung*. Die beiden Tabellen sind bis auf den genannten Unterschied identisch und werden deshalb gemeinsam beschrieben.

Durch verschiedene Zusatzfunktionen wird die Arbeit in dieser Maske erleichtert. Die Schaltflächen sind mit folgenden Funktionen belegt:

Schaltfläche	Bezeichnung	Funktion
	Reguläre Beulsteifenpositionen	Gleichmäßige Verteilung der vorhandenen Beulsteifen über die Beulfeldhöhe
	Zeile kopieren	Kopiert die aktuelle Zeile in die nächste Zeile
	Zeile löschen	Löscht die vorhandenen Zeile
	An Excel übergeben	Exportiert die vorhandene Tabelle in MS Excel
	Aus Excel übernehmen	Importiert vorhandene Eingaben aus MS Excel

In den Spalten A bis C der beiden Tabellen ist die *Lage* der Längs- und Quersteifen anzugeben. Nach **EN 1993-1-5** sind dies die Positionen  $z, x_1, x_2$  bzw.  $x, y_1, y_2$ , nach **DIN 18800-3** die Positionen  $y, x_1, x_2$  bzw.  $x, y_1, y$ .

In Spalte D *Steife-Typ* ist der Querschnitt der Steifen festzulegen. Es stehen folgende Steifentypen zur Auswahl.

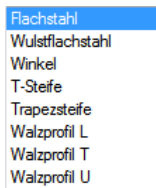


Bild 2.6: Steifentypen

Nach der Auswahl eines Typs können in einem Dialog die Querschnittsparameter eingegeben werden.

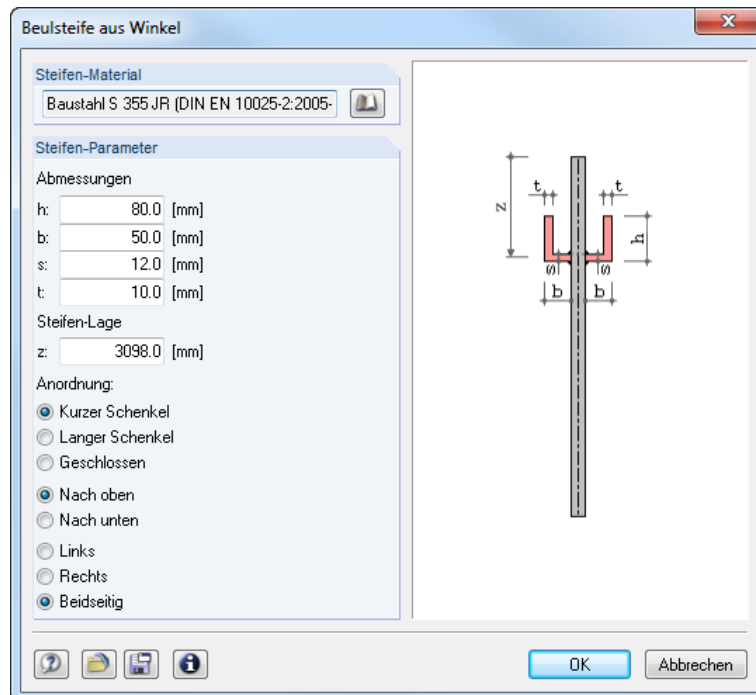


Bild 2.7: Beulsteife aus Winkel



Treffen Sie hier Angaben über Art und Ausrichtung der Beulsteifen. In FE-BEUL ist es möglich, verschiedene Materialien für die Steifen und das Beulfeld zu definieren. Für die Steifen kann eines aus der Liste der im Programm hinterlegten Materialien ausgewählt werden, die von der gewählten Norm abhängen. Die entsprechenden Stahlsorten sind mit ihren Kennwerten in der Bibliothek hinterlegt. Über die Schaltfläche [Bibliothek] kann die Datenbank der Stahlsorten aufgerufen werden. Nach Auswahl eines Materials wird es mit [OK] in die Maske 1.2 übernommen.



Über die Schaltfläche [Info] erhalten Sie Informationen zu den Querschnittswerten der ausgewählten Steife.



Mit der Schaltfläche [Speichern] können die festgelegten Daten in einer Steifen-Datenbank abgelegt werden. Diese lassen mit der Schaltfläche [Laden] wieder einlesen.

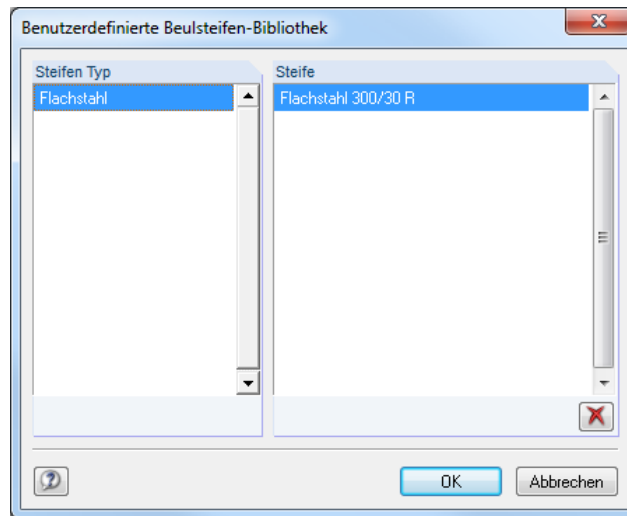


Bild 2.8: Benutzerdefinierte Beulsteifen-Bibliothek

Durch Doppelklicken der gespeicherten Steife wird diese in den Dialog *Beulsteifen aus...* übernommen und kann dort bei Bedarf angepasst werden.



[OK] schließt den *Beulsteifen*-Dialog und übergibt die Steife in die FE-BEUL-Eingabemaske 1.2. [Abbrechen] bewirkt ein Beenden der Eingabe ohne Übernahme der Eingaben.



In Spalte E *Parameter* der Maske 1.2 werden die Eigenschaften der eingegebenen Steife angezeigt. Mit Klick auf die Schaltfläche [...] ist das Editieren der Eingabedaten möglich.

Nach der Definition der Belastungen in Maske 1.3 *Belastungen* ändert sich das Layout der Maske 1.2 *Beulsteifen* wie folgt.

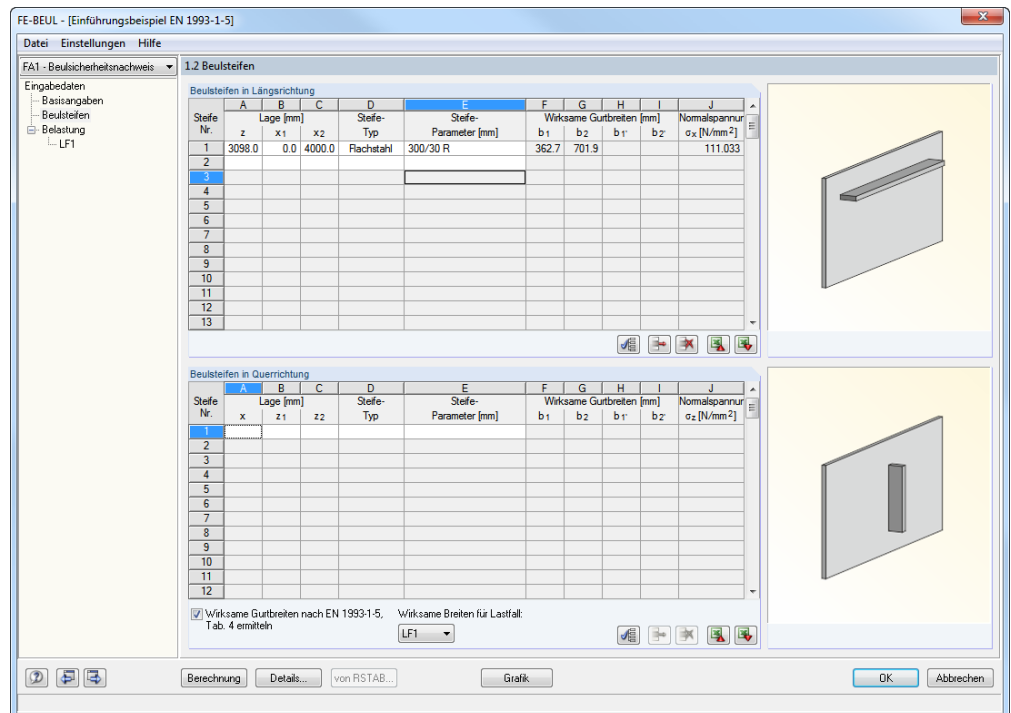


Bild 2.9: Maske 1.2 *Beulsteifen*

### Wirksame Gurtbreiten

Dieser Maskenabschnitt wird erst nach Eingabe der Belastung in Maske 1.3 angezeigt.

Die wirksamen Gurtbreiten der Beulsteifen werden zur Ermittlung der kritischen Beulspannungen und für die Berechnung der kritischen Knickspannung der Beulsteifen verwendet.

Es ist anzugeben, ob die wirksamen Breiten nach Norm (EN 1993-1-5 oder DIN 18800) berechnet werden sollen. Nach dem Deaktivieren des Kontrollfeldes können die wirksamen Gurtbreiten in den Spalten F bis I manuell definiert werden.

Nach EN 1993-1-5 wird die Tabelle 4.1 oder 4.2 verwendet, nach DIN 18800-3 das Kapitel (4). Dabei sind die in Maske 1.1 *Basisangaben* definierten *Randbedingungen* zu beachten.

Weiterhin wird die jeweilige Normalspannung, die sich aus der gegebenen Belastung ergibt, für die jeweilige Steife unter den Normalspannungen dargestellt.

Sind mehrere Lastfälle definiert, so werden die wirksamen Gurtbreiten getrennt voneinander berechnet und angegeben. Über die Auswahlliste haben Sie dann die Möglichkeit, zwischen den einzelnen Lastfällen zu wechseln.

## 2.3 Belastung

In dieser Maske sind die Belastungen respektive die Spannungen des Beulfeldes festzulegen.

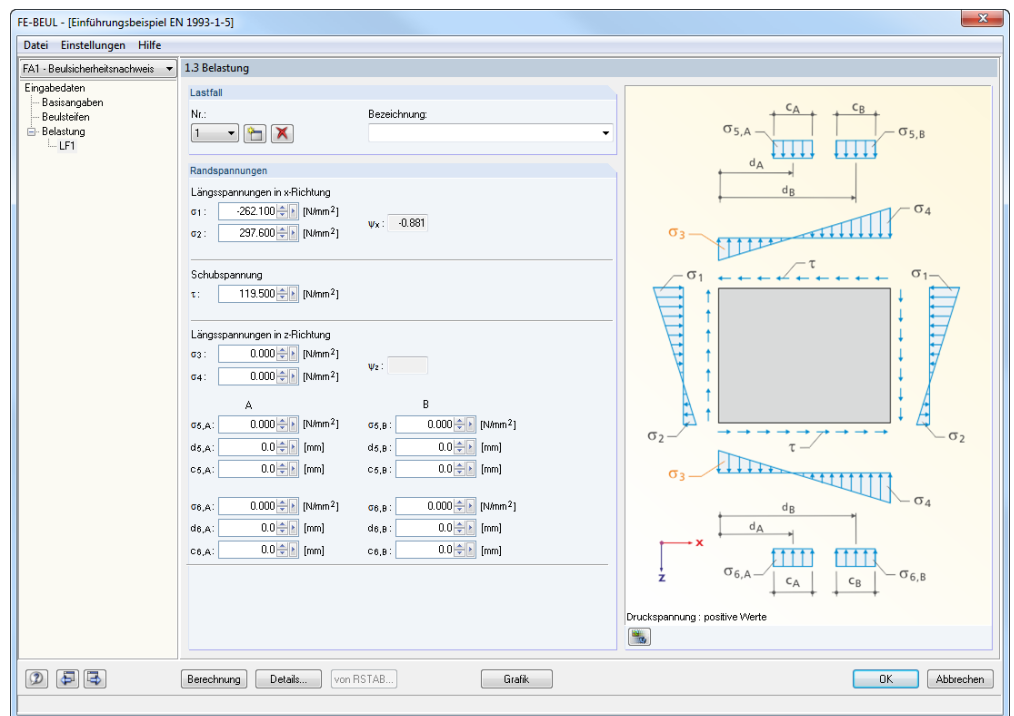


Bild 2.10: Maske 1.3 *Belastung*

### Lastfall

Vergeben Sie für den neuen Lastfall eine *Nummer* und eine *Bezeichnung*. Ein Klick auf die Schaltfläche [▼] listen die bereits verwendeten Bezeichnungen auf. [Neu] legt eine neue Lastfall-Nr. an, [Löschen] entfernt den aktuellen Lastfall.

### Randspannungen

In diesem Abschnitt sind die wirkenden Normalspannungen (*Längsspannungen in x-Richtung*), Schubspannungen und Querspannungen (*Längsspannungen in z-Richtung*) anzugeben. Druckspannungen sind positiv, Zugspannungen negativ und Schubspannungen positiv einzugeben.



### Erläuterung zu Längsspannungen in z-Richtung

Mit FE-BEUL können Querspannungen und lokal begrenzte Querspannungen kombiniert werden. Dabei wird das Superpositionsprinzip angewendet. Die maßgebende Belastung des Beulfeldes ist somit die Spannung, die sich aus der Überlagerung ergibt.

### Spannungen aus RSTAB bzw. RFEM importieren

Mit der Schaltfläche [von RSTAB]/[von RFEM] können die Beulfeld-Spannungen eines Stabes aus RSTAB bzw. RFEM übernommen werden. Es öffnet sich ein Dialog, in dem der *Stab*, das *c/t-Teil* sowie die relevanten *Lastfälle* ausgewählt werden kann.

von RSTAB...

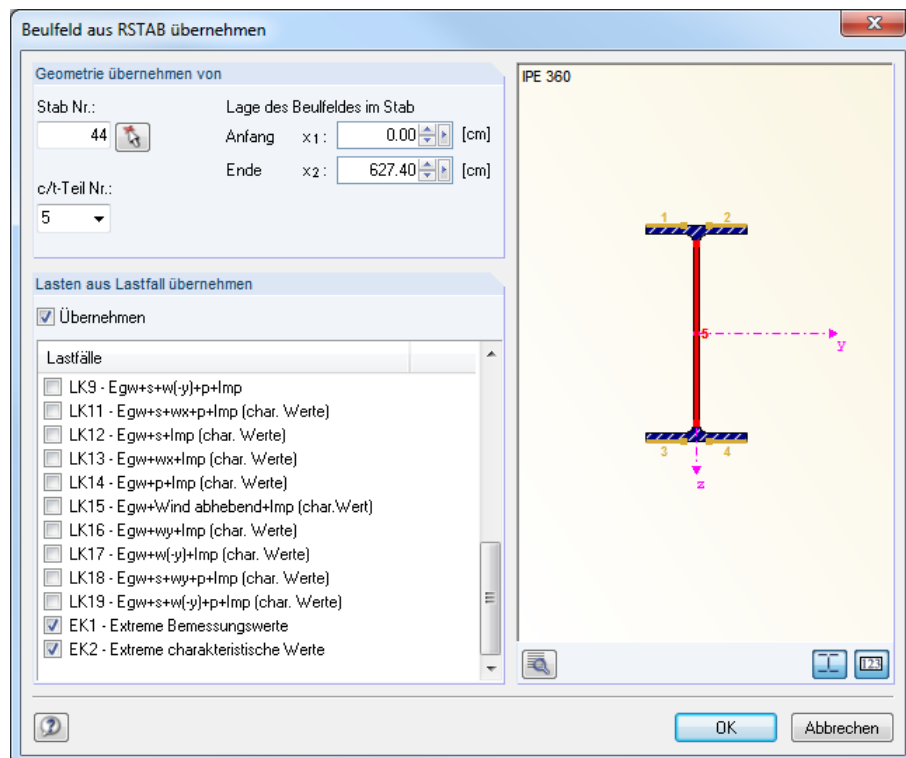


Bild 2.11: Beulfeld aus RSTAB übernehmen



Mit der Schaltfläche [↖] kann ein Stab grafisch im Arbeitsfenster des Hauptprogramms durch Anklicken ausgewählt werden.

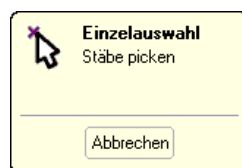


Bild 2.12: Stäbe grafisch auswählen

Unmittelbar nach dem Anklicken wird die Nummer des Stabes in den Dialog eingetragen. Zudem erfolgt beim Verlassen des Dialogs eine Abfrage, ob die Abmessungen des Beulfeldes in Maske 1.1 *Basisangaben* an die geometrischen Verhältnisse des Stabes angepasst werden sollen.

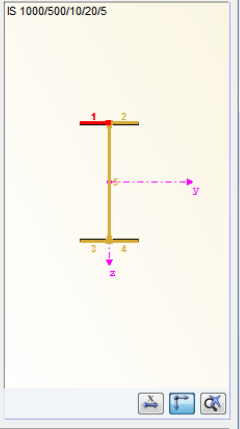
Das relevante Beulfeld kann in der Liste *c/t-Teil Nr.* oder in der Querschnittsgrafik ausgewählt werden. Damit werden auch die geometrischen Parameter des Beulfeldes in Maske 1.1 *Basisangaben* angepasst.



Über die Schaltfläche [Details über c/t-Teile] sind nähere Informationen zu den Beulfelddaten zugänglich.

c/t-Teile von IS 1000/500/10/20/5

c/t-Teil Nr.	A Gelagert Form	B c [mm]	C t [mm]	D c/t [-]	E Koordinaten Anfang y [mm]	F z [mm]	G Koordinaten Ende y [mm]	H z [mm]	I Mittlere statische Momente S <sub>y</sub> [cm <sup>3</sup> ]	J S <sub>z</sub> [cm <sup>3</sup> ]
1	Einseitig	237.9	20.0	11.90	-12.1	-500.0	-250.0	-500.0	1162.17	406.12
2	Einseitig	237.9	20.0	11.90	12.1	-500.0	250.0	-500.0	1162.17	406.12
3	Einseitig	237.9	20.0	11.90	-12.1	500.0	-250.0	500.0	1162.17	406.12
4	Einseitig	237.9	20.0	11.90	12.1	500.0	250.0	500.0	1162.17	406.12
5	Beidseitig	945.9	10.0	94.59	0.0	-472.9	0.0	472.9	5683.58	0.00



IS 1000/500/10/20/5

Schließen

Bild 2.13: c/t Teile

Im Abschnitt *Lasten aus Lastfall übernehmen* des Dialogs *Beulfeld aus RSTAB übernehmen* (siehe Bild 2.11) kann man aus allen RSTAB-Lastfällen die Belastung des Beulfeldes auswählen.

Nach dem Verlassen des Dialogs *Beulfeld aus RSTAB übernehmen* mit [OK] wird bei noch nicht berechneten Lastfällen die RSTAB-Berechnung automatisch eingeleitet. [Abbrechen] beendet die Eingabe ohne Übernahme der Daten.

### Grafikfenster

Über die Schaltfläche [Schema oder Rendering] kann die Art der Ansicht ausgewählt werden. Neben dem Beulfeld-Schema mit den Spannungsgrafiken ist ein 3D-Rendering des Beulfeldes möglich.

Bei der Rendering-Anzeige des zur Bemessung gewählten Beulfeldes kann die Ansicht über die links dargestellten Schaltflächen gesteuert werden. Befindet man sich mit der Maus im Grafikfenster, sind Zoom- und Rotationsfunktionen möglich. Nähere Informationen dazu finden Sie in [3], Kapitel 3.4.9.

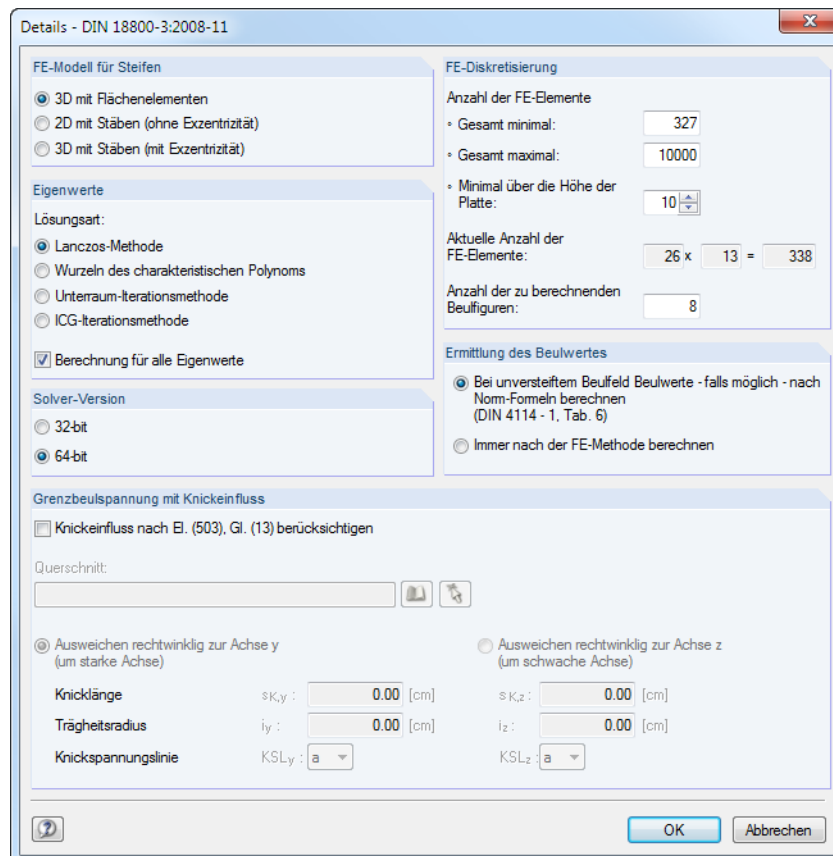


# 3. Berechnung

Details...

Vor der Berechnung sollten die Bemessungsdetails überprüft werden. Der entsprechende Dialog ist in jeder Maske von FE-BEUL über die Schaltfläche [Details] zugänglich.

## 3.1 Berechnungsdetails DIN 18800


 Bild 3.1: Dialog *Details - DIN 18800*

### FE-Modell für Steifen

Hier ist festzulegen, nach welchen Konventionen die Beulsteifen zur Berechnung der Beulfigur Einfluss nehmen. Bei den Einstellungen *3D mit Flächenelementen* und *3D mit Stäben* gehen die tatsächlichen Steifigkeiten der Steifen in die Berechnung ein. Bei der Einstellung *2D mit Stäben* wird die Steife nur bezogen auf den Schwerpunkt als Linienelement mit erhöhten Steifigkeiten in der Plattenebene berücksichtigt. Somit gehen die Vorteile des exzentrischen Anschlusses der Steife verloren. Mit den beiden *3D*-Optionen kann die Wirksamkeit der Profile besser bei der Ausnutzung berücksichtigt werden. Bei der Einstellung *2D mit Stäben* hingegen verkürzt sich die Berechnungsdauer erheblich.

### Eigenwerte

Die Ermittlung der Beulfiguren einer Platte erfolgt durch eine Eigenwertberechnung des Beulfeldes. Dabei werden die idealen Beulwerte für  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau$  sowie der ideale Beulwert für gleichzeitige Wirkung aller Spannungskomponenten berechnet. Hierzu können drei direkte Gleichungslöser (*Lanczos-Methode*, *Wurzeln des charakteristischen Polynoms*, *Unterraum-Methode*) oder ein iterativer Gleichungslöser (*ICG-Iterationsmethode*) benutzt werden.

Die direkten Gleichungslöser sind für kleine und mittelgroße Systeme zu empfehlen. Voraussetzung ist, dass der Arbeitsspeicher ausreichend groß für die Daten der Dreieckszerlegung ist, sonst ist mit längeren Rechenzeiten zu rechnen. Die Lanczos-Methode ist voreingestellt, da sie sich für die meisten Modelle eignet. Weitere Informationen zu dieser Methode finden Sie unter <http://de.wikipedia.org/wiki/Lanczos-Verfahren>.

Die ICG-Iterationsmethode sollte benutzt werden, wenn keine direkte Methode zum Ziel führt oder die Rechenzeiten bei großen Systemen außergewöhnlich lang sind. Die Vorteile dieser Methode sind minimale Anforderungen an den Arbeitsspeicher und die Ermittlung von genaueren Ergebnissen bei schlecht konvergenten, also labilnahen Modellen.

Durch das Anhängen der Option *Berechnung für alle Eigenwerte* wird der Beulnachweis für jede der gewählten Eigenformen und ihren Eigenwerten geführt. Ist das Kontrollfeld deaktiviert, so wird die erste Eigenform als maßgebend betrachtet.

#### Solver-Version

In diesem Abschnitt kann eingestellt werden, ob der *32-bit*- oder der *64-bit*-Gleichungslöser benutzt werden soll.

#### FE-Diskretisierung

Die Felder *Anzahl der FE-Elemente* steuern, wie fein das FE-Netz erzeugt wird. Für eine gute Näherungslösung kann es erforderlich sein, die maximale Anzahl der Elemente für das FE-Netz zu erhöhen. Viele finite Elemente haben aber einen erhöhten Rechenaufwand zur Folge.

*Minimal über die Höhe der Platte* müssen mindestens vier Elemente erzeugt werden, damit die Berechnung durchgeführt werden kann.

FE-BEUL ermittelt die ungünstigsten Beulfiguren des Modells, wobei die niedrigste Beulfigur immer der maßgebenden Beulfigur entspricht. Eine große *Anzahl der zu berechnenden Beulfiguren* wirkt sich entsprechend auf die Berechnungsdauer aus.

#### Ermittlung des Beulwertes

Dieser Abschnitt steuert, nach welchem Verfahren die Beulwerte berechnet werden: analytisch nach *Norm-Formeln* oder nach *FE-Methode*. Sind Beulsteifen im Modell vorhanden, so benutzt FE-BEUL automatisch die Option *Immer nach der FE-Methode berechnen*, um den Beulwert zu ermitteln. Die verwendete Berechnungsmethode wird in der Ergebnismaske dokumentiert.

#### Grenzbeulspannungen mit Knickeinfluss

Das Kontrollfeld *Knickeinfluss berücksichtigen* ist anzuhaken, wenn für das Bauteil, in dem sich das Beulfeld befindet, der Nachweis des Biegeknickens erforderlich ist. Dies ist der Fall, wenn das Beulfeld z. B. Teil eines Druckstabes ist. Dadurch ist eine gegenseitige Beeinflussung von Beulen und Knicken gegeben: Beulen einzelne Querschnittsteile des Druckstabes vor Erreichen der kritischen Druckkraft aus, so bedeutet dies für den Druckstab eine Abnahme der Steifigkeit. Die aufnehmbare Druckkraft sinkt auf einen Wert kleiner der kritischen Druckkraft.

Nach dem Anhängen des Kontrollfeldes sind die Felder unterhalb zur Eingabe der Parameter zugänglich.



Mit der Schaltfläche [Bibliothek] erhalten Sie Zugriff auf die Querschnittsbibliothek von RSTAB bzw. RFEM. Über die Schaltfläche [↖] können Sie die Querschnittswerte und Länge eines Stabes aus dem Arbeitsfenster von RSTAB bzw. RFEM übernehmen. Die Angaben zum *Ausweichen rechtwinklig zur Achse y* werden in diesem Fall automatisch eingetragen. Knicklänge, Trägheitsradius und Knickspannungslinie des Profils können jedoch auch manuell definiert werden.

## 3.2 Berechnungsdetails EN 1993-1-5

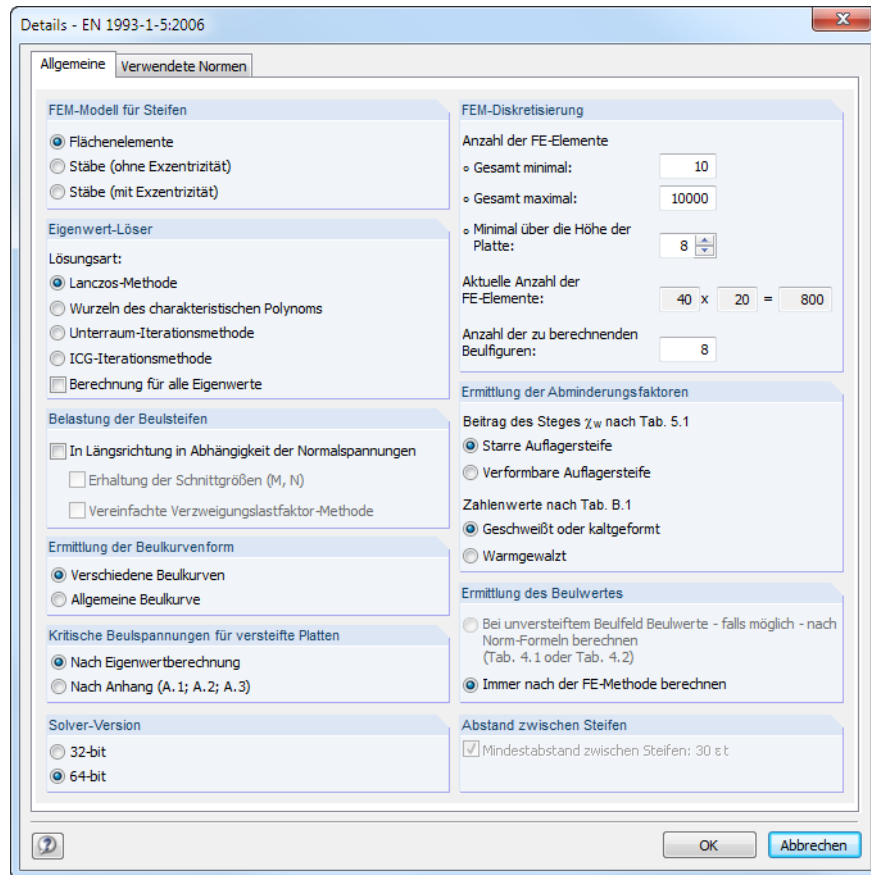


Bild 3.2: Dialog Details EN 1993-1-5



Die Abschnitte **FEM-Modell für Steifen**, **Eigenwert-Löser**, **Solver-Version**, **FEM-Diskretisierung** und **Ermittlung des Beulwertes** sind im Kapitel 3.1 beschrieben.

### Belastung der Beulsteifen

Ist das Kontrollfeld *In Längsrichtung in Abhängigkeit der Normalspannungen* angehakt, werden die in Längsrichtung definierten Spannungen auch auf die Längssteifen angesetzt und in der Eigenwertberechnung berücksichtigt. Anderenfalls wirken die Spannungen nur auf das Beulfeld.

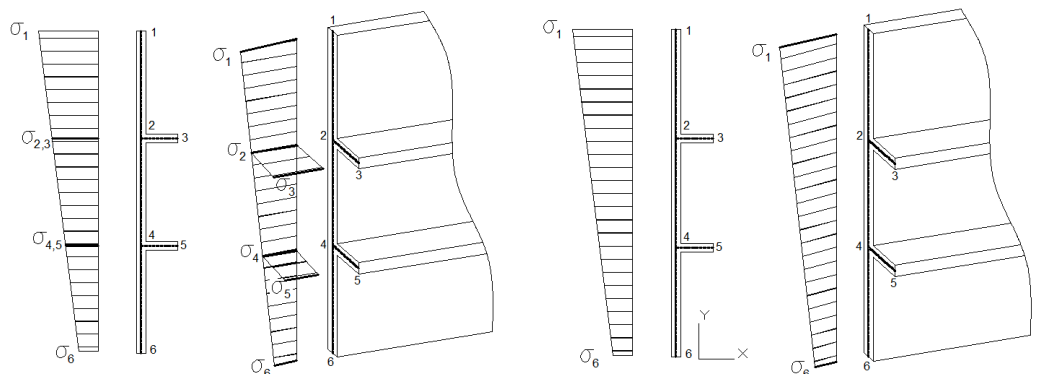
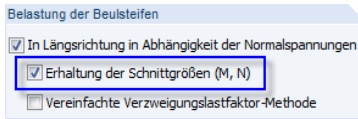


Bild 3.3: Längsspannungen auf Beulfeld und Steifen (links) oder nur auf Beulfeld (rechts)



#### Erhaltung der Schnittgrößen (M, N)

Die Schnittgrößen und die damit verbundenen Beulfeldspannungen werden häufig anhand der Stabstatik ermittelt. In diesen Modellen werden Steifen mit ihren Steifigkeiten nicht berücksichtigt. Durch Anhängen des Kontrollfeldes *Erhaltung der Schnittgrößen (M, N)* kann dem jedoch Rechnung getragen werden.

Die Spannungen der Maske 1.3 werden unter Einhaltung des Gleichgewichts zwischen den inneren und äußeren Kräften sowie einer linearen Spannungsverteilung zurückgerechnet.

$$\oint_A \sigma(\bar{a}) d\bar{a} = \oint_A \sigma(a) da = N$$

$$\oint_A \sigma(\bar{a}) z \cdot d\bar{a} = \oint_A \sigma(a) da \cdot z = M$$

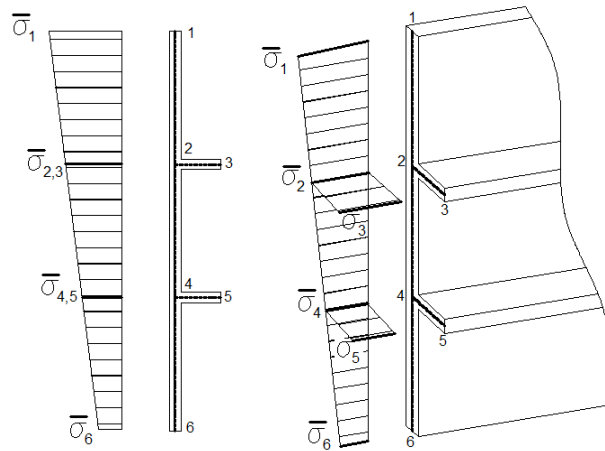
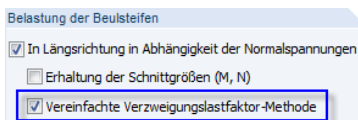


Bild 3.4: Längsspannungen für Beulfeld und Längssteifen unter *Erhaltung der Schnittgrößen (M, N)*



#### Vereinfachte Verzweigungslastfaktor-Methode

Bei dieser Methode werden die horizontalen Spannungen vollständig in die Steifen verteilt. Ein Vorteil dabei ist, dass nur wenige lokale Extrema der Beulfiguren berechnet werden brauchen. Dieser Ansatz ist in [18] vorgestellt.

$$F_1 = \int_{L_1/2}^{L_2/2} \sigma(x) t dz + A_{\text{Steife}_1} \cdot \sigma_{2,3}$$

$$F_1 = \int_{L_2/2}^{L_3/2} \sigma(x) t dz + A_{\text{Steife}_2} \cdot \sigma_{4,5}$$

$$\underline{\underline{\sigma_2}} = \underline{\underline{\sigma_3}} = \frac{F_1}{A_{\text{Steife}_1}}$$

$$\underline{\underline{\sigma_4}} = \underline{\underline{\sigma_5}} = \frac{F_2}{A_{\text{Steife}_2}}$$

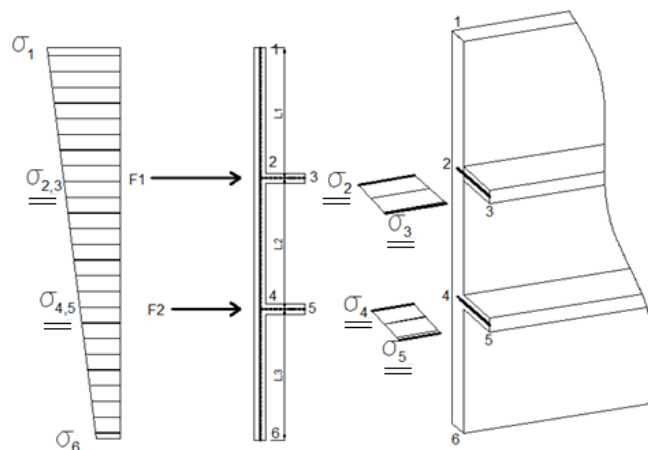


Bild 3.5: Längsspannungen für Beulfeld und Längssteifen bei Vereinfachter Verzweigungslastfaktor-Methode



Die Vereinfachte Verzweigungslastfaktor-Methode kann mit dem Verfahren der Erhaltung der Schnittgrößen ( $M$ ,  $N$ ) kombiniert werden.

### Ermittlung der Beulkurvenform

Für den Interaktionsnachweis und die Abminderungsfaktoren stellt die EN 1993-1-5 die Möglichkeit zur Verfügung, entweder eine *Allgemeine Beulkurve* für den gesamten Nachweis oder für jede vorhandene Spannung *Verschiedene Beulkurven* zu verwenden.

### Kritische Beulspannungen für versteifte Platten

Der *Anhang* zur EN 1993-1-5 stellt analytische Verfahren zur Ermittlung der kritischen Beulspannung zur Verfügung. Dabei werden folgenden Varianten in der Norm behandelt:

- eine oder zwei Beulsteifen im Druckbereich des Beulfeldes
- drei oder mehr Steifen im Beulfeld

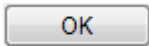
Ist das Auswahlfeld *Nach Anhang* aktiv, so untersucht FE-BEUL die Steifen- und Belastungssituation und berechnet die kritische Beulspannung nach der maßgebenden Variante. Sollten die nötigen Restriktionen nicht erfüllt sein, werden automatisch die Beulwerte *Nach Eigenwertberechnung* (FE-Methode) ermittelt und damit die Beulspannung berechnet.

### Ermittlung der Abminderungsfaktoren

Nach *Tabelle 5.1* der EN 1993-1-5 kann für die Ermittlung von  $\chi_w$  (Beitrag des Steges) zwischen einer starren und einer verformbaren Auflagersteife gewählt werden. Um die Möglichkeiten der Norm zu berücksichtigen, kann zwischen den beiden Optionen gewählt werden.

Bei der Ermittlung der Abminderungsfaktoren für das Plattenbeulen wird nach EN 1993-1-5, Anhang B.1, *Tabelle B.1* zwischen geschweißten oder kaltgeformten und warmgewalzten Produkten unterschieden. Beide Varianten können über die Auswahlfelder festgelegt werden.

# 4. Ergebnisse



Unmittelbar nach der Berechnung erscheint die Maske 2.1 *Maßgebender Lastfall*. Die Masken 2.1 bis 2.5 geben die Nachweise mitsamt Erläuterungen zu den einzelnen Bauteilen geordnet aus. Jede der Masken kann über den Navigator von FE-BEUL angesteuert werden. Alternativ werden die beiden links dargestellten Schaltflächen oder die Funktionstasten [F2] und [F3] benutzt, um eine Maske vor- oder zurückzublättern.

[OK] sichert die Ergebnisse. FE-BEUL wird verlassen und man gelangt zurück in das Arbeitsfenster von RSTAB bzw. RFEM.

Das Kapitel 4 *Ergebnisse* stellt die einzelnen Masken der Reihe nach vor. Die Auswertung und Kontrolle der Resultate ist im Kapitel 5 *Ergebnisauswertung* ab Seite 26 beschrieben.

## 4.1 Maßgebender Lastfall

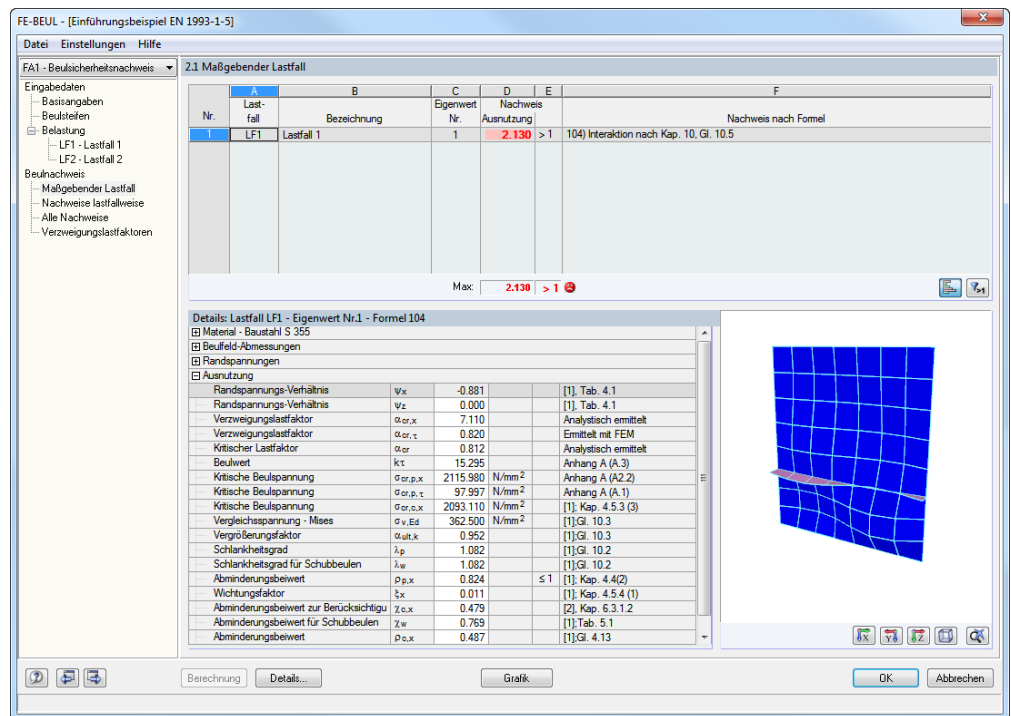


Bild 4.1: Maske 2.1 *Maßgebender Lastfall*

### Bezeichnung

In dieser Spalte werden zur Information die Bezeichnungen der Lastfälle, Last- und Ergebniskombinationen angegeben, die für die jeweiligen Nachweise maßgebend sind.

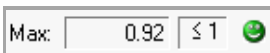
### Eigenwert Nr.

Für jeden bemessenen Lastfall bzw. jede bemessene Last- und Ergebniskombination wird die Nummer des Eigenwertes (Beulfigur) angegeben, der die höchste Ausnutzung aufweist.

### Nachweis

Für jede Nachweisart und für jeden Lastfall bzw. jede Last- und Ergebniskombination werden jeweils die Nachweisbedingungen gemäß EN 1993-1-5 oder DIN 18800 ausgegeben.

Die farbigen Balken veranschaulichen die Ausnutzungen infolge der einzelnen Lastfälle.



## Nachweis nach Formel

Diese Spalte listet die Gleichungen der Norm auf, mit denen die Nachweise geführt wurden.

## Details

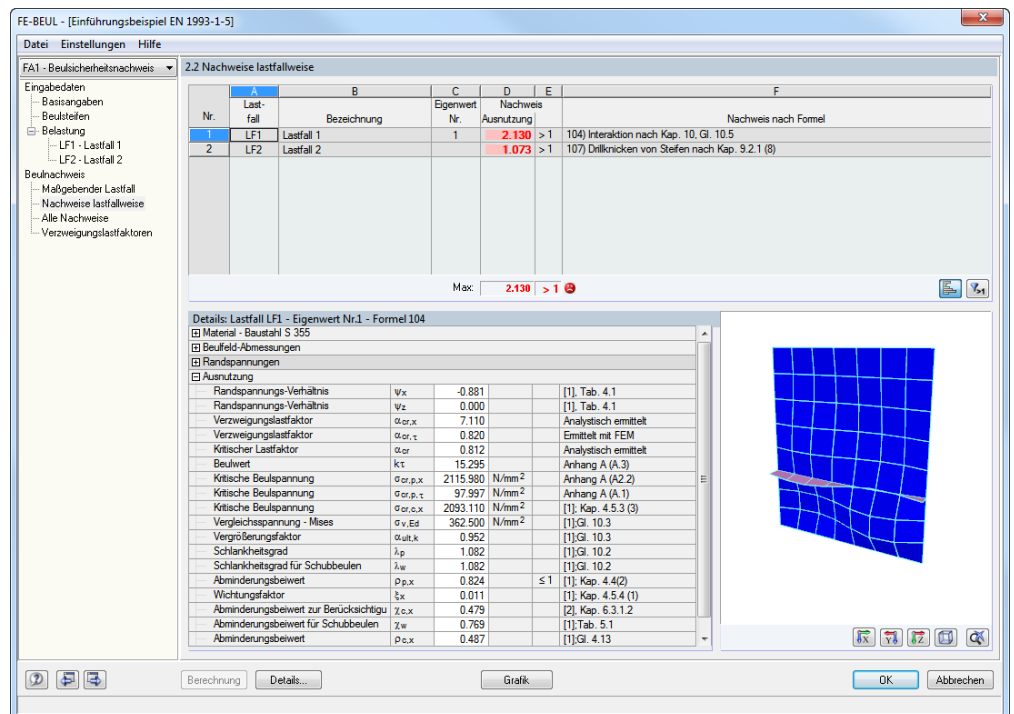
Im unteren Abschnitt *Details* werden die Zwischenergebnisse zu den geführten Nachweisen nachvollziehbar mit Verweisen zur gewählten Norm dargestellt.

## Grafikfenster

Das Grafikfenster zeigt das bemessene Beulfeld im 3D-Rendering an. Die unterschiedlichen Ansichten lassen sich über die Schaltflächen unterhalb steuern. Befindet man sich mit der Maus im Grafikfenster, sind Zoom- und Rotationsfunktionen möglich. Nähere Informationen dazu finden Sie in [3] Kapitel 3.4.9.



## 4.2 Nachweise lastfallweise



The screenshot shows the 'FE-BEUL - [Einführungsbeispiel EN 1993-1-5]' window. The main table displays the following data:

Nr.	Lastfall	Bezeichnung	Eigenwert Nr.	Nachweis Ausnutzung	Nachweis nach Formel
1	LF1	Lastfall 1	1	2.130 > 1	104) Interaktion nach Kap. 10. Gl. 10.5
2	LF2	Lastfall 2		1.073 > 1	107) Drillknicken von Steifen nach Kap. 9.2.1 (6)

The 'Details' section for 'Lastfall LF1 - Eigenwert Nr.1 - Formel 104' lists various parameters and their values:

Parameter	Wert	Einheit	Referenz
Material - Baustahl S 355			
Beulfeld-Abmessungen			
Randspannungen			
Ausnutzung			
Randspannungs-Verhältnis $\eta_x$	0.981		[1], Tab. 4.1
Randspannungs-Verhältnis $\eta_z$	0.000		[1], Tab. 4.1
Verzweigungslastfaktor $\alpha_{cr,x}$	7.110		Analytisch ermittelt
Verzweigungslastfaktor $\alpha_{cr,z}$	0.820		Ermittelt mit FEM
Kritischer Lastfaktor $\alpha_{cr}$	0.812		Analytisch ermittelt
Beulwert $k_t$	15.295		Anhang A (A.3)
Kritische Beulspannung $\sigma_{cr,p,x}$	2115.980	N/mm <sup>2</sup>	Anhang A (A2.2)
Kritische Beulspannung $\sigma_{cr,p,z}$	97.997	N/mm <sup>2</sup>	Anhang A (A.1)
Kritische Beulspannung $\sigma_{cr,o,x}$	2093.110	N/mm <sup>2</sup>	[1], Kap. 4.5.3 (3)
Vergleichsspannung - Mises $\sigma_{v,Ed}$	362.500	N/mm <sup>2</sup>	[1], Gl. 10.3
Vergrößerungsfaktor $\alpha_{ult,k}$	0.952		[1], Gl. 10.3
Schlankheitsgrad $\lambda_p$	1.082		[1], Gl. 10.2
Schlankheitsgrad für Schubbeulen $\lambda_w$	1.082		[1], Gl. 10.2
Abminderungsbeiwert $\rho_{p,x}$	0.824		[1], Kap. 4.4(2)
Wichtungsfaktor $\chi_x$	0.011		[1], Kap. 4.5.4 (1)
Abminderungsbeiwert zur Berücksichtigung $\chi_{c,x}$	0.479		[2], Kap. 6.3.1.2
Abminderungsbeiwert für Schubbeulen $\chi_w$	0.769		[1], Tab. 5.1
Abminderungsbeiwert $\rho_{c,x}$	0.487		[1], Gl. 4.13

Bild 4.2: Maske 2.2 Nachweise lastfallweise

Diese Maske listet die maximalen Ausnutzungen und die zugehörigen maßgebenden Nachweise aller zur Bemessung definierten Lastfälle, Last- und Ergebniskombinationen auf.

### 4.3 Nachweise eigenwertweise

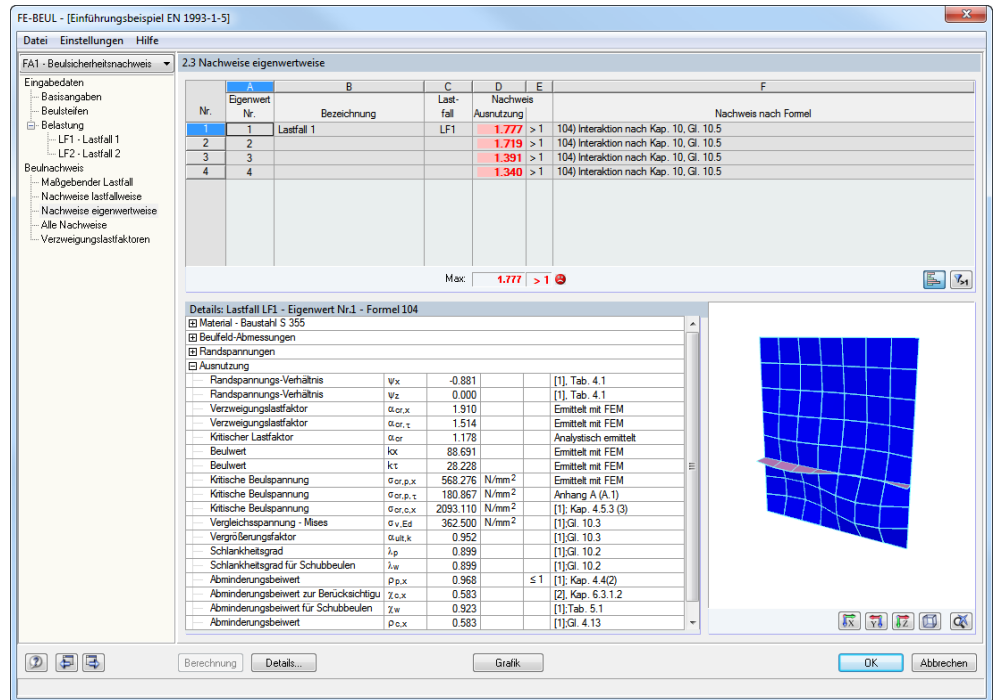


Bild 4.3: Maske 2.3 Nachweis eigenwertweise

Berechnung für alle Eigenwerte

Diese Ausgabemaske wird angezeigt, wenn im Dialog *Details* die *Berechnung für alle Eigenwerte* aktiviert wurde (siehe Bild 3.2, Seite 19). FE-BEUL berechnet die Nachweise für die gewählte Anzahl der Eigenformen. In Maske 2.3 wird dann der maßgebende Lastfall mit dem entsprechenden Nachweis ausgegeben.

### 4.4 Alle Nachweise

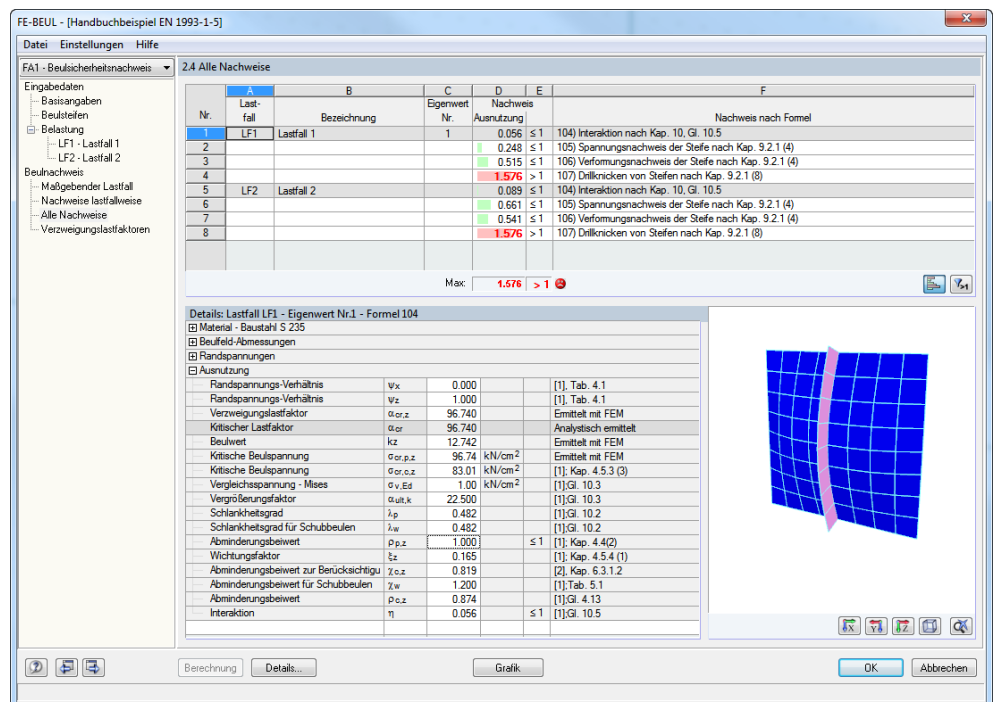


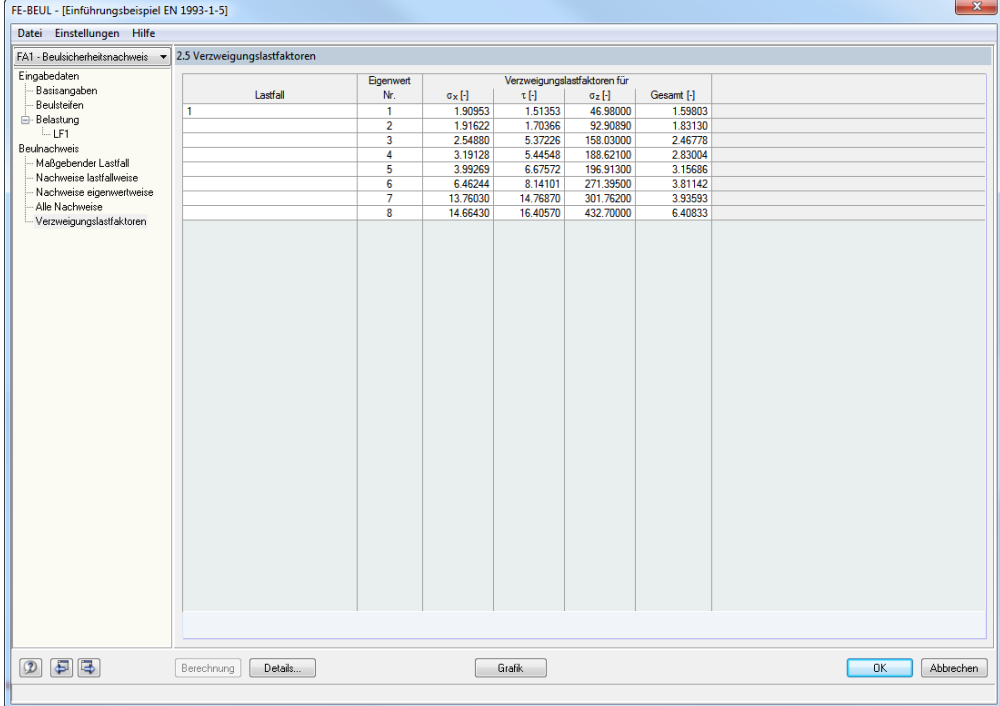
Bild 4.4: Maske 2.4 Alle Nachweise

Alle Ergebnisse werden mit Verweisen auf DIN 18800-3 bzw. EN 1993-1-5 ausgegeben.

Nach *DIN 18800-3* werden die Berechnungsergebnisse getrennt für die Einwirkung nur einer Randspannung sowie infolge gleichzeitiger Wirkung aller Randlasten dargestellt.

Die Nachweise nach *EN 1993-1-5* beinhalten zum einen den Interaktionsnachweis des Beulfeldes und zum anderen alle Nachweise, die für die Bemessung eventuell vorhandener Steifen notwendig sind.

### 4.5 Verzweigungslastfaktoren



Lastfall	Eigenwert Nr.	Verzweigungslastfaktoren für			Gesamt [ ]
		$\sigma_x$ [ ]	$\tau$ [ ]	$\sigma_z$ [ ]	
1	1	1.90953	1.51353	46.98000	1.59803
	2	1.91622	1.70366	92.90890	1.83130
	3	2.54880	5.37226	158.03000	2.46778
	4	3.19128	5.44548	188.62100	2.83004
	5	3.99289	6.67572	196.91300	3.15686
	6	6.46244	8.14101	271.39500	3.81142
	7	13.76030	14.76870	301.76200	3.93593
	8	14.66430	16.40570	432.70000	6.40833

Bild 4.5: Maske 2.5 Verzweigungslastfaktoren

Die letzte Ergebnismaske stellt für sämtliche Lastfälle die aus  $\sigma_x$ ,  $\tau$  und  $\sigma_z$  ( $\sigma_y$ ) resultierenden Verzweigungslastfaktoren dar. Sie werden getrennt nach Einwirkung für alle Beulformen aufgelistet.

# 5. Ergebnisauswertung

Die Bemessungsergebnisse lassen sich auf verschiedene Weise auswerten.

## 5.1 Ergebnismasken

Die Schaltflächen am Ende der oberen Tabelle erleichtern die Auswertung in den Ergebnismasken.

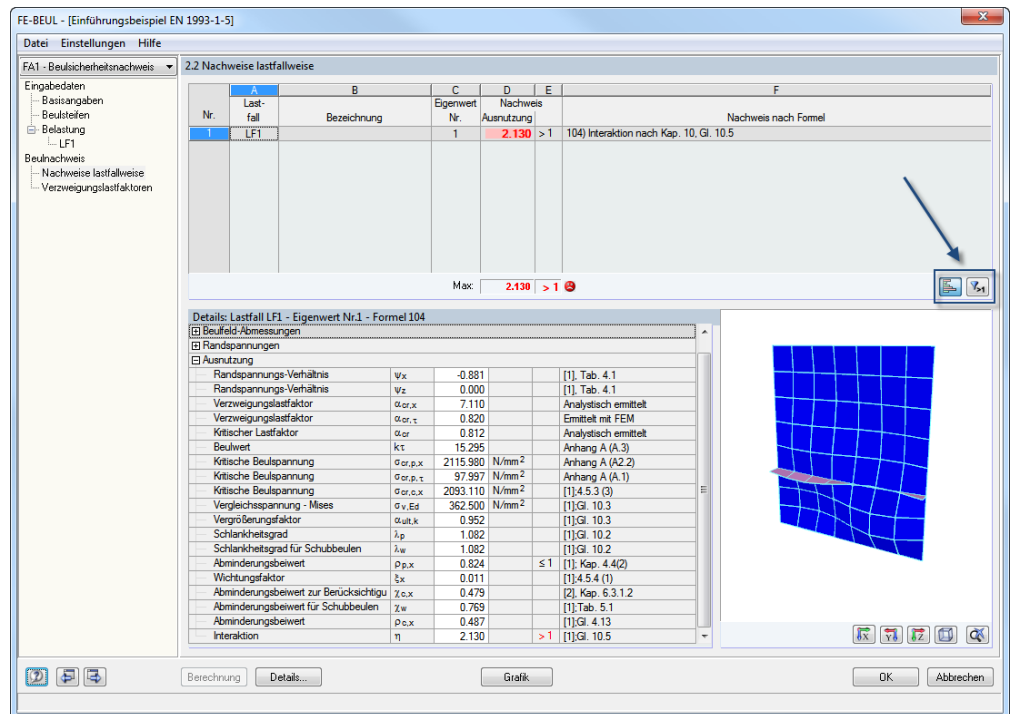


Bild 5.1: Schaltflächen zur Ergebnisauswertung

Die Schaltflächen sind mit folgenden Funktionen belegt:



Schaltfläche	Bezeichnung	Funktion
	Relationsbalken	Blendet die farbigen Bezugsskalen in den Ergebnismasken ein und aus
	Überschreitung	Stellt nur Zeilen dar, in denen die Ausnutzung größer als 1 und damit der Nachweis nicht erfüllt ist

Tabelle 5.1: Schaltflächen in den Ergebnismasken 2.1 bis 2.5

## 5.2 Visualisierung der Beulfiguren

Grafik

Mithilfe der Schaltfläche [Grafik] können die Beulfiguren grafisch dargestellt werden. Hierzu öffnet sich ein neues FE-BEUL-Fenster.

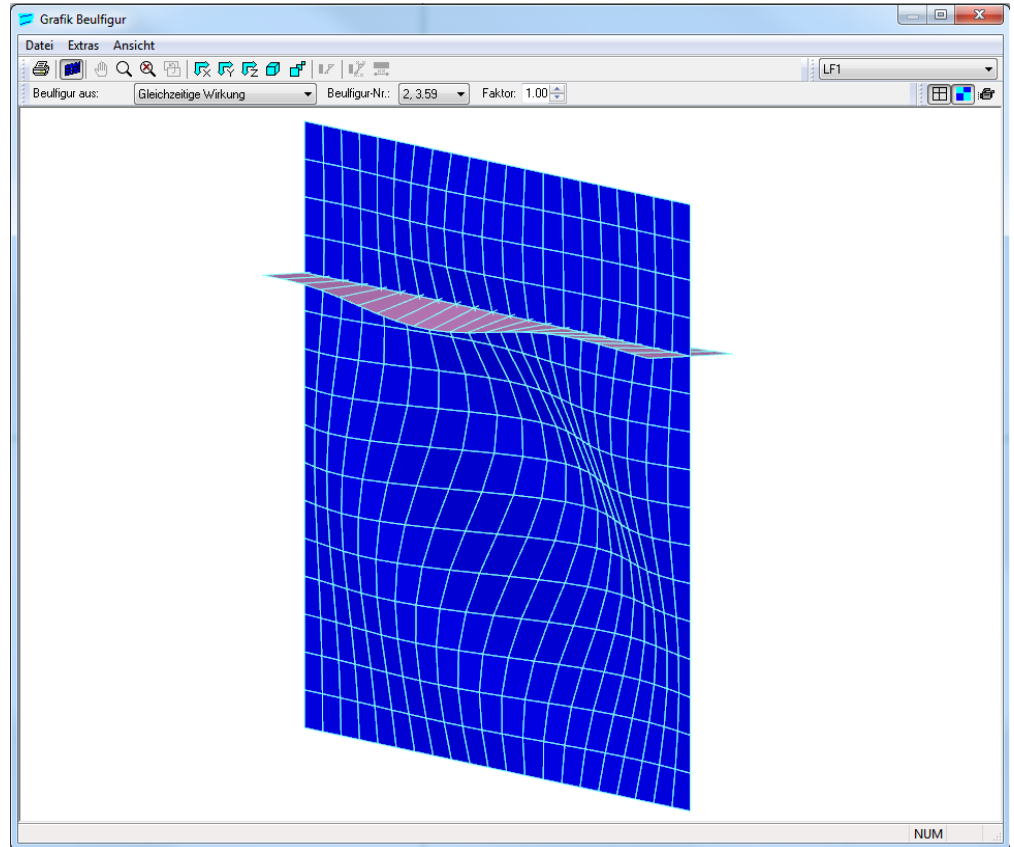


Bild 5.2: Grafik Beulfigur

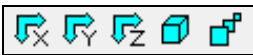
In diesem Fenster lassen sich verschiedene Einwirkungen auf das Beulfeld, unterschiedliche Lastfälle sowie verschiedene Beulfiguren visualisieren. Bei Lastfällen, die noch nicht berechnet sind, wird die Belastung des Beulfeldes gezeigt. Anhand der grafischen Darstellung können die Beulfiguren bzw. Belastungsdaten schnell überprüft werden.

Die Grafik lässt sich über das Pulldownmenü oder die Funktionen der Symbolleiste steuern. Die links dargestellten Schaltflächen ermöglichen es, das Beulfeld in unterschiedlichen Perspektiven zu betrachten.

Eine Sonderstellung bei den Schaltflächen nimmt die Greiffunktion ein: So können Sie bei gleichzeitigem Drücken der linken Maustaste und der [Shift]-Taste mittels vertikaler Bewegungen auf dem Bildschirm die Ansicht zoomen. Beim Drücken der linken Maustaste und der [Strg]-Taste können Sie die Ansicht drehen. Es empfiehlt sich, ein wenig mit den Funktionen zu „spielen“, damit die Wirkungsweise klar wird.

Das Feld [Faktor] ermöglicht es, kleine Verformungen überhöht darzustellen.

Die [Animation] der Beulformen erleichtert oft das Verständnis des Beultragverhaltens bei ausgesteiften Platten.



## 6. Ausdruck

### 6.1 Ausdruckprotokoll

Für die Daten von FE-BEUL wird zunächst ein Ausdruckprotokoll generiert, das mit Grafiken und Erläuterungen ergänzt werden kann. Die Selektion im Ausdruckprotokoll steuert, welche Daten schließlich im Ausdruck erscheinen.



Das Ausdruckprotokoll ist im RSTAB- bzw. RFEM-Handbuch [3] ausführlich beschrieben. Insbesondere das Kapitel 10.1.3.5 *Selektion der Zusatzmodul-Daten* erläutert, wie die Ein- und Ausgabedaten von Zusatzmodulen für den Ausdruck aufbereitet werden können.

Bei großen Systemen mit vielen Bemessungsfällen trägt die Aufteilung der Daten in mehrere Ausdruckprotokolle zur Übersichtlichkeit bei.

### 6.2 FE-BEUL-Grafikausdruck

Grafik

In FE-BEUL kann jedes Bild, das im Grafikfenster des Programms angezeigt wird, in das Ausdruckprotokoll übergeben oder direkt zum Drucker geleitet werden.

Das Drucken von Grafiken ist in [3] Kapitel 10.2 beschrieben.

#### FE-BEUL Modell mit Belastungen

Die aktuelle FE-BEUL-Grafik kann gedruckt werden über Menü

**Datei** → **Drucken**

oder die entsprechende Schaltfläche in der Symbolleiste.

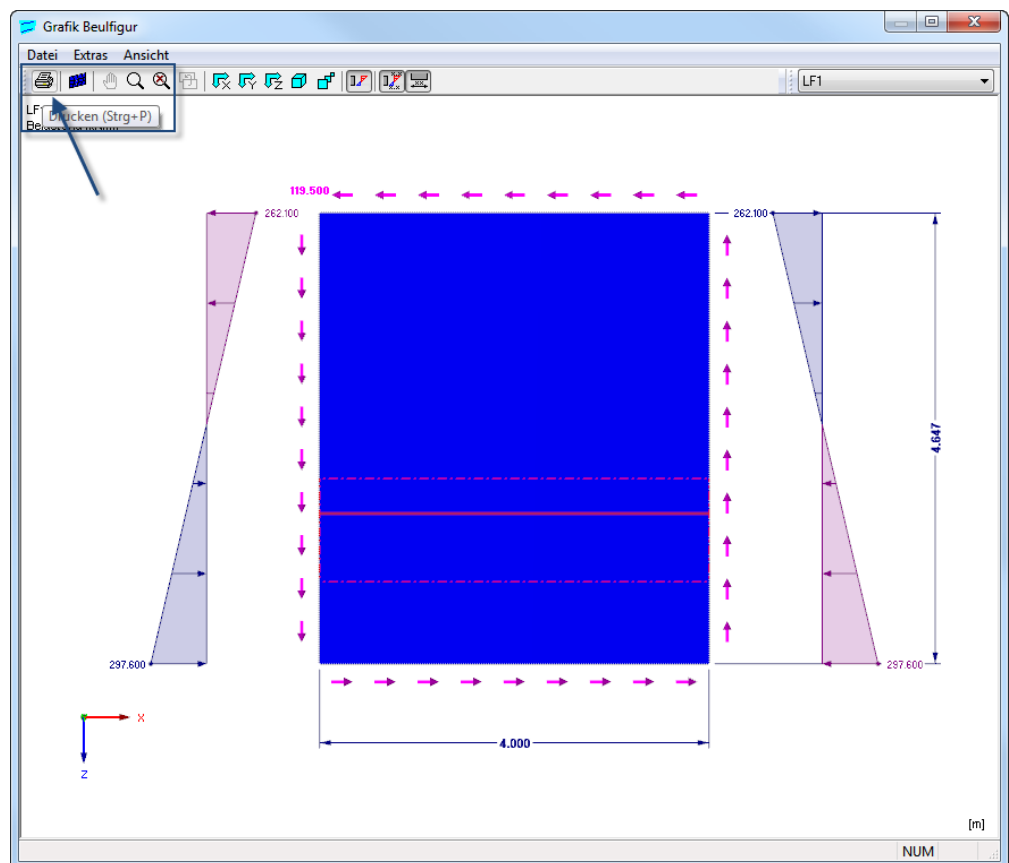


Bild 6.1: Schaltfläche *Drucken* in der Symbolleiste des Hauptfensters

Es wird folgender Dialog angezeigt.

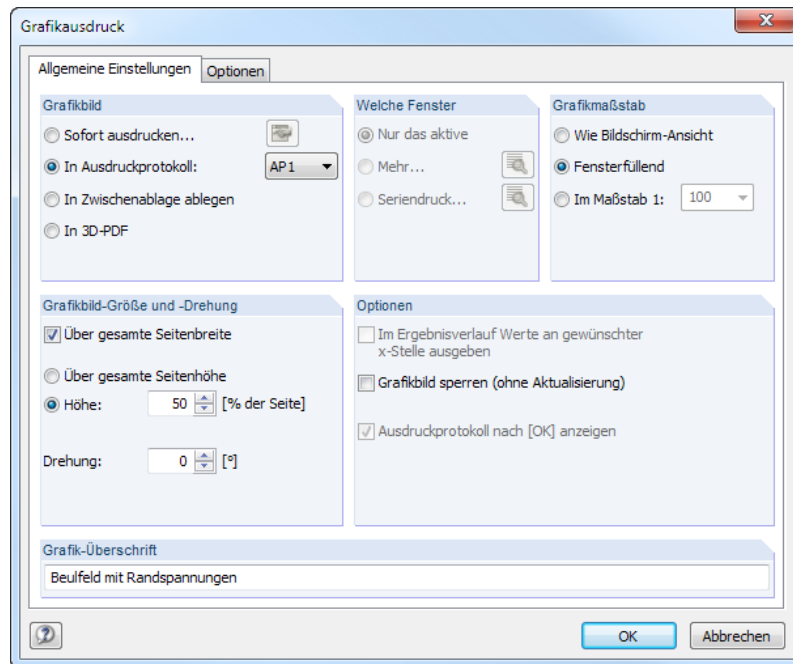


Bild 6.2: Dialog *Grafikausdruck*, Register *Allgemeine Einstellungen*

Dieser Dialog ist in [3] Kapitel 10.2 beschrieben. Dort sind auch die weiteren Register beschrieben.

Eine Grafik kann im Ausdruckprotokoll wie gewohnt per Drag-and-Drop an eine andere Stelle geschoben werden.

Um eine Ausdruckprotokoll-Grafik nachträglich anzupassen, klicken Sie den Titel der Grafik im Protokoll-Navigator mit der rechten Maustaste an. Im Kontextmenü klicken Sie dann auf *Eigenschaften*, um den Dialog *Grafikausdruck* erneut aufzurufen und die Änderungen vorzunehmen.

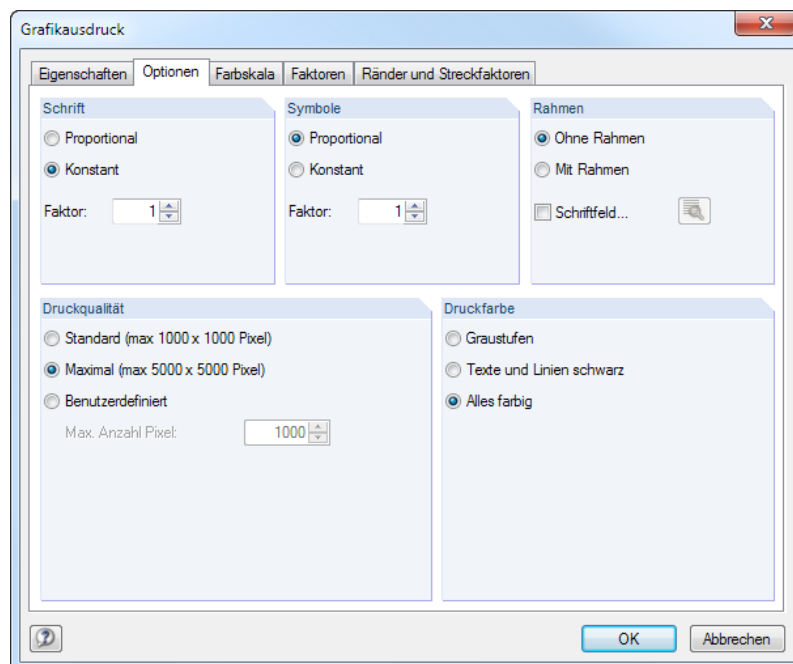
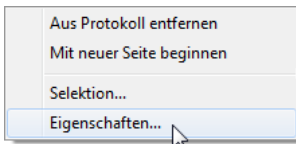


Bild 6.3: Dialog *Grafikausdruck*, Register *Optionen*

## 7. Allgemeine Funktionen

Dieses Kapitel beschreibt nützliche Menüfunktionen und stellt Exportmöglichkeiten für die Nachweise vor.

### 7.1 Bemessungsfälle

Über Bemessungsfälle lassen sich z. B. die Beulfelder von Stäben aus dem Modell gruppieren oder Varianten untersuchen.

#### Neuen Bemessungsfall anlegen

Ein Bemessungsfall wird angelegt über das FE-BEUL-Menü

**Datei** → **Neuer Fall**.

Es erscheint folgender Dialog.

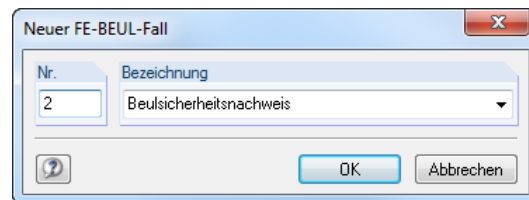


Bild 7.1: Dialog *Neuer FE-BEUL-Fall*

In diesem Dialog ist eine (noch freie) *Nummer* für den neuen Bemessungsfall anzugeben. Die *Bezeichnung* erleichtert die Auswahl in der Lastfall-Liste.

Nach [OK] erscheint die FE-BEUL-Maske 1.1 *Basisangaben* zur Eingabe der Bemessungsdaten.

#### Bemessungsfall umbenennen

Die Bezeichnung eines Bemessungsfalls wird geändert über das FE-BEUL-Menü

**Datei** → **Fall umbenennen**.

Es erscheint folgender Dialog.

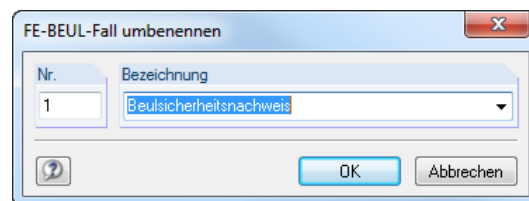


Bild 7.2: Dialog *FE-BEUL-Fall umbenennen*

Hier kann nicht nur eine andere *Bezeichnung*, sondern auch eine andere *Nummer* für den Bemessungsfall festgelegt werden.

### Bemessungsfall kopieren

Die Eingabedaten des aktuellen Bemessungsfalls werden kopiert über das FE-BEUL-Menü

**Datei → Fall kopieren.**

Es erscheint folgender Dialog.

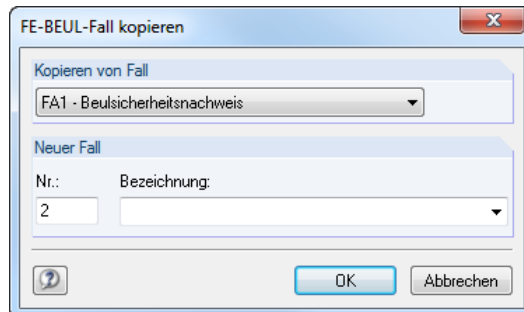


Bild 7.3: Dialog *FE-BEUL-Fall kopieren*

Es ist die *Nummer* und ggf. eine *Bezeichnung* für den neuen Fall festzulegen.

### Bemessungsfall löschen

Bemessungsfälle lassen sich wieder löschen über das FE-BEUL-Menü

**Datei → Fall löschen.**

Es erscheint folgender Dialog.

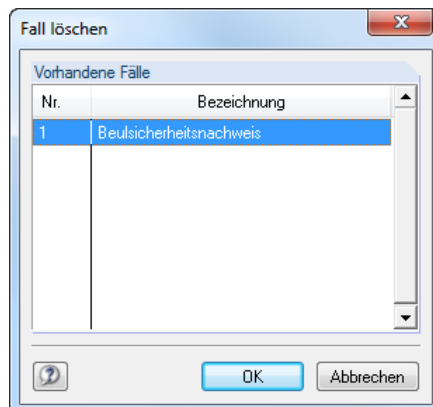


Bild 7.4: Dialog *Fall löschen*

Der Bemessungsfall kann in der Liste *Vorhandene Fälle* ausgewählt werden. Mit [OK] erfolgt der Löschvorgang.

## 7.2 Einheiten und Dezimalstellen

Die Einheiten und Nachkommastellen werden für RFEM/RSTAB und für die Zusatzmodule gemeinsam verwaltet. In FE-BEUL ist der Dialog zum Anpassen der Einheiten zugänglich über Menü

**Einstellungen → Einheiten und Dezimalstellen.**

Es wird der aus RSTAB bzw. RFEM bekannte Dialog aufgerufen. Das Modul FE-BEUL ist voreingestellt.

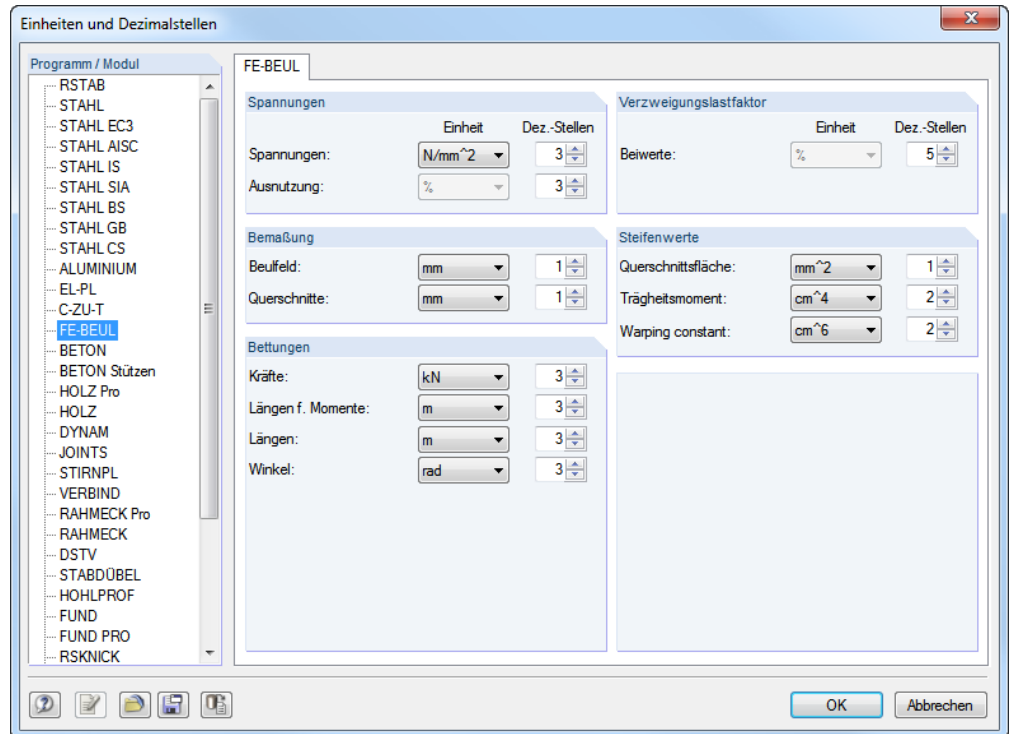


Bild 7.5: Dialog *Einheiten und Dezimalstellen*



Die Einstellungen können als Benutzerprofil gespeichert und in anderen Modellen wieder verwendet werden. Diese Funktionen sind in [3] Kapitel 11.1.3 beschrieben.

## 7.3 Export der Ergebnisse

Die Ergebnisse von FE-BEUL lassen sich auch in anderen Programmen verwenden.

### Zwischenablage

Markierte Zellen der Ergebnismasken können mit [Strg]+[C] in die Zwischenablage kopiert und dann mit [Strg]+[V] z. B. in ein Textverarbeitungsprogramm eingefügt werden. Die Überschriften der Tabellenspalten bleiben dabei unberücksichtigt.

### Ausdruckprotokoll

Die Daten von FE-BEUL können in das Ausdruckprotokoll gedruckt (siehe Kapitel 6.1, Seite 28) und dort exportiert werden über Menü

**Datei → Export in RTF.**

Diese Funktion ist in [3] Kapitel 10.1.11 beschrieben.

### Excel / OpenOffice

FE-BEUL ermöglicht den direkten Datenexport zu MS Excel, OpenOffice.org Calc oder in das CSV-Format. Diese Funktion wird aufgerufen über das Menü

**Datei → Tabellen exportieren.**

Es öffnet sich folgender Exportdialog.

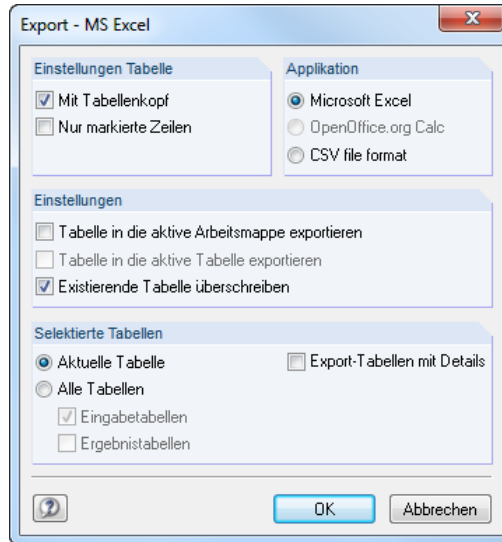


Bild 7.6: Dialog *Export - MS Excel*

Wenn die Auswahl feststeht, kann der Export mit [OK] gestartet werden. Excel bzw. OpenOffice werden automatisch aufgerufen, d. h. die Programme brauchen nicht zuvor geöffnet werden.

	A	B	C	D	E	F
1	Ausnutzung					
2	Maßgebende Spannung	$\sigma_x$	130,000	N/mm <sup>2</sup>		Ecke C
3	Maßgebende Spannung	$\sigma_y$	0,000	N/mm <sup>2</sup>		
4	Exponent für Sigma-x	$e_x$	1,390			Ei. (504), Gl. (15)
5	Anteil $\sigma_x$	Inter- $\sigma_x$	0,754			Ei. (504), Gl. (14)
6	Exponent für Sigma-y	$e_y$	2,000			Ei. (504), Gl. (16)
7	Anteil $\sigma_y$	Inter- $\sigma_y$	0,000			Ei. (504), Gl. (14)
8	Hilfswert V	V	-1,000			Ei. (504), Gl. (18) bzw. (19)
9	Exponent für Tau	$e_\tau$	1,359			Ei. (504), Gl. (17)
10	Anteil $\tau$	Inter- $\tau$	0,412			Ei. (504), Gl. (14)
11	Interaktionsbedingung	$\eta$	0,976		$\leq 1$	Ei. (504), Gl. (14)

Bild 7.7: Ergebnis in *Excel*

## 8. Theoretische Grundlagen

### 8.1 DIN 18800-3

Beim Beulen weichen ebene dünnwandige Platten, deren Blechdicke  $t$  wesentlich kleiner ist als die Flächengeometrie  $a \cdot b$  und die durch Normal- oder Schubspannungen beansprucht sind, senkrecht zur Plattenebene aus. Beulgefährdete Rechteckplatten in Bauteilen werden als Beulfelder bezeichnet.

Bei der Untersuchung von Beulproblemen muss der Spannungs- und Verformungszustand einer Platte betrachtet werden. Dabei sind folgende Parameter zu erfassen:

- Ort der am stärksten beulgefährdeten Steg- und Gurtbereiche
- Abmessungen der Beulfelder
- Stützungen der Beulfeldränder
- Belastung der Randflächen in Form der dort wirkenden Spannungen

Das Programm FE-BEUL, das auf der Methode der finiten Elemente basiert, kann zur Ermittlung der Lastverzweigungsfaktoren verwendet werden. Für die Berechnung werden folgende Annahmen getroffen (lineare Beultheorie):

- Die Platte ist bei Belastungsbeginn vollkommen eben.
- Die Beulverformungen rechtwinklig zur Plattenebene sind klein.
- Die Beanspruchungen wirken in der Plattenmittelebene.
- Der Werkstoff verhält sich ideal linear-elastisch.

Beim Plattenbeulen liegt unter diesen Voraussetzungen ein Verzweigungsproblem vor. Die lineare Beultheorie wird lediglich herangezogen, um einen bezogenen Plattenschlankheitsgrad zu bestimmen, von dem die für den Beulsicherheitsnachweis erforderlichen Abminderungsfaktoren  $\kappa$  abhängig sind.

#### 8.1.1 Definitionen und Begriffe

##### Ideale Beulspannung

Unter dieser Beanspruchung kann die Platte noch in ihrer ursprünglichen Lage verharren. Bei einer weiteren Laststeigerung beult die Platte aus.

$\sigma_{xPi} = k\sigma_x * \sigma_e$  Ideale Beulspannung bei alleiniger Wirkung von Randspannungen  $\sigma_x$

$$\sigma_e = \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad \text{Eulersche Bezugsspannung}$$

Mit diesen Eingangswerten kann für eine Platte die ideale Beulspannung für die jeweils alleinige Wirkung von  $\sigma_y$ ,  $\sigma_x$  und  $\tau$  ermittelt werden. Für Beulen ist die kleinste ideale Beulspannung und folglich der kleinste Beulwert maßgebend. Der Beulwert und somit die ideale Beulspannung ist von folgenden Einflüssen abhängig:

- Randbedingungen (Lagerbedingungen)
- Beanspruchungsart
- Seitenverhältnis  $\alpha$
- Art und Lage der Steifen

Die Beulwerte werden in FE-BEUL normalerweise mithilfe der FE-Methode durch Lösung des Eigenwertproblems bestimmt.

### Grenzbeulspannung

Mit Bezug auf die lineare Beultheorie werden in Abhängigkeit von den Beulfeldabmessungen, den Lager- und Belastungsbedingungen sowie vom bezogenen Plattenschlankheitsgrad die Abminderungsfaktoren  $\kappa$  für die Grenzbeulspannung ermittelt. Auf die Berechnung der Grenzbeulspannung nehmen auch nachfolgende Punkte Einfluss:

- Bauteile ohne Knickeinfluss (reine Biegung)
- Bauteile mit Knickeinfluss (Biegeträger mit Druckkraft/ Druckstäbe mit Biegemomenten)
- Platten ohne knickstabähnliches Verhalten
- Platten mit knickstabähnlichem Verhalten

### Grenzbeulspannung ohne Knickeinfluss

Die Grenzbeulspannungen werden nach folgenden Gleichungen ermittelt.

$$\sigma_{xP,R,d} = \kappa_x \cdot f_{y,k} / \gamma_M$$

$$\sigma_{yP,R,d} = \kappa_y \cdot f_{y,k} / \gamma_M$$

$$\tau_{P,R,d} = \kappa_\tau \cdot f_{y,k} / (\sqrt{3} \cdot \gamma_M)$$

### Grenzbeulspannung mit Knickeinfluss

Ist das beulgefährdete Beulfeld Teil eines Druckstabes, so ist die gegenseitige Beeinflussung von Knicken und Beulen zu berücksichtigen. Dies wird durch eine Reduktion der Grenzbeulspannung mithilfe des Abminderungsfaktors  $\kappa_K$  für Knicken erreicht.

$$\sigma_{xP,R,d} = \kappa_K \cdot \kappa_x \cdot f_{y,k} / \gamma_M$$

Zur Ermittlung von  $\kappa_K$  siehe DIN 18 800 Teil 2, Element (304) Gleichungen (4a) - (4c).

### Grenzbeulspannung bei knickstabähnlichem Verhalten

Ein knickstabähnliches Verhalten liegt bei einer Platte vor, die ein kleines Seitenverhältnis  $\alpha$  aufweist und die in Längsrichtung gedrückt wird. Eine Abstützung der mittleren Plattenbereiche auf die Plattenränder ist nicht mehr gegeben. Dadurch besitzt die Platte – genauso wie Knickstäbe – keine überkritischen Tragreserven mehr und muss zwischen die Versagensfälle *Beulen* und *Knicken* eingeordnet werden. Dies geschieht mit Hilfe des Wichtungsfaktors  $\rho$ . Ist der Wichtungsfaktor  $\rho > 0$ , muss die Grenzbeulspannung mit Hilfe des Abminderungsfaktors  $\kappa_{PK}$  ermittelt werden.

$$\rho = \frac{\Lambda - \sigma_{xPi} / \sigma_{xKi}}{\Lambda - 1} \geq 0$$

In FE-BEUL wird  $\sigma_{xKi}$  analytisch ermittelt. Es handelt sich um die Eulersche Knickspannung des Beulfeldes mit frei angenommenen Längsrändern. Bezüglich des Abminderungsfaktors für knickstabähnliches Verhalten gilt nach DIN 18 800, Teil 3, Element (603)

$$\kappa_{PK} = (1 - \rho^2) \cdot \kappa_\sigma + \rho^2 \cdot \kappa_K$$

Der Abminderungsfaktor  $\kappa_K$  wird nach DIN 18 800 Teil 2, Gl. (4a), (4b) bzw. (4c) nach Knickspannungslinie b ermittelt.

Die Grenzbeulspannungen werden nach DIN 18 800, Teil 3, Element (502) wie folgt berechnet.

$$\sigma_{P,R,d} = \frac{\kappa_{PK} \cdot f_{y,k}}{\gamma_M} \leq 1$$

$$\tau_{P,R,d} = \frac{\kappa_\tau \cdot f_{y,k}}{\gamma_M \cdot \sqrt{3}} \leq 1$$

### Interaktionsbedingung

Wirken in einem Beulfeld mehrere Spannungskomponenten  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  und  $\tau$  gleichzeitig, so muss der Interaktionsnachweis geführt werden. Dabei handelt es sich stets um einander zugeordnete Spannungen.

Beim Import von Spannungen aus RSTAB bzw. RFEM wird abweichend zu dieser Regelung von jeder Spannungsart der Maximalwert übernommen.

$$e_1 = 1 + \kappa_{\sigma_x}^4$$

$$e_2 = 1 + \kappa_{\sigma_y}^4$$

$$e_3 = 1 + \kappa_{\sigma_x} \cdot \kappa_{\sigma_y} \cdot \kappa_{\tau}^2$$

$$V = (\kappa_x \cdot \kappa_y)^6$$

$$\left( \frac{|\sigma_x|}{\sigma_{xP,R,d}} \right)^{e_1} + \left( \frac{|\sigma_y|}{\sigma_{yP,R,d}} \right)^{e_2} - V \left[ \frac{|\sigma_x \cdot \sigma_y|}{\sigma_{xP,R,d} \cdot \sigma_{yP,R,d}} \right] + \left( \frac{\tau}{\tau_{P,R,d}} \right)^{e_3} \leq 1$$

## 8.2 EN 1993-1-5

Im Programm FE-BEUL ist für den Beulnachweis nach EN 1993-1-5 die Methode der reduzierten Spannungen implementiert. Der Eurocode bietet hauptsächlich zwei Methoden an, nach denen der Beulnachweis geführt werden kann:

- Methode der wirksamen Querschnittsflächen (EN 1993-1-5, Kap. 4-7)
- Methode der reduzierten Spannungen (EN 1993-1-5, Kap. 10)

Bei der Methode der reduzierten Spannungen werden die im Beulfeld wirkenden Spannungen mit einem Grenzspannungszustand verglichen, der unter Berücksichtigung des VON-MISES-Fließzustandes reduziert ist. Der Beulnachweis wird auf der Grundlage des gesamten Spannungsfeldes geführt. Dieser Ansatz entspricht der Vorgehensweise nach DIN 18800-3 – jedoch mit dem wesentlichen Unterschied, dass in EN 1993-1-5 ein einziger Systemschlankheitsgrad auf der Grundlage des gesamten Spannungsfeldes bestimmt wird. Ein Nachweis der Einzelbeanspruchungen und die nachfolgende Zusammenführung mittels Interaktionskriterium entfällt somit.

Da Beulwertermittlung in EN 1993-1-5 numerisch gestützt ist, können die Eingangsparameter in FE-BEUL durch die Eigenwertlösung einfach bestimmt werden.

In EN 1993-1-5 Kap. 9 werden weiterhin Nachweise für die eventuell vorhandenen Steifen im Beulfeld gefordert. Für Längs- und Quersteifen sind folgende Nachweise zu erfüllen:

- Elastischer Spannungsnachweis mit Schnittgrößen nach Theorie II. Ordnung
- Verformungsnachweis
- Nachweis der Drillknicksicherheit

Detaillierte Vorgehensweisen zur Nachweisführung sind in [18] beschrieben.

## 8.2.1 Ermittlung der kritischen Beulspannungen

Der Anhang zu EN 1993-1-5 stellt analytische Formeln zur Berechnung der kritischen Beulspannungen von unversteiften und versteiften Beulfeldern zur Verfügung. Allgemein gilt:

$$\sigma_{cr,p} = k_{cr,p} \cdot \sigma_e \quad \text{Anhang A, (A.1)}$$

Bei **unversteiften Beulfeldern** werden die Beulwerte nach Tabelle 4.1 bzw. Tabelle 4.2 aufgrund des vorhandenen Randspannungszustands errechnet.

- zweiseitig gestützte Beulfelder Tabelle 4.1
- einseitig gestützte Beulfelder Tabelle 4.2

Bei **versteiften Beulfeldern** wird zwischen folgenden Varianten der Steifenanordnung innerhalb des Beulfeldes unterschieden:

- drei oder mehr Längssteifen im Beulfeld Anhänge (A.1), (A.3)
- eine Längssteife im Druckbereich des Beulfeldes Anhänge (A.1), (A.2.2.2), (A.3)
- zwei Längssteifen im Druckbereich des Beulfeldes Anhänge (A.1), (A.2.2.1), (A.3)

Diese Formeln bzw. deren Anwendungen sind an einige Restriktionen gebunden, die beachtet werden müssen. Sollten diese Bedingungen nicht eingehalten werden, führt FE-BEUL automatisch eine Berechnung der kritischen Beulspannungen mittels Eigenwertlösung durch.

## 8.2.2 Interaktionsnachweis

Die im Beulfeld wirkenden Spannungen werden mit einem Grenzspannungszustand verglichen, der unter Berücksichtigung des VON-MISES-Fließzustandes reduziert ist. In EN 1993-1-5 wird dafür nur ein einziger Systemschlankheitsgrad auf Grundlage des gesamten Spannungsfeldes bestimmt. Folgende Parameter sind für den Interaktionsnachweis relevant:

### Schlankheitsgrads des Blechfeldes

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}} \quad \text{Gl. 10.2}$$

$$\frac{1}{\alpha_{ult,k}} = \left( \frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y} \right)^2 - \left( \frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y} \right) \cdot \left( \frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y} \right) + 3 \cdot \left( \frac{\tau_{Ed}}{f_y} \right)^2 \quad \text{Gl. 10.3}$$

$$\frac{1}{\alpha_{cr}} = \frac{1+\psi_x}{4 \cdot \alpha_{cr,x}} + \frac{1+\psi_z}{4 \cdot \alpha_{cr,z}} + \left[ \left( \frac{1+\psi_x}{4 \cdot \alpha_{cr,x}} + \frac{1+\psi_z}{4 \cdot \alpha_{cr,z}} \right)^2 + \frac{1-\psi_x}{2 \cdot \alpha_{cr,x}^2} + \frac{1-\psi_z}{2 \cdot \alpha_{cr,z}^2} + \frac{1}{\alpha_{cr,\tau}^2} \right]^{0,5} \quad \text{Gl. 10.6}$$

### Abminderungsbeiwerte $\rho_i$

Zur Ermittlung der Abminderungsbeiwerte sind zwei Vorgehensweisen möglich: Es können für jede vorhandene Spannungskomponente die einzelnen Faktoren errechnet werden oder es wird global nur ein Abminderungsfaktor für alle vorhandenen Spannungen ermittelt. Dieses Vorgehen spiegelt die Wahl der jeweiligen Beulkurve wider.

Bei *verschiedenen* Beulkurven ergeben sich folgende Abminderungsfaktoren:

- Abminderungsfaktor für die x-Richtung  $\rho_x$  nach Kap. 4.4 (2)
- Abminderungsfaktor für die z-Richtung  $\rho_z$  nach Anhang B.1
- Abminderungsfaktor für Schubbeulen  $\chi_w$  nach Tabelle 5.1

Bei Verwendung der *allgemeinen* Beulkurve gilt:

- Abminderungsfaktor  $\rho_i$  nach Anhang B.1

### Interaktion zwischen plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten

Für den endgültigen Abminderungsbeiwert der jeweiligen Richtung muss eine Interaktion zwischen plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten nach folgender Formel ermittelt werden:

$$\rho_i = (\rho - \chi_c) \cdot \xi \cdot (2 \cdot \xi) + \chi_c \quad \text{nach Gl. 4.13}$$

Mit:  $\chi_c$  nach Kap. 4.5.3 (5)

$\xi$  nach Kap. 4.5.4 (1)

### Interaktionskriterium nach Gl. 10.5:

$$\left( \frac{\sigma_{x,Ed}}{\rho_x \cdot f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{z,Ed}}{\rho_z \cdot f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 - \left( \frac{\sigma_{x,Ed}}{\rho_x \cdot f_y / \gamma_{M1}} \right) \cdot \left( \frac{\sigma_{z,Ed}}{\rho_z \cdot f_y / \gamma_{M1}} \right) + 3 \cdot \left( \frac{\tau_{Ed}}{\chi_w \cdot f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 \leq 1$$

## 8.2.3 Elastischer Spannungsnachweis der Steifen

EN 1993-1-5 fordert für Quersteifen einen Spannungsnachweis elastisch-elastisch mit Schnittgrößen nach Theorie II. Ordnung. Dabei müssen eine Vorkrümmung der Quersteife, die Abtriebslasten auf den benachbarten Teilfeldern sowie die Spannungen auf dem Beulfeld berücksichtigt werden. Die vorhandenen Spannungen dürfen die Streckgrenze  $f_y/\gamma_{M1}$  nicht überschreiten.

Diese Formeln sind zum großen Teil analytisch und detailliert in [18] beschrieben.

## 8.2.4 Verformungsnachweis der Steifen

Die maximale Verformung der Steife ist auf den Wert  $b/300$  begrenzt. Dabei ist zu beachten, dass sich die Verformung aus der Vorkrümmung sowie der eigentlichen Verformung der Steife ergibt.

Die Formeln sind ebenfalls in [18] beschrieben.

## 8.2.5 Nachweis der Drillknicksicherheit

Um das Drillknicken von Quer- und Längssteifen mit offenen Querschnitten zu vermeiden, sollten folgende Nachweise erfüllt sein:

$$\frac{I_T}{I_p} \geq 5,3 \cdot \frac{f_y}{E} \quad \text{nach Gl. 9.3}$$

Mit:  $I_T$  St. Venantsches Torsionsträgheitsmoment des Steifenquerschnitts

$I_p$  polares Trägheitsmoment des Steifenquerschnitts

Wird die Wölbsteifigkeit der Steife mit berücksichtigt, sollte entweder Gl. 9.3 oder Gl. 9.4 erfüllt werden:

$$\sigma_{cr} \geq \theta \cdot f_y \quad \text{nach Gl. 9.4}$$

Mit:  $\theta$  Beiwert zur Sicherstellung des elastischen Verhaltens ( $\theta = 6$ )

## 9. Beispiele

### 9.1 DIN 18800

#### 9.1.1 Unversteiftes Beulfeld mit knickstabähnlichem Verhalten

<b>Material:</b>	Baustahl St 37	
	Streckgrenze $f_{y,k} = 240 \text{ N/mm}^2$	
<b>Teilsicherheitsbeiwert:</b>	$\gamma_M = 1,1$	
<b>Systemgrößen:</b>		
Länge des untersuchten Beulfeldes	$a$	= 1000 mm
Breite des untersuchten Beulfeldes	$b$	= 1200 mm
Plattendicke	$t$	= 10 mm
→ Seitenverhältnis	$\alpha = \frac{a}{b} = \frac{1000}{1200}$	= 0,833

#### Maßgebende Spannungen:

Normaldruckspannung	$\sigma_1$	= 80 N/mm <sup>2</sup>
Normaldruckspannung	$\sigma_2$	= 80 N/mm <sup>2</sup>
Schubspannung	$\tau$	= 12 N/mm <sup>2</sup>

#### Randspannungsverhältnis bezogen auf größte Druckspannung:

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{80}{80} = 1,0$$

#### Bezugsspannung:

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - 0,3^2)} \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 = \frac{3,14^2 \cdot 210000}{12 \cdot (1 - 0,3^2)} \cdot \left(\frac{10}{1200}\right)^2 = 13,18 \text{ N/mm}^2$$

#### Berechnung der Beulwerte nach DIN 4114, Tafel 6, Zeile 3 und Zeile 5:

$$\alpha = 0,833 < 1 \text{ und } \psi = 1$$

$$k_\sigma = \left(\alpha + \frac{1}{\alpha}\right)^2 \cdot \frac{2,1}{\psi + 1,1} = \left(0,833 + \frac{1}{0,833}\right)^2 \cdot \frac{2,1}{1 + 1,1} = 4,4134$$

$$k_\tau = 4,00 + \frac{5,34}{\alpha^2} = 4,00 + \frac{5,34}{0,833^2} = 11,69$$

#### Ideale Beulspannung bei Wirkung von Randspannungen $\sigma$ nach DIN 18 800 Teil 3, El. (113):

$$\sigma_{Pi} = k_\sigma \cdot \sigma_E = 4,13 \cdot 13,18 = 54,43 \text{ N/mm}^2$$

#### Ideale Beulspannung bei Wirkung von Randspannungen $\tau$ :

$$\tau_{Pi} = k_\tau \cdot \sigma_E = 11,69 \cdot 13,18 = 154,07 \text{ N/mm}^2$$

**Bezugsschlankheitsgrad:**

$$\lambda_a = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_{y,k}}} = 3,14 \cdot \sqrt{\frac{210000}{240}} = 92,93$$

**Plattenschlankheitsgrad (Normalspannung):**

$$\lambda_p = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma_{Pi}}} = 3,14 \cdot \sqrt{\frac{210000}{54,49}} = 195,03$$

**Plattenschlankheitsgrad (Schubspannungen):**

$$\lambda_p = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{\tau_{Pi} \cdot \sqrt{3}}} = 3,14 \cdot \sqrt{\frac{210000}{154,07 \cdot \sqrt{3}}} = 88,13$$

**Bezogener Plattenschlankheitsgrad (Normalspannung) nach DIN 18 800 Teil 3, El. (113):**

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\lambda_p}{\lambda_a} = \frac{195,03}{92,93} = 2,098$$

**Bezogener Plattenschlankheitsgrad (Schubspannung):**

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\lambda_p}{\lambda_a} = \frac{88,13}{92,93} = 0,948$$

**Abminderungsfaktoren für das Plattenbeulen nach DIN 18 800 Teil 3, Tabelle 1:**

$$\kappa_\sigma = c \cdot \left( \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,22}{\bar{\lambda}_p^2} \right) \text{ mit } c = 1,25 - 0,25 \cdot \psi, \text{ jedoch } c \leq 1,25$$

$$c = 1,25 - 0,25 \cdot 1,0 = 1,00$$

$$\kappa_\sigma = 1,0 \cdot \left( \frac{1}{2,098} - \frac{0,22}{2,098^2} \right) = 0,427$$

$$\kappa_\tau = \frac{0,84}{\bar{\lambda}_p} = \frac{0,84}{0,948} = 0,886$$

**Beulen mit knickstabähnlichem Verhalten nach DIN 18 800 Teil 3, El. (602):**

$$\rho = \frac{\Lambda - \sigma_{Pi} / \sigma_{Ki}}{\Lambda - 1} \geq 0 \quad \Lambda = \bar{\lambda}_p^2 + 0,5, \text{ jedoch } 2 \leq \Lambda \leq 4$$

$$\sigma_{Pi} / \sigma_{Ki} = k_\sigma \cdot \alpha^2 = 4,134 \cdot 0,833^2 = 2,838$$

$$\Lambda = 2,098^2 + 0,5 = 4,902 > 4 \Rightarrow \Lambda = 4$$

$$\rho = \frac{4 - 2,868}{4 - 1} = 0,377$$

Nach DIN 18 800 Teil 3, El. (603):

$$\lambda_P > 0,2 \Rightarrow \kappa_K = \frac{1}{\left(k + \sqrt{k^2 - \lambda_P^2}\right)}$$

$$k = 0,5 \cdot \left[1 + 0,34 \cdot (\lambda_P - 0,2) + \lambda_P^2\right]$$

$$k = 0,5 \cdot \left[1 + 0,34 \cdot (2,098 - 0,2) + 2,098^2\right] = 3,023$$

$$\kappa_K = \frac{1}{\left(3,023 + \sqrt{3,023^2 - 2,098^2}\right)} = 0,192$$

Abminderungsfaktor mit knickstabähnlichem Verhalten:

$$\kappa_{PK} = (1 - \rho^2) \cdot \kappa_\sigma + \rho^2 \cdot \kappa_K = (1 - 0,377^2) \cdot 0,427 + 0,377 \cdot 0,192 = 0,393$$

Berechnung der Grenzbeulspannungen nach DIN 18 800 Teil 3, El. (502):

$$\sigma_{P,R,d} = \frac{\kappa_{PK} \cdot f_{y,k}}{\gamma_M} = \frac{0,393 \cdot 240}{1,1} = 85,88 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{P,R,d} = \frac{\kappa_\tau \cdot f_{y,k}}{\gamma_M \cdot \sqrt{3}} = \frac{0,886 \cdot 240}{1,1 \cdot \sqrt{3}} = 111,5 \text{ N/mm}^2$$

Nachweis des Beulfeldes nach DIN 18 800 Teil 3, El. (501):

$$\frac{\sigma}{\sigma_{P,R,d}} = \frac{80}{85,88} = 0,931 < 1$$

$$\frac{\tau}{\tau_{P,R,d}} = \frac{12}{111,5} = 0,107 < 1$$

Nachweis bei gleichzeitiger Wirkung aller Randspannungen (Interaktion) nach DIN 18 800 Teil 3, El. (504):

$$e_1 = 1 + \kappa_\sigma^4 = 1 + 0,393^4 = 1,023$$

$$e_3 = 1 + \kappa_\sigma \cdot \kappa_\tau^2 = 1 + 0,393 \cdot 0,886^2 = 1,308$$

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_{P,R,d}}\right)^{e_1} + \left(\frac{\tau}{\tau_{P,R,d}}\right)^{e_3} \leq 1$$

$$\left(\frac{80}{85,82}\right)^{1,023} + \left(\frac{12}{111,5}\right)^{1,308} = 0,984 \leq 1$$

**Die Beulsicherheit ist ausreichend!**

### 9.1.2 Ausgesteiftes Beulfeld

Das folgende Beispiel ist [11] entnommen. Es beschreibt den Beulsicherheitsnachweis für ein ausgesteiftes Beulfeld.

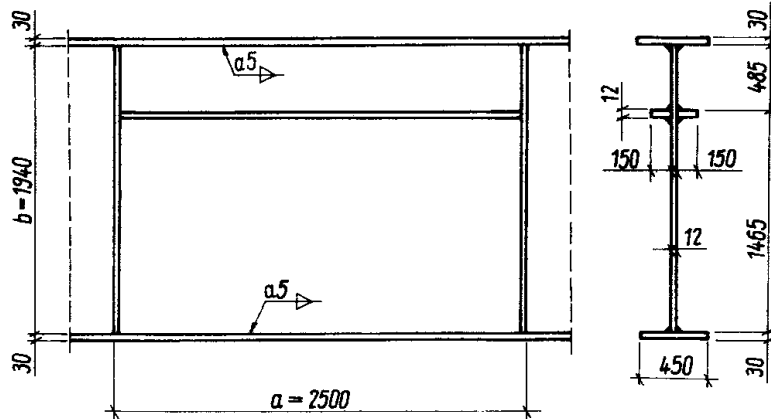


Bild 9.1: Systemskizze mit Abmessungen und Belastungen

**Material:**

Baustahl St 37

Streckgrenze  $f_{y,k} = 240 \text{ N/mm}^2$

**Teilsicherheitsbeiwert:**

$\gamma_M = 1,1$

**Systemgrößen:**

Länge des untersuchten Beulfeldes  $a = 2500 \text{ mm}$   
 Breite des untersuchten Beulfeldes  $b = 1940 \text{ mm}$   
 Plattendicke  $t = 12 \text{ mm}$

$$\rightarrow \text{Seitenverhältnis} \quad a = \frac{a}{b} = \frac{2500}{1940} = 1,29$$

**Steife:**

Höhe:  $h = 150 \text{ mm}$   
 Länge:  $a = 2500 \text{ mm}$   
 Dicke:  $t = 12 \text{ mm}$   
 Steifenlage:  $y = 485 \text{ mm}$  (vom oberen Rand)  
 Steifenkennwerte:  $I_{y,Steife} = 3040 \text{ cm}^4$   
 $A_{y,Steife} = 36 \text{ cm}^2$   
 $\delta = 0,155$  nach DIN 18800 Teil 3 El. (114)  
 $\gamma = 99$  nach DIN 18800 Teil 3 El. (114)

Aus diesen Eingangswerten erhält man nach [13]:

$k_{ox} = 84$   
 $k_{\tau} = 12$

**Maßgebende Spannungen:**

Normaldruckspannung	$\sigma_1$	= 130 N/mm <sup>2</sup>
Normalzugspannung	$\sigma_2$	= -130 N/mm <sup>2</sup>
Schubspannung	$\tau$	= 52 N/mm <sup>2</sup>

**Randspannungsverhältnis bezogen auf größte Druckspannung:**

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{13}{-13} = -1,0$$

**Bezugsspannung:**

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - 0,3^2)} \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 = \frac{3,14^2 \cdot 210000}{12 \cdot (1 - 0,3^2)} \cdot \left(\frac{1,2}{194}\right)^2 = 0,73 \text{ KN/cm}^2$$

**Berechnung der Beulwerte nach DIN 4114, Tafel 6, Zeile 3 und Zeile 5:**

$$\alpha = 1,29 > 1 \text{ und } \psi = -1$$

**Ideale Beulspannung bei Wirkung von Randspannungen  $\sigma$  nach DIN 18 800 Teil 3, El. (113):**

$$\sigma_{Pi_x} = k_\sigma \cdot \sigma_E = 84 \cdot 0,73 = 61,3 \text{ kN/cm}^2$$

**Ideale Beulspannung bei Wirkung von Randspannungen  $\tau$ :**

$$\tau_{Pi} = k_\tau \cdot \sigma_E = 12 \cdot 0,73 = 8,8 \text{ kN/cm}^2$$

**Bezugsschlankheitsgrad:**

$$\lambda_a = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_{y,k}}} = 3,14 \cdot \sqrt{\frac{210000}{240}} = 92,93$$

**Plattenschlankheitsgrad (Normalspannung):**

$$\lambda_{P_{\sigma_x}} = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma_{Pi}}} = 3,14 \cdot \sqrt{\frac{21000}{61,3}} = 58,12$$

**Plattenschlankheitsgrad (Schubspannungen):**

$$\lambda_P = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{\tau_{Pi} \cdot \sqrt{3}}} = 3,14 \cdot \sqrt{\frac{21000}{8,8 \cdot \sqrt{3}}} = 116,55$$

**Bezogener Plattenschlankheitsgrad (Normalspannung) nach DIN 18 800 Teil 3, El. (113):**

$$\bar{\lambda}_{P_{\sigma_x}} = \frac{\lambda_P}{\lambda_a} = \frac{58,12}{92,93} = 0,625$$

**Bezogener Plattenschlankheitsgrad (Schubspannung):**

$$\bar{\lambda}_P = \frac{\lambda_P}{\lambda_a} = \frac{116,55}{92,93} = 1,254 < 1,38$$

**Abminderungsfaktoren für das Plattenbeulen nach DIN 18 800 Teil 3, Tabelle 1:**

$$\kappa_{\sigma_x} = c \cdot \left( \frac{1}{\lambda_p} - \frac{0,22}{\lambda_p^2} \right) \text{ mit } c = 1,25 - 0,25 \cdot \psi, \text{ jedoch } c \leq 1,25$$

$$c = 1,25 - 0,25 \cdot -1,0 = 1,50 \implies 1,25$$

$$\kappa_{\sigma_x} = 1,25 \cdot \left( \frac{1}{0,625} - \frac{0,22}{0,625^2} \right) = 1,296 \implies 1,0$$

$$\kappa_{\tau} = \frac{0,84}{\lambda_p} = \frac{0,84}{1,255} = 0,669$$

**Berechnung der Grenzbeulspannungen nach DIN 18 800 Teil 3, El. (502):**

$$\sigma_{xP,R,d} = \frac{\kappa \cdot f_{y,k}}{\gamma_M} = \frac{1,0 \cdot 240}{1,1} = 218 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{P,R,d} = \frac{\kappa_{\tau} \cdot f_{y,k}}{\gamma_M \cdot \sqrt{3}} = \frac{0,669 \cdot 240}{1,1 \cdot \sqrt{3}} = 84 \text{ N/mm}^2$$

**Nachweis des Beulfeldes nach DIN 18 800 Teil 3, El. (501):**

$$\frac{\sigma_x}{\sigma_{xP,R,d}} = \frac{13}{21,8} = 0,60 < 1$$

$$\frac{\tau}{\tau_{P,R,d}} = \frac{5,2}{8,4} = 0,62 < 1$$

**Nachweis bei gleichzeitiger Wirkung aller Randspannungen (Interaktion) nach DIN 18 800 Teil 3, El. (504):**

$$e_1 = 1 + \kappa_{\sigma_x}^4 = 1 + 1^4 = 2$$

$$e_3 = 1 + \kappa_{\sigma_x} \cdot \kappa_{\tau}^2 = 1 + 1,0 \cdot 0,669^2 = 1,447$$

$$\left( \frac{|\sigma_x|}{\sigma_{xP,R,d}} \right)^{e_1} + \left( \frac{\tau}{\tau_{P,R,d}} \right)^{e_3} \leq 1$$

$$\left( \frac{13}{21,8} \right)^2 + \left( \frac{5,2}{8,4} \right)^{1,447} = 0,73 \leq 1$$

**Die Beulsicherheit ist ausreichend!**

## 9.2 EN 1993-1-5

### 9.2.1 Unversteiftes Beulfeld mit knickstabähnlichem Verhalten

Das folgende Beispiel ist [6] entnommen. Es beschreibt den Beulsicherheitsnachweis für ein unausgesteiftes Beulfeld.

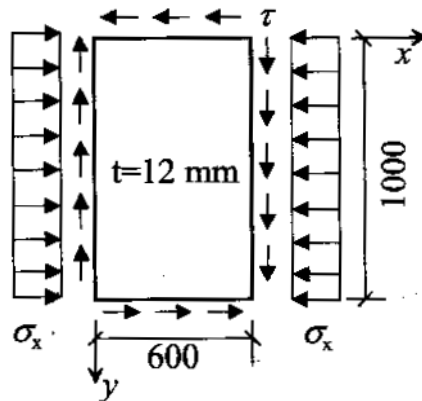


Bild 9.2: Systemskizze mit Abmessungen und Belastungen

**Material:**

Baustahl S355

Streckgrenze  $f_{y,k} = 355 \text{ N/mm}^2$

**Teilsicherheitsbeiwert:**

$\gamma_M = 1,1$

**Systemgrößen:**

Länge des untersuchten Beulfeldes

$a = 600 \text{ mm}$

Breite des untersuchten Beulfeldes

$b = 1000 \text{ mm}$

Plattendicke

$t = 12 \text{ mm}$

→ Seitenverhältnis

$a = \frac{a}{b} = \frac{600}{1000} = 0,60$

**Maßgebende Spannungen:**

Normaldruckspannung

$\sigma_1 = 100 \text{ N/mm}^2$

Normaldruckspannung

$\sigma_2 = 100 \text{ N/mm}^2$

Schubspannung

$\tau = 50 \text{ N/mm}^2$

**Randspannungsverhältnis bezogen auf größte Druckspannung:**

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{100}{100} = 1,0$$

**Bezugsspannung:**

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - 0,3^2)} \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 = \frac{3,14^2 \cdot 210000}{12 \cdot (1 - 0,3^2)} \cdot \left(\frac{12}{1000}\right)^2 = 27,33 \text{ N/mm}^2$$

**Berechnung der Beulwerte nach EN 1993-1-5, Tabelle 4 und Anhang A.3/A.5:**

$$\alpha = 0,6 < 1 \text{ und } \psi = 1$$

$$k_{\sigma} = 4,0$$

$$k_{\tau} = 4,00 + \frac{5,34}{\alpha^2} = 4,00 + \frac{5,34}{0,60^2} = 18,83$$

**Ideale Beulspannung bei Wirkung von Randspannungen  $\sigma$  nach EN 1993-1-5, Anhang A.1:**

$$\sigma_{cr,p,x} = k_{\sigma,x} \cdot \sigma_E = 4,0 \cdot 27,33 = 109,32 \text{ N/mm}^2$$

**Ideale Beulspannung bei Wirkung von Randspannungen  $\tau$ :**

$$\tau_{cr} = k_{\tau} \cdot \sigma_E = 18,83 \cdot 27,33 = 514,75 \text{ N/mm}^2$$

**Fließkriterium nach EN 1993-1-5, Gl. (10.3):**

$$\alpha_{ult,k} = \frac{f_y}{\sigma_{v,Ed}} = \frac{355}{132,29} = 2,6835$$

$$\text{Mit: } \sigma_{v,Ed} = \sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + 3 \cdot \tau_{Ed}^2} = \sqrt{100^2 + 3 \cdot 50^2} = 132,29 \text{ N/mm}^2$$

**Eigenwerte der Spannungskomponenten nach EN 1993-1-5, Gl. (10.6):**

$$\alpha_{cr,x} = \frac{\sigma_{cr,p,x}}{\sigma_{x,Ed}} = \frac{109,32}{100} = 1,0932$$

$$\alpha_{cr,\tau} = \frac{\tau_{cr}}{\tau_{Ed}} = \frac{514,75}{50} = 10,295$$

**Kritischer Lastfaktor nach EN 1993-1-5, Gl. (10.6):**

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

$$\alpha_{cr} = 1,081$$

**Plattenschlankheitsgrad nach EN 1993-1-5, Gl. (10.2):**

$$\bar{\lambda}_p = \bar{\lambda}_w = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}} = \sqrt{\frac{2,6835}{1,081}} = 1,576$$

**Abminderungsfaktoren für Plattenbeulen nach EN 1993-1-5, Abschnitt 4.4 und Tab. 5.1:**

Prüfung:

$$\bar{\lambda}_p \geq 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 \cdot \psi}$$

$$1,576 \geq 0,673$$

$$\rho_p = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,00$$

$$\rho_p = \frac{1,576 - 0,055(3 + 1,0)}{1,576^2} \leq 1,00$$

$$\rho_p = 0,546 \leq 1,00$$

Unter Verwendung der Tabelle 5.1 und der Option „Verformbare Auflagersteife“:

$$\chi_w = \frac{0,83}{\lambda_p} = \frac{0,83}{1,576} = 0,527$$

Beulen mit knickstabähnlichem Verhalten nach EN 1993-1-5, Abschnitt 4.5.4 (1):

$$\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1 \leq 1$$

$$\text{Mit: } \sigma_{cr,c} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I^2}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot a^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 12^2}{12 \cdot (1 - 0,3^2) \cdot 600^2} = 75,92 \text{ N/mm}^2$$

$$\xi = \frac{109,32}{75,92} - 1 = 0,44 \leq 1$$

Bei diesem Gesamtfeld liegt ein knickstabähnliches Verhalten vor.

Abminderungsfaktor mit knickstabähnlichem Verhalten:

$$\rho_c = (\rho_p - \chi_c) \cdot \xi \cdot (2 - \xi_x) + \chi_c = (0,546 - 0,342) \cdot 0,44 \cdot (2 - 0,44) + 0,342 = 0,482$$

$$\text{Mit: } \chi_c = \frac{1}{\left( \theta_p + \sqrt{\theta_p^2 - \lambda_p^2} \right)} = \frac{1}{\left( 1,886 + \sqrt{1,886^2 - 1,576^2} \right)} = 0,342$$

$$\theta_p = 0,5 \cdot (1 + 0,21 \cdot (1,576 - 0,2)) + 1,576^2 = 1,886$$

Nachweis (Interaktionsbedingung) nach EN 1993-1-5, Gl. (10.5):

$$\left( \frac{\sigma_{x,Ed}}{\rho_c \cdot f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{\tau_{Ed}}{\chi_w \cdot f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 \leq 1$$

$$\left( \frac{100}{0,482 \cdot 355 / 1,1} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{50}{0,527 \cdot 355 / 1,1} \right)^2 = 0,672 \leq 1$$

Die Beulsicherheit ist ausreichend!

## 9.2.2 Ausgesteiftes Beulfeld

Das folgende Beispiel ist [18] entnommen. Es beschreibt den Beulsicherheitsnachweis für ein ausgesteiftes Beulfeld.

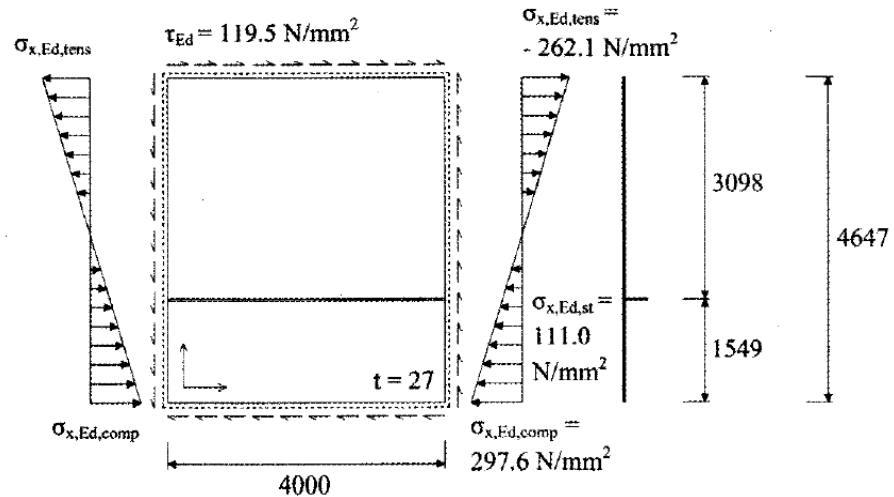


Bild 9.3: Systemskizze mit Abmessungen und Belastungen

**Material:**

Baustahl S355

Streckgrenze  $f_{y,k} = 345 \text{ N/mm}^2$  (für  $t = 30 \text{ mm}$ )

**Teilsicherheitsbeiwert:**

$\gamma_M = 1,1$

**Systemgrößen:**

Länge des untersuchten Beulfeldes	$a$	=	4000 mm
Breite des untersuchten Beulfeldes	$b$	=	4647 mm
Plattendicke	$t$	=	27 mm

$$\rightarrow \text{Seitenverhältnis} \quad \alpha = \frac{a}{b} = \frac{4000}{4647} = 0,861$$

**Steife:**

Höhe:	$h$	=	300 mm
Länge:	$a$	=	4000 mm
Dicke:	$t$	=	30 mm
Steifenlage:	$z$	=	3098 mm (vom oberen Rand)

**Maßgebende Spannungen:**

Normaldruckspannung	$\sigma_2$	=	297,6 N/mm <sup>2</sup>
Normalzugspannung	$\sigma_1$	=	-262,1 N/mm <sup>2</sup>
Schubspannung	$\tau$	=	119,5 N/mm <sup>2</sup>

**Ermittlung der kritischen Beulspannungen nach EN 1993-1-5, Anhang A:**

Bei einer Längssteife in der Druckzone ergibt sich nach Anhang A.2.2:

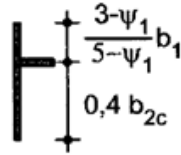
**Kritische Beulspannung  $\sigma_{cr,p}$** 


Bild 9.4: Bild A.1, Anhang A

- Ermittlung der mitwirkenden Breiten:

$$\psi_1 = \frac{\sigma_{sl,1}}{\sigma_1} = \frac{111,03}{297,6} = 0,373 \geq 0 \rightarrow ok$$

$$b_1 = 1549 \text{ mm}$$

$$b_{1,inf} = \frac{3 - 0,373}{5 - 0,373} \cdot 1549 = 879,45 \text{ mm}$$

$$b_{2,c} = \frac{\sigma_{sl,1}}{m} = \frac{111,03}{0,1204} = 922,76 \text{ mm}$$

$$b_{2,sup} = 0,4 \cdot 922,76 = 369,10 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow \underline{\underline{A_{sl,1} = 42711 \text{ mm}^2}}$$

$$\Rightarrow \underline{\underline{I_{sl,1} = 2,549 \cdot 10^9 \text{ mm}^4}}$$

- Nach Gl. (A.4), Anhang A:

$$a_c = 4,33 \cdot \sqrt[4]{\frac{I_{sl,1} \cdot b_1^2 \cdot b_2^2}{t^3 \cdot b}} = 12241 \text{ mm} > a = 4000 \text{ mm}$$

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

$$\sigma_{cr,sl} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 2,549 \cdot 10^9}{42711 \cdot 4000^2} + \frac{210000 \cdot 27^2 \cdot 4647 \cdot 4000^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot (1 - 0,3^2) \cdot 42711 \cdot 1549^2 \cdot 3098^2}$$

$$\sigma_{cr,sl} = 796,1 \text{ N/mm}^2$$

 Die kritische Beulspannung  $\sigma_{cr,p}$  erhält man über eine Extrapolation zum druckbeanspruchtem Rand:

$$\sigma_{cr,p} = \sigma_{cr,sl} \cdot \frac{\sigma_1}{\sigma_{sl,1}} = 796,1 \cdot \frac{297,6}{111,03} = 2134,41 \text{ N/mm}^2$$

**Kritische Beulspannung  $\tau_{cr}$** 

- Ermittlung der mitwirkenden Breiten

Nach EN 1993-1-5, Bild 5.3 wird für die mitwirkenden Breiten die Mindestbreite angesetzt.

$$\min b = 15 \cdot \varepsilon \cdot t_w$$

$$\min b = 15 \cdot \sqrt{\frac{235}{345}} \cdot 27 = 334,26 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow A_{sl,1} = 2,786 \cdot 10^4 \text{ mm}^2$$

$$\Rightarrow I_{sl,1} = 2,315 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$$

- Ermittlung des Beulwerts nach Anhang A.3, Gl. (A.6):

$$\alpha = \frac{a}{h_w} = \frac{4000}{4647} = 0,861 < 3$$

$$k_\tau = 4,1 + \frac{6,3 + 0,18 \cdot \frac{I_{sl}}{t_w^3 \cdot h_w}}{\left(\frac{a}{h_w}\right)^2} + 2,2 \cdot \sqrt[3]{\frac{I_{sl}}{t_w^3 \cdot h_w}}$$

$$k_\tau = 4,1 + \frac{6,3 + 0,18 \cdot \frac{2,315 \cdot 10^9}{27^3 \cdot 4647}}{\left(\frac{4000}{4647}\right)^2} + 2,2 \cdot \sqrt[3]{\frac{2,315 \cdot 10^9}{27^3 \cdot 4647}} = 16,22$$

Die kritische Beulspannung  $\tau_{cr}$  bei Wirkung von Randspannungen  $\tau$  ist:

$$\tau_{cr} = k_\tau \cdot \sigma_E = 16,22 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 210000}{12 \cdot (1 - 0,3^2)} \cdot \left(\frac{27}{4647}\right)^2 = 103,9 \text{ N/mm}^2$$

**Fließkriterium nach EN 1993-1-5, Gl. (10.3)**

$$\alpha_{ult,k} = \frac{f_y}{\sigma_{v,Ed}} = \frac{345}{362,5} = 0,952$$

$$\text{Mit: } \sigma_{v,Ed} = \sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + 3 \cdot \tau_{Ed}^2} = \sqrt{297,6^2 + 3 \cdot 119,5^2} = 362,5 \text{ N/mm}^2$$

**Eigenwerte der Spannungskomponenten nach EN 1993-1-5, Gl. (10.6):**

$$\alpha_{cr,x} = \frac{\sigma_{cr,p,x}}{\sigma_{x,Ed}} = \frac{2134,41}{297,6} = 7,172$$

$$\alpha_{cr,\tau} = \frac{\tau_{cr}}{\tau_{Ed}} = \frac{103,9}{119,5} = 0,869$$

**Kritischer Lastfaktor nach EN 1993-1-5, Gl. (10.6):**

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

$$\alpha_{cr} = 0,86$$

Plattenschlankheitsgrad nach EN 1993-1-5, Gl. (10.2):

$$\bar{\lambda}_p = \bar{\lambda}_w = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}} = \sqrt{\frac{0,952}{0,86}} = 1,052$$

Abminderungsfaktoren für das Plattenbeulen EN 1993-1-5, Gl. (4.2) und Tab. 5.1

$$\rho_p = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,052 - 0,055 \cdot \left(3 + \left(\frac{-262,1}{297,6}\right)\right)}{1,052^2} = 0,845$$

Nach Tabelle 5.1 ist bei einer starren Auflagersteife der Beitrag des Stegs:

$$\chi_w = \frac{0,83}{\bar{\lambda}_p} = \frac{0,83}{1,052} = 0,789$$

Beulen mit knickstabähnlichem Verhalten nach EN 1993-1-5, Abschnitt 4.5.4, Gl. (1):

$$\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1 = \frac{2134,41}{2109,8} - 1 = 0,011 \leq 1$$

$$\text{Mit: } \sigma_{cr,c} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl,1}}{A_{sl,1} \cdot a^2} \cdot \frac{\sigma_1}{\sigma_{sl,1}} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 2,549 \cdot 10^9}{42711 \cdot 4000^2} \cdot \frac{297,6}{111,03} = 2109,8 \text{ N/mm}^2$$

Bei diesem Gesamtfeld liegt ein knickstabähnliches Verhalten vor.

Abminderungsfaktor mit knickstabähnlichem Verhalten:

$$\rho_c = (\rho_p - \chi_c) \cdot \xi \cdot (2 - \xi_x) + \chi_c = (0,845 - 0,496) \cdot 0,011 \cdot (2 - 0,011) + 0,496 = 0,487$$

$$\text{Mit: } \chi_c = \frac{1}{\left(\theta_p + \sqrt{\theta_p^2 - \bar{\lambda}_p^2}\right)} = \frac{1}{\left(1,282 + \sqrt{1,282^2 - 1,052^2}\right)} = 0,496$$

$$\theta_p = 0,5 \cdot (1 + \alpha_e \cdot (1,052 - 0,2) + 1,052^2) = 1,282$$

$$\alpha_e = \alpha + \frac{0,09}{i/e} = 0,49 + \frac{0,09}{\sqrt{\frac{2,549 \cdot 10^9}{42711}} / 129} = 0,537$$

Nachweis (Interaktionsbedingung) nach EN 1993-1-5, Gl. (10.5):

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\rho_c \cdot f_y / \gamma_{M1}}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{Ed}}{\chi_w \cdot f_y / \gamma_{M1}}\right)^2 \leq 1$$

$$\left(\frac{297,50}{0,487 \cdot 345 / 1,1}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{119,50}{0,789 \cdot 345 / 1,1}\right)^2 = \underline{\underline{4,50 > 1}}$$

Die Beulsicherheit ist nicht ausreichend!

# A Literatur

- [1] EN 1993-1-1: 2010, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau
- [2] EN 1993-1-5: 2010, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile
- [3] Programmbeschreibung RSTAB/RFEM, DLUBAL GmbH, Fassung Oktober 2012
- [4] Petersen, Chr.: Stahlbau. Verlag Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig/Wiesbaden, 1988
- [5] Petersen, Chr.: Statik und Stabilität der Baukonstruktionen. Verlag Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig/ Wiesbaden, 1982
- [6] Schneider Bautabellen, 19. Auflage. Werner Verlag, Düsseldorf, 2010
- [7] DIN 18 800 Teil 1, Stahlbauten, Bemessung und Konstruktion. Ausgabe November 1990
- [8] DIN 18 800 Teil 2, Stahlbauten, Stabilitätsfälle, Knicken von Stäben und Stabwerken. Ausgabe November 1990
- [9] DIN 18 800 Teil 3, Stahlbauten, Stabilitätsfälle, Plattenbeulen. Ausgabe November 1990
- [10] Osterrieder, Peter; Richter, Stefan: Kranbahnträger aus Walzprofilen. Verlag Vieweg und Sohn, Braunschweig/Wiesbaden, 1999
- [11] Hünersen, Gottfried: Stahlbau in Beispielen. Werner Verlag, Düsseldorf, 1998
- [12] Krüger, Ulrich: Stahlbau. Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1998
- [13] Bochmann, Fritz: Statik im Bauwesen, Band 2: Festigkeitslehre. Verlag für Bauwesen GmbH, Berlin, 1995
- [14] Hirt, Manfred A.; Bez, Rolf: Stahlbau. Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1998
- [15] Thiele, Albrecht; Lohse, Wolfram: Stahlbau. Verlag B. G. Teubner, Stuttgart, 1997
- [16] Klöppel, K.; Scheer, J.: Beulwerte ausgesteifter Rechteckplatten, Band 1. Verlag Wilhelm Ernst und Sohn, Berlin, 1960
- [17] Klöppel, K. Möller, J.: Beulwerte ausgesteifter Rechteckplatten, Band 2. Verlag Wilhelm Ernst und Sohn, Berlin, 1968
- [18] Beg, D.; Kuhlmann, U.; Davaine L.; Braun B.: Design of Plated Structures ECCS Eurocode Design Manuals, 2010

# B Index

<b>A</b>	
Abminderungsfaktoren .....	21
Alle Nachweise .....	24
Ausdruckprotokoll .....	28, 29
Ausnutzung .....	22
<b>B</b>	
Basisangaben .....	8
Beenden von FE-BEUL .....	8
Belastung .....	14
Bemessungsfall .....	30, 31
Benutzerdefinierte Beulsteifen-Bibliothek .....	13
Benutzerprofil .....	32
Berechnung .....	17
Beulfeld-Abmessungen .....	9
Beulfiguren .....	27
Beulkurvenform .....	21
Beulsteifen .....	11, 13, 19, 20
Beulwert .....	18
Blättern in Masken .....	8
<b>C</b>	
c/t Teile .....	16
CSV-Export .....	33
<b>D</b>	
Details DIN 18800 .....	17
Details EN 1993-1-5 .....	19, 21
Dezimalstellen .....	32
DIN 18800 .....	17, 34, 39
Drucken .....	28
<b>E</b>	
Eigenwerte .....	17, 22
Einheiten .....	32
EN 1993-1-5 .....	19, 36, 45
Ergebnisauswertung .....	26
Ergebnismasken .....	22
Erhaltung der Schnittgrößen .....	20
Excel .....	33
Export Ergebnisse .....	32
<b>F</b>	
FE-Modell .....	17
<b>G</b>	
Gleichungslöser .....	18
Grafik drucken .....	28
Grafikfenster .....	16
<b>I</b>	
ICG-Methode .....	17, 18
Import .....	15
Installation .....	6
<b>K</b>	
Knickeinfluss .....	18
Kommentar .....	10
Kritische Beulspannungen .....	21
<b>L</b>	
Lanczos .....	17, 18
Lastfall .....	14, 16
Lösungsart .....	18
<b>M</b>	
Maßgebender Lastfall .....	22
Material .....	9
<b>N</b>	
Nachweis .....	22
Nachweis eigenwertweise .....	24
Nachweis lastfallweise .....	23
Nationaler Anhang .....	9
Navigator .....	8
<b>O</b>	
OpenOffice .....	33
<b>P</b>	
Programmaufruf .....	6
<b>R</b>	
Randbedingungen .....	10
Randspannungen .....	14
Relationsbalken .....	26
<b>S</b>	
Schaltflächen .....	11, 26
Stäbe auswählen .....	15
Starten von FE-BEUL .....	6
Steifen .....	11, 17
<b>U</b>	
Unterraum .....	17
<b>V</b>	
Verzweigungslastfaktoren .....	25

Verzweigungslastfaktor-Methode.....20  
von RSTAB/RFEM..... 15

**W**

Wirksame Gurtbreiten ..... 14

**Z**

Zwischenablage ..... 32