



Fassung  
Dezember 2017

Programm

# FE-BEUL

Beulsicherheitsnachweis rechteckiger  
Platten mit oder ohne Steifen

## Programmbeschreibung

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 2017  
Am Zellweg 2  
D-93464 Tiefenbach  
Deutschland

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
<b>1.</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
1.1	Über FE-BEUL	3
1.2	FE-BEUL-Team	4
1.3	Gebrauch des Handbuchs	4
1.4	FE-BEUL starten	5
<b>2.</b>	<b>Eingabedaten</b>	<b>6</b>
2.1	Basisangaben	6
2.2	Beulsteifen	11
2.3	Belastung	14
<b>3.</b>	<b>Berechnung</b>	<b>17</b>
3.1	Details EN 1993-1-5	17
3.2	Details DIN 18800	21
3.3	Berechnung	22
<b>4.</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>23</b>
4.1	Maßgebender Lastfall	23
4.2	Nachweise lastfallweise	24
4.3	Nachweise eigenwertweise	25
4.4	Alle Nachweise	26
4.5	Verzweigungslastfaktoren	27
<b>5.</b>	<b>Ergebnisauswertung</b>	<b>28</b>
5.1	Ergebnismasken	28
5.2	Grafik der Beulfiguren	29
<b>6.</b>	<b>Ausdruck</b>	<b>31</b>
6.1	Ausdruckprotokoll	31
6.2	Auswahl der Druckdaten	32
6.2.1	Globale Selektion	32
6.2.2	Selektion der Eingabedaten	33
6.2.3	Selektion der Ergebnisse	33
6.3	Ausdruckprotokoll	34
6.4	Protokollkopf	39
6.5	Grafikausdruck	41
<b>7.</b>	<b>Allgemeine Funktionen</b>	<b>44</b>
7.1	Bemessungsfälle	44
7.2	Einheiten und Dezimalstellen	46
7.3	Export der Ergebnisse	47
<b>8.</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>49</b>
8.1	EN 1993-1-5	49
8.1.1	Ermittlung der kritischen Beulspannungen	50
8.1.2	Interaktionsnachweis	50
8.1.3	Elastischer Spannungsnachweis der Steifen	51
8.1.4	Verformungsnachweis der Steifen	51
8.1.5	Nachweis der Drillknicksicherheit	51
8.2	DIN 18800	52
8.2.1	Ideale Beulspannung	52
8.2.2	Grenzbeulspannung	52
8.2.3	Interaktionsbedingung	53



<b>9.</b>	<b>Beispiele</b>	<b>54</b>
9.1	EN 1993-1-5	54
9.1.1	Unversteiftes Beulfeld mit knickstabähnlichem Verhalten	54
9.1.2	Ausgesteiftes Beulfeld	57
9.2	DIN 18800	61
9.2.1	Unversteiftes Beulfeld mit knickstabähnlichem Verhalten	61
9.2.2	Ausgesteiftes Beulfeld	64
<b>A.</b>	<b>Literatur</b>	<b>67</b>
<b>B.</b>	<b>Index</b>	<b>68</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Über FE-BEUL

Der Eurocode 3 (EN 1993-1-5:2010-12 + NA 2010-12) [1] regelt die Bemessung und Konstruktion plattenförmiger Bauteile aus Stahl in den Mitgliedsstaaten der Europäischen Union.

Mit dem Programm FE-BEUL bietet DLUBAL SOFTWARE GMBH ein leistungsstarkes Werkzeug für die Analyse rechteckiger Plattenbauteile an, die mit oder ohne Aussteifungen ausgeführt sind. Länderspezifische Regelungen können durch verschiedene Nationale Anhänge berücksichtigt werden. Die Liste links zeigt die aktuell im Programm verfügbaren Anhänge. Daneben lassen sich eigene Grenzwerte in Form benutzerdefinierter Anhänge erstellen.

CEN	Europäische Union
DIN	Deutschland
CSN	Tschechische Republik
SFS	Finnland
CYS	Zypern
UNI	Italien
NBN	Belgien
NEN	Niederlande
NS	Norwegen
ÖNORM B	Österreich

FE-BEUL kann sowohl als eigenständiges Programm als auch als Zusatzmodul in der RFEM- und RSTAB-Umgebung genutzt werden. Im RFEM/RSTAB-Zusatzmodul besteht die Möglichkeit, die bemessungsrelevanten Eingabedaten und die Schnittgrößen aus dem aktuellen Modell zu übernehmen.

FE-BEUL führt alle typischen Stabilitätsnachweise, den Spannungs- und Verformungsnachweis sowie die Nachweise der Drillknicksicherheit für die Steifen. Der Stabilitätsnachweis erfolgt nach der Methode der reduzierten Spannungen mittels Interaktionskriterium. Weiterhin sind in FE-BEUL die Gleichungen zur Berechnung der kritischen Beulspannungen nach [1] Anhang A implementiert, wodurch die Berechnung über eine Eigenwertlösung möglich ist.

Nach der Bemessung lassen sich die Nachweise von den Eingabedaten bis zur Bemessung im Ausdruckprotokoll dokumentieren und für die Druckausgabe aufbereiten.

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

Ihr Team von

DLUBAL SOFTWARE GMBH

## 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

### 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. (FH) René Flori  
Dipl.-Ing. (FH) Stefan Frenzel

Dipl.-Ing. (FH) Walter Fröhlich  
Dipl.-Ing. (BA) Andreas Niemeier, M.Eng.  
Dipl.-Ing. (FH) Walter Rustler, M.Eng.  
Dipl.-Ing. (FH) Frank Sonntag, M.Sc.  
Dipl.-Ing. (FH) Lukas Sühnel

## 1.3 Gebrauch des Handbuchs

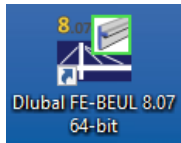
Da die Themenbereiche Installation, Benutzeroberfläche, Ergebnisauswertung und Ausdruck im [RSTAB-Handbuch](#) und im [RFEM-Handbuch](#) erläutert sind, wird hier auf eine Beschreibung verzichtet. Der Schwerpunkt dieses Handbuchs liegt auf den Besonderheiten, die sich im Rahmen der Arbeit mit FE-BEUL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



Das 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. [Anwenden]. Zugleich sind sie am linken Rand abgebildet. Die **Begriffe**, die in Dialogen, Tabellen und Menüs erscheinen, sind in *Kursivschrift* hervorgehoben, damit die Erläuterungen gut nachvollzogen werden können.

Am Ende des Handbuchs befindet sich ein Stichwortverzeichnis. Sollten Sie dennoch nicht fündig werden, können Sie die Suchfunktion auf unserer Blog-Website <https://www.dlubal.com/blog/de> nutzen, um unter den Beiträgen eine Lösung zu finden.

## 1.4 FE-BEUL starten



### Icon / Startmenü

Das eigenständig lauffähige Programm FE-BEUL kann über das Windows-Startmenü oder das Dlubal-Icon auf dem Desktop gestartet werden.

### RFEM/RSTAB-Pulldownmenü

In RFEM oder RSTAB kann das Zusatzmodul FE-BEUL aufgerufen werden über das Menü

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

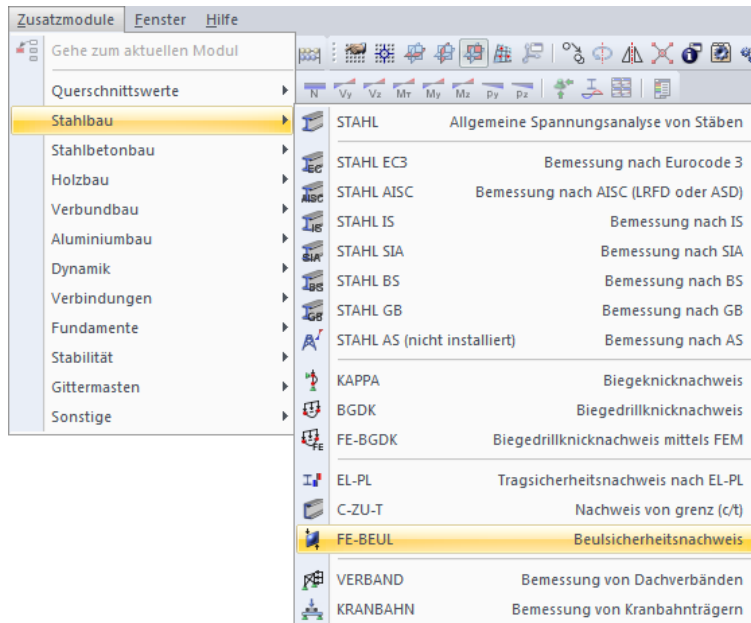


Bild 1.1: Menü *Zusatzmodule* → *Stahlbau* → *FE-BEUL*

### RFEM/RSTAB-Navigator

Alternativ lässt sich FE-BEUL im *Daten*-Navigator von RFEM oder RSTAB starten über den Eintrag

**Zusatzmodule → FE-BEUL.**

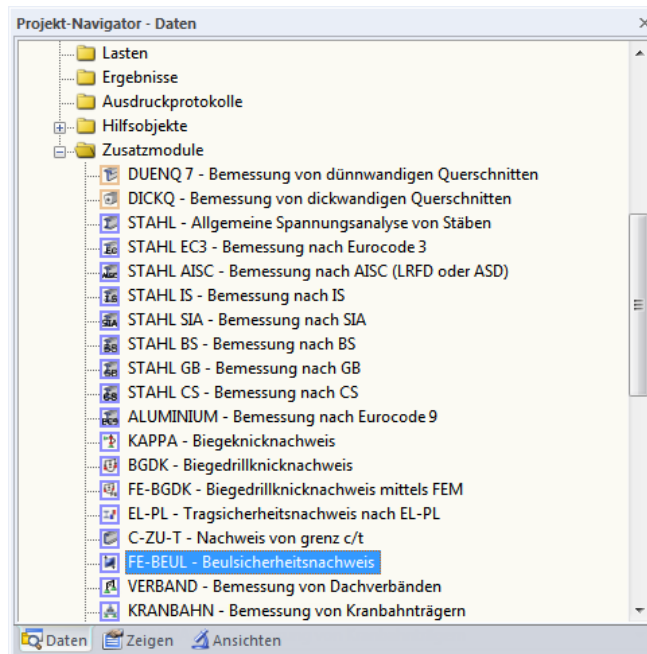


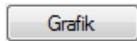
Bild 1.2: Daten-Navigator: *Zusatzmodule* → *FE-BEUL*.

## 2 Eingabedaten

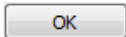
Nach dem Programmaufruf erscheint das FE-BEUL-Fenster. Links wird ein Navigator angezeigt, der alle aktuell anwählbaren Masken verwaltet. Darüber befindet sich eine Pulldownliste mit den eventuell vorhandenen Bemessungsfällen (siehe [Kapitel 7.1, Seite 44](#)).



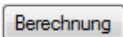
Die Ansteuerung der Masken erfolgt entweder durch Anklicken eines bestimmten Eintrags im Navigator von FE-BEUL oder durch Blättern mit den beiden links gezeigten Schaltflächen. Die Funktionstasten [F2] und [F3] blättern ebenfalls eine Maske vorwärts bzw. zurück.



Die Eingaben in den Masken werden durch dynamischen Grafiken unterstützt. Über die Schaltfläche [Grafik] ist es zudem möglich, die Eingabedaten anschaulich darzustellen und zu kontrollieren.



[OK] sichert die getroffenen Eingaben und beendet FE-BEUL. Mit der Schaltfläche [Abbrechen] wird das Programm verlassen, ohne die Daten zu speichern.



Sind alle Daten eingegeben, kann mit der Schaltfläche [Berechnung] das statische System erzeugt und berechnet werden. Mit den Ergebnissen der Eigenwertanalyse werden die entsprechenden Nachweise geführt und anschließend in den Ergebnismasken ausgegeben.

### 2.1 Basisangaben

In Maske *1.1 Basisangaben* ist die Geometrie des nachzuweisenden Beulfeldes mit seinen Randbedingungen und Materialeigenschaften einzugeben. Des Weiteren ist festzulegen, nach welcher Norm der Beulnachweis erfolgen soll.

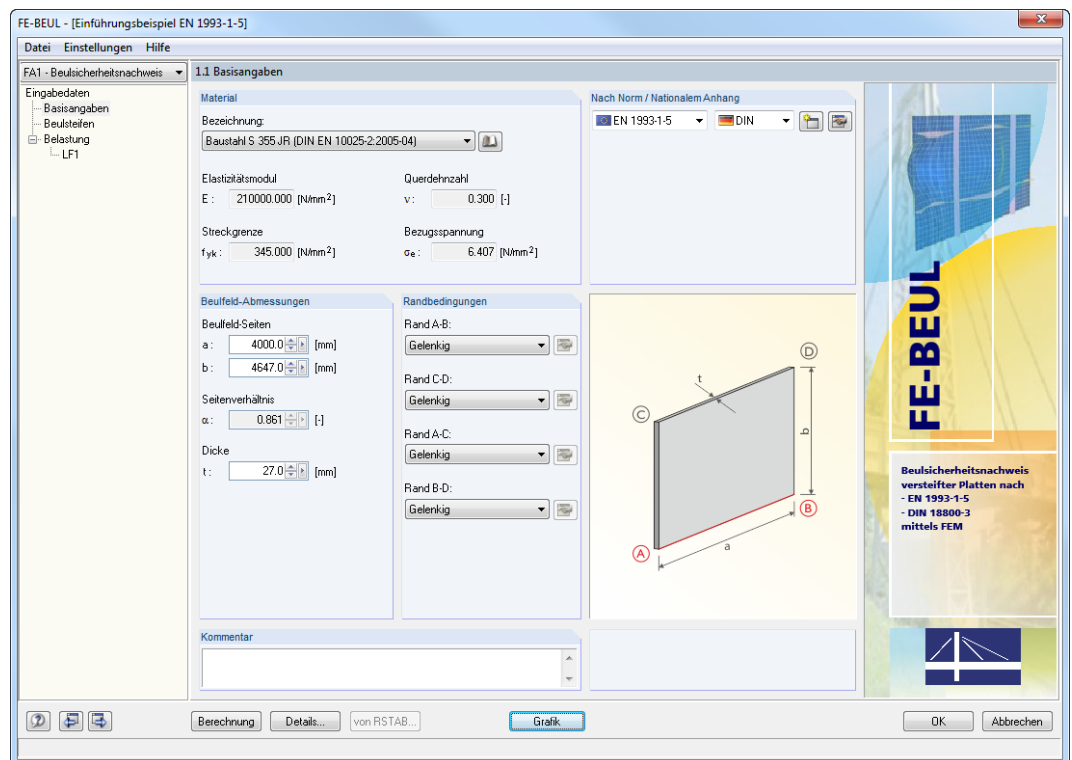


Bild 2.1: Maske 1.1 Basisangaben

## Material

Aus der Liste lässt sich eines der im Programm registrierten Materialien auswählen. Es stehen die nach der gewählten Norm zulässigen Stahl-Materialien zur Verfügung. Die entsprechenden Stahlsorten sind mit ihren Kennwerten in einer Bibliothek hinterlegt.



Die Materialdatenbank der Stahlsorten ist über die Schaltfläche [Bibliothek] aufrufbar.

**Material aus Bibliothek übernehmen**

**Filter**

Materialkategorie-Gruppe: Metall

Material-Kategorie: Stahl

Norm-Gruppe: EN

Norm: EN 1993-1-1:2005-05

☐ Inklusive ungültiger...

☐ Favoritengruppe: Beton - DIN

**Material zum Übernehmen**

Materialbezeichnung	Norm
Baustahl S 235	EN 1993-1-1:2005-05
Baustahl S 275	EN 1993-1-1:2005-05
Baustahl S 355	EN 1993-1-1:2005-05
Baustahl S 450	EN 1993-1-1:2005-05
Baustahl S 275 N	EN 1993-1-1:2005-05
Baustahl S 275 NL	EN 1993-1-1:2005-05
Baustahl S 355 N	EN 1993-1-1:2005-05
Baustahl S 355 NL	EN 1993-1-1:2005-05
Baustahl S 420 N	EN 1993-1-1:2005-05
Baustahl S 420 NL	EN 1993-1-1:2005-05
Baustahl S 460 N	EN 1993-1-1:2005-05
Baustahl S 460 NL	EN 1993-1-1:2005-05
Baustahl S 275 M	EN 1993-1-1:2005-05
Baustahl S 275 ML	EN 1993-1-1:2005-05
Baustahl S 355 M	EN 1993-1-1:2005-05
Baustahl S 355 ML	EN 1993-1-1:2005-05
Baustahl S 420 M	EN 1993-1-1:2005-05
Baustahl S 420 ML	EN 1993-1-1:2005-05

Suchen:

**Materialkennwerte** Baustahl S 235 | EN 1993-1-1:2005-05

Haupt-Kennwerte			
Elastizitätsmodul	E	21000.00	kN/cm <sup>2</sup>
Schubmodul	G	8076.92	kN/cm <sup>2</sup>
Poissonsche Zahl (Querdehnzahl)	ν	0.300	
Spezifisches Gewicht	γ	78.50	kN/m <sup>3</sup>
Temperaturdehnzahl (Wärmedehnzahl)	α	1.2000E-05	1/°C
Zusätzliche Kennwerte			
Dickenbereich t ≤ 40.0 mm			
Streckgrenze	f <sub>y</sub>	23.50	kN/cm <sup>2</sup>
Zugfestigkeit	f <sub>u</sub>	36.00	kN/cm <sup>2</sup>
Dickenbereich t > 40.0 mm und t ≤ 80.0 mm			
Streckgrenze	f <sub>y</sub>	21.50	kN/cm <sup>2</sup>
Zugfestigkeit	f <sub>u</sub>	36.00	kN/cm <sup>2</sup>
Dickenbereich t > 80.0 mm und t ≤ 100.0 mm			
Streckgrenze	f <sub>y</sub>	21.50	kN/cm <sup>2</sup>
Zugfestigkeit	f <sub>u</sub>	36.00	kN/cm <sup>2</sup>
Dickenbereich t > 100.0 mm und t ≤ 150.0 mm			
Streckgrenze	f <sub>y</sub>	19.50	kN/cm <sup>2</sup>
Zugfestigkeit	f <sub>u</sub>	35.00	kN/cm <sup>2</sup>
Dickenbereich t > 150.0 mm und t ≤ 200.0 mm			
Streckgrenze	f <sub>y</sub>	18.50	kN/cm <sup>2</sup>

OK Abbrechen

Bild 2.2: Materialbibliothek

Nach dem Festlegen des Materials lässt sich dieses mit [OK] in die Maske 1.1 übernehmen.

Die Bezugsspannung  $\sigma_\varepsilon$  errechnet sich aus den *Beulfeld-Abmessungen*  $a$ ,  $b$  und  $t$  (siehe unten).

Nach EN 1993-1-5 [1]:

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

Nach DIN 18800-3 [2]:

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



### Norm / Nationaler Anhang

In der Liste links kann die Norm ausgewählt werden, nach der die Bemessung erfolgen soll. FE-BEUL ermöglicht Analysen nach *DIN 18800* [2] und *EN 1993-1-5* [1].

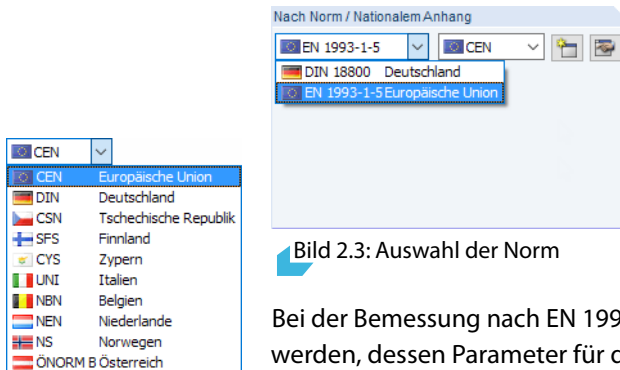


Bild 2.3: Auswahl der Norm

Bei der Bemessung nach EN 1993-1-5 kann über die zweite Liste der nationale Anhang festgelegt werden, dessen Parameter für die Bemessung anzusetzen sind. Die links dargestellte Liste zeigt die aktuell im Programm verfügbaren nationalen Anhänge.

Nationaler Anhang

Nat. Anhang...

Über die Schaltfläche lassen sich die Parameter des aktuellen nationalen Anhangs überprüfen. Hierbei handelt es sich in erster Linie um die Teilsicherheitsbeiwerte für die Bemessung. Der Dialog *Daten des Nationalen Anhangs* ist auch über die Schaltfläche [Nat. Anhang] aufrufbar, die in jeder Eingabemaske von FE-BEUL zur Verfügung steht.

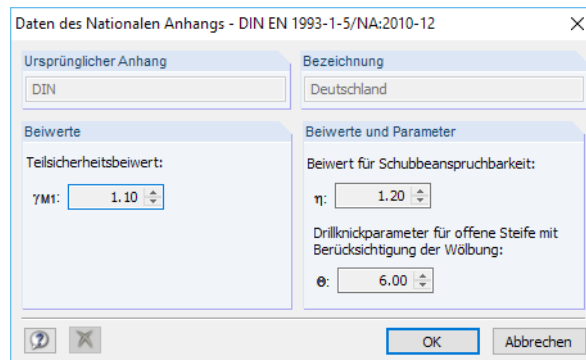


Bild 2.4: Dialog *Daten des Nationalen Anhangs*

Mit der Schaltfläche kann ein benutzerdefinierter nationaler Anhang erstellt werden. Im Dialog *Daten des Nationalen Anhangs* sind die Parameter des aktuellen nationalen Anhangs voreingestellt. Sie können dort entsprechend angepasst werden. Für den neuen nationalen Anhang ist eine *Bezeichnung* anzugeben.



Ein eigendefinierter nationaler Anhang lässt sich im Dialog *Daten des Nationalen Anhangs* wieder [Löschen].

## Beulfeld-Abmessungen

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

Der Abschnitt *Beulfeld-Abmessungen* verwaltet die geometrischen Angaben der Platte.

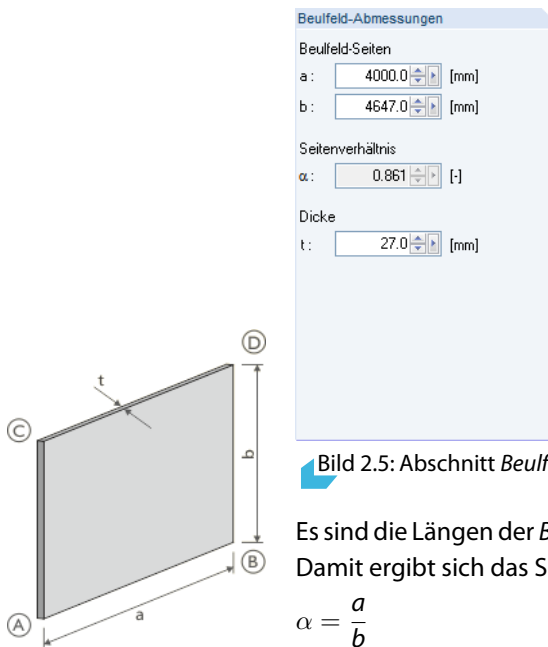


Bild 2.5: Abschnitt *Beulfeld-Abmessungen*

Es sind die Längen der *Beulfeld-Seiten*  $a$  und  $b$  sowie die *Blechdicke*  $t$  gemäß Grafikskizze anzugeben. Damit ergibt sich das Seitenverhältnis  $\alpha$  wie folgt:

$$\alpha = \frac{a}{b}$$

## Randbedingungen

Durch die Eingaben in diesem Abschnitt wird die Lagerung des Beulfeldes definiert. Es sind die Lagerungsarten *Gelenkig*, *Eingespannt*, *Frei* und *Gelenkig Elastisch* möglich.




Bild 2.6: Abschnitt *Randbedingungen*

Die Parameter der Plattenrändern üben einen maßgebenden Einfluss auf die Berechnung aus. Diese Randbedingungen hängen von der Beschaffenheit der Ränder ab und werden auch durch den Anschluss angrenzender Teile beeinflusst. Häufig wird vereinfachend angenommen, dass die Platten entlang ihrer Ränder gelenkig gelagert sind. Diese Annahme liegt auf der sicheren Seite.

Die geometrischen Randbedingungen sind für die Verschiebungen, Verdrehungen und Verwölbungen an den vier Plattenrändern des Gesamtbeulfeldes anzugeben. Dabei gilt:

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

Vollständig gelenkige oder eingespannte Ränder existieren praktisch nicht, da die Platten meistens Stege oder Flansche von Trägern darstellen. Mit der Option *Gelenkig - Elastisch* kann die reale Lagerung durch die Eingabe einer Federsteifigkeit erfasst werden, die aus den angrenzenden Bauteilen resultiert. Über die Schaltfläche  neben der Liste ist der Dialog *Elastische Lagerung* zugänglich. Dort kann die Konstante  $C_{\varphi,x}$  der Feder um die Linienlängsachse angegeben werden.

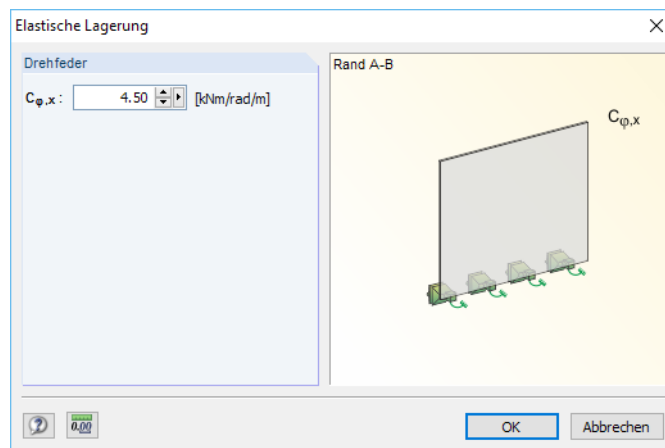


Bild 2.7: Dialog *Elastische Lagerung*

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

Erfolgt die Bemessung nach DIN 18800, steht zusätzlich die Option *Konstante Randverschiebung  $u$  nach Tabelle 1, Zeile 5* zur Verfügung. Damit lässt sich steuern, wie der Abminderungsfaktor  $\kappa$  bei dreiseitig gelagerten Beulfeldern ermittelt wird.

## Kommentar

Dieses Eingabefeld steht für eine benutzerdefinierte Anmerkung zur Verfügung.

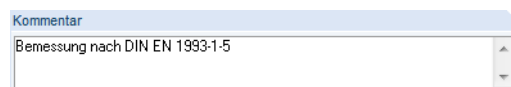
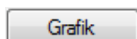


Bild 2.8: *Kommentar*

## Grafik



Die Geometrie des Beulfeldes kann grafisch überprüft werden: Klicken Sie auf die Schaltfläche [Grafik], um das Fenster *Grafik Beulfigur* zu öffnen (siehe Bild 5.4, Seite 30). In dieser Grafik sind die Abmessungen des Beulfeldes und die definierten Randbedingungen als 3D-Rendering dargestellt.

## 2.2 Beulsteifen

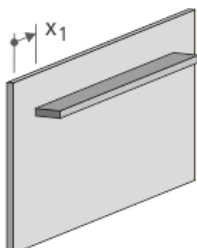
Diese Maske ist zweigeteilt. Im Abschnitt *Beulsteifen in Längsrichtung* sind die in Längsrichtung angeordneten Steifen anzugeben, die bei der Berechnung berücksichtigt werden sollen. Die untere Tabelle bietet die gleichen Eingabemöglichkeiten für die *Beulsteifen in Querrichtung*. Beide Tabellen sind bis auf den genannten Unterschied identisch und werden deshalb gemeinsam beschrieben.

Bild 2.9: Maske 1.2 Beulsteifen

Verschiedene Zusatzfunktionen erleichtern die Arbeit in dieser Maske. Die Schaltflächen unterhalb der Tabellen sind mit folgenden Funktionen belegt:

Schaltfläche	Bezeichnung	Funktion
	Reguläre Beulsteifenabstände	Verteilt die vorhandenen Beulsteifen geometrisch gleichmäßig über die Beulfeldhöhe
	Reguläre Schwerpunktabstände	Verteilt die Schwerpunkte der vorhandenen Beulsteifen gleichmäßig über die Beulfeldhöhe
	Zeile kopieren	Kopiert die aktuelle Zeile in die nächste Zeile
	Zeile löschen	Löscht die vorhandenen Zeile
	Excel-Export	Exportiert die vorhandene Tabelle in MS Excel
	Excel-Import	Importiert eine Tabelle aus MS Excel

Tabelle 2.1: Schaltflächen in Maske 1.2



### Lage

In den Spalten A bis C ist die Lage der Längs- und Quersteifen anzugeben. Für EN 1993-1-5 sind dies die Positionen  $z$ ,  $x_1$ ,  $x_2$  bzw.  $x$ ,  $y_1$ ,  $y_2$ , für DIN 18800 die Positionen  $y$ ,  $x_1$ ,  $x_2$  bzw.  $x$ ,  $y_1$ ,  $y$ . Der aktuelle Parameter wird jeweils in der Grafik angezeigt.

## Steife-Typ

In Spalte D ist der Querschnitt der Steifen festzulegen. Es sind die links dargestellten Querschnittstypen verfügbar.

Nach der Auswahl des Typs können die Profilparameter in einem Dialog eingegeben werden.

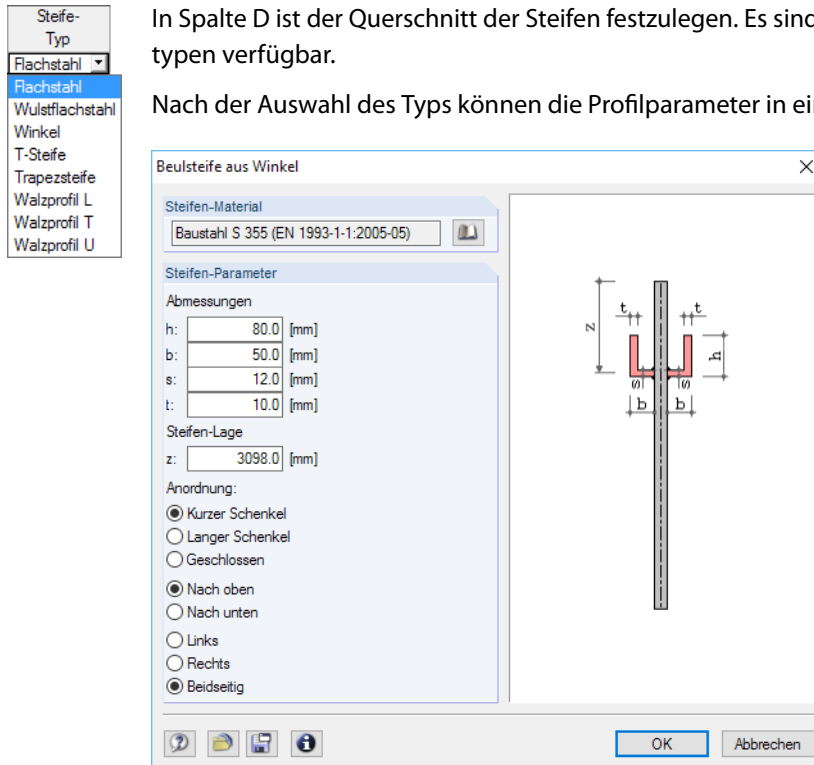





Bild 2.10: Dialog *Beulsteife aus Winkel*

Die *Steifen-Parameter* (Abmessungen, Anordnung etc.) unterscheiden sich je nach Typ.

Falls die Steife aus einem anderen Material als das Beulfeld besteht, kann es über die Schaltfläche  in einer Bibliothek ausgewählt werden (siehe Bild 2.2, Seite 7). Die verfügbaren Stahlsorten hängen von der Norm ab, die für die Bemessung eingestellt ist.

Die Schaltfläche  öffnet einen Dialog mit den Querschnittswerten der Steife.

Mit der Schaltfläche  können die Parameter der Steife in einer Datenbank abgelegt werden. Diese lassen sich mit der Schaltfläche  wieder einlesen.

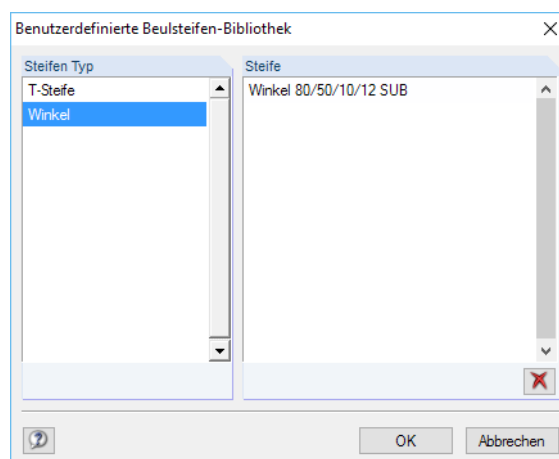


Bild 2.11: Dialog *Benutzerdefinierte Beulsteifen-Bibliothek*

Durch Doppelklicken eines Eintrags oder mit [OK] wird die Steife in den Dialog *Beulsteifen aus...* übernommen und kann dort ggf. angepasst werden.

[OK] schließt den *Beulsteife*-Dialog (Bild 2.10) und übergibt die Steife in die Maske *1.2 Beulsteifen*.

### Parameter

In Spalte E der Maske 1.2 werden die Eigenschaften der Steife in Parameterschreibweise angezeigt. Mit Klick auf die Schaltfläche ist das Editieren der Eingabedaten möglich.

### Wirksame Gurtbreiten

Das Layout der Maske 1.2 *Beulsteifen* verändert sich, sobald in Maske 1.3 *Belastung* Spannungen definiert wurden.

**1.2 Beulsteifen**

Beulsteifen in Längsrichtung

Steife Nr.	Lage [mm]			Steife-Typ	Steife-Parameter [mm]	Wirksame Gurtbreiten [mm]				Normalspannung $\sigma_x$ [N/mm <sup>2</sup> ]
	z	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>			b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>1'</sub>	b <sub>2'</sub>	
1	200.0	100.0	1900.0	Flachstahl	100/15 R	96.2	390.2			111.83
2	994.0	250.0	1750.0	Winkel	80/50/10/12 SUB	390.2	0.0			111.83
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										
13										

Beulsteifen in Querrichtung

Steife Nr.	Lage [mm]			Steife-Typ	Steife-Parameter [mm]	Wirksame Gurtbreiten [mm]				Normalspannung $\sigma_z$ [N/mm <sup>2</sup> ]
	x	z <sub>1</sub>	z <sub>2</sub>			b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>1'</sub>	b <sub>2'</sub>	
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										

☒ Wirksame Gurtbreiten nach EN 1993-1-5, Tab. 4 ermitteln

Wirksame Breiten für Lastfall: LF1

Bild 2.12: Maske 1.2 *Beulsteifen* nach Eingabe von Spannungen

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

☒ Wirksame Gurtbreiten nach EN 1993-1-5, Tab. 4 ermitteln

Es ist anzugeben, ob die wirksamen Breiten nach Norm ermittelt werden sollen. 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. Nach dem Deaktivieren des Kontrollfeldes können die wirksamen Gurtbreiten in den Spalten F bis I manuell festgelegt werden.

### Normalspannung

In Spalte J wird die Normalspannung, die sich aus der definierten Belastung ergibt, für die jeweilige Steife angegeben.

Wirksame Breiten für Lastfall:

LF1 LF1 LF2

Falls mehrere Lastfälle existieren (siehe [Kapitel 2.3](#)), werden die wirksamen Gurtbreiten getrennt voneinander berechnet und angegeben. Über die Liste besteht dann die Möglichkeit, zwischen den einzelnen Lastfällen zu wechseln.

## 2.3 Belastung

In Maske 1.3 *Belastung* sind die Spannungen des Beulfeldes festzulegen.

### 1.3 Belastung

Nr.:

1

Bezeichnung:

Vollast

Randspannungen

Längsspannungen in x-Richtung

☐ Werte für die Erhaltung der Schnittgrößen anzeigen

$\sigma_1$ :

-262.10

[N/mm<sup>2</sup>]

$\sigma_2$ :

297.60

[N/mm<sup>2</sup>]

$\psi_x$ :

-0.881

Schubspannung

$\tau$ :

119.50

[N/mm<sup>2</sup>]

Längsspannungen in z-Richtung

$\sigma_3$ :

0.00

[N/mm<sup>2</sup>]

$\sigma_4$ :

0.00

[N/mm<sup>2</sup>]

$\psi_z$ :

A

B

$\sigma_{5,A}$ :

0.00

[N/mm<sup>2</sup>]

$\sigma_{5,B}$ :

0.00

[N/mm<sup>2</sup>]

$d_{5,A}$ :

0.0

[mm]

$d_{5,B}$ :

0.0

[mm]

$c_{5,A}$ :

0.0

[mm]

$c_{5,B}$ :

0.0

[mm]

$\sigma_{6,A}$ :

0.00

[N/mm<sup>2</sup>]

$\sigma_{6,B}$ :

0.00

[N/mm<sup>2</sup>]

$d_{6,A}$ :

0.0

[mm]

$d_{6,B}$ :

0.0

[mm]

$c_{6,A}$ :

0.0

[mm]

$c_{6,B}$ :

0.0

[mm]

Druckspannung : positive Werte

Bild 2.13: Maske 1.3 *Belastung*

### Lastfall

1

Beim Aufruf der Maske ist der Lastfall 1 voreingestellt. Für diesen Lastfall kann eine *Bezeichnung* eingetragen oder in der Liste ausgewählt werden. Mit der Schaltfläche [Neu] wird ein neuer Lastfall angelegt. [Löschen] entfernt den aktuellen Lastfall.

### Randspannungen

In diesem Abschnitt sind die wirkenden Normalspannungen (*Längsspannungen in x-Richtung*), die *Schubspannung* und die Querspannungen (*Längsspannungen in z-Richtung*) anzugeben.



Druckspannungen sind positiv, Zugspannungen negativ und Schubspannungen positiv einzugeben.

### 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.

## Import von Spannungen aus RSTAB/RFEM

Wurde FE-BEUL als Zusatzmodul aus der Oberfläche von RSTAB oder RFEM gestartet, so können die Spannungen auch vom Hauptprogramm übernommen werden. Beim eigenständig lauffähigen Programm FE-BEUL steht diese Funktion nicht zur Verfügung.

von RSTAB...

Für den Import der Beulfeld-Spannungen eines Stabes aus RSTAB oder RFEM ist die Schaltfläche [von RSTAB] bzw. [von RFEM] anzuklicken. Es öffnet sich ein Dialog, in dem der *Stab*, das *c/t-Teil* sowie der relevante *Lastfall* ausgewählt werden kann.

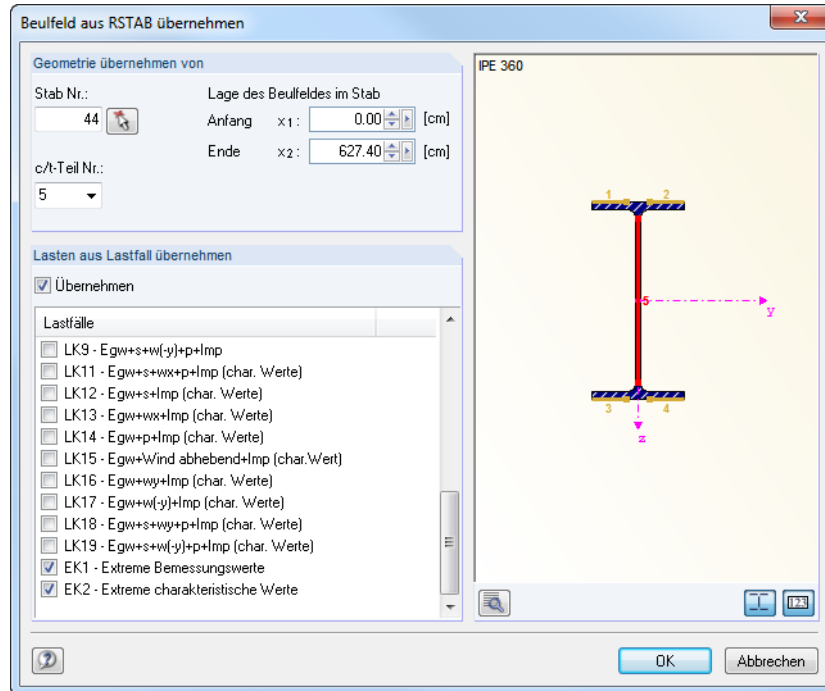
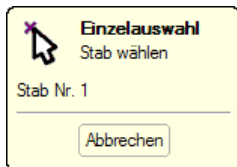



Bild 2.14: Dialog *Beulfeld aus RSTAB übernehmen*



Mit der Schaltfläche  kann ein *Stab* grafisch im Arbeitsfenster des Hauptprogramms durch Anklicken ausgewählt werden. Mit dem Anklicken des Stabes wird dessen Nummer in den Dialog eingetragen.

Falls die geometrischen Verhältnisse im Stab nicht den Vorgaben der Maske 1.1 *Basisangaben* entsprechen, erfolgt beim endgültigen Verlassen des Dialogs eine Abfrage, ob die Abmessungen des Beulfeldes entsprechend geändert werden sollen.

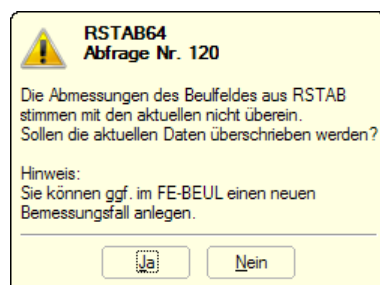



Bild 2.15: Abfrage bei Übernahme eines Beulfeldes

Das relevante Beulfeld kann in der Liste *c/t-Teil Nr.* oder in der Querschnittsgrafik durch Anklicken ausgewählt werden. Diese Vorgaben werden wie oben beschrieben mit den geometrischen Beulfeld-Parametern der Maske 1.1 *Basisangaben* abgeglichen.

Mit der Schaltfläche  unterhalb der Profilgrafik sind nähere Informationen zu den *c/t-Teilen* aufrufbar (siehe Bild 2.16).



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

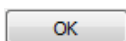
c/t-Teil Nr.	A Gelagert Form	B c [mm]	C t [mm]	D c/t [-]	E Koordinaten Anfang y [mm]	F Koordinaten Anfang z [mm]	G Koordinaten Ende y [mm]	H Koordinaten Ende z [mm]	I Mittlere statische Momente S <sub>y</sub> [cm <sup>3</sup> ]	J Mittlere statische Momente S <sub>z</sub> [cm <sup>3</sup> ]
1	Einseitig	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 2.16: Dialog c/t Teile eines Schweißprofils

Im Abschnitt *Lasten aus Lastfall übernehmen des Beulfeld-Dialogs* (siehe Bild 2.14) kann unter den RSTAB/RFEM-Lastfällen die Belastung des Beulfeldes ausgewählt werden. Auch eine Mehrfachauswahl von Lastfällen oder Kombinationen ist möglich.



Nach dem Bestätigen des Dialogs mit [OK] wird bei nicht berechneten Lastfällen automatisch die Berechnung eingeleitet.

## Grafikfenster



Über die Schaltfläche [Schema oder Rendering] kann die Darstellung im Grafikfenster festgelegt werden. Neben dem Beulfeld-Schema mit den Spannungsgrafiken ist auch ein 3D-Rendering des Beulfeldes möglich.

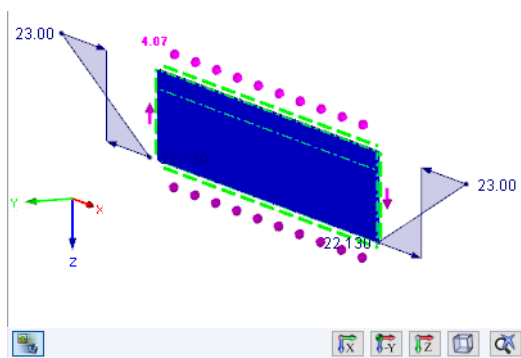


Bild 2.17: Beulfeld im Rendering (Ausschnitt)



Bei der Rendering-Anzeige des Beulfeldes kann die Ansicht mit den links dargestellten Schaltflächen gesteuert werden.



Durch Drehen des Scrollrades lässt sich die aktuelle Darstellung vergrößern bzw. verkleinern. Als Zentrum des Zoombereichs wird immer die Position des Mauszeigers angenommen.



Mit gedrücktem Scrollrad kann das Beulfeld-Modell direkt verschoben werden. Wird dabei zusätzlich die [Strg]-Taste gedrückt, kann das Beulfeld gedreht werden. Das Rotieren ist auch mit dem Scrollrad und gedrückter rechter Maustaste möglich. Die am Mauszeiger angezeigten Symbole verdeutlichen die gewählte Funktion.

# 3 Berechnung

Details...

Vor der Berechnung empfiehlt es sich, die Bemessungsdetails zu überprüfen. Der entsprechende Dialog ist in jeder Maske von FE-BEUL über die Schaltfläche [Details] zugänglich.

## 3.1 Details EN 1993-1-5

Bild 3.1: Dialog Details - DIN EN 1993-1-5/NA:2010-12

## FEM-Modell für Steifen

Das Kontrollfeld steuert, nach welchen Konventionen die Beulsteifen Einfluss auf die Berechnung der Beulfigur nehmen. Bei den Einstellungen *Flächenelemente* und *Stäbe (mit Exzentrizität)* gehen die tatsächlichen Steifigkeiten der Steifen als 3D-Modell in die Berechnung ein. Bei der Einstellung *Stäbe (ohne Exzentrizität)* wird die Steife nur als 2D-Linienelement mit erhöhten Steifigkeiten in der Plattenebene berücksichtigt, d. h. ohne Berücksichtigung des exzentrischen Anschlusses.

Mit den beiden 3D-Optionen kann die Wirksamkeit der Steifenprofile besser für die Ausnutzung berücksichtigt werden. Das Stabmodell ohne Exzentrizität hingegen bietet den Vorteil einer deutlich verkürzten Berechnungsdauer.

## Eigenwert-Löser

Die Beulfiguren einer Platte werden durch eine Eigenwertberechnung des Beulfeldes bestimmt. Dabei werden die idealen Beulwerte für  $\sigma_x, \sigma_z, \tau$  und der ideale Beulwert für gleichzeitige Wirkung aller Spannungskomponenten berechnet. Hierzu stehen drei direkte Gleichungslöser (*Lanczos-Methode*, *Wurzeln des charakteristischen Polynoms*, *Unterraum-Iterationsmethode*) und ein iterativer Gleichungslöser (*ICG-Iterationsmethode*) zur Auswahl.

Die direkten Gleichungslöser sind für kleine und mittelgroße Modelle zu empfehlen. Voraussetzung ist, dass der Arbeitsspeicher ausreichend groß für die Daten der Dreieckszerlegung ist. Die *Lanczos-Methode* ist voreingestellt, da sie sich für die meisten Modelle eignet. Weitere Informationen zu diesem Algorithmus 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 Modellen 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 *Auswertung berücksichtigt 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.

## Belastung der Beulsteifen

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

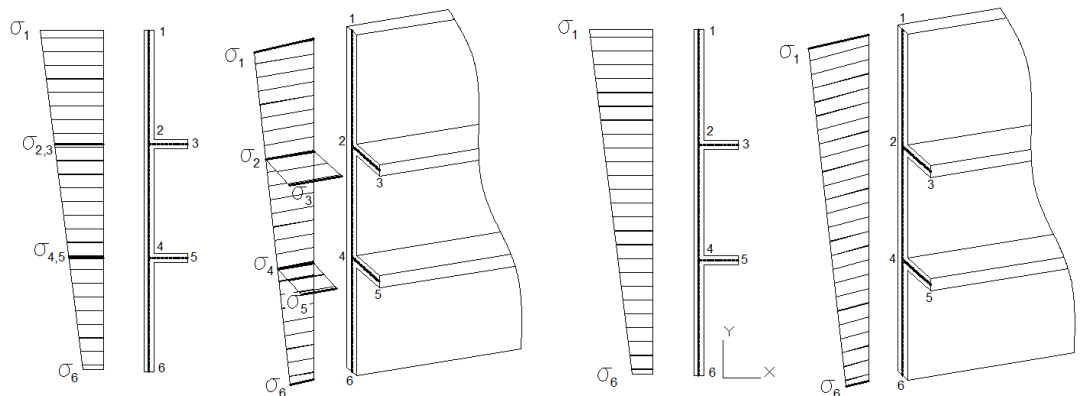
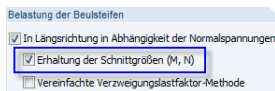


Bild 3.2: Längsspannungen auf Beulfeld und Steifen (links) oder nur auf Beulfeld (rechts)

## 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 unter Annahme einer linearen Spannungsverteilung zurückgerechnet.

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

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

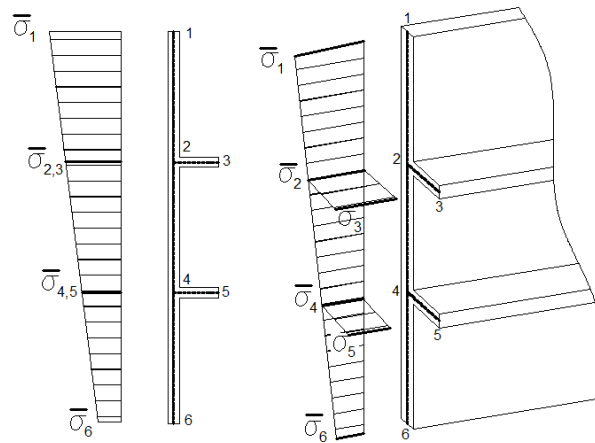
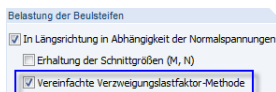


Bild 3.3: Längsspannungen für Beulfeld und Längssteifen unter *Erhaltung der Schnittgrößen (M, N)*

### 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 [3] vorgestellt.

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

$$F_2 = \int_{L_2/2}^{L_3/2} \sigma(x) t dz + A_{\text{Steife}_2} \cdot \sigma_{4,5}$$

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

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

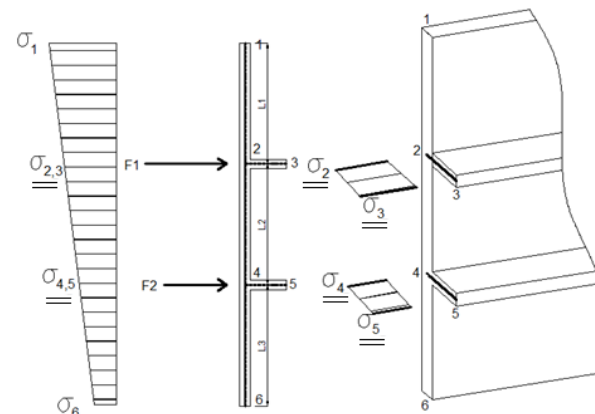


Bild 3.4: Längsspannungen für Beulfeld und Längssteifen bei *Vereinfachter Verzweigungslastfaktor-Methode*



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 besteht in der Norm [1] die Möglichkeit, entweder eine *Allgemeine Beulkurve* für den gesamten Nachweis oder *Verschiedene Beulkurven* für jede vorhandene Spannung anzusetzen.

## Kritische Beulspannungen für versteifte Platten

Der Anhang A der EN 1993-1-5 beinhaltet analytische Verfahren zur Ermittlung der kritischen Beulspannung. Dabei werden folgenden Varianten behandelt:

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

Ist die Option *Nach Anhang (A.1; A.2; A.3)* ausgewählt, so untersucht FE-BEUL die Steifen- und Belastungssituation und berechnet die kritische Beulspannung nach der maßgebenden Variante. Falls die nötigen Restriktionen nicht erfüllt sind, werden automatisch die Beulwerte *Nach Eigenwertberechnung* (FE-Methode) ermittelt und damit die Beulspannung berechnet.

## Solver-Version

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

## FEM-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 finiten Elemente zu erhöhen. Damit ist aber auch ein erhöhter Berechnungsaufwand verbunden.

*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 der Abminderungsfaktoren

Um den *Beitrag des Steges*  $\chi_w$  nach Tabelle 5.1 [1] für die Ermittlung des Beiwerts zu ermitteln, bietet FE-BEUL die Auswahl zwischen einer starren und einer verformbaren Auflagersteife.

In [1] Anhang B.1 ist die Ermittlung der Abminderungsfaktoren für das Plattenbeulen beschrieben. Die *Zahlenwerte nach Tabelle B.1* unterscheiden sich dabei nach geschweißten oder kaltgeformten und warmgewalzten Produkten.

## Ermittlung des Beulwertes

Dieser Abschnitt steuert, nach welchem Verfahren die Beulwerte berechnet werden: analytisch nach *Norm-Formeln* oder nach *FE-Methode*. Wenn Beulsteifen im Modell vorhanden sind, benutzt FE-BEUL immer die Option *Immer nach der FE-Methode berechnen* zur Ermittlung des Beulwerts.

Bei der Ermittlung des Beulwertes nach der FE-Methode kann der Verzweigungslastfaktor entweder aus der FEM-Analyse übernommen oder analytisch nach [1] Gleichung 10.6 ermittelt werden. In einigen Anwendungsfällen führt dies zu einer wirtschaftlicheren Bemessung des Beulfeldes.

Die verwendete Methode zur Ermittlung des Beulwerts und des Verzweigungslastfaktors wird in den Ergebnismasken unter den *Details* angegeben.

## Abstand zwischen Steifen

Das Kontrollfeld bietet die Möglichkeit, den *Mindestabstand* zwischen den Steifen auf  $30 \cdot \varepsilon \cdot t$  festzusetzen (mit  $\varepsilon$  als Faktor in Abhängigkeit von  $f_y$ ). Falls diese Bedingung nicht eingehalten ist, erscheint bei der Eingabe in Maske 1.2 *Beulsteifen* eine entsprechende Meldung.

Der Mindestabstand  $a_{min}$  der Steifen kann auch benutzerdefiniert vorgegeben werden.

## Beulsteifen in Längsrichtung - Knickstabähnliches Verhalten

Das Kontrollfeld steuert, ob Beulsteifen, die kürzer als das Beulfeld sind, für die Nachweise der Steife nach [1] Abschnitt 9 angesetzt und bei der Ermittlung der Abminderungsfaktoren für das knickstabähnliche Verhalten berücksichtigt werden.

### 3.2 Details DIN 18800

Bild 3.5: Dialog Details - DIN 18800



Die Abschnitte *FE-Modell für Steifen*, *Eigenwerte*, *Solver-Version*, *FE-Diskretisierung* und *Ermittlung des Beulwertes* sind im [Kapitel 3.1](#) beschrieben.

### Grenzbeulspannung mit Knickeinfluss

Das Kontrollfeld *Knickeinfluss nach El. (503), Gl. (13) 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.

Mit dem Anhaken des Kontrollfeldes werden die Felder zur Eingabe der Parameter zugänglich.

Die Schaltfläche ermöglicht den Zugriff auf eine umfangreiche Profildatenbank, in der der relevante *Querschnitt* ausgewählt werden kann.

Im Zusatzmodul FE-BEUL lassen sich mit der Schaltfläche die Querschnittswerte und Länge eines Stabes auch aus dem Arbeitsfenster von RFEM oder RFEM übernehmen. Die Angaben zum *Ausweichen rechtwinklig zur Achse y* werden dann automatisch eingetragen. Es ist aber auch jederzeit eine manuelle Definition von Knicklänge, Trägheitsradius und Knickspannungslinie möglich.

## 3.3 Berechnung

Berechnung

In jeder Eingabemaske von FE-BEUL ist es möglich, die [Berechnung] über die gleichnamige Schaltfläche zu starten.

Der Ablauf der Berechnung kann anschließend in einem Dialog verfolgt werden.

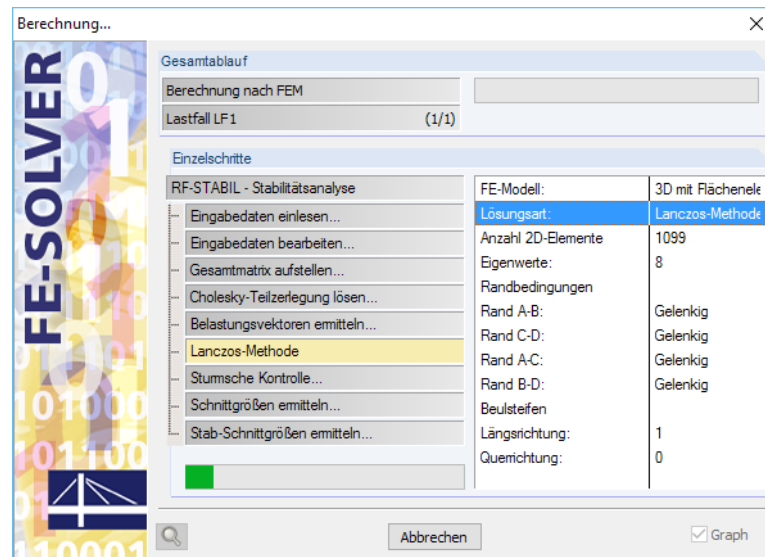


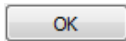
Bild 3.6: Dialog Berechnung

# 4 Ergebnisse

Unmittelbar nach der Berechnung erscheint die Maske **2.1 Maßgebender Lastfall** (siehe Bild 4.1).



Die Ergebnisse der Bemessung sind in den Ergebnismasken 2.1 bis 2.5 nach verschiedenen Kriterien sortiert. Jede Maske lässt sich durch Anklicken des Eintrags im Navigator direkt ansteuern. Mit den links dargestellten Schaltflächen wird die vorherige bzw. nächste Maske eingestellt. Das Blättern durch die Masken ist auch mit den Funktionstasten [F2] und [F3] möglich.



[OK] sichert die Ergebnisse und beendet das Programm FE-BEUL bzw. bewirkt eine Rückkehr zum Arbeitsfenster von RFEM oder RSTAB.

Dieses Kapitel stellt die Ergebnismasken der Reihe nach vor. Die Auswertung und Kontrolle der Resultate ist im Kapitel 5 ab Seite 28 beschrieben.

## 4.1 Maßgebender Lastfall

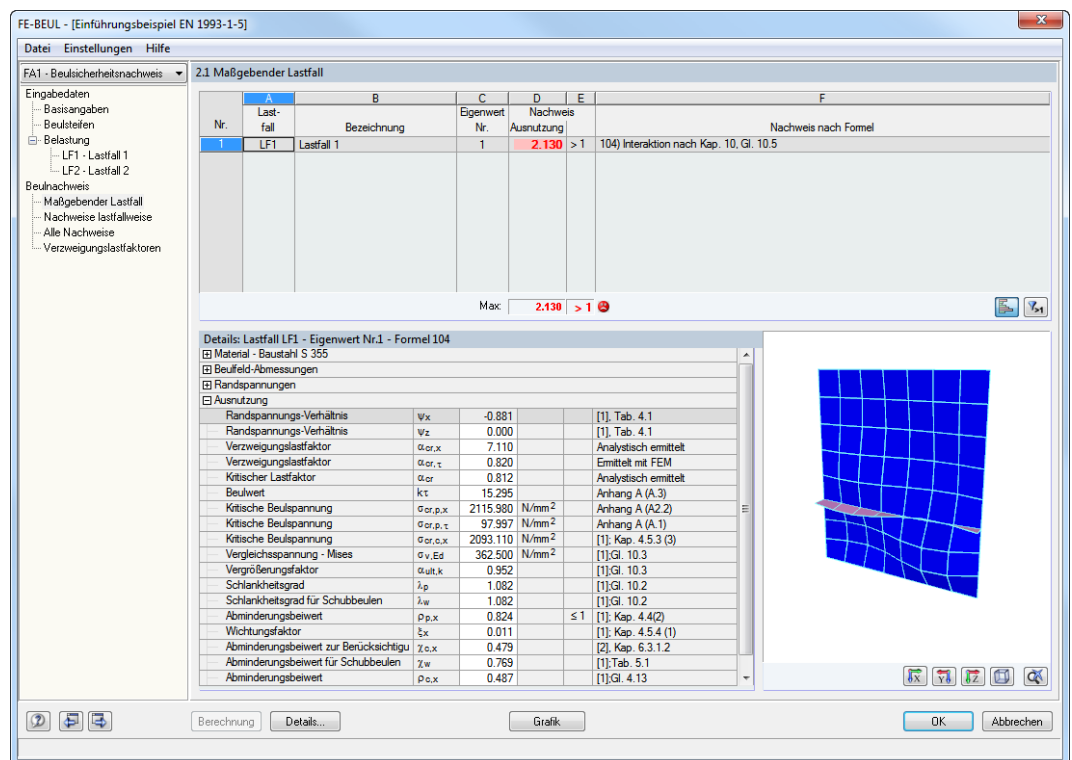


Bild 4.1: Maske 2.1 Maßgebender Lastfall

## Lastfall / Bezeichnung

In diesen beiden Spalten wird die Nummer und Bezeichnung des Lastfalls angegeben, der bei den geführten Nachweisen maßgebend ist.

## Eigenwert Nr.

Für den maßgebenden Lastfall wird die Nummer des Eigenwertes (Beulfigur) angegeben, der zur größten Ausnutzung führt.



## Nachweis

Für jede Nachweisart werden die Nachweisbedingungen gemäß EN 1993-1-5 [1] bzw. DIN 18800 [2] untersucht. In dieser Spalte erscheint der größte Quotient als maximale Ausnutzung.

## Nachweis nach Formel

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

## Details

Im Maskenabschnitt unterhalb werden die Zwischenergebnisse des maßgebenden Nachweises angezeigt. Dabei wird auch auf die relevanten Abschnitte oder Gleichungen der Norm verwiesen.

## Grafikfenster



Das Grafikfenster zeigt das bemessene Beulfeld im 3D-Rendering an. Mit den links dargestellten Schaltflächen kann die Ansicht gesteuert werden.



Durch Drehen des Scrollrades lässt sich die aktuelle Darstellung vergrößern bzw. verkleinern. Als Zentrum des Zoombereichs wird immer die Position des Mauszeigers angenommen.



Mit gedrücktem Scrollrad kann das Beulfeld-Modell direkt verschoben werden. Wird dabei zusätzlich die [Strg]-Taste gedrückt, kann das Beulfeld gedreht werden. Das Rotieren ist auch mit dem Scrollrad und gedrückter rechter Maustaste möglich. Die am Mauszeiger angezeigten Symbole verdeutlichen die gewählte Funktion.

## 4.2 Nachweise lastfallweise

2.2 Nachweise lastfallweise

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 (8)

Max: 2.130 > 1

Details: Lastfall LF1 - Eigenwert Nr.1 - Formel 104

- Material - Baustahl S 355
- Beulfeld-Abmessungen
- Randspannungen
- Ausnutzung

Parameter	Wert	Referenz
Randspannungs-Verhältnis $\psi_x$	-0.881	[1], Tab. 4.1
Randspannungs-Verhältnis $\psi_z$	0.000	[1], Tab. 4.1
Verzweigungslastfaktor $\alpha_{cr,x}$	7.110	Analysisch ermittelt
Verzweigungslastfaktor $\alpha_{cr,z}$	0.820	Ermittelt mit FEM
Kritischer Lastfaktor $\alpha_{cr}$	0.812	Analysisch 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 (A.2.2)
Kritische Beulspannung $\sigma_{cr,p,z}$	97.997 N/mm <sup>2</sup>	Anhang A (A.1)
Kritische Beulspannung $\sigma_{cr,c,x}$	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 [1], Kap. 4.4(2)
Wichtungsfaktor $\xi_x$	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 Lastfälle auf, die für die Bemessung definiert wurden.

Max: 0.96 ≤ 1

Die farbigen Balken veranschaulichen die Ausnutzungen infolge der einzelnen Lastfälle.

## 4.3 Nachweise eigenwertweise

### Eigenwert-Löser

#### Lösungsart:

- ☒ Lanczos-Methode
- ☐ Wurzeln des charakteristischen Polynoms
- ☐ Unterraum-Iterationsmethode
- ☐ ICG-Iterationsmethode
- ☒ Auswertung berücksichtigt für alle Eigenwerte

Diese Ausgabemaske wird angezeigt, wenn im Dialog *Details*-Dialogs das Kontrollfeld *Auswertung berücksichtigt für alle Eigenwerte* angehakt wurde (siehe Bild 3.1, Seite 17). FE-BEUL berechnet die Nachweise für die vorgegebene Anzahl der Eigenformen.

2.3 Nachweise eigenwertweise

Nr.	A Eigenwert Nr.	B Bezeichnung	C Last- fall	D Nachweis Ausnutzung	E	F Nachweis nach Formel
1	1	Lastfall 1	LF1	1.777	> 1	104) Interaktion nach Kap. 10, Gl. 10.5
2	2			1.719	> 1	104) Interaktion nach Kap. 10, Gl. 10.5
3	3			1.391	> 1	104) Interaktion nach Kap. 10, Gl. 10.5
4	4			1.340	> 1	104) Interaktion nach Kap. 10, Gl. 10.5

Max: 1.777 > 1

Details: Lastfall LF1 - Eigenwert Nr.1 - Formel 104

- Material - Baustahl S 355
- Beulfeld-Abmessungen
- Randspannungen
- Ausnutzung

Randspannungs-Verhältnis	$\psi_x$	-0.881		[1], Tab. 4.1
Randspannungs-Verhältnis	$\psi_z$	0.000		[1], Tab. 4.1
Verzweigungslastfaktor	$\alpha_{cr,x}$	1.910		Ermittelt mit FEM
Verzweigungslastfaktor	$\alpha_{cr,z}$	1.514		Ermittelt mit FEM
Kritischer Lastfaktor	$\alpha_{cr}$	1.178		Analytisch ermittelt
Beulwert	$k_x$	88.691		Ermittelt mit FEM
Beulwert	$k_z$	28.228		Ermittelt mit FEM
Kritische Beulspannung	$\sigma_{cr,p,x}$	568.276	N/mm <sup>2</sup>	Ermittelt mit FEM
Kritische Beulspannung	$\sigma_{cr,p,z}$	180.867	N/mm <sup>2</sup>	Anhang A (A.1)
Kritische Beulspannung	$\sigma_{cr,c,x}$	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	$\lambda_p$	0.899		[1], Gl. 10.2
Schlankheitsgrad für Schubbeulen	$\lambda_w$	0.899		[1], Gl. 10.2
Abminderungsbeiwert	$\rho_{p,x}$	0.968	≤ 1	[1], Kap. 4.4(2)
Abminderungsbeiwert zur Berücksichtigung	$\chi_{c,x}$	0.583		[2], Kap. 6.3.1.2
Abminderungsbeiwert für Schubbeulen	$\chi_w$	0.923		[1], Tab. 5.1
Abminderungsbeiwert	$\rho_{c,x}$	0.583		[1], Gl. 4.13

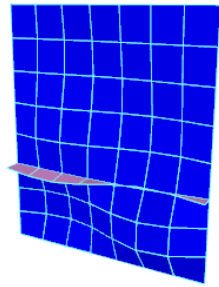


Bild 4.3: Maske 2.3 Nachweis eigenwertweise

In Maske 2.3 werden die Nachweise des maßgebenden Lastfall ausgegeben, die mit den jeweiligen Eigenformen vorliegen.

## 4.4 Alle Nachweise

In dieser Maske werden die Ergebnisse sämtlicher Nachweise mit Verweisen auf die Norm ([1] bzw. [2]) ausgegeben. Die Auflistung erfolgt nach Lastfällen geordnet.

2.4 Alle Nachweise

Nr.	Lastfall	Bezeichnung	Eigenwert Nr.	Nachweis Ausnutzung	Nachweis nach Formel
1	LF1	Lastfall 1	1	0.056 ≤ 1	104) Interaktion nach Kap. 10, Gl. 10.5
2				0.248 ≤ 1	105) Spannungsnachweis der Steife nach Kap. 9.2.1 (4)
3				0.515 ≤ 1	106) Verformungsnachweis der Steife nach Kap. 9.2.1 (4)
4				1.576 > 1	107) Drillknicken von Steifen nach Kap. 9.2.1 (8)
5	LF2	Lastfall 2		0.089 ≤ 1	104) Interaktion nach Kap. 10, Gl. 10.5
6				0.661 ≤ 1	105) Spannungsnachweis der Steife nach Kap. 9.2.1 (4)
7				0.541 ≤ 1	106) Verformungsnachweis der Steife nach Kap. 9.2.1 (4)
8				1.576 > 1	107) Drillknicken von Steifen nach Kap. 9.2.1 (8)

Max: 1.576 > 1

Details: Lastfall LF1 - Eigenwert Nr.1 - Formel 104

- Material - Baustahl S 235
- Beulfeld-Abmessungen
- Randspannungen
- Ausnutzung

Randspannungs-Verhältnis	$\psi_x$	0.000	[1], Tab. 4.1
Randspannungs-Verhältnis	$\psi_z$	1.000	[1], Tab. 4.1
Verzweigungslastfaktor	$\alpha_{cr,z}$	96.740	Ermittelt mit FEM
Kritischer Lastfaktor	$\alpha_{cr}$	96.740	Analytisch ermittelt
Beulwert	$k_z$	12.742	Ermittelt mit FEM
Kritische Beulspannung	$\sigma_{cr,p,z}$	96.74 kN/cm <sup>2</sup>	Ermittelt mit FEM
Kritische Beulspannung	$\sigma_{cr,c,z}$	83.01 kN/cm <sup>2</sup>	[1], Kap. 4.5.3 (3)
Vergleichsspannung - Mises	$\sigma_{v,Ed}$	1.00 kN/cm <sup>2</sup>	[1], Gl. 10.3
Vergrößerungsfaktor	$\alpha_{ult,k}$	22.500	[1], Gl. 10.3
Schlankheitsgrad	$\lambda_p$	0.482	[1], Gl. 10.2
Schlankheitsgrad für Schubbeulen	$\lambda_w$	0.482	[1], Gl. 10.2
Abminderungsbeiwert	$\rho_{p,z}$	1.000	≤ 1 [1], Kap. 4.4(2)
Wichtungsfaktor	$\xi_z$	0.165	[1], Kap. 4.5.4 (1)
Abminderungsbeiwert zur Berücksichtigung	$\chi_{c,z}$	0.819	[2], Kap. 6.3.1.2
Abminderungsbeiwert für Schubbeulen	$\chi_w$	1.200	[1], Tab. 5.1
Abminderungsbeiwert	$\rho_{c,z}$	0.874	[1], Gl. 4.13
Interaktion	$\eta$	0.056	≤ 1 [1], Gl. 10.5

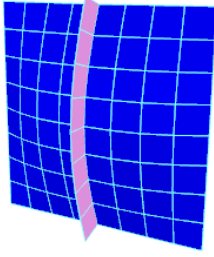


Bild 4.4: Maske 2.4 Alle Nachweise

Die Nachweise nach EN 1993-1-5 beinhalten den Interaktionsnachweis des Beulfeldes sowie alle Nachweise, die für die Bemessung der ggf. vorhandenen Steifen notwendig sind.

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

## 4.5 Verzweigungslastfaktoren

2.5 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	3.99269	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 gibt für alle Lastfälle die Verzweigungslastfaktoren aus, die sich aus den Randspannungen  $\sigma_x$ ,  $\tau$  und  $\sigma_z$  (bzw.  $\sigma_y$  für [2]) ergeben.

Die Verzweigungslastfaktoren werden getrennt nach Einwirkung für alle Eigenwerte (Beulformen) aufgelistet.

# 5 Ergebnisauswertung

## 5.1 Ergebnismasken

Anhand der Struktur der Ergebnismasken lassen sich die Ergebnisse nach bestimmten Kriterien (Lastfälle, Eigenwerte, Nachweise) filtern.

Für die Ergebnisauswertung sind auch die Schaltflächen unterhalb der Tabelle hilfreich.

2.2 Nachweise lastfallweise

Nr.	Lastfall	Bezeichnung	Eigenwert Nr.	Nachweis Ausnutzung	Nachweis nach Formel
1	LF1		1	2.130	> 1

Max: 2.130 > 1

Details: Lastfall LF1 - Eigenwert Nr.1 - Formel 104

- Beulfeld-Abmessungen
- Randspannungen
- Ausnutzung

Parameter	Wert	Einheit	Referenz
Randspannungs-Verhältnis $\psi_x$	-0.881		[1], Tab. 4.1
Randspannungs-Verhältnis $\psi_z$	0.000		[1], Tab. 4.1
Verzweigungslastfaktor $\alpha_{or,x}$	7.110		Analytisch ermittelt
Verzweigungslastfaktor $\alpha_{or,z}$	0.820		Ermittelt mit FEM
Kritischer Lastfaktor $\alpha_{or}$	0.812		Analytisch ermittelt
Beulwert $k_T$	15.295		Anhang A (A.3)
Kritische Beulspannung $\sigma_{or,p,x}$	2115.980	N/mm <sup>2</sup>	Anhang A (A2.2)
Kritische Beulspannung $\sigma_{or,p,z}$	97.997	N/mm <sup>2</sup>	Anhang A (A.1)
Kritische Beulspannung $\sigma_{or,c,x}$	2093.110	N/mm <sup>2</sup>	[1], 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 $\xi_x$	0.011		[1], 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
Interaktion $\eta$	2.130		[1], Gl. 10.5

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 Grafik der Beulfiguren

Grafik

Die Beulfiguren lassen sich nicht nur im Grafikbereich der Ergebnismasken überprüfen (siehe Bild 5.1), sondern auch als bildschirmfüllende Darstellung in einem separaten Fenster visualisieren. Klicken Sie hierzu auf die Schaltfläche [Grafik]. Sie ist in jeder Maske von FE-BEUL verfügbar.

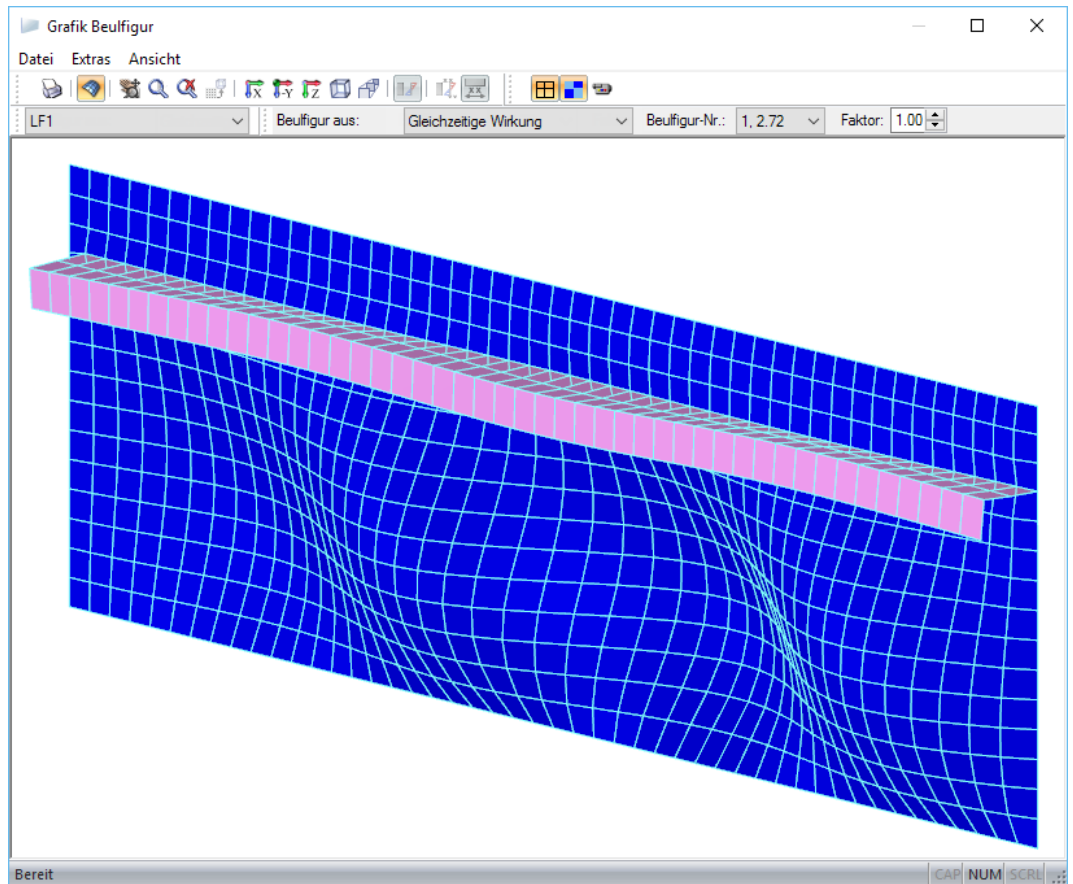


Bild 5.2: Grafikfenster mit Beulfigur

Im Fenster *Grafik Beulfigur* können verschiedene Einwirkungen auf das Beulfeld, unterschiedliche Lastfälle sowie verschiedene Beulfiguren dargestellt werden. Die Listen in der Symbolleiste bieten die entsprechende Auswahl.

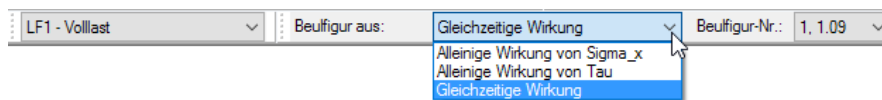



Bild 5.3: Auswahl der Randspannungen für Beulfigur



Über das Menü *Ansicht* oder die entsprechenden Funktionen in der Symbolleiste lässt sich die Darstellung steuern. Die links dargestellten Schaltflächen ermöglichen es, das Beulfeld in unterschiedlichen Perspektiven zu betrachten.

Mit der Schaltfläche  kann die Greiffunktion zur Steuerung der Grafik aktiviert werden. Damit 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 wird die Ansicht gedreht.






Durch Drehen des Scrollrades lässt sich die Grafik ebenfalls vergrößern bzw. verkleinern. Ferner kann mit gedrücktem Scrollrad das Beulfeld-Modell verschoben werden. Wird dabei zusätzlich die [Strg]-Taste gedrückt, kann das Beulfeld gedreht werden. Die am Mauszeiger angezeigten Symbole verdeutlichen die gewählte Funktion.

Das Feld *Faktor* ermöglicht es, die Beulfiguren überhöht darzustellen. Auf diese Weise lassen sich Bereiche mit kleinen Verformungen besser überprüfen.



Die [Animation] der Beulformen ist manchmal hilfreich, um das Beultragverhalten ausgereifter Platten zu bewerten.

Mit der Schaltfläche  kann die Darstellung des FE-Netzes ein- und ausgeblendet werden. Die Schaltfläche  steuert, ob die Flächen des Beulfeldes und der Steifen in der Grafik dargestellt werden.

Falls ein Lastfall noch nicht berechnet ist, zeigt die Grafik die Belastung des Beulfeldes an. Aber auch nach der Berechnung ist es mit der Schaltfläche  möglich, zwischen den Grafiken der Belastung und der Beulfigur zu wechseln.

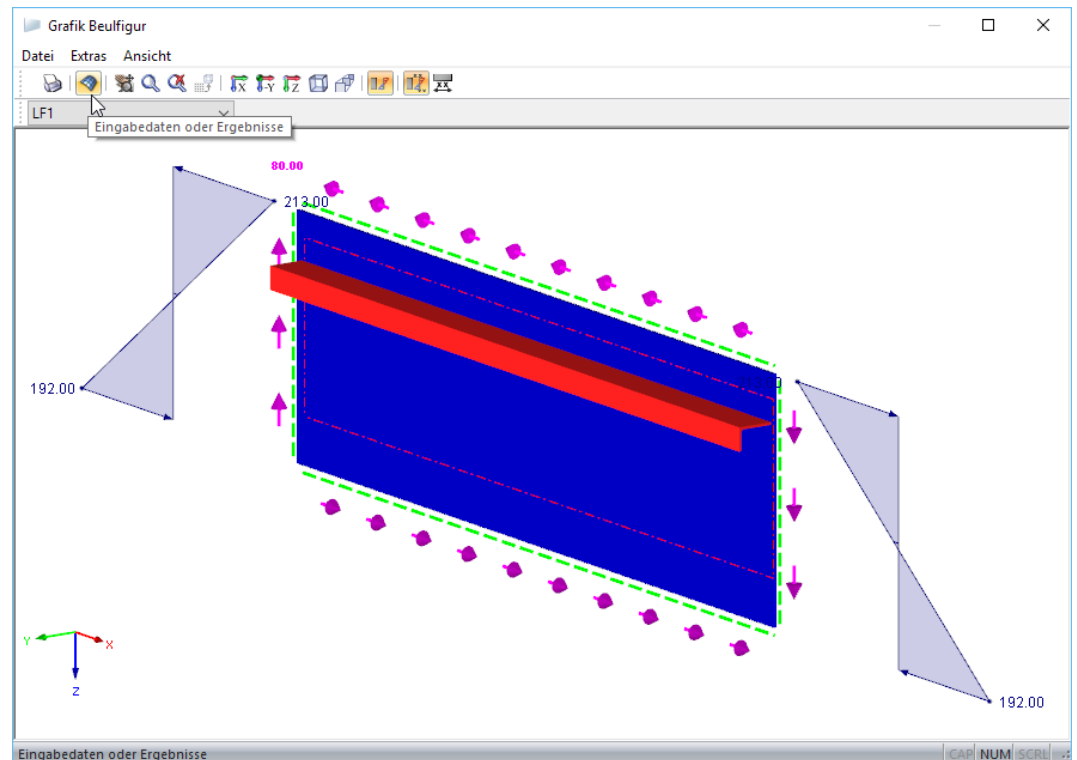


Bild 5.4: Grafik mit Belastung



Mit der Schaltfläche [Drucken] kann die aktuelle Darstellung direkt ausgedruckt, in die Zwischenablage oder in das Ausdruckprotokoll übergeben werden. Diese Funktion ist im [Kapitel 6.5](#) auf [Seite 41](#) beschrieben.

## 6 Ausdruck

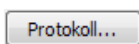
Die Eingabedaten und Ergebnisse von FE-BEUL werden nicht direkt zum Drucker geschickt. Vielmehr wird ein so genanntes Ausdruckprotokoll – eine Druckvorschau – erzeugt, das mit Grafiken, Erläuterungen, Scans etc. ergänzt werden kann (siehe [Bild 6.5, Seite 34](#)). In diesem Ausdruckprotokoll ist festzulegen, welche Daten für den Ausdruck relevant sind.

Es können mehrere Ausdruckprotokolle im Modell angelegt werden. Je nachdem, welche Daten benötigt werden, kann z. B. für die Prüfstatik ein anderes Protokoll zusammengestellt werden als für die Fertigung.

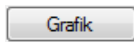
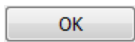


Das Ausdruckprotokoll kann nur geöffnet werden, wenn ein Standarddrucker installiert ist. Die Vorschau im Ausdruckprotokoll verwendet diesen Druckertreiber.

### 6.1 Ausdruckprotokoll



Im eigenständig lauffähigen Programm FE-BEUL kann ein neues Ausdruckprotokoll mit der Schaltfläche [Protokoll] angelegt werden.



Wurde FE-BEUL als Zusatzmodul in RFEM oder RSTAB gestartet, muss das Modul zunächst mit der Schaltfläche [OK] oder [Grafik] verlassen werden. In der RFEM/RSTAB-Oberfläche kann das Ausdruckprotokoll dann erzeugt werden über das Menü

**Datei → Ausdruckprotokoll öffnen**



oder die zugeordnete Schaltfläche in der Symbolleiste.

Wenn noch kein Ausdruckprotokoll existiert, erscheint der Dialog *Neues Ausdruckprotokoll*.

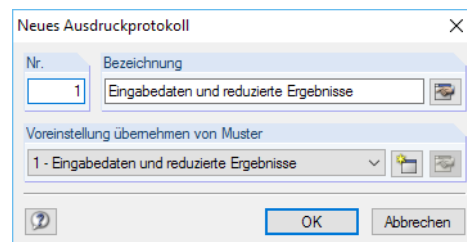


Bild 6.1: Dialog *Neues Ausdruckprotokoll*

Die *Nummer* des Protokolls ist voreingestellt, kann aber geändert werden. Für das Protokoll kann eine *Bezeichnung* angegeben werden, die die Auswahl erleichtert. Diese Bezeichnung erscheint nicht im Ausdruck.

In der Liste *Voreinstellung übernehmen von Muster* kann ein Musterprotokoll als Vorlage ausgewählt werden.

Die Schaltflächen im Dialog sind mit folgenden Funktionen belegt:



	Die Druckdaten können ausgewählt werden (→ <a href="#">Kapitel 6.2, Seite 32</a> ).
	Ein neues Musterprotokoll wird angelegt.

Tabelle 6.1: Schaltflächen im Dialog *Neues Ausdruckprotokoll*



## 6.2 Auswahl der Druckdaten

In einem Dialog können die Kapitel ausgewählt werden, die im Ausdruckprotokoll erscheinen sollen. Diese Funktion wird aufgerufen über das Ausdruckprotokoll-Menü

**Bearbeiten → Auswahl**



oder die links gezeigte Schaltfläche in der Symbolleiste des Ausdruckprotokolls.

Es erscheint der Dialog *Ausdruckprotokoll-Selektion* (siehe [Bild 6.2](#)).

### 6.2.1 Globale Selektion

Das Register *Globale Selektion* für FE-BEUL verwaltet die beiden Oberkapitel des Protokolls. Wenn hier ein Eintrag deaktiviert wird, verschwindet auch das zugehörige Detailregister.

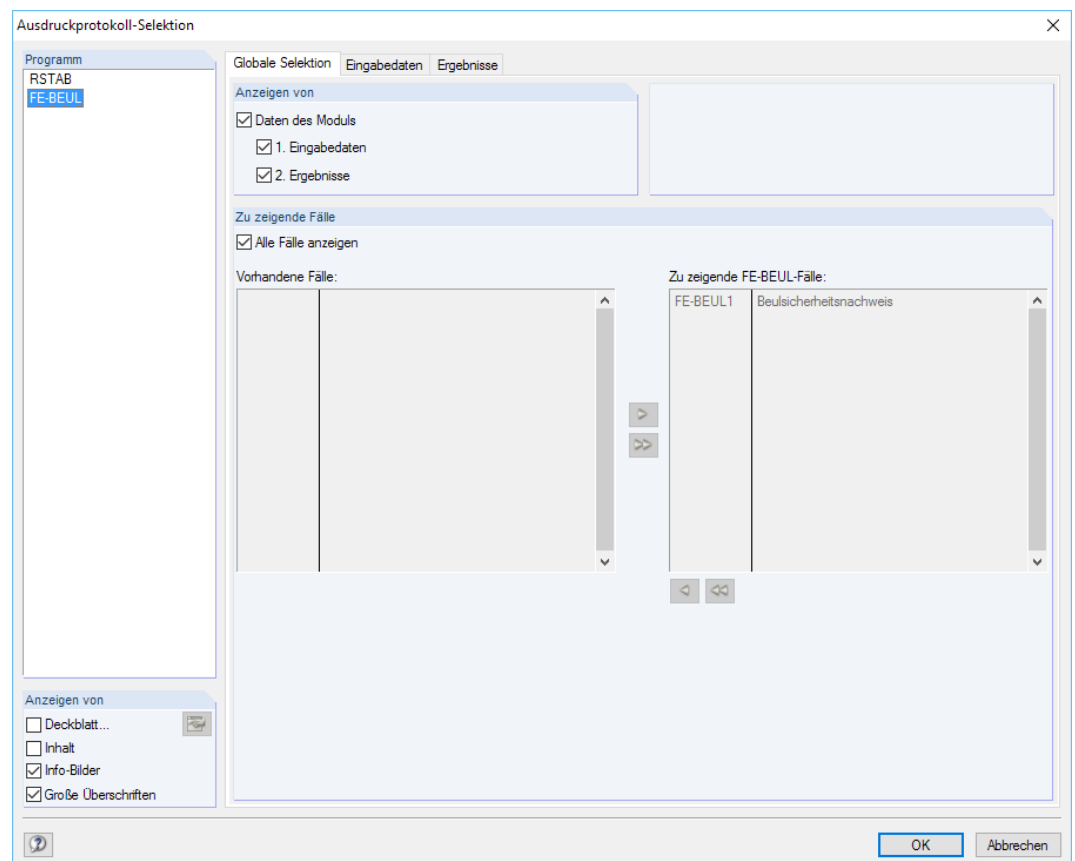


Bild 6.2: Dialog *Ausdruckprotokoll-Selektion*, Register *Globale Selektion* für FE-BEUL

Um nur die Eingabedaten und Ergebnisse des Zusatzmoduls FE-BEUL anzuzeigen, können die Basisangaben und Modelldaten über den Eintrag *RFEM* bzw. *RSTAB* deaktiviert werden.

Die Kontrollfelder im Abschnitt *Anzeigen von* steuern, ob ein *Deckblatt*, ein *Inhaltsverzeichnis*, kleine *Info-Bilder* in der Randspalte und *Große Überschriften* im Protokoll angezeigt werden.

## 6.2.2 Selektion der Eingabedaten

Das zweite Register für FE-BEUL steuert, welche Eingabedaten im Ausdruck erscheinen.

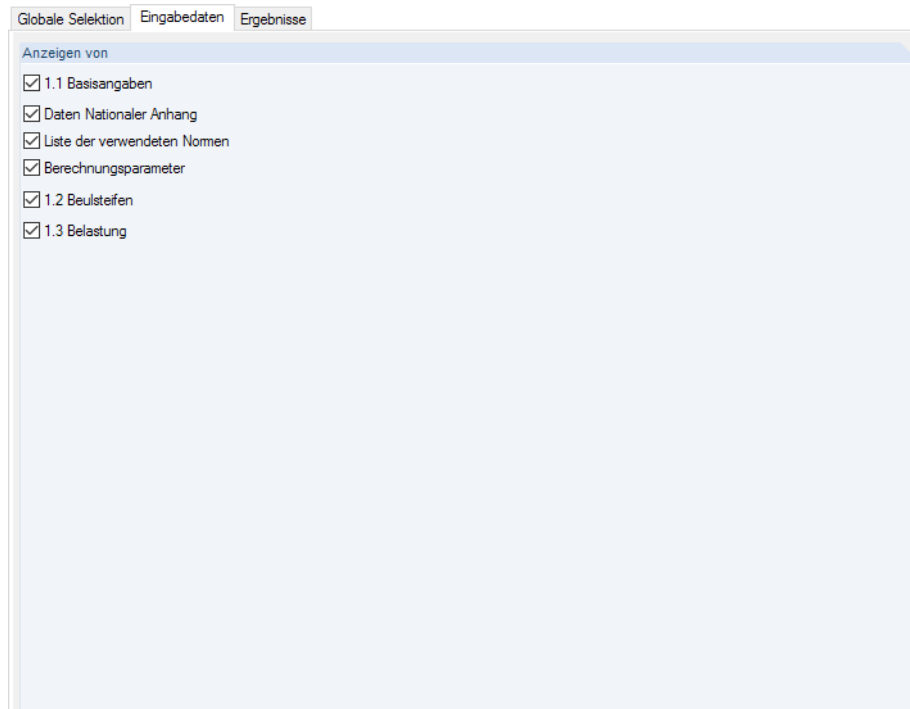


Bild 6.3: Dialog *Ausdruckprotokoll-Selektion*, Register *Eingabedaten*

## 6.2.3 Selektion der Ergebnisse

Der Umfang des Ausdrucks lässt sich über die Kontroll- und Auswahlfelder in diesem Register beeinflussen. Dadurch kann die Dokumentation reduziert oder erweitert werden.

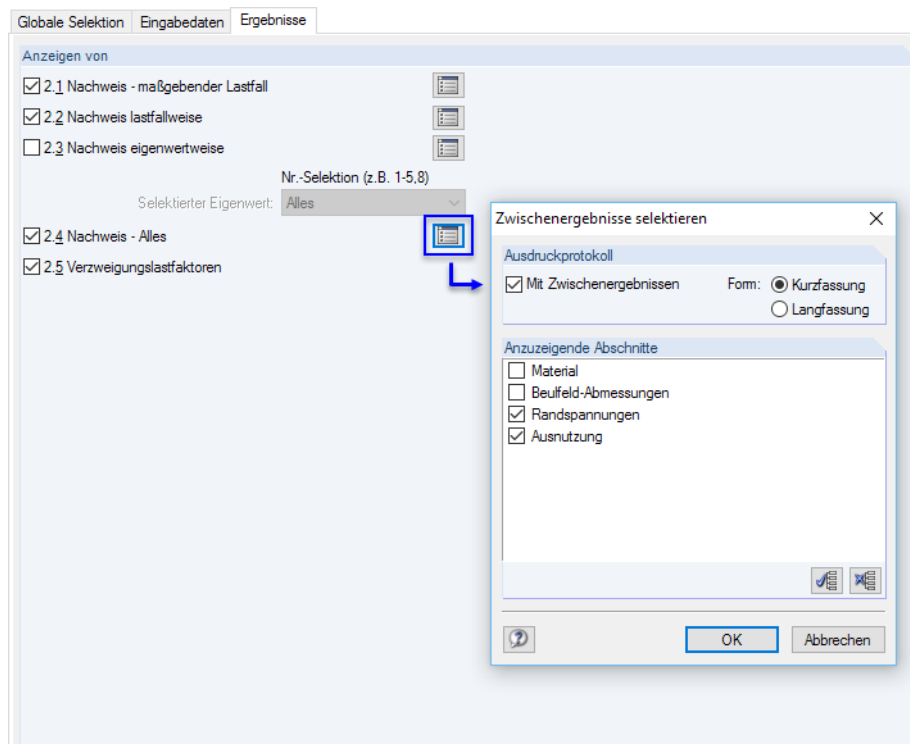


Bild 6.4: Dialog *Ausdruckprotokoll-Selektion*, Register *Ergebnisse*



Der Druckumfang der Ergebnisse kann über die Schaltflächen [Details] gesteuert werden, die für die einzelnen Nachweisarten zur Verfügung stehen.

Soll der Ausdruck auch *Mit Zwischenergebnissen* erstellt werden, so lassen sich diese in einer Liste gezielt festlegen und in Form einer *Kurzfassung* (kompakte Darstellung) oder *Langfassung* (Listendarstellung) dokumentieren.

## 6.3 Ausdruckprotokoll

Ist das Ausdruckprotokoll aufgebaut, wird links ein Navigator, rechts die Seitenansicht mit der Druckvorschau angezeigt.

**Ausdruckprotokoll - AP1: Eingabedaten und reduzierte Ergebnisse\***

File Ansicht Bearbeiten Einstellungen Einfügen Hilfe

**Ausdruckprotokollnavigator**

- Ausdruckprotokoll
  - FE-BEUL
    - FA1 - Beulsicherheitsnachweis
      - Basisangaben
        - 1.1.2 Beulfeld-Abmessungen
        - 1.1.3 Randbedingungen
        - 1.1.1 Material
      - Daten des Nationalen Anhangs
      - Verwendete Normen
      - Berechnungsparameter
      - Beulsteifen
        - 1.2.1 Beulsteifen in X-Richtung
      - Belastung
        - 1.3.1 Längs- und Schubspannung
      - Belastung - info
      - Beulnachweis
        - 2.1 Maßgebender Lastfall
        - 2.2 Nachweise lastfallweise
        - 2.4 Alle Nachweise
        - 2.5 Verzweigung

**1.1.2 BEULFELD-ABMESSUNGEN**

Seitenlänge	g (mm)	g (mm)	Seitenverhältnis	Beulhöhe	h (mm)
g (mm)	3000.0	534.0	5.62	12.0	

**1.1.3 RANDBEDINGUNGEN**

Rand	Rand	Rand	Rand
Übergang	Übergang	Übergang	Übergang

**1.1.1 MATERIAL**

Material	Bezeichnung	Beulhöhe	Beulhöhe	Querdehnung	Beugungswinkel
FE-BEUL	FA1	Beulsicherheitsnachweis	20000.00	0.300	37.33

**DATEN DES NATIONALEN ANHANGS**

11. DIN EN 1995-1-1 NA:2010-12: Deutschland  
 12. DIN EN 1995-1-1 NA:2010-12: Deutschland  
 13. Handbuch des BODS

**VERWENDETE NORMEN**

11. Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-5: Planarformige  
 12. Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-1: Allgemeine  
 13. Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-1: Allgemeine

**BERECHNUNGSPARAMETER**

Parameter	Wert
FE-Modell für Beulen	3D mit Flächenelementen
Eigenwertberechnung	Lineare Methode
Teilung für FE-Mesh	16
Anzahl der zugeordneten Bauteile	1
Bezeichnung für die Bauteile	
Bemessungswert	Immer nach der FE-Methode berechnen
Bemessung des Beulfeldes	Stärke Aufgabendate
Bemessung des Beulfeldes	Geschwindigkeit Langform
Bemessung des Beulfeldes	Verschiebung Beulformen

**1.2.1 BEULSTEIFEN IN X-RICHTUNG**

Beule	Lage (mm)	Typ	Parameter (mm)	Wirkende Beulsteifen (mm)
1	180.0	1	Winkelfeld	180.0x10.0

**1.3.1 LÄNGS- UND SCHUBSPANNUNGEN**

Lastrichtung	σ <sub>1</sub> (N/mm²)	σ <sub>2</sub> (N/mm²)	τ <sub>12</sub> (N/mm²)	τ <sub>21</sub> (N/mm²)
1	228.00	199.30	-1.118	96.00

**FE-BEUL**  
 FA1  
 Beulsicherheitsnachweis  
 DIN EN 1995-1-1 NA:2010-12

**RTAB 8.07.15 - Räumliche Stabwerke**

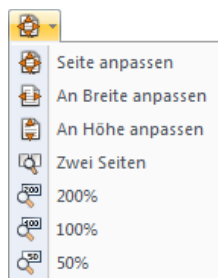
Seiten: 5 Seite: 1

Bild 6.5: Ausdruckprotokoll mit Kontextmenü im Navigator und Druckvorschau

## Navigation

Am einfachsten lässt sich ein Eintrag durch Anklicken des Kapitels im Navigator ansteuern.

Das Menü *Bearbeiten* bietet weitere Funktionen für die Navigation. Diese sind auch über die entsprechenden Schaltflächen in der Ausdruckprotokoll-Symbolleiste zugänglich.















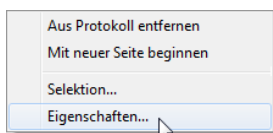
	In der Seitenvorschau wird eine Seite zurückgeblättert.
	Es wird eine Seite weitergeblättert.
	In der Seitenvorschau wird die erste Seite angezeigt.
	Es wird die letzte Seite angezeigt.
	In einem Dialog kann die Nummer einer bestimmten Seite angegeben werden.
	Die Darstellung in der Vorschau wird vergrößert.
	Die Darstellung in der Vorschau wird verkleinert.
	Listenschaltfläche <i>Zoomen</i> zur Anpassung der Darstellungsgröße
	Bewegmodus: Die Maus kann zur Navigation im Ausdruckprotokoll benutzt werden.
	Auswahlmodus: Per Mausclick können Kapitel selektiert und bearbeitet werden.
	Sofortaktualisierung: Änderungen im Navigator werden in der Vorschau dargestellt (siehe DLUBAL-Blog: <a href="https://www.dlubal.com/blog/19116">https://www.dlubal.com/blog/19116</a> ).

Tabelle 6.2: Navigations-Schaltflächen in der Symbolleiste des Ausdruckprotokolls

## Arrangement der Druckdaten

 **Ergebnisse**  
Symbol und Titel



Im Navigator können die Kapitel des Protokolls per Drag-and-drop beliebig angeordnet werden. Dabei ist Folgendes zu beachten: Wird ein Kapitel auf ein **Symbol** geschoben (im Bild links der Ordner), so wird es nach diesem Kapitel eingefügt. Wird es hingegen auf einen **Titel** (Text) geschoben, wird es als Unterkapitel eingefügt.

Zum Verschieben mehrerer Kapitel empfiehlt es sich, die [Sofortaktualisierung] auszuschalten.

Das Navigator-Kontextmenü (siehe Bild 6.5) bietet weitere Möglichkeiten zur Anpassung des Ausdruckprotokolls. Es lässt sich mit einem Rechtsklick auf ein bestimmtes Kapitel aufrufen. Wie in Windows üblich, ist eine Mehrfachselektion von Kapiteln mit den Tasten [Strg] und [↑] möglich.

### Aus Protokoll entfernen

Das markierte Kapitel wird gelöscht. Soll es wieder in das Protokoll eingefügt werden, ist dies über die Selektion möglich: Menü *Bearbeiten* → *Auswahl*.

### Mit neuer Seite beginnen



Mit diesem Kapitel wird eine neue Seite begonnen. Im Navigator ist das Kapitel mit einem roten Pin gekennzeichnet.

### Selektion

Es wird der Dialog *Ausdruckprotokoll-Selektion* aufgerufen, der im Kapitel 6.2 beschrieben ist. Das gewählte Kapitel ist voreingestellt.

## Eigenschaften

Einige allgemeine Eigenschaften eines Kapitels können beeinflusst werden, z. B. der Titel geändert oder eine Zusatzerläuterung eingetragen werden.

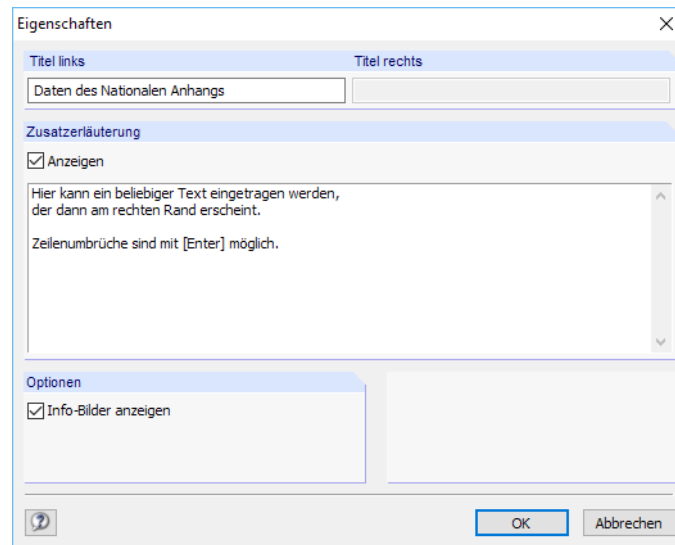


Bild 6.6: Dialog *Eigenschaften*

Im Dialog kann der *Titel* des Kapitels geändert und eine *Zusatzerläuterung* eingegeben werden, die im Protokoll am linken Seitenrand erscheint.

## Layout

Das Layout eines Ausdruckprotokolls kann hinsichtlich der Schriftarten und -farben, der Randeinstellungen und des Tabellendesigns angepasst werden.

Der Dialog zum Bearbeiten des Seitenlayouts wird aufgerufen über das Ausdruckprotokoll-Menü

**Einstellungen** → **Seite**



oder die zugeordnete Schaltfläche in der Symbolleiste des Ausdruckprotokolls.

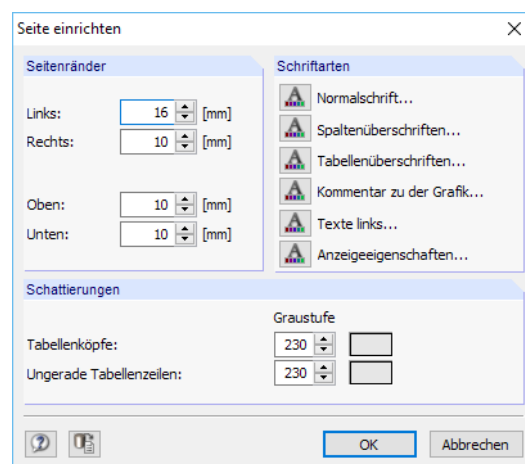


Bild 6.7: Dialog *Seite einrichten*



Es sind relativ kleine Standardfonts für Normal- und Spaltenüberschriften vorgesehen. Dennoch sollte man vorsichtig sein, die voreingestellten **Arial**-Schriftgrößen zu verändern: Mit größeren Fonts passen die Einträge nicht immer in die vorgesehenen Spalten und werden abgeschnitten.

## Sprache

Die Spracheinstellung im Ausdruckprotokoll ist unabhängig von der Sprache der FE-BEUL-Benutzeroberfläche. Mit der deutschen Version kann also ein englisches oder italienisches Ausdruckprotokoll erzeugt werden.

Die im Ausdruckprotokoll benutzte Sprache wird geändert über das Menü

**Einstellungen → Sprache.**

Im folgenden Dialog kann die gewünschte Sprache in der Liste ausgewählt werden.

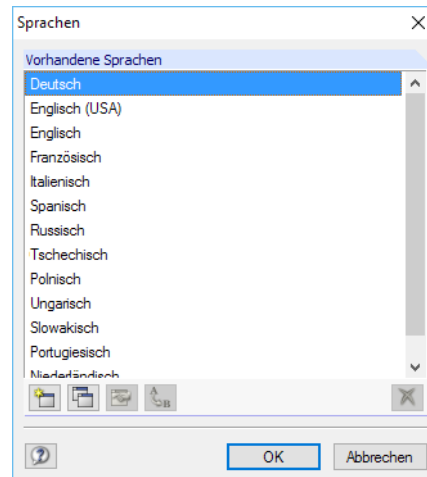


Bild 6.8: Dialog *Sprachen*

## Druckausgabe

Der eigentliche Druckvorgang wird gestartet mit dem Ausdruckprotokoll-Menü

**Datei → Drucken**



oder der entsprechenden Schaltfläche in der Symbolleiste des Ausdruckprotokolls.

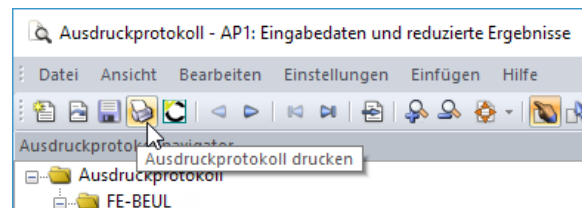


Bild 6.9: Schaltfläche *Ausdruckprotokoll drucken*

Es wird der Standard-Druckerdialog von Windows aufgerufen, in dem der Drucker und die zu druckenden Seiten festzulegen sind.

Falls nicht der Standarddrucker verwendet wird, kann der Seitenumbruch und damit auch die Seitenzahl auf dem Papier von der Vorschau in FE-BEUL abweichen.

Bei der Option *Ausdruck in Datei* wird eine Druckdatei im PRN-Format erzeugt. Diese kann mit dem **copy**-Befehl auf einen Drucker geleitet werden.

## Export des Ausdruckprotokolls

### RTF-Export

Das Ausdruckprotokoll einschließlich Grafiken kann in das RTF-Format exportiert werden über das Ausdruckprotokoll-Menü

**Datei → Export in RTF.**

Es öffnet sich der Windows-Dialog *Speichern unter*.

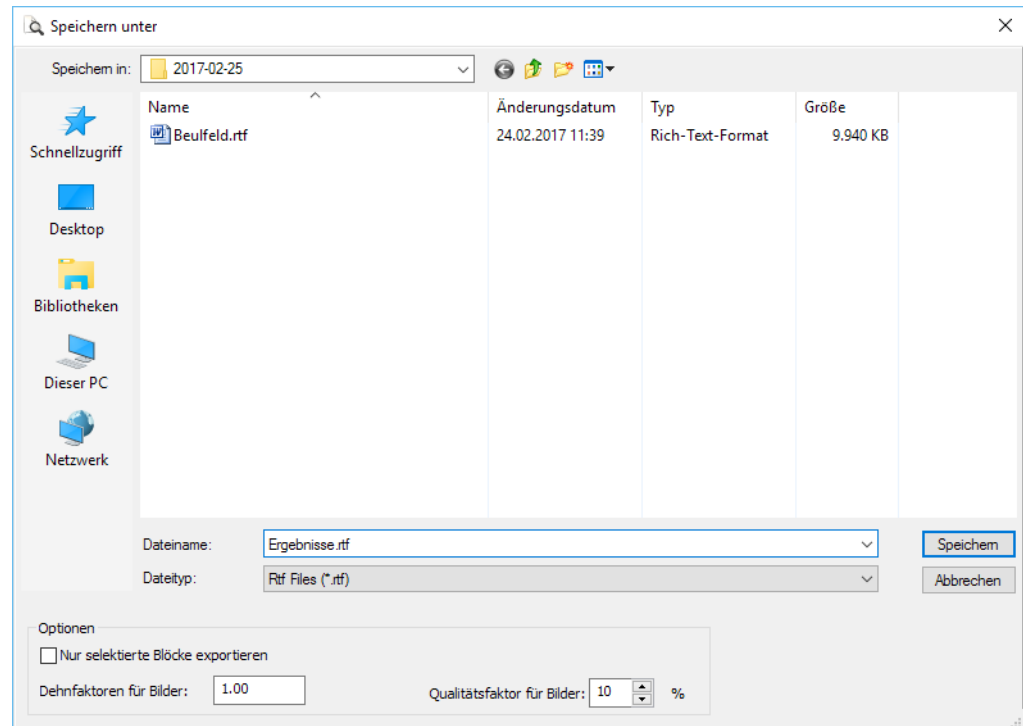


Bild 6.10: Dialog *Speichern unter*

Es sind der Speicherort und der Dateiname anzugeben. Wird das Kontrollfeld *Nur selektierte Blöcke exportieren* angehakt, so wird nicht das ganze Protokoll exportiert, sondern nur das bzw. die Kapitel, die zuvor im Navigator selektiert wurden.

### PDF-Export

Der integrierte PDF-Drucker ermöglicht es, die Daten des Ausdruckprotokolls als PDF-Datei auszugeben. Dies erfolgt über das Menü

**Datei → Export in PDF-Datei.**

Im Windows-Dialog *Speichern unter* (siehe Bild 6.10) sind der Speicherort und der Dateiname anzugeben. Der zusätzliche Abschnitt *Bezeichnung* ermöglicht es, Anmerkungen für die PDF-Datei vorzunehmen.



In der PDF-Datei werden auch Lesezeichen erzeugt, die das Navigieren im Dokument erleichtern.

### VCmaster-Export

VCmaster aus dem Hause VEIT CHRISTOPH (früher BauText) ist ein Textverarbeitungsprogramm mit speziellen Erweiterungen für statische Berechnungen.



Der direkte Export nach VCmaster wird gestartet über die Schaltfläche [VCmaster] in der Symbolleiste des Ausdruckprotokolls.

Für den erfolgreichen Export sollte VCmaster bereits im Hintergrund laufen.

## 6.4 Protokollkopf

Im Zuge der Installation wird ein Druckkopf aus den Kundendaten angelegt. Diese Angaben können im Ausdruckprotokoll geändert werden über das Menü

**Einstellungen → Protokollkopf**



oder die zugeordnete Schaltfläche in der Symbolleiste des Ausdruckprotokolls.

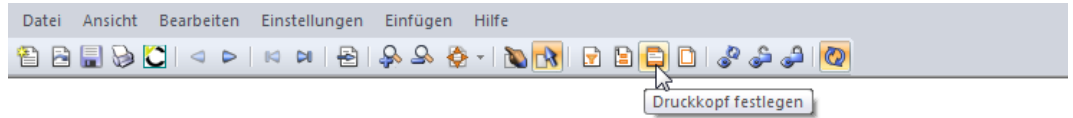


Bild 6.11: Schaltfläche [Druckkopf festlegen]

Es erscheint der Dialog *Protokollkopf*.

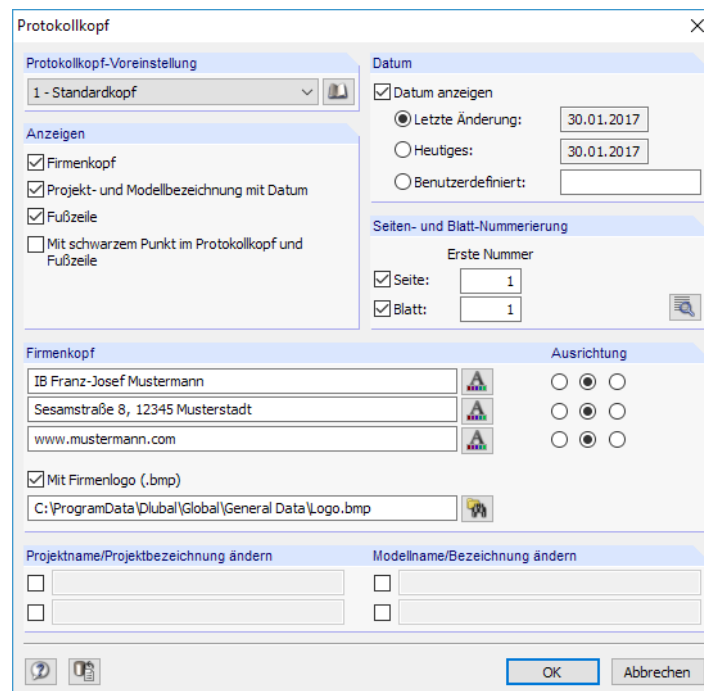



Bild 6.12: Dialog *Protokollkopf*

## Protokollkopf-Voreinstellung

Sind mehrere Druckköpfe vorhanden, kann in der Liste der passende Kopf ausgewählt werden.

Die Schaltfläche  ermöglicht ebenfalls den Zugriff auf verschiedene Protokollköpfe. Zusätzlich können dort Protokollköpfe erzeugt, geändert oder gelöscht werden.

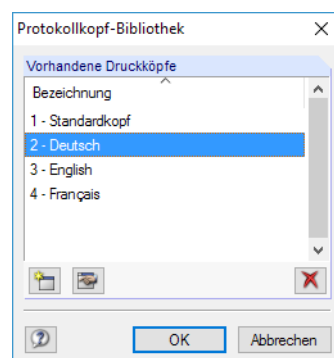


Bild 6.13: Dialog *Protokollkopf-Bibliothek*



Die Schaltflächen in der *Protokollkopf-Bibliothek* bedeuten im Einzelnen:




	Es wird ein neuer Protokollkopf erzeugt. Die Angaben sind in einem weiteren Dialog vorzunehmen, der wie der Dialog <i>Protokollkopf</i> konzipiert ist (siehe <a href="#">Bild 6.12</a> ).
	Die Eigenschaften des selektierten Protokollkopfs können bearbeitet werden.
	Der in der Liste selektierte Protokollkopf wird gelöscht.

Tabelle 6.3: Schaltflächen im Dialog *Protokollkopf-Bibliothek*



Die Protokollköpfe werden in der Datei **DlubalProtocolConfigNew.cfg** im allgemeinen Stammdatenordner *C:\ProgramData\Dlubal\Global\General Data* abgelegt. Diese Datei wird bei einem Update nicht überschrieben; eine Sicherungsdatei kann trotzdem von Vorteil sein.

## Anzeigen

Dieser Abschnitt steuert, welche Elemente des Protokollkopfs oder des Seitenlayouts dargestellt werden.

Die Option *Projekt- und Modellbezeichnung* blendet die Projekt- und Modellangaben – mit oder ohne Datum (siehe unten) – ein oder aus. Die Projektbezeichnung wird von den Basisangaben des Projekts im Projektmanager, die Modellbezeichnung von den Basisangaben des Modells übernommen. Die Vorgaben können in den Abschnitten *Projektname* und *Modellname* für den Ausdruck angepasst werden (siehe unten).

Die *Fußzeile* lässt sich ebenso ein- und ausblenden wie der *schwarze Punkt* in den Schnittpunkten von Randlinie mit Kopf- und Fußzeilenlinie.

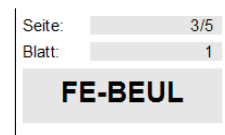
## Datum

Für die Anzeige des Datums im Protokollkopf stehen automatische Vorgaben und eine *Benutzerdefinierte* Angabe zur Auswahl.


## Seiten- und Blattnummerierung


Wenn für *Seite* und *Blatt* die Standardnummern gesetzt und die beiden Kontrollfelder angehakt sind, werden die einzelnen Seiten fortlaufend unter einem Blatt verwaltet (siehe Bild links).


Über die Schaltfläche  sind detaillierte Vorgaben für die Nummerierung möglich.



## Firmenkopf

Dieser Abschnitt des *Protokollkopf*-Dialogs enthält die Angaben aus den Kundendaten, die hier angepasst werden können. Für jede der drei Druckkopfzeilen steht ein Eingabefeld zur Verfügung. Über die Schaltfläche  können jeweils Schriftart und Schriftgrad geändert werden. Die *Ausrichtung* der Zeilen lässt sich ebenfalls separat festlegen.

Der linke Bereich der Kopfzeile ist für das Firmenlogo reserviert. Die Grafik kann im \*.jpg, \*.png, \*.gif oder \*.bmp-Format vorliegen; sie kann mit der Schaltfläche  eingelesen werden.

Mit der Schaltfläche  unten im Dialog können die geänderten Angaben gespeichert und als Standard gesetzt werden. Es erscheint der Dialog *Name des Protokollkopfes*, in dem eine Bezeichnung anzugeben ist. Der neue Druckkopf erscheint dann als *Protokollkopf-Voreinstellung*.

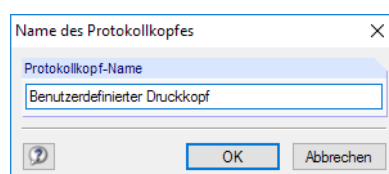


Bild 6.14: Dialog *Name des Protokollkopfes*

## Projektname/Modellname/Bezeichnung ändern

Im untersten Abschnitt des *Protokollkopf*-Dialogs (siehe [Bild 6.12](#)) können der Projekt- und Modellname mit den benutzerdefinierten Bezeichnungen für den Ausdruck geändert werden. Nach dem Anhaken der Kontrollfelder sind die Eingabefelder für neue Einträge zugänglich.

## 6.5 Grafikausdruck



Die Grafiken der Beulfiguren sind mit der Schaltfläche [Grafik] in einem separaten Fenster verfügbar (siehe [Kapitel 5.2, Seite 29](#)). Sie lassen sich ebenfalls für die Dokumentation verwenden.

Die aktuelle Grafik wird gedruckt über das Menü

**Datei → Grafik drucken**



oder die entsprechende Schaltfläche in der Symbolleiste.

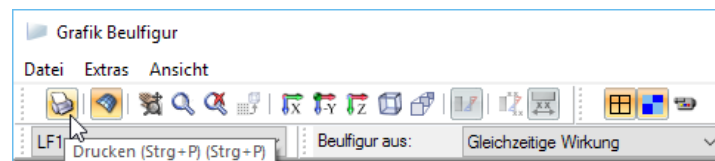


Bild 6.15: Schaltfläche Drucken

Es erscheint der Dialog *Grafikausdruck*, der aus zwei Registern besteht.

## Allgemeine Einstellungen

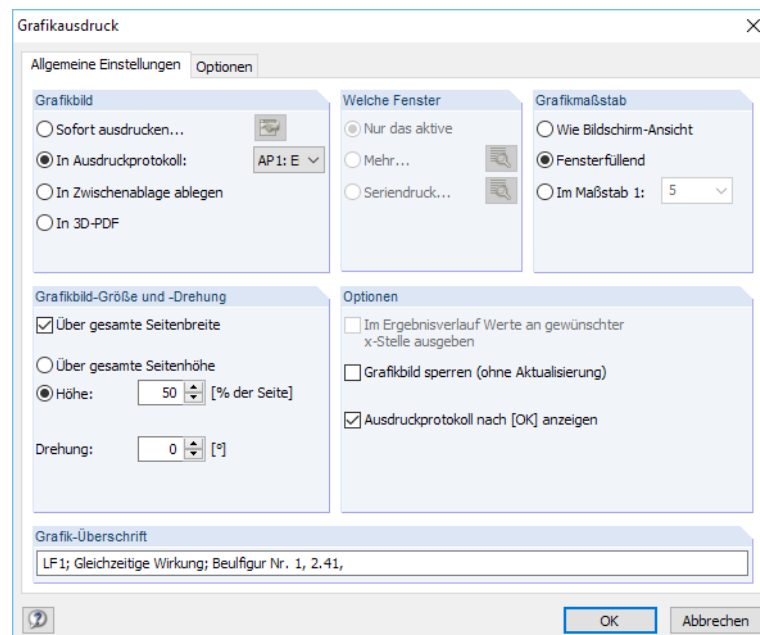



Bild 6.16: Dialog *Grafikausdruck*, Register *Allgemeine Einstellungen*

### Grafikbild

Es bestehen vier Möglichkeiten der Grafikausgabe:

- Sofort ausdrucken
- In Ausdruckprotokoll (siehe [Kapitel 6.3, Seite 34](#))
- In Zwischenablage ablegen
- In 3D-PDF

*Sofort ausdrucken* ermöglicht eine direkte Druckausgabe. Der Protokollkopf kann über die Schaltfläche  angepasst werden, die den *Protokollkopf*-Dialog aufruft (siehe [Kapitel 6.4, Seite 39](#)).

Beim Drucken in das *Ausdruckprotokoll* wird die Grafik in das Ausdruckprotokoll *AP* eingefügt, das in der Liste ausgewählt werden kann. Falls noch kein Ausdruckprotokoll existiert, erscheint nach dem Bestätigen des Dialogs der Dialog *Neues Ausdruckprotokoll*, in dem die Bezeichnung und der Inhalt des Ausdruckprotokolls festgelegt werden kann (siehe [Bild 6.1, Seite 31](#)).

Die *Zwischenablage* stellt die Grafik anderen Programmen zur Verfügung. Dort kann die Grafik in der Regel über das Menü **Bearbeiten** → **Einfügen** übernommen werden.

### Welche Fenster

Dieser Abschnitt ist für die Druckausgabe von FE-BEUL nicht relevant.

### Grafikmaßstab

Der Abschnitt rechts oben im Dialog verwaltet den Abbildungsmaßstab der Grafik auf dem Papier.

Wie *Bildschirmansicht* verwendet den gleichen Darstellungsmaßstab wie auf dem Monitor. Damit lassen sich gezoomte Bereiche oder spezielle Ansichten drucken.

Die Option *Fensterfüllend* stellt die Gesamtgrafik auf dem Papier dar. Es wird der aktuelle Blickwinkel verwendet, um das ganze Modell in der vorgegebenen Grafikbild-Größe (siehe unten) abzubilden.

Im *Maßstab* druckt die Grafik in dem Maßstab, der in der Liste gewählt oder manuell eingegeben wird. Auch hier wird der aktuelle Blickwinkel verwendet. Eine perspektivische Ansicht eignet sich nicht für den maßstäblichen Ausdruck.

### Grafikbild-Größe und -Drehung

Dieser Abschnitt regelt die Größe der Grafik auf dem Papier.

Ist das Kontrollfeld *Über gesamte Seitenbreite* angehakt, wird auch der linke Rand neben der vertikalen Trennlinie für die Grafik genutzt.

Soll nicht die ganze Seite für die Grafik genutzt werden, kann die *Höhe* des Grafikbereichs als Prozentwert der Seitenhöhe vorgegeben werden.

Der Drehwinkel im Eingabefeld *Drehung* rotiert die Grafik für den Ausdruck.

### Optionen

Standardmäßig werden dynamische Grafiken erzeugt: Bei einer Änderung des Modells oder der Ergebnisse werden die Grafiken im Ausdruckprotokoll automatisch aktualisiert. Treten Performanceprobleme im Protokoll wegen der Grafiken auf, so kann die dynamische Anpassung über das Kontrollfeld *Grafikbild sperren (ohne Aktualisierung)* unterbunden werden.

Im Ausdruckprotokoll kann die Sperrung einer Grafik wieder aufgehoben werden: Klicken Sie im Protokoll-Navigator den Grafikeintrag mit der rechten Maustaste an, um das Kontextmenü zu aktivieren (siehe [Bild 6.5, Seite 34](#)). Über die *Eigenschaften* ist der Dialog *Grafikausdruck* dieses Bildes wieder zugänglich. Alternativ selektieren Sie die Grafik im Protokoll-Navigator und wählen das Menü **Bearbeiten** → **Eigenschaften**.

### Grafik-Überschrift

Beim Aufruf des Dialogs *Grafikausdruck* ist ein Titel für die Grafik voreingestellt, der in diesem Eingabefeld geändert werden kann.

## Optionen

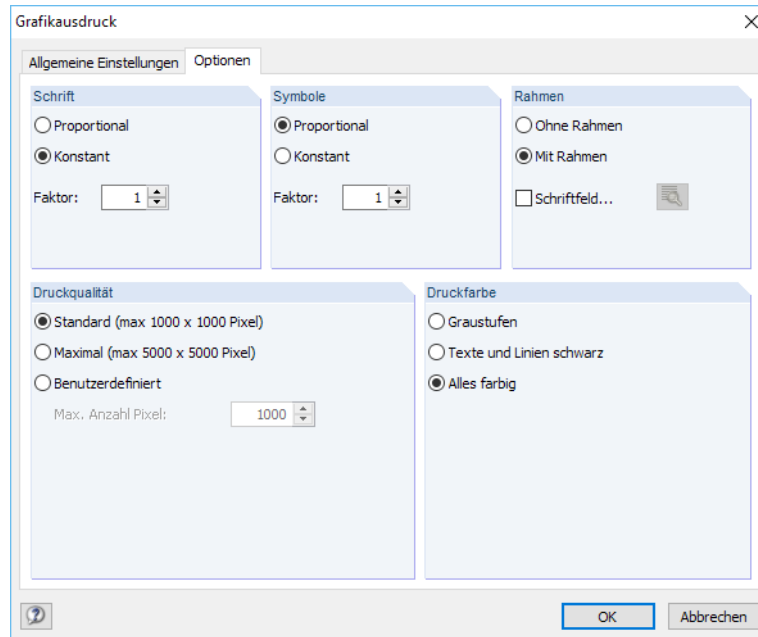


Bild 6.17: Dialog *Grafikausdruck*, Register *Optionen*


### Schrift / Symbole

In diesen beiden Abschnitten brauchen die Voreinstellungen nur selten verändert werden. Für das großformatige Plotten kann es erforderlich sein, die Faktoren anzupassen.

Die Größe der *Schrift* und *Symbole* ist abhängig vom Druckertreiber. Wenn die Druckresultate nicht zufriedenstellend sind, können hier spezifische Skalierungsfaktoren definiert werden.

### Rahmen

Die Grafik kann im Ausdruck mit oder ohne Rahmen dargestellt werden.

Für den Ausdruck besteht zusätzlich die Möglichkeit, ein Schriftfeld zu ergänzen. Die Schaltfläche  öffnet den Dialog *Schriftfeld-Einstellungen*, in dem das Aussehen und der Inhalt des Schriftfeldes festgelegt werden können. Der untere Bereich dieses Dialogs zeigt die Vorschau an.

### Druckqualität

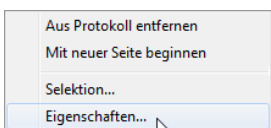
In diesem Abschnitt brauchen die Voreinstellungen nur selten verändert werden. Als *Standard* wird die Grafik als Bitmap in einer Größe von maximal 1000 x 1000 Pixel ausgegeben. Die *Maximal*-Größe von maximal 5000 x 5000 Pixel führt bei einer 32 Bit-Farbtiefe zu einer Datenmenge von etwa 100 MB. Dies kann bei einigen Druckertreibern Probleme bereiten.

### Druckfarbe

Erfolgt die Druckausgabe auf einen Schwarz-Weiß-Drucker, können zur besseren Lesbarkeit *Texte und Linien schwarz* anstatt in Graustufen gedruckt werden. Dabei ist zu beachten, dass z. B. mehrfarbige Querschnittsverformungen oder Lagersymbole von dieser Einstellung nicht beeinflusst werden und somit farbig im Ausdruck erscheinen. Die Umsetzung farbiger Ergebnisverläufe in Graustufen wird vom Druckertreiber vorgenommen.

Nach dem Drucken in das Ausdruckprotokoll kann die Grafik per Drag-and-Drop an eine andere Stelle geschoben werden.

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



# 7 Allgemeine Funktionen

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

## 7.1 Bemessungsfälle

Anhand von Bemessungsfällen lassen sich Varianten untersuchen oder die Beulfelder von Stäben aus dem RFEM/RSTAB-Modell gruppieren.

### Neuen Bemessungsfall anlegen

Ein Bemessungsfall wird angelegt über das FE-BEUL-Menü

**Datei → Neuer Fall.**

Es erscheint folgender Dialog.

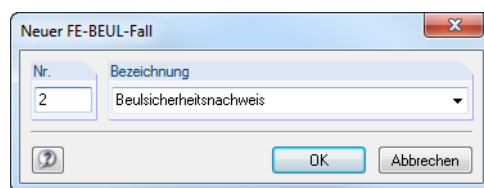


Bild 7.1: Dialog Neuer FE-BEUL-Fall

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.

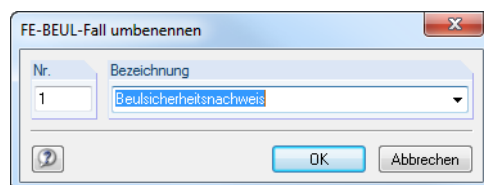


Bild 7.2: Dialog FE-BEUL-Fall umbenennen

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.

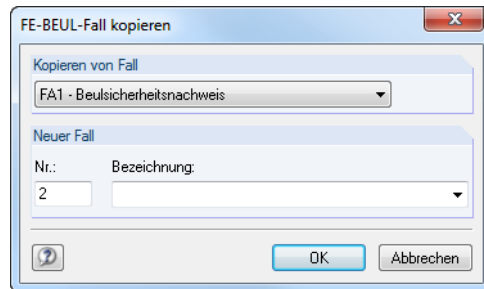


Bild 7.3: Dialog FE-BEUL-Fall kopieren

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 und Nachkommastellen können während der Modellierung oder Auswertung beliebig geändert werden: Die Zahlenwerte werden entsprechend umgerechnet oder angepasst.

Der Dialog zum Anpassen der Einheiten ist zugänglich über das FE-BEUL-Menü

**Einstellungen** → **Einheiten und Dezimalstellen**.

Im Dialog *Einheiten und Dezimalstellen* sind die Parameter in Abschnitten gruppiert.

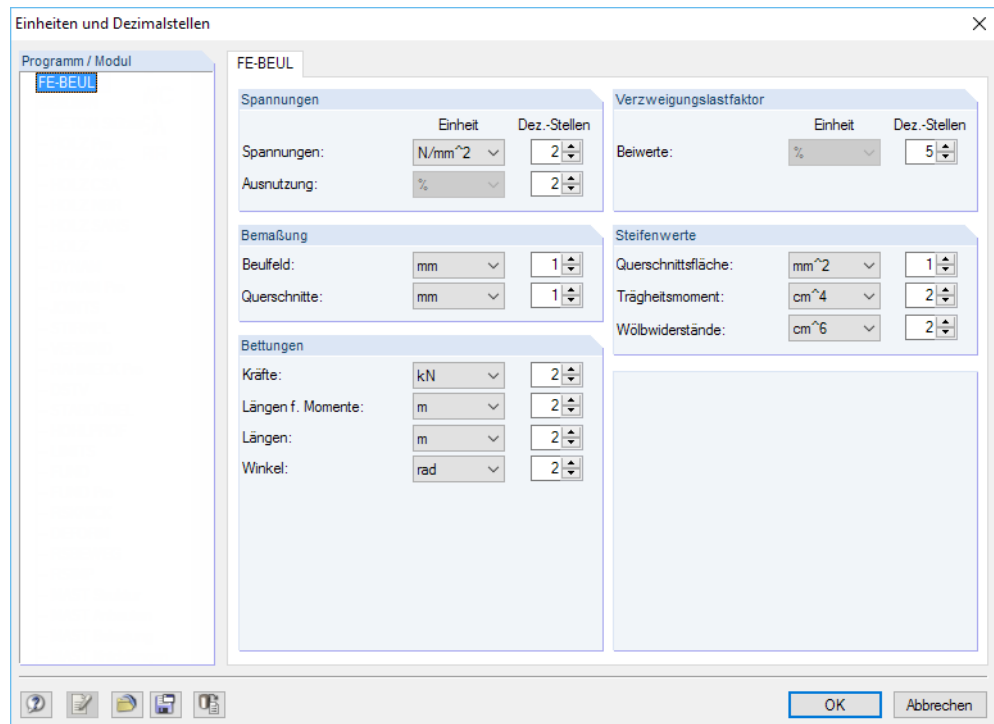


Bild 7.5: Dialog *Einheiten und Dezimalstellen*

Die Einstellungen können gespeichert und in anderen Modellen wieder verwendet werden. Auf diese Weise sind spezifische Einheitenprofile für Beulfelder möglich.



Die Schaltfläche [Sichern] ruft einen Dialog auf, in dem der *Name* des neuen Benutzerprofils für Einheiten und Dezimalstellen anzugeben ist.

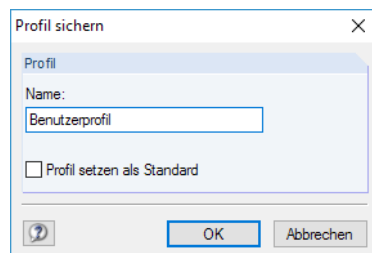


Bild 7.6: Dialog *Profil sichern*

Um dieses Profil als Voreinstellung für neue Beulfelder zu verwenden, ist das Kontrollfeld *Profil setzen als Standard* zu aktivieren.



Über Schaltfläche [Öffnen] kann ein Benutzerprofil eingelesen werden. Es erscheint ein Dialog, in dem verschiedene Profile zur Auswahl stehen (siehe Bild 7.7). Als Voreinstellungen sind ein metrisches und ein imperiales (angloamerikanisches) Einheitenprofil enthalten.

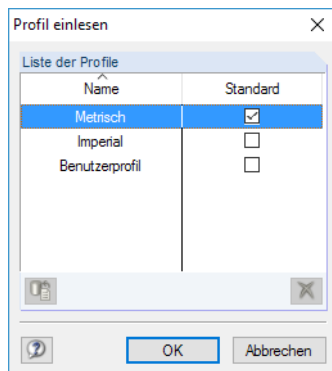


Bild 7.7: Dialog *Profil einlesen*



Mit der Schaltfläche [Standard] lassen sich die voreingestellten Einheiten und Dezimalstellen wiederherstellen.

### 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 und dort exportiert werden über das Menü

**Datei → Export in RTF.**

Diese Funktion ist im [Kapitel 6.1](#) auf [Seite 38](#) beschrieben.

#### Excel / OpenOffice

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

**Datei → Tabellen exportieren.**

Es öffnet sich folgender Exportdialog.

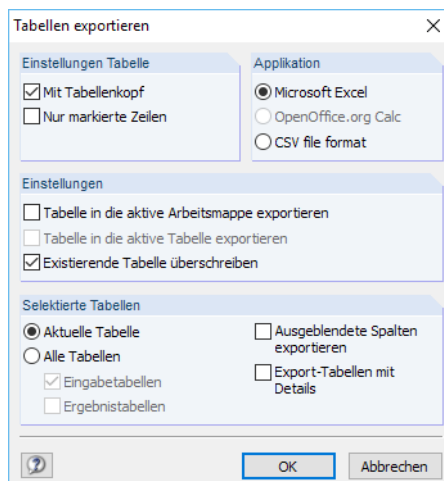


Bild 7.8: Dialog *Tabellen exportieren*



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	G
	Nr.	Lastfall	Bezeichnung	Eigenwert Nr.	Nachweis Ausnutzung		Nachweis nach Formel
3	1	LF1	Volllast	1	0,65 ≤ 1	104	Interaktion nach Kap. 10, Gl. 10.5
4	2				0,52 ≤ 1	107	Drillknicken von Steifen nach Kap. 9.2.1 (8), (9)
5	3			2	0,65 ≤ 1	104	Interaktion nach Kap. 10, Gl. 10.5
6	4				0,52 ≤ 1	107	Drillknicken von Steifen nach Kap. 9.2.1 (8), (9)
7	5			3	0,64 ≤ 1	104	Interaktion nach Kap. 10, Gl. 10.5
8	6				0,52 ≤ 1	107	Drillknicken von Steifen nach Kap. 9.2.1 (8), (9)
9	7			4	0,63 ≤ 1	104	Interaktion nach Kap. 10, Gl. 10.5
10	8				0,52 ≤ 1	107	Drillknicken von Steifen nach Kap. 9.2.1 (8), (9)
11	9			5	0,62 ≤ 1	104	Interaktion nach Kap. 10, Gl. 10.5
12	10				0,52 ≤ 1	107	Drillknicken von Steifen nach Kap. 9.2.1 (8), (9)
13	11			6	0,62 ≤ 1	104	Interaktion nach Kap. 10, Gl. 10.5
14	12				0,52 ≤ 1	107	Drillknicken von Steifen nach Kap. 9.2.1 (8), (9)
15	13			7	0,62 ≤ 1	104	Interaktion nach Kap. 10, Gl. 10.5
16	14				0,52 ≤ 1	107	Drillknicken von Steifen nach Kap. 9.2.1 (8), (9)
17	15			8	0,62 ≤ 1	104	Interaktion nach Kap. 10, Gl. 10.5
18	16				0,52 ≤ 1	107	Drillknicken von Steifen nach Kap. 9.2.1 (8), (9)
19							
20							
21							
22							
23							

Bild 7.9: Ergebnis in Excel

# 8 Theoretische Grundlagen

Ebene dünnwandige Platten, deren Blechdicke  $t$  wesentlich kleiner als die Flächengeometrie  $a \cdot b$  ist und die durch Normal- oder Schubspannungen beansprucht sind, weichen beim Beulen 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

Da das Programm FE-BEUL auf der Methode der finiten Elemente basiert, kann es 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 verwendet, um den bezogenen Plattenschlankheitsgrad zu bestimmen, von dem die für den Beulsicherheitsnachweis notwendigen Abminderungsfaktoren  $\kappa$  abhängen.

## 8.1 EN 1993-1-5

Die Norm [1] nennt zwei Methoden, nach denen der Beulnachweis geführt werden kann:

- Methode der wirksamen Querschnittsflächen ([1] Abschnitte 4 bis 7)
- Methode der reduzierten Spannungen ([1] Abschnitt 10)

In FE-BEUL ist die Methode der reduzierten Spannungen implementiert. Dabei 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 (siehe Kapitel 8.2), jedoch mit dem Unterschied, dass in [1] ein einziger Systemschlankheitsgrad auf der Grundlage des gesamten Spannungsfeldes bestimmt wird. Ein Nachweis der Einzelbeanspruchungen und die nachfolgende Zusammenführung mittels Interaktionskriterium entfällt.

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

In [1] Abschnitt 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 [3] beschrieben.

### 8.1.1 Ermittlung der kritischen Beulspannungen

Der Anhang zu [1] stellt analytische Formeln zur Berechnung der kritischen Beulspannungen von unverteiften und verteilten Beulfeldern zur Verfügung. Allgemein gilt:

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

Bei **unverteiften 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 **verteiften 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.

### 8.1.2 Interaktionsnachweis

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

#### Schlankheitsgrads des Blechfeldes

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

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

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

#### 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:

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

mit

$\chi_c$  : nach Abschnitt 4.5.3(5)

$\xi$  : nach Abschnitt 4.5.4(1)

### Interaktionskriterium nach Gleichung 10.5

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

### 8.1.3 Elastischer Spannungsnachweis der Steifen

[1] 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.

Die Gleichungen sind detailliert in [3] beschrieben.

### 8.1.4 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 und der eigentlichen Verformung der Steife ergibt.

Die Gleichungen sind ebenfalls in [3] beschrieben.

### 8.1.5 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 ( $\theta = 6$ )

## 8.2 DIN 18800

In diesem Kapitel wird kurz auf das Bemessungsverfahren nach DIN 18800-3 [2] eingegangen.

### 8.2.1 Ideale Beulspannung

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

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

mit

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

Mit diesen Eingangswerten kann für eine Platte die ideale Beulspannung für die jeweils alleinige Wirkung von  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  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 in der Regel mithilfe der FE-Methode durch Lösung des Eigenwertproblems bestimmt.

### 8.2.2 Grenzbeulspannung

Mit Bezug auf die lineare Beultheorie werden – abhängig von den Beulfeldabmessungen, den Lager- und Belastungsbedingungen sowie vom bezogenen Plattenschlankheitsgrad – die Abminderungsfaktoren  $\kappa$  für die Grenzbeulspannung ermittelt. Auf die Berechnung der Grenzbeulspannung wirken sich ferner auch folgende Aspekte aus:

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

Diese Punkte werden nachfolgend kurz vorgestellt.

#### Grenzbeulspannung ohne Knickeinfluss

Die Grenzbeulspannungen werden nach folgenden Gleichungen ermittelt:

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

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

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

### 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.

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

Zur Ermittlung von  $\kappa_K$  siehe DIN 18800 Teil 2 [4] 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 mithilfe 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 18800 Teil 3 [2] Element (603):

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

Der Abminderungsfaktor  $\kappa_K$  wird nach DIN 18800 Teil 2 [4], Gleichungen (4a), (4b) bzw. (4c) nach Knickspannungslinie b ermittelt.

Die Grenzbeulspannungen werden nach DIN 18800 Teil 3 [2] Element (502) wie folgt berechnet:

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

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

### 8.2.3 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.

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

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

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

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

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

# 9 Beispiele

## 9.1 EN 1993-1-5

### 9.1.1 Unversteiftes Beulfeld mit knickstabähnlichem Verhalten

Das folgende Beispiel ist [5] auf Seite 8.42 vorgestellt. Es beschreibt den Beulsicherheitsnachweis für ein unausgesteiftes Beulfeld.

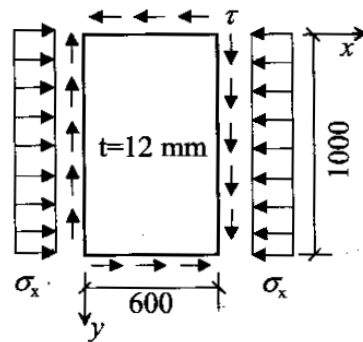


Bild 9.1: Systemskizze mit Abmessungen und Belastungen nach [5]

**Material:**

Baustahl S 355

**Teilsicherheitsbeiwert:**

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

$\gamma_M = 1,1$

**Systemgrößen:**

Länge des untersuchten Beulfeldes

$a = 600 \text{ mm}$

Breite des untersuchten Beulfeldes

$b = 1\,000 \text{ mm}$

Plattendicke

$t = 12 \text{ mm}$

→ Seitenverhältnis

$\alpha = \frac{a}{b} = \frac{600}{1\,000} = 0,60$

**Maßgebende Spannungen:**

Normalspannung

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

Normalspannung

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

Schubspannung

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

**Randspannungsverhältnis bezogen auf größte Druckspannung:**

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

**Bezugsspannung:**

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - 0,3^2)} \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 = \frac{3,14^2 \cdot 210\,000}{12 \cdot (1 - 0,3^2)} \cdot \left(\frac{12}{1\,000}\right)^2 = 27,33 \text{ N/mm}^2$$

**Berechnung der Beulwerte nach [1] Tabelle 4 und Anhang A.3/A.5:**

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

$$k_\sigma = 4,0$$

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

**Ideale Beulspannung bei Wirkung von Randspannungen  $\sigma$  nach [1] 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 [1] Gl. (10.3):**

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

mit

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

**Eigenwerte der Spannungskomponenten nach [1] 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 [1] 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 [1] 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 [1] 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“:**

$$\chi_w = \frac{0,83}{\bar{\lambda}_p} = \frac{0,83}{1,576} = 0,527$$



### Beulen mit knickstabähnlichem Verhalten nach [1] Abschnitt 4.5.4 (1):

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

mit

$$\sigma_{cr,c} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot t^2}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot a^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210\,000 \cdot 12^2}{12 \cdot (1 - 0,3^2) \cdot 600^2} = 75,92 \text{ N/mm}^2$$

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

**Bei diesem Gesamtfeld liegt ein knickstabähnliches Verhalten vor.**

### Abminderungsfaktor mit knickstabähnlichem Verhalten:

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

mit

$$\chi_c = \frac{1}{\left(\theta_p + \sqrt{\theta_p^2 - \bar{\lambda}_p^2}\right)} = \frac{1}{\left(1,886 + \sqrt{1,886^2 - 1,576^2}\right)} = 0,342$$

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

### Nachweis (Interaktionsbedingung) nach [1] Gl. (10.5):

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

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

**Die Beulsicherheit ist ausreichend!**

### 9.1.2 Ausgesteiftes Beulfeld

Das folgende Beispiel ist [3] entnommen. Es beschreibt den Beulsicherheitsnachweis für ein ausgesteiftes Beulfeld.

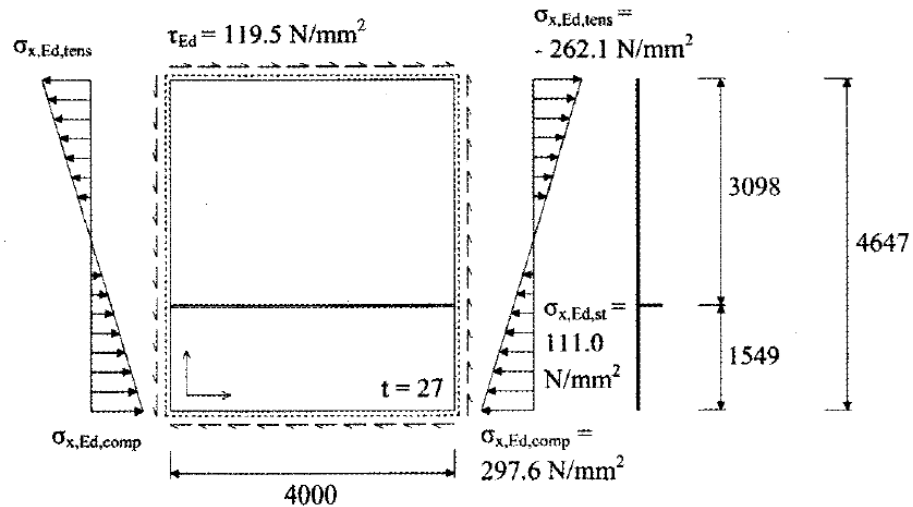


Bild 9.2: Systemskizze mit Abmessungen und Belastungen

#### Material:

Baustahl S 355

#### Teilsicherheitsbeiwert:

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

#### Systemgrößen:

$\gamma_M = 1,1$

Länge des untersuchten Beulfeldes

$a = 4000 \text{ mm}$

Breite des untersuchten Beulfeldes

$b = 4647 \text{ mm}$

Plattendicke

$t = 27 \text{ mm}$

→ Seitenverhältnis

$\alpha = \frac{a}{b} = \frac{4000}{4647} = 0,861$

#### Steife:

Höhe:

$h = 300 \text{ mm}$

Länge:

$a = 4000 \text{ mm}$

Dicke:

$t = 30 \text{ mm}$

Steifenlage:

$z = 3098 \text{ mm}$  (vom oberen Rand)

#### Maßgebende Spannungen:

Normaldruckspannung

$\sigma_2 = 297,6 \text{ N/mm}^2$

Normalzugspannung

$\sigma_1 = -262,1 \text{ N/mm}^2$

Schubspannung

$\tau = 119,5 \text{ N/mm}^2$

## Ermittlung der kritischen Beulspannungen nach [1] Anhang A:

Bei einer Längssteife in der Druckzone ergibt sich nach [1] Anhang A.2.2:

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

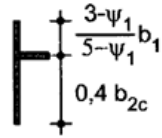


Bild 9.3: Bild A.1, Anhang A

- Ermittlung der mitwirkenden Breiten:

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

$$b_1 = 1\,549 \text{ mm}$$

$$b_{1,inf} = \frac{3 - 0,373}{5 - 0,373} \cdot 1\,549 = 879,45 \text{ mm}$$

$$b_{2,c} = \frac{\sigma_{sl,1}}{m} = \frac{111,03}{0,1\,204} = 922,76 \text{ mm}$$

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

$$\Rightarrow A_{sl,1} = 42\,711 \text{ mm}^2$$

$$\Rightarrow I_{sl,1} = 2,594 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

- Nach [1] Anhang A, Gl. (A.4):

$$a_c = 4,33 \cdot \sqrt[4]{\frac{I_{sl,1} \cdot b_1^2 \cdot b_2^2}{t^3 \cdot b}} = 12\,241 \text{ mm} > a = 4\,000 \text{ mm}$$

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

$$\sigma_{cr,sl} = \frac{\pi^2 \cdot 210\,000 \cdot 2,594 \cdot 10^8}{42\,711 \cdot 4\,000^2} + \frac{210\,000 \cdot 27^3 \cdot 4\,647 \cdot 4\,000^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot (1 - 0,3^2) \cdot 42\,711 \cdot 1\,549^2 \cdot 3\,098^2}$$

$$\sigma_{cr,sl} = 795,4 \text{ N/mm}^2$$

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

$$\sigma_{cr,p} = \sigma_{cr,sl} \cdot \frac{\sigma_1}{\sigma_{sl,1}} = 795,4 \cdot \frac{297,6}{111,0} = 2\,132,6 \text{ N/mm}^2$$

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

- Ermittlung der mitwirkenden Breiten  
Nach [1] Bild 5.3 wird für die mitwirkenden Breiten die Mindestbreite angesetzt.

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

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

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

$$\Rightarrow I_{sl,1} = 2,315 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

- Ermittlung des Beulwerts nach [1] Anhang A.3, Gl. (A.6):

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

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

$$k_\tau = 4,1 + \frac{6,3 + 0,18 \cdot \frac{2,315 \cdot 10^8}{27^3 \cdot 4647}}{\left(\frac{4000}{4647}\right)^2} + 2,2 \cdot \sqrt[3]{\frac{2,315 \cdot 10^8}{27^3 \cdot 4647}} = 16,22$$

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

$$\tau_{cr} = k_\tau \cdot \sigma_E = 16,22 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 210\,000}{12 \cdot (1 - 0,3^2)} \cdot \left(\frac{27}{4647}\right)^2 = 103,9 \text{ N/mm}^2$$

**Fließkriterium nach [1] Gl. (10.3)**

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

mit

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

**Eigenwerte der Spannungskomponenten nach [1] Gl. (10.6):**

$$\alpha_{cr,x} = \frac{\sigma_{cr,p,x}}{\sigma_{x,Ed}} = \frac{2\,134,41}{297,6} = 7,172$$

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

**Kritischer Lastfaktor nach [1] 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 [1] 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 nach [1] 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 [1] 4.5.4(1):**

$$\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1 = \frac{2\,134,41}{2\,109,8} - 1 = 0,011 \leq 1$$

mit

$$\sigma_{cr,c} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl,1}}{A_{sl,1} \cdot \alpha^2} \cdot \frac{\sigma_1}{\sigma_{sl,1}} = \frac{\pi^2 \cdot 210\,000 \cdot 2,594 \cdot 10^8}{42\,711 \cdot 4\,000^2} \cdot \frac{297,6}{111,03} = 2\,109,3 \text{ N/mm}^2$$

*Bei diesem ausgesteiften Beulfeld liegt ein knickstabähnliches Verhalten vor.*

**Abminderungsfaktor mit knickstabähnlichem Verhalten nach [1] Gl. (4.13):**

$$\rho_c = (\rho_p - \chi_c) \cdot \xi \cdot (2 - \xi_x) + \chi_c = (0,845 - 0,469) \cdot 0,011 \cdot (2 - 0,011) + 0,469 = 0,475$$

$$\chi_c = \frac{1}{\left(\theta_p + \sqrt{\theta_p^2 - \bar{\lambda}_p^2}\right)} = \frac{1}{\left(1,326 + \sqrt{1,326^2 - 1,052^2}\right)} = 0,469$$

mit

$$\theta_p = 0,5 \cdot (1 + \alpha_\varepsilon \cdot (1,052 - 0,2) + 1,052^2) = 1,326$$

$$\alpha_\varepsilon = \alpha + \frac{0,09}{i/e} = 0,49 + \frac{0,09}{\sqrt{\frac{2,594 \cdot 10^8}{42\,711}}/129} = 0,639$$

**Nachweis (Interaktionsbedingung) nach [1] Gl. (10.5):**

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

$$\left(\frac{297,50}{0,478 \cdot 345/1,1}\right)^2 + 3 \left(\frac{119,50}{0,789 \cdot 345/1,1}\right)^2 = \underline{\underline{4,65 > 1}}$$

**Die Beulsicherheit ist nicht ausreichend!**

## 9.2 DIN 18800

### 9.2.1 Unversteiftes Beulfeld mit knickstabähnlichem Verhalten

**Material:**

Baustahl St 37

Streckgrenze  $f_{y,k} = 240 \text{ N/mm}^2$ 
**Teilsicherheitsbeiwert:**
 $\gamma_M = 1,1$ 
**Systemgrößen:**

Länge des untersuchten Beulfeldes

 $a = 1\,000 \text{ mm}$ 

Breite des untersuchten Beulfeldes

 $b = 1\,200 \text{ mm}$ 

Plattendicke

 $t = 10 \text{ mm}$ 

→ Seitenverhältnis

 $\alpha = \frac{a}{b} = \frac{1\,000}{1\,200} = 0,833$ 
**Maßgebende Spannungen:**

Normaldruckspannung

 $\sigma_1 = 80 \text{ N/mm}^2$ 

Normaldruckspannung

 $\sigma_2 = 80 \text{ N/mm}^2$ 

Schubspannung

 $\tau = 12 \text{ N/mm}^2$ 
**Randspannungsverhältnis bezogen auf größte Druckspannung:**

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

**Bezugsspannung:**

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - 0,3^2)} \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 = \frac{3,14^2 \cdot 210\,000}{12 \cdot (1 - 0,3^2)} \cdot \left(\frac{10}{1\,200}\right)^2 = 13,18 \text{ N/mm}^2$$

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

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

$$k_\sigma = \left(\alpha + \frac{1}{\alpha}\right)^2 \cdot \frac{2,1}{\psi + 1,1} = \left(0,833 + \frac{1}{0,833}\right)^2 \cdot \frac{2,1}{1 + 1,1} = 4,4\,134$$

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

**Ideale Beulspannung bei Wirkung von Randspannungen  $\sigma$  nach [2] 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:**

$$\lambda_\alpha = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_{y,k}}} = 3,14 \cdot \sqrt{\frac{210\,000}{240}} = 92,93$$

**Plattenschlankheitsgrad (Normalspannung):**

$$\lambda_P = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma_{Pi}}} = 3,14 \cdot \sqrt{\frac{210\,000}{54,49}} = 195,03$$

**Plattenschlankheitsgrad (Schubspannungen):**

$$\lambda_p = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{\tau_{pi} \cdot \sqrt{3}}} = 3,14 \cdot \sqrt{\frac{210\,000}{154,07 \cdot \sqrt{3}}} = 88,13$$

**Bezogener Plattenschlankheitsgrad (Normalspannung) nach [2] El. (113):**

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

**Bezogener Plattenschlankheitsgrad (Schubspannung):**

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

**Abminderungsfaktoren für das Plattenbeulen nach [2] Tabelle 1:**

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

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

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

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

**Beulen mit knickstabähnlichem Verhalten nach [2] El. (602):**

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

$$\frac{\sigma_{pi}}{\sigma_{ki}} = k_\sigma \cdot \alpha^2 = 4,134 \cdot 0,833^2 = 2,838$$

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

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

**Nach [2] El. (603):**

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

$$k = 0,5 \cdot |1 + 0,34 \cdot (\lambda_p - 0,2) + \lambda_p^2|$$

$$k = 0,5 \cdot |1 + 0,34 \cdot (2,098 - 0,2) + 2,098^2| = 3,023$$

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

**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 [2] 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 [2] 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 [2] 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!**



### 9.2.2 Ausgesteiftes Beulfeld

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

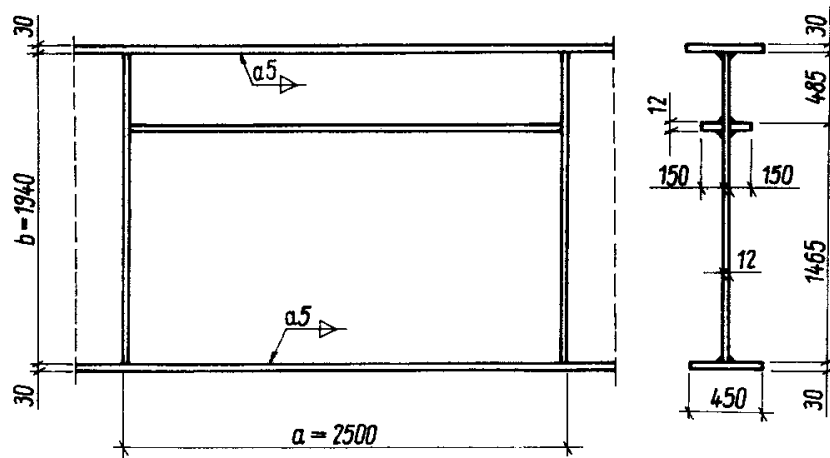


Bild 9.4: Systemskizze mit Abmessungen und Belastungen nach [6]

**Material:**

Baustahl St 37  
Streckgrenze  $f_{y,k} = 240 \text{ N/mm}^2$   
 $\gamma_M = 1,1$

**Teilsicherheitsbeiwert:**

**Systemgrößen:**

Länge des untersuchten Beulfeldes  
Breite des untersuchten Beulfeldes  
Plattendicke  
→ Seitenverhältnis

$a = 2\,500 \text{ mm}$   
 $b = 1\,940 \text{ mm}$   
 $t = 12 \text{ mm}$   
 $\alpha = \frac{a}{b} = \frac{2\,500}{1\,940} = 1,29$

**Steife:**

Höhe:  
Länge:  
Dicke:  
Steifenlage:  
Steifenkennwerte:

$h = 150 \text{ mm}$   
 $a = 2\,500 \text{ mm}$   
 $t = 12 \text{ mm}$   
 $y = 485 \text{ mm}$  (vom oberen Rand)  
 $I_{y,\text{Steife}} = 3\,040 \text{ cm}^4$   
 $A_{y,\text{Steife}} = 36 \text{ cm}^2$   
 $\delta = 0,155$  nach [2] El. (114)  
 $\gamma = 99$  nach [2] El. (114)

Aus diesen Eingangswerten erhält man nach [7]:

$k_{\sigma x} = 84$   
 $k_{\tau} = 12$

**Maßgebende Spannungen:**

Normaldruckspannung  $\sigma_1 = 130 \text{ N/mm}^2$   
Normalzugspannung  $\sigma_2 = -130 \text{ N/mm}^2$   
Schubspannung  $\tau = 52 \text{ N/mm}^2$

**Randspannungsverhältnis bezogen auf größte Druckspannung:**

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

**Bezugsspannung:**

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - 0,3^2)} \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 = \frac{3,14^2 \cdot 210\,000}{12 \cdot (1 - 0,3^2)} \cdot \left(\frac{1,2}{194}\right)^2 = 0,73 \text{ kN/cm}^2$$

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

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

**Ideale Beulspannung bei Wirkung von Randspannungen  $\sigma$  nach [2] 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:**

$$\lambda_\alpha = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_{y,k}}} = 3,14 \cdot \sqrt{\frac{210\,000}{240}} = 92,93$$

**Plattenschlankheitsgrad (Normalspannung):**

$$\lambda_{p_{\sigma_x}} = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma_{Pi}}} = 3,14 \cdot \sqrt{\frac{21\,000}{61,3}} = 58,12$$

**Plattenschlankheitsgrad (Schubspannungen):**

$$\lambda_p = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{\tau_{Pi} \cdot \sqrt{3}}} = 3,14 \cdot \sqrt{\frac{21\,000}{8,8 \cdot \sqrt{3}}} = 116,55$$

**Bezogener Plattenschlankheitsgrad (Normalspannung) nach [2] El. (113):**

$$\bar{\lambda}_{p_{\sigma_x}} = \frac{\lambda_p}{\lambda_\alpha} = \frac{58,12}{92,93} = 0,625$$

**Bezogener Plattenschlankheitsgrad (Schubspannung):**

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\lambda_p}{\lambda_\alpha} = \frac{116,55}{92,93} = 1,254 < 1,38$$

**Abminderungsfaktoren für das Plattenbeulen nach [2] Tabelle 1:**

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

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

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

$$\kappa_\tau = \frac{0,84}{\bar{\lambda}_p} = \frac{0,84}{1,255} = 0,669$$

## Berechnung der Grenzbeulspannungen nach [2] 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 [2] 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 [2] 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!**

# Literatur

- [1] *EN 1993-1-5: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile.* Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2006.
- [2] *DIN 18800 Stahlbauten – Teil 3: Stabilitätsfälle – Plattenbeulen.* Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2008.
- [3] Darko Beg, Ulrike Kuhlmann, Laurence Davaine und Benjamin Braun. *Design of Plated Structures, ECCS Eurocode design manuals.* Ernst & Sohn, Berlin, 1. Auflage, 2010.
- [4] *DIN 18800 (11.90) Teil 2: Stahlbauten - Stabilitätsfälle, Knicken von Stäben und Stabwerken.* Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1992.
- [5] *SCHNEIDER: Bautabellen für Ingenieure.* Bundesanzeiger Verlag, Köln, 22. Auflage, 2016.
- [6] Gottfried Hünensen und Ehler Fritzsche. *Stahlbau in Beispielen: Berechnungspraxis nach DIN 18800. Teil 1 bis Teil 3.* Werner Verlag, 1998.
- [7] Kurt Klöppel und Joachim Scheer. *Beulwerte ausgesteifter Rechteckplatten, Band 1.* Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1960.
- [8] *EN 1993-1-1:2005: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau.* CEN, Brüssel, Mai 2005.
- [9] Christian Petersen. *Stahlbau.* Vieweg & Sohn, Wiesbaden, 3. Auflage, 1993.
- [10] Christian Petersen. *Statik und Stabilität der Baukonstruktionen.* Vieweg & Sohn, Wiesbaden, 2. Auflage, 1982.
- [11] *DIN 18800 (11.90) Teil 1: Stahlbauten - Bemessung und Konstruktion.* Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1992.
- [12] Peter Osterrieder und Stefan Richter. *Kranbahnträger aus Walzprofilen.* Vieweg & Sohn, Wiesbaden, 2. Auflage, 2002.
- [13] Ulrich Kruger. *Stahlbau.* Ernst & Sohn, Berlin, 1998.
- [14] Manfred Hirt und Rolf Bez. *Stahlbau: Grundbegriffe und Bemessungsverfahren.* Ernst & Sohn, Berlin, 1998.
- [15] Albrecht Thiele und Wolfram Lohse. *Stahlbau.* B. G. Teubner, Stuttgart, 1997.
- [16] Kurt Klöppel und Karl Heinrich Möller. *Beulwerte ausgesteifter Rechteckplatten, Band 2.* Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1968.

# Index

3D-PDF .....	41	EN 1993-1-5 .....	17, 49, 54
<b>A</b>		Ergebnisauswertung .....	28
Abminderungsfaktoren .....	20	Ergebnismasken .....	23
Ausdruckprotokoll .....	31, 37, 43	Erhaltung der Schnittgrößen .....	18
Ausnutzung .....	24	Excel .....	47
Auswahlmodus .....	35	Export Ergebnisse .....	47
<b>C</b>		Exzentrizität .....	17
c/t Teil .....	15	<b>F</b>	
<b>B</b>		FE-BEUL starten .....	5
Basisangaben .....	6	FE-Netz .....	20
Beenden von FE-BEUL .....	6	FEM-Modell .....	17
Belastung .....	14	Firmenkopf .....	39, 40
Bemessungsfall .....	44, 45	Firmenlogo .....	40
Berechnung .....	17, 22	Fonts .....	36
Beulfeld .....	50	<b>G</b>	
Beulfeld-Abmessungen .....	9	Gleichungslöser .....	20
Beulfigur .....	25, 29	Grafik .....	29
Beulkurvenform .....	19	Grafikausdruck .....	41
Beulspannung .....	50	Grafikfenster .....	16
Beulsteifen .....	11, 13, 18, 19	Grafikmaßstab .....	42
Beulsteifen-Bibliothek .....	12	Graustufen .....	43
Beulwert .....	20	<b>I</b>	
Bewegmodus .....	35	ICG-Iterationsmethode .....	18
Bezugsspannung .....	7	Import .....	15
Blättern in Masken .....	6	Installation .....	4
<b>C</b>		<b>K</b>	
CSV-Export .....	47	Knickeinfluss .....	21
<b>D</b>		Knickstabähnliches Verhalten .....	21
Datum .....	40	Kommentar .....	10
Details DIN 18800 .....	21	Kontextmenü .....	35
Details EN 1993-1-5 .....	17, 19	Kritische Beulspannungen .....	20
Dezimalstellen .....	46	<b>L</b>	
DIN 18800 .....	52, 61	Lanczos .....	18
Drag-and-drop .....	35	Lastfall .....	14, 16, 24
Druckdatei .....	37	Layout .....	36
Drucken .....	37	Lösungsart .....	18
Druckfarbe .....	43	Logo .....	68
Druckkopfmuster .....	40	<b>M</b>	
Druckqualität .....	43	Maßgebender Lastfall .....	23
<b>E</b>		Material .....	7
Eigenwerte .....	18, 23, 25	Modellbezeichnung .....	40, 41
Eingabedaten .....	6	Musterprotokoll .....	31
Einheiten .....	46		

<b>N</b>		
Nachweis .....	24, 26	Scrollrad .....
Nachweis eigenwertweise .....	25	Seitennummerierung .....
Nationaler Anhang .....	8	Seitenvorschau .....
Navigator .....	6	Selektion Ausdruckprotokoll .....
Neue Seite .....	35	Sofortaktualisierung .....
Normalspannung .....	13, 14	Sperren Grafik .....
Nummerierung .....	40	Sprache einstellen .....
		Stäbe auswählen .....
<b>O</b>		Standarddrucker .....
OpenOffice .....	47	Starten von FE-BEUL .....
		Steifen .....
<b>P</b>		
PDF-Datei .....	38	<b>U</b>
Plotten .....	43	Überschrift .....
Projektbezeichnung .....	40, 41	Unterraum .....
Protokollkopf .....	39, 40, 42	
<b>R</b>		<b>V</b>
Randbedingungen .....	9	von RSTAB/RFEM .....
Randspannungen .....	14	VCmaster .....
Relationsbalken .....	28	Verzweigungslastfaktor-Methode .....
RTF-Datei .....	38	Verzweigungslastfaktoren .....
<b>S</b>		<b>W</b>
Schaltflächen .....	11, 28	Wirksame Gurtbreiten .....
Schriftfeld .....	43	
Schubspannung .....	14	<b>Z</b>
		Zusatzerläuterung .....
		Zwischenablage .....