

**Fassung**  
**Dezember 2010**

**Zusatzmodul**

# **FE-BGDK**

**Biegedrillknicknachweis für Stäbe  
nach FE-Methode  
(Biegetorsionstheorie II. Ordnung)**

## **Programm- Beschreibung**

Alle Rechte, auch das der Übersetzung, vorbehalten.

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

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

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



# Inhalt

|         | Inhalt                                                                            | Seite     |       | Inhalt                                | Seite      |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|-------|---------------------------------------|------------|
| 1.      | <b>Einleitung</b>                                                                 | <b>5</b>  | 3.5   | <b>Elastische Stabbettungen</b>       | <b>52</b>  |
| 1.1     | <b>Zusatzmodul FE-BGDK</b>                                                        | <b>5</b>  | 3.6   | <b>Stabendfedern</b>                  | <b>60</b>  |
| 1.2     | <b>FE-BGDK Team</b>                                                               | <b>7</b>  | 3.7   | <b>Stabendgelenke</b>                 | <b>64</b>  |
| 1.3     | <b>Gebrauch des Handbuchs</b>                                                     | <b>8</b>  | 3.8   | <b>Belastung</b>                      | <b>66</b>  |
| 1.4     | <b>Aufruf des FE-BGDK-Moduls</b>                                                  | <b>8</b>  | 3.8.1 | Knotenlasten                          | 66         |
| 2.      | <b>Theoretische Grundlagen</b>                                                    | <b>10</b> | 3.8.2 | Stablasten                            | 68         |
| 2.1     | <b>Vorbemerkungen</b>                                                             | <b>10</b> | 3.8.3 | Imperfektionen                        | 71         |
| 2.1.1   | Allgemeines                                                                       | 10        | 4.    | <b>Berechnung</b>                     | <b>74</b>  |
| 2.1.2   | Grundlagen des Berechnungsverfahrens                                              | 12        | 4.1   | <b>Berechnungsdetails</b>             | <b>74</b>  |
| 2.1.3   | Bestimmung der Vorverformung                                                      | 13        | 4.2   | <b>Start der Berechnung</b>           | <b>75</b>  |
| 2.1.4   | Berechnung nach Theorie II. Ordnung                                               | 13        | 5.    | <b>Ergebnisse</b>                     | <b>77</b>  |
| 2.2     | <b>Definitionen</b>                                                               | <b>14</b> | 5.1   | <b>Spannungen querschnittsweise</b>   | <b>77</b>  |
| 2.2.1   | Koordinaten und Verschiebungen                                                    | 14        | 5.2   | <b>Spannungen stabsatzweise</b>       | <b>80</b>  |
| 2.2.2   | Schnittgrößen                                                                     | 15        | 5.3   | <b>Spannungen x-stellenweise</b>      | <b>81</b>  |
| 2.2.3   | Einzelfedern und kontinuierliche Federn                                           | 16        | 5.4   | <b>Spannungen spannungspunktweise</b> | <b>81</b>  |
| 2.2.4   | Lasten                                                                            | 18        | 5.5   | <b>Schnittgrößen</b>                  | <b>82</b>  |
| 2.2.5   | Randbedingungen                                                                   | 20        | 5.6   | <b>Verformungen</b>                   | <b>83</b>  |
| 2.3     | <b>Spannungsberechnung</b>                                                        | <b>20</b> | 5.7   | <b>Lagerkräfte</b>                    | <b>84</b>  |
| 2.4     | <b>Ermittlung gebundener Drehachsen</b>                                           | <b>23</b> | 5.8   | <b>Kritische Lastfaktoren</b>         | <b>85</b>  |
| 2.5     | <b>Ermittlung von Federsteifigkeiten</b>                                          | <b>26</b> | 6.    | <b>Ergebnisauswertung</b>             | <b>87</b>  |
| 2.5.1   | Drehfedern                                                                        | 26        | 6.1   | <b>Spannungen am Querschnitt</b>      | <b>88</b>  |
| 2.5.2   | Wegfedern                                                                         | 28        | 6.2   | <b>Ergebnisse am RSTAB-Modell</b>     | <b>90</b>  |
| 2.5.3   | Wölbfedern                                                                        | 29        | 6.3   | <b>Ergebnisverläufe</b>               | <b>94</b>  |
| 2.6     | <b>Nachweise nach DIN 18800</b>                                                   | <b>32</b> | 6.4   | <b>Filter für Ergebnisse</b>          | <b>95</b>  |
| 2.6.1   | Ersatzstabverfahren                                                               | 33        | 7.    | <b>Ausdruck</b>                       | <b>97</b>  |
| 2.6.1.1 | Ersatzstabsnachweis                                                               | 34        | 7.1   | <b>Ausdruckprotokoll</b>              | <b>97</b>  |
| 2.6.1.2 | Tragsicherheitsnachweis mit<br>Berechnung des räumlich imperfekten<br>Einzelstabs | 36        | 7.2   | <b>Grafikausdruck</b>                 | <b>98</b>  |
| 2.6.2   | Bestimmung der Vorverformungen                                                    | 37        | 8.    | <b>Allgemeine Funktionen</b>          | <b>99</b>  |
| 2.6.3   | Tragfähigkeitsnachweis nach Theorie II.<br>Ordnung                                | 38        | 8.1   | <b>FE-BGDK-Bemessungsfälle</b>        | <b>99</b>  |
| 2.6.4   | Traglasten $F_T$ oder $F_G$                                                       | 39        | 8.2   | <b>Einheiten und Dezimalstellen</b>   | <b>101</b> |
| 3.      | <b>Eingabedaten</b>                                                               | <b>40</b> | 8.3   | <b>Export der Ergebnisse</b>          | <b>101</b> |
| 3.1     | <b>Basisangaben</b>                                                               | <b>40</b> | 9.    | <b>Beispiele</b>                      | <b>103</b> |
| 3.2     | <b>Materialien</b>                                                                | <b>42</b> | 9.1   | <b>Träger mit Einzellast</b>          | <b>103</b> |
| 3.3     | <b>Querschnitte</b>                                                               | <b>44</b> | 9.1.1 | Biegung ohne Drehbettung              | 103        |
| 3.4     | <b>Knotenlager</b>                                                                | <b>46</b> | 9.1.2 | Biegung mit Drehbettung               | 104        |
|         |                                                                                   |           | 9.2   | <b>Träger mit Gleichlast</b>          | <b>104</b> |
|         |                                                                                   |           | 9.3   | <b>Kragträger mit Wölbbehinderung</b> | <b>105</b> |

# Inhalt

|       | Inhalt                                 | Seite |      | Inhalt                              | Seite |
|-------|----------------------------------------|-------|------|-------------------------------------|-------|
| 9.4   | Kragträger mit Gleichlast              | 106   | 9.8  | Dreifeldträger mit Gleichlasten     | 110   |
| 9.4.1 | Kragträgerende ohne Lagerung           | 106   | 9.9  | Gebetteter Träger mit Normalkraft   | 112   |
| 9.4.2 | Kragträgerende mit seitlicher Stützung | 107   | 9.10 | Dachträger Bürogebäude              | 113   |
| 9.5   | Träger mit Gleichlast                  | 107   | 9.11 | Träger mit exzentrischer Gleichlast | 117   |
| 9.6   | Durchlaufträger mit zwei Einzellasten  | 108   | A    | Literatur                           | 118   |
| 9.7   | Durchlaufträger mit Gleichlasten       | 108   | B    | Index                               | 119   |

# 1. Einleitung

## 1.1 Zusatzmodul FE-BGDK

Das Modul FE-BGDK stellt kein eigenständig lauffähiges Programm dar, sondern ist als Zusatzmodul fest in die Benutzeroberfläche des Hauptprogramms RSTAB integriert. Damit werden dem Nachlaufmodul die strukturspezifischen Eingabe- und Belastungsdaten aller Stäbe automatisch zur Verfügung gestellt. Umgekehrt können die FE-BGDK-Ergebnisse im Arbeitsfenster von RSTAB grafisch ausgewertet und in das zentrale Ausdruckprotokoll eingebunden werden.

FE-BGDK führt den Nachweis gegen Biegeknicken und Biegedrillknicken für Stabsätze. Das Programm basiert auf der Methode der finiten Elemente. Die Nachweise erfolgen am Gesamtsystem. Dazu werden Schnittgrößen, Verformungen und Spannungen von räumlich beanspruchten Tragwerken nach Theorie II. Ordnung bestimmt. FE-BGDK ermittelt zudem für eine gegebene Lastkombination die Stabilitätslast oder die maximal aufnehmbare Last bei Einhaltung der Normal-, Schub- und Vergleichsspannungen.

Separate Bemessungsfälle erlauben eine flexible Untersuchung des Biegeknick- und Biegedrillknickverhaltens.

Gemäß DIN 18800 kann der Nachweis nach verschiedenen Verfahren durchgeführt werden. In FE-BGDK geschieht dies durch folgende Ansätze:

- Berechnung der kritischen Lasten am perfekten System. Dies liefert
  - die ideale Biegeknicklast  $N_{Kl,z}$  um die z-Achse (aus der Systemebene heraus),
  - die ideale Drillknicklast  $N_{Kl,\vartheta}$  bzw.
  - das ideale Biegedrillknickmoment  $M_{Kl}$  um die y-Achse.

Mit diesen idealen Werten kann dann der Stabilitätsnachweis nach DIN 18800, Teil 2 für I-Profile nach dem Ersatzstabverfahren (z. B. mit BGDK) geführt werden.

- Berechnung der maximalen aufnehmbaren Last  $F_T$  bevor ein Stabilitätsverlust unter Einhaltung der vorgegebenen elastischen Grenzspannung eintritt (Durchschlagslast) oder Ermittlung der elastischen Grenzlasterlast  $F_G$ , bei der die elastische Grenzspannung erreicht wird. Diese Berechnungen erfolgen am imperfekten System.
- Nachweis der Spannungen unter  $\gamma$ -facher Last  $F_d$  am imperfekten System.

Die Berechnung erfolgt nach Biegetorsionstheorie II. Ordnung mit folgenden Möglichkeiten:

- Nachweis am Gesamtsystem, um so z. B. die Einspannwirkungen für die biegedrillknickgefährdeten Bauteile in systemgerechter Weise zu berücksichtigen
- Bestimmung der Imperfektionen durch eine Eigenwertanalyse vor der Berechnung und Ansatz des skalierten Eigenvektors als System-Vorverformung
- Erfassung des Einflusses von Verbänden und anderen stützenden Bauteilen durch Anordnung exzentrischer Knotenfedern sowie Idealisierung von Wölbeinspannungen über entsprechende Einzelfedern
- Berücksichtigung der elastischen Drehbettung durch die Trapezbleche der Dachhaut und/oder Verbandsschubsteifigkeiten in Form von verteilten Federn und Drehfedern, die in beide Querschnittsachsenrichtungen wirken
- Realisierung einer eventuell vorhandenen gebundenen Kippachse durch Vorgabe entsprechender Randbedingungen

Der Nachweis gegen Biegedrillknicken nach DIN 18800 wird mit FE-BGDK in folgender Form geführt:

1. Spannungsnachweis mit den unter  $\gamma$ -fachen Lasten nach Theorie II. Ordnung berechneten Schnittgrößen (imperfektes System mit Lasten  $F_d$ )
2. Berechnung der maximal aufnehmbaren Belastung, bevor das Systemversagen eintritt
  - Berechnung der Stabilitätslast unter der Voraussetzung, dass die elastischen Grenzspannungen eingehalten sind ( $F_T \leq F_G$ ).
  - Einhaltung der elastischen Grenzspannungen (Normal-, Schub- und Vergleichsspannung, ( $F_G \leq F_T$ )).

Einige Neuerungen im Zusatzmodul FE-BGDK sind:

- Kopplung der Masken des Moduls mit dem RSTAB-Arbeitsfenster, wodurch die aktuellen Objekte in der Hintergrundgrafik selektiert werden
- Sichtmodus zur Änderung der RSTAB-Ansicht im hinterlegten Arbeitsfenster
- Farb-Relationsbalken in den Ergebnismasken
- Kurzinfo über eingehaltenen oder nicht erfüllten Tragsicherheitsnachweis
- Darstellung der Profilausnutzung als Ergebnisverlauf
- Filtermöglichkeit für die Darstellung in der RSTAB-Grafik
- Nachweisanzeige am gerenderten Modell
- Direkter Datenexport zu MS Excel und OpenOffice.org Calc

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

Ihr Team von ING.-SOFTWARE DLUBAL GMBH

## 1.2 FE-BGDK Team

An der Entwicklung von FE-BGDK waren beteiligt:

### Programmkoordinierung

Dipl.-Ing. Georg Dlubal  
Dipl.-Ing. (FH) Younes El Frem

### Programmierung

|                               |                    |
|-------------------------------|--------------------|
| Prof. Dr.-Ing. Peter Wriggers | Ing. Roman Svoboda |
| Dipl.-Ing. Georg Dlubal       | Dis. Jiří Šmerák   |
| Mgr. Petr Oulehle             | Lukáš Tůma         |

### Querschnitts- und Materialdatenbank

|                      |             |
|----------------------|-------------|
| Ing. Ph.D. Jan Rybín | Jan Brnušák |
| Stanislav Krytinář   |             |

### Programmdesign, Dialogbilder und Icons

|                         |                |
|-------------------------|----------------|
| Dipl.-Ing. Georg Dlubal | Ing. Jan Milěř |
| MgA. Robert Kolouch     |                |

### Programmkontrolle

|                              |                       |
|------------------------------|-----------------------|
| Ing. Martin Vasek            | Bc. Michala Sobotková |
| Ing. Ing. František Knobloch |                       |

### Handbuch, Hilfesystem und Übersetzungen

|                             |                           |
|-----------------------------|---------------------------|
| Dipl.-Ing. Frank Faulstich  | Dipl.-Ü. Gundel Pietzcker |
| Dipl.-Ing. (FH) Robert Vogl |                           |

### Technische Unterstützung und Endkontrolle

|                                    |                                         |
|------------------------------------|-----------------------------------------|
| Dipl.-Ing. (BA) Markus Baumgärtel  | Dipl.-Ing. (FH) Bastian Kuhn            |
| Dipl.-Ing. (BA) Sandy Baumgärtel   | M.Sc. Dipl.-Ing. Frank Lobisch          |
| Dipl.-Ing. (FH) Steffen Clauß      | Dipl.-Ing. (FH) Alexander Meierhofer    |
| Dipl.-Ing. (FH) Matthias Entenmann | M.Eng. Dipl.-Ing. (BA) Andreas Niemeier |
| Dipl.-Ing. Frank Faulstich         | M.Eng. Dipl.-Ing. (FH) Walter Rustler   |
| Dipl.-Ing. (FH) René Flori         | M.Sc. Dipl.-Ing. (FH) Frank Sonntag     |
| Dipl.-Ing. (FH) Stefan Frenzel     | Dipl.-Ing. (FH) Christian Stautner      |
| Dipl.-Ing. (FH) Walter Fröhlich    | Dipl.-Ing. (FH) Robert Vogl             |
| Dipl.-Ing. (FH) Andreas Hörold     | Dipl.-Ing. (FH) Andreas Wopperer        |

## 1.3 Gebrauch des Handbuchs

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

Dieses Handbuch orientiert sich an der Reihenfolge und am Aufbau der Eingabe- und Ergebnismasken. Im Text werden die beschriebenen **Schaltflächen** (Buttons) in eckige Klammern gesetzt, z. B. [Details]. Gleichzeitig sind sie am linken Rand abgebildet. Zudem werden die **Begriffe** der Dialoge, Tabellen und Menüs in *Kursivschrift* hervorgehoben, um das Nachvollziehen der Erläuterungen zu erleichtern.

Am Ende des Handbuchs befindet sich ein Stichwortverzeichnis. Sollten Sie trotzdem nicht fündig werden, so können Sie auf der Website [www.dlubal.de](http://www.dlubal.de) die Suchfunktion benutzen, um in der Liste aller *Fragen und Antworten* nach bestimmten Kriterien zu filtern.

## 1.4 Aufruf des FE-BGDK-Moduls

Es bestehen in RSTAB folgende Möglichkeiten, das Zusatzmodul FE-BGDK zu starten.

### Menü

Der Programmaufruf kann erfolgen über das RSTAB-Menü

**Zusatzmodule → Stahlbau → FE-BGDK.**

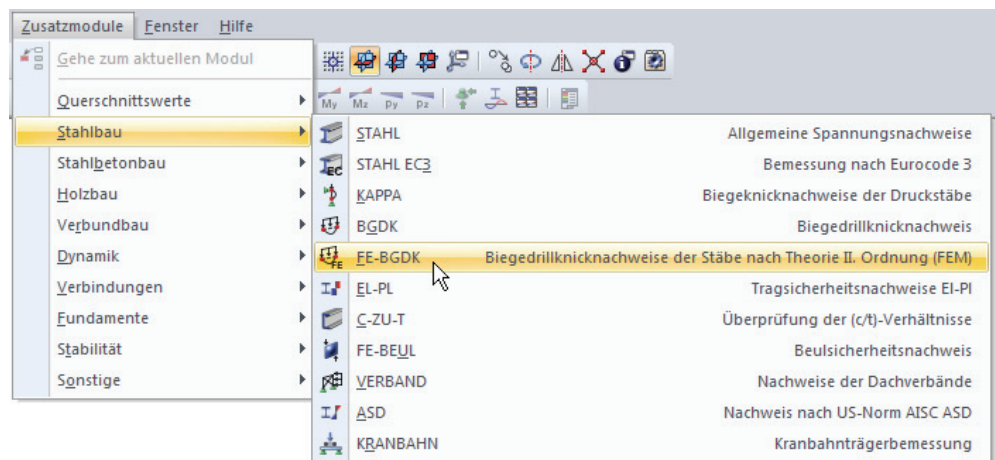


Bild 1.1: Menü *Zusatzmodule* → *Stahlbau* → *FE-BGDK*

## Navigator

FE-BGDK kann im *Daten-Navigator* aufgerufen werden über den Eintrag  
**Zusatzmodule → FE-BGDK.**

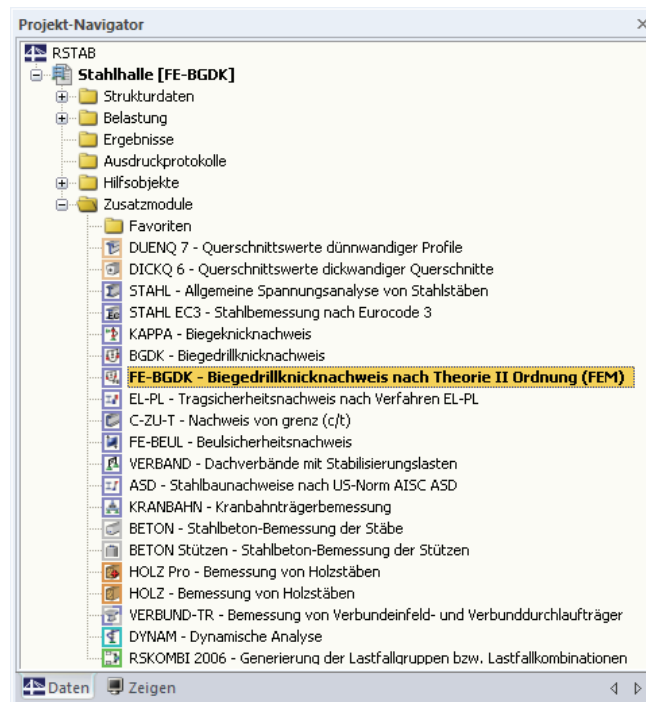
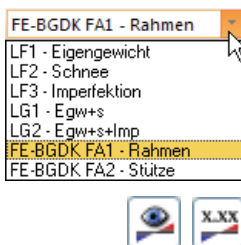


Bild 1.2: Daten-Navigator *Zusatzmodule* → *FE-BGDK*

## Panel

Falls in der RSTAB-Position bereits Ergebnisse für FE-BGDK vorliegen, kann der relevante Bemessungsfall in der Liste der Lastfälle eingestellt werden. Stellen Sie ggf. mit der Schaltfläche [Ergebnisse ein/aus] die grafische Anzeige der Nachweise und Detailergebnisse her.

Im Panel steht nun die Schaltfläche [FE-BGDK] zur Verfügung, die den Sprung in das Modul FE-BGDK ermöglicht.



FE-BGDK

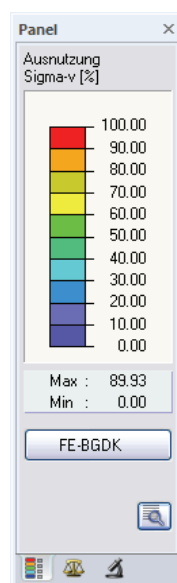


Bild 1.3: Panel-Schaltfläche [FE-BGDK]

## 2. Theoretische Grundlagen

Dieses Kapitel stellt die Grundlagen vor, die für die Arbeit mit dem Programm FE-BGDK von Bedeutung sind. Im Wesentlichen werden die theoretischen Ansätze der Literatur wiedergegeben. Dieses einführende Kapitel kann daher kein Lehrbuch ersetzen.

### 2.1 Vorbemerkungen

#### 2.1.1 Allgemeines

Das Biegedrillknicken stellt einen Stabilitätsfall dar, bei dem eine primäre Biegeverformung mit einer seitlichen Verschiebung einschließlich Drillung überlagert wird. Biegedrillknicken ist mit Kippen verwandt. Der Unterschied besteht darin, dass in der üblichen Sprachregelung Biegedrillknicken mit Beanspruchung aus exzentrischer Druckkraft verknüpft ist, während Kippen infolge Biegung auftritt. Darüber hinaus kann auch der Fall einer Druck-Biegebeanspruchung vorliegen. In allen Fällen hat die Lage der Wirkungslinie der auf einen Stab aufgebrachten Lasten einen erheblichen Einfluss auf die Größe der Stabilitätslast.

Alle oben genannten Stabilitätsprobleme lassen sich mit dem Programm FE-BGDK behandeln. Zur Berechnung des Biegedrillknickens oder Kippens von Trägern können unterschiedliche Verfahren angewendet werden. Einige Methoden seien hier kurz aufgeführt.

- Ersatzstabverfahren nach DIN 18800, Teil 1 und 2 (Programm BGDK [9])
- Berechnung der Eigenwerte ( $M_{Ki}$ ,  $N_{Ki}$ ) für Durchlaufträger oder beliebige Stabwerke unter dreidimensionaler Beanspruchung (Programm FE-BGDK)
- Grenzlast- oder Stabilitätsberechnung von Stabwerken unter dreidimensionaler Beanspruchung nach Theorie II. Ordnung am imperfekten System (Programm FE-BGDK)
- Grenzlast- oder Stabilitätsberechnung von Stabwerken unter dreidimensionaler Beanspruchung nach einer geometrisch exakten Theorie am imperfekten System

Für viele baupraktische Belange reicht das Ersatzstabverfahren völlig aus. Dieses Verfahren ist in der DIN 18800, Teil 1 [7] und 2 [8] und in vielen Veröffentlichungen beschrieben und verifiziert. Programmtechnische Umsetzungen finden sich beispielsweise im Zusatzmodul BGDK [9], das den Biegedrillknicksicherheitsnachweis für Stäbe mit einfach- oder doppel-symmetrischem Doppel-T-Querschnitt führt, die einer Beanspruchung aus Einfach- oder Doppelbiegung und konstanter Normalkraft unterliegen.

Das Ersatzstabverfahren nach DIN 18800 ist in seiner Anwendung auf spezielle Querschnitte (siehe oben) beschränkt. Zudem sind vom Anwender die Randbedingungen für den Ersatzstab zu definieren, was bei allgemeinen Stabtragwerken häufig nicht einfach ist und somit nur eine Abschätzung sein kann. Um hier genauer zu rechnen, ist das Stabtragwerk unter dreidimensionaler Beanspruchung nach Theorie II. Ordnung zu berechnen. In der Regel geht es dabei um die Berechnung der elastischen Stabilitätslast eines Ein- oder Mehrfeldträgers oder eines Rahmens.

Das Zusatzmodul FE-BGDK, das auf der Methode der finiten Elemente basiert, kann für die Berechnung der Stabilitätslasten von Stäben benutzt werden. Dabei wird ein elastisches Materialverhalten bei geometrisch nichtlinearem Verhalten angenommen. Folgende grundsätzlichen Annahmen werden bei der Wölbtorsionstheorie vorausgesetzt:

1. Formtreue Querschnitte, um lokale Instabilitäten auszuschließen
2. Bernoullische Biegung
3. Moderate Verschiebungen und Verdrehungen, die insgesamt klein gegenüber den Systemabmessungen sind

Die Berechnungen werden dreidimensional nach Biegetorsionstheorie II. Ordnung durchgeführt, wobei die einzelnen Stabelemente als gerade angesehen werden.

Vorverformungen können bei der Analyse als skalierte Eigenvektoren des Systems angesetzt werden. Die Berechnung von ausmittig angreifenden Lasten, z. B. am Ober- oder Untergurt, ist möglich.

In Abhängigkeit von der geometrischen Form des Tragwerkes, den Einwirkungen und den Vorverformungen (Imperfektionen) können unterschiedliche maximale Versagens- und/oder Grenzzustände auftreten. Bild 2.1 stellt die grundsätzlichen Tragwerksantworten dar.

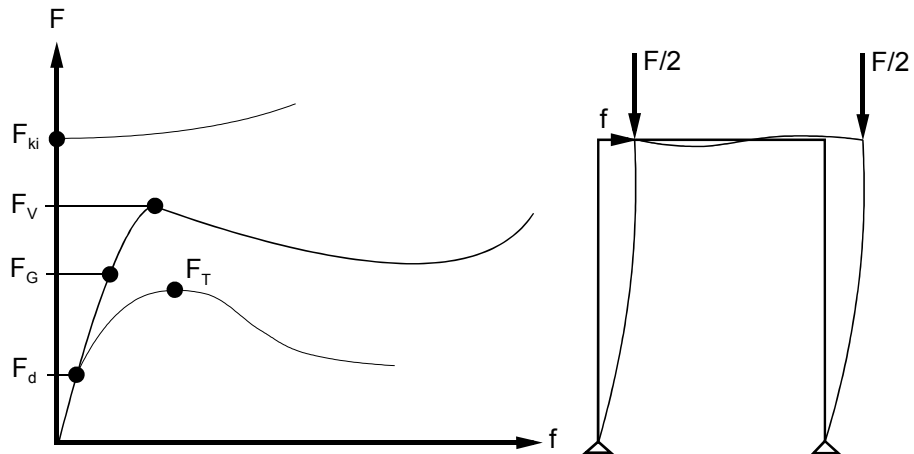


Bild 2.1: Grundsätzliche Tragwerksantwort

FE-BGDK liefert je nach Anwendung die folgenden Ergebnisse (vgl. auch Bild 2.1):

1. Verzweigungslast  $F_{ki}$ 
  - Ideales Biegedrillknickmoment  $M_{ki,y}$
  - Ideale Biegeknicklast  $N_{ki,z}$
  - Ideale Drillknicklast  $N_{ki,\vartheta}$

Das Programm berechnet stets die kleinste Verzweigungslast des Systems, wobei keine Vorverformungen berücksichtigt werden. Diese idealen kritischen Lasten sind bei der Anwendung des Ersatzstabverfahrens erforderlich (siehe Kapitel 2.6.1, Seite 33).

2. Traglast  $F_T$  infolge Stabilitätsverlust (Durchschlaglast) unter Einhaltung der elastischen Grenzspannung am imperfekten System

Die Durchschlaglast  $F_T$  wird unter Voraussetzung eines rein elastischen Werkstoffverhaltens mit Begrenzung durch eine vorzugebende elastische Grenzspannung ermittelt.

3. Elastische Grenzlast  $F_G$  am imperfekten System

Dies ist die Last, die das System aufnehmen kann, ohne dass in irgendeinem Querschnitt die Normalspannung, die Schubspannung oder die Vergleichsspannung (nach von Mises) größer als die entsprechende Grenzspannung wird. Diese Berechnung ist nur bei Vorgabe von Vorverformungen durchzuführen.

4. Mögliche Traglast  $F_V$  infolge Stabilitätsverlust bei Vorgabe von Vorverformungen ohne Einhaltung der elastischen Grenzspannungen

5. Nachweis der Grenzspannungen unter den Bemessungslasten  $F_d$  am imperfekten System nach Theorie II. Ordnung

Damit ist FE-BGDK in der Lage, basierend auf Theorie II. Ordnung die Verzweigungs-, Durchschlags- oder elastische Grenzlasten automatisch zu finden. Diese Lasten werden iterativ ermittelt.



Profiltypen

Um die Durchschlaglast  $F_T$  oder die elastische Grenzlast  $F_G$  (siehe Bild 2.1) zu bestimmen, ist auf das System eine Vorverformung aufzubringen. Diese wird in FE-BGDK automatisch aus der ersten, niedrigsten Eigenform generiert, da diese der Knickfigur der niedrigsten Stabilitätslast entspricht. Die Skalierung dieser Eigenform erfolgt nach DIN 18800 Teil 2, sie kann jedoch auch direkt vom Anwender vorgegeben werden (vgl. Kapitel 2.6.2, Seite 37 und Kapitel 3.8.3, Seite 72).

FE-BGDK führt die Nachweise für alle Walzprofile, einfach- und doppelsymmetrischen I-Profile, U-Profile, T-Profile, Rechteckprofile, C-Profile, Hohlprofile und Kreisringprofile. Das Programm in der Lage, die Spannungen nach Theorie II. Ordnung für diese oben genannten Profile zu berechnen. Auf diesen Spannungsberechnungen, die an den maßgebenden Punkten im Querschnitt durchgeführt werden, basiert dann die Bestimmung der elastischen Grenzlast  $F_G$  (siehe Punkt 3 oben) bzw. der Grenzspannungsnachweis (siehe Punkt 5 oben).

Zudem können auch beliebige Querschnittswerte eingegeben werden. Diese werden direkt von RSTAB übernommen. Die Spannungsnachweise werden wieder in FE-BGDK geführt.

Federn können in FE-BGDK als Einzelfedern oder als kontinuierliche Federn mit beliebigem Angriffspunkt im Querschnitt vorgegeben werden. Dies ist in der Regel erforderlich, wenn die aussteifende Wirkung von Dacheindeckungen (z. B. Trapezblech) berücksichtigt werden soll.

Sowohl Einzellasten als auch Streckenlasten können an beliebigen Stellen im Querschnitt angreifen.

### 2.1.2 Grundlagen des Berechnungsverfahrens

Die theoretischen Grundlagen des Programms FE-BGDK sind sehr umfangreich und können daher hier nicht im Detail diskutiert werden. Die entsprechenden Abhandlungen finden sich z. B. in PETERSEN [2] oder in RAMM, HOFMANN [10].

Für Biegetorsionsaufgaben, die nichtlineare Verformungsabhängigkeiten einschließen, existieren in der Regel keine analytischen Lösungen. Daher wird hier die Methode der finiten Elemente (FEM) angewandt, um Näherungslösungen der in [2] oder [10] angegebenen Differentialgleichungen zu bestimmen. Die Genauigkeit der Lösung hängt dann von der Wahl der Anzahl der finiten Elemente ab (vgl. Kapitel 9).

Für die FE-Diskretisierung werden Elemente mit zwei Knoten verwendet. Als Ansätze innerhalb der Elemente werden kubische Hermite-Polynome für die Verschiebungen in y- bzw. z-Richtung und für die Verdrehung um die x-Achse gewählt. Die Längsverschiebung in x-Richtung wird durch einen linearen Polynomansatz beschrieben. Diese Ansätze lösen die homogene Differentialgleichung der zugehörigen linearen Theorie exakt, stellen jedoch Näherungen für die Theorie II. Ordnung dar. Es hat sich bei der praktischen Anwendung der Methode gezeigt, dass in der Regel acht Elemente pro Feld eines Trägers ausreichen, um Verformungen mit Abweichungen von weniger als 5 % von der konvergierten Lösung zu berechnen. Eine Lösung wird als konvergiert bezeichnet, wenn sich bei jeweils verdoppelter Elementanzahl keine Änderungen mehr in der Lösung zeigen (vgl. Beispiel 9.2, Seite 104).

Mit diesen Ansätzen ergeben sich insgesamt sieben Freiheitsgrade pro Elementknoten:  $u_x, v_y, w_z, \varphi_x, \varphi_y, \varphi_z, \varphi'_x$ . Hier ist  $u_x$  die Längsverschiebung in Stabrichtung,  $v_y$  bzw.  $w_z$  sind die Verschiebungen in y- bzw. z-Richtung,  $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$  sind die Verdrehungen um die x-, y- bzw. z-Achse und  $\varphi'_x$  ist die Verwölbung.

### 2.1.3 Bestimmung der Vorverformung

Die Bestimmung der Vorverformung erfolgt durch Lösen des Eigenwertproblems:

$$(K - \lambda \cdot I) \cdot \Phi = 0$$

Gleichung 2.1: Eigenwertanalyse

In Gleichung 2.1 ist die Steifigkeitsmatrix  $K$  eine Funktion der Normalkräfte und Momente des Grundlastzustandes.  $I$  ist die Einheitsmatrix.

Durch Lösen des Eigenwertproblems mit einem iterativen Verfahren wird der zum niedrigsten Eigenwerte gehörende Eigenvektor  $\Phi$  bestimmt, der dann die Form der Vorverformung bestimmt. Die Skalierung der Vorverformung erfolgt nach DIN 18800 Teil 2.

### 2.1.4 Berechnung nach Theorie II. Ordnung

Für die Berechnung nach Theorie II. Ordnung werden folgende Voraussetzungen und Annahmen getroffen:

- Die Querschnitte sind dünnwandig und abschnittsweise konstant.
- Die einzelnen Stabelemente werden als gerade angesehen.
- Die Querschnittsform soll bei der Verformung des Stabes erhalten bleiben. Damit sind lokale Instabilitäten ausgeschlossen, die ggf. auch durch Querschnittsaussteifungen zu verhindern sind.
- Für die Biegebeanspruchung gilt die BERNOULLI-Hypothese vom Ebenbleiben der Querschnitte.
- Die Verschiebungen und Verdrehungen sind klein gegenüber den Systemabmessungen.

Die nach Theorie II. Ordnung ermittelten Schnittgrößen sind bereits auf das verschobene und verdrehte Koordinatensystem bezogen und brauchen deshalb für die Spannungsrechnung nicht transformiert werden.

Der Nachweis für ein Biegetorsionsproblem kann in FE-BGDK unterschiedlich ausgeführt werden. Dazu gehören:

1. Bestimmung des kritischen Lastfaktors am unverformten System
2. Bestimmung des kritischen Lastfaktors am verformten System
3. Nachweis der Spannungen unter Bemessungslast
4. Berechnung der maximal aufnehmbaren Last unter Einhaltung der Spannungen

Grundsätzlich erfolgt die Berechnung iterativ, wobei sich die Steifigkeitsmatrix  $K$  infolge bereits berechneter Schnittgrößen und Verformungen ändert. Für die Nachweise nach den obigen Punkten 2, 3 und 4 werden vor der eigentlichen iterativen Berechnung die Eigenformen mit den Schnittgrößen des ersten Schrittes ermittelt und gemäß Kapitel 2.6.2 berücksichtigt.

Die Bestimmung des kritischen Lastfaktors nach Punkt 1 oder 2 liefert die Stabilitätslast des untersuchten Tragwerkes. Diese ist in einer numerischen Berechnung dadurch gekennzeichnet, dass entweder die Determinante der Matrix  $K$  zu null wird oder bei der Berechnung für sehr kleine Lastzuwächse sehr große Verschiebungen auftreten. In beiden Fällen erkennt FE-BGDK, dass der zugehörige Gleichgewichtszustand nicht mehr stabil ist.

Praktisch läuft die Berechnung so ab, dass zunächst die Schnittgrößen, Verformungen und Spannungen für die vom Benutzer vorgegebenen Laststufen berechnet werden (siehe Kapitel 2.3 *Spannungsberechnung*). An dieser Stelle gibt es zwei Möglichkeiten:

- Die vom Benutzer vorgegebenen Laststufen sind stabile Gleichgewichtszustände. In diesem Fall erhöht FE-BGDK automatisch die Last über die vorgegebene Maximallast hinaus solange, bis eine Instabilität eintritt. Der zugehörige Wert wird dann durch eine geschachtelte Iteration genau bestimmt.
- Die vom Benutzer vorgegebenen Laststufen können nicht alle erreicht werden. In diesem Fall schachtelt FE-BGDK die zu der Instabilität gehörende Laststufe ein, wobei von der letzten stabilen Laststufe ausgegangen wird.

Damit ist der kritische Lastfaktor bekannt, der zur Verzweigungslast  $F_{Ki}$  (Biegedrillknicklast) gehört. Im Fall von Punkt 1 (siehe oben) erhält man damit die zum unverformten System gehörende Biegedrillknicklast. Das maximale Biegemoment  $M_y$  entspricht dann dem idealen Biegedrillknickmoment. Im Fall von Punkt 2 erhält man die mögliche Traglast  $F_V$  infolge Stabilitätsverlustes. In beiden Fällen wird vom Programm nicht überprüft, ob die Grenzspannungen eingehalten werden. Die Spannungen finden sich jedoch in der Ergebnisausgabe, wobei Überschreitungen gekennzeichnet sind.

Die Berechnung des Systems mit Vorverformung (siehe Punkt 2 oben) kann nun noch in der Weise durchgeführt werden, dass die vom Benutzer vorgegebenen Grenzspannungen eingehalten werden. In diesem Fall führt FE-BGDK die unter a) und b) genannten Schritte durch und prüft dabei, ob die Grenzspannungen eingehalten sind.

Schließlich kann auch noch der Nachweis nach Theorie II. Ordnung am biegedrillknickgefährdeten System unter Bemessungslast durchgeführt werden (siehe Punkt 3 oben). Kann FE-BGDK in diesem Fall ein Gleichgewicht finden, dann ist der Nachweis direkt erbracht, wenn alle Grenzspannungen eingehalten sind.

Für alle vorgestellten Fälle finden sich im Kapitel 9 entsprechende Beispiele.

## 2.2 Definitionen

### 2.2.1 Koordinaten und Verschiebungen

Bild 2.2 zeigt die Querschnittskordinaten und die positiven Verschiebungsgrößen.

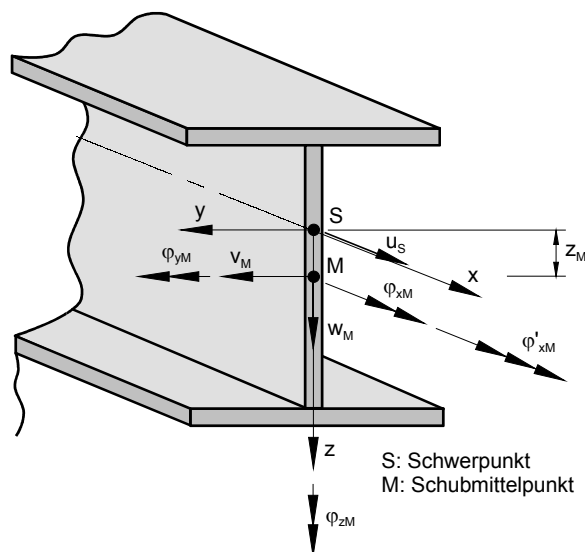


Bild 2.2: Querschnittskordinaten und Verschiebungsgrößen

Während die Längsverschiebung  $u_s$  auf den Schwerpunkt  $S$  bezogen ist, beziehen sich die Verschiebungen  $v_M$  und  $w_M$  sowie die Verdrehungen  $\varphi_{xM}$ ,  $\varphi_{yM}$ ,  $\varphi_{zM}$  und die Verwölbung  $\varphi'_{xM}$  auf den Schubmittelpunkt  $M$ . Die Verschiebungen  $v$ ,  $w$  und  $u$  eines beliebigen Querschnittspunkts lassen sich mit der bei der Theorie II. Ordnung üblichen Linearisierung durch die Verschiebungsgrößen des Schubmittelpunktes ausdrücken:

$$v = v_M - (y - y_M)(1 - \cos \varphi_{xM}) - (z - z_M) \sin \varphi_{xM} \approx v_M - (z - z_M) \sin \varphi_{xM}$$

$$w = w_M - (z - z_M)(1 - \cos \varphi_{xM}) + (y - y_M) \sin \varphi_{xM} \approx w_M + (y - y_M) \sin \varphi_{xM}$$

Gleichung 2.2: Verschiebungsgrößen

Die Verschiebung  $u$  eines Punktes resultiert aus der Translation des Querschnittes in  $x$ -Richtung, der Rotation um die  $y$ - und  $z$ -Achse und aus der Verwölbung infolge Torsion:

$$u = u_s - w_M \dot{z} - v_M \dot{y} - \varphi_{xM} \omega_0$$

mit  $\omega_0$  Einheitsverwölbung

Gleichung 2.3: Verschiebungsgrößen

### 2.2.2 Schnittgrößen

Bild 2.3 zeigt die verwendeten Schnittgrößendefinitionen.

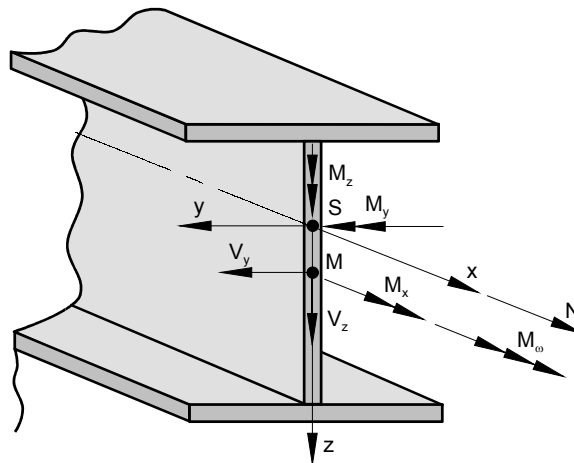


Bild 2.3: Schnittgrößendefinition am positiven Schnitthufer

Die Querkräfte  $V_z$  und  $V_y$  sowie das Torsionsmoment  $M_x$  und das Wölbmoment  $M_\omega$  sind auf den Schubmittelpunkt  $M$  bezogen, die Biegemomente  $M_y$  und  $M_z$  sowie die Normalkraft  $N$  auf den Schwerpunkt  $S$ .



Die Schnittgrößen beziehen sich immer auf die Hauptachsen des Querschnitts. Bei unsymmetrischen Querschnitten sind somit die Querkräfte  $V_y$  und  $V_u$  und die Biegemomente als  $M_u$  und  $M_v$  anzunehmen.

### 2.2.3 Einzelfedern und kontinuierliche Federn

Elastische Stützungen können durch Berücksichtigung von zentrisch oder exzentrisch angeordneten Einzelfedern oder/und kontinuierlichen Federn (Elementfedern) realisiert werden.

Im Bild 2.4 sind die **zentrischen Einzelfedern** am Knoten K dargestellt. Diese Federn sind auf das globale Koordinatensystem (KOS) bezogen.

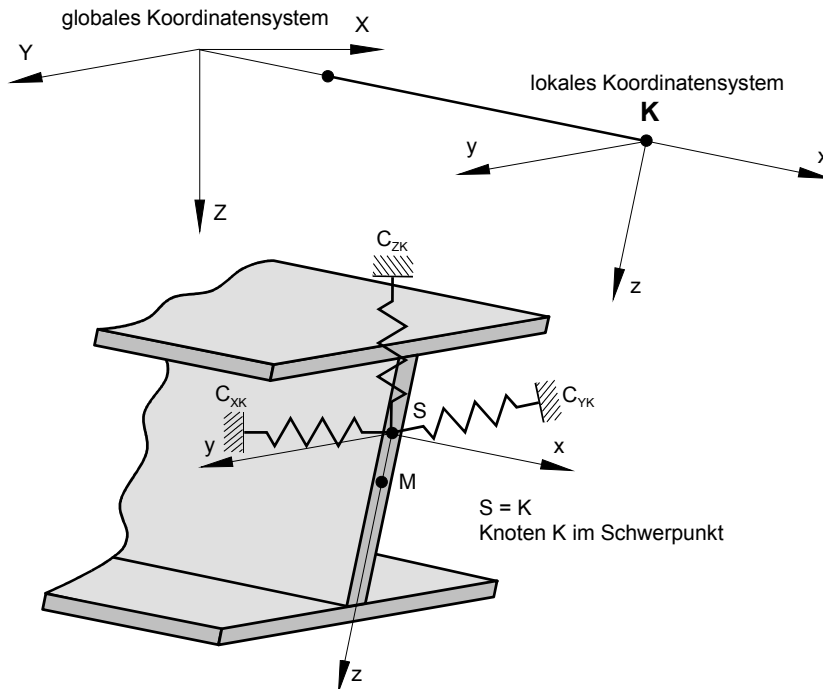


Bild 2.4: Zentrische Knotenfedern

Die Federkonstanten in Bild 2.4 bedeuten:

|                  |                                                        |
|------------------|--------------------------------------------------------|
| $C_{XK}$         | Knotenfederkonstante in globaler X-Richtung in [kN/cm] |
| $C_{YK}$         | Knotenfederkonstante in globaler Y-Richtung in [kN/cm] |
| $C_{ZK}$         | Knotenfederkonstante in globaler Z-Richtung in [kN/cm] |
| $C_{\varphi XK}$ | Knotendrehfederkonstante um globale X-Achse in [kNcm]  |
| $C_{\varphi YK}$ | Knotendrehfederkonstante um globale Y-Achse in [kNcm]  |
| $C_{\varphi ZK}$ | Knotendrehfederkonstante um globale Z-Achse in [kNcm]  |
| $C_{\omega K}$   | Wölbfederkonstante in [kNcm <sup>3</sup> ]             |

Die **exzentrischen Knotenfedern** am Knoten K sind auf das lokale Koordinatensystem bezogen (siehe folgendes Bild 2.5).

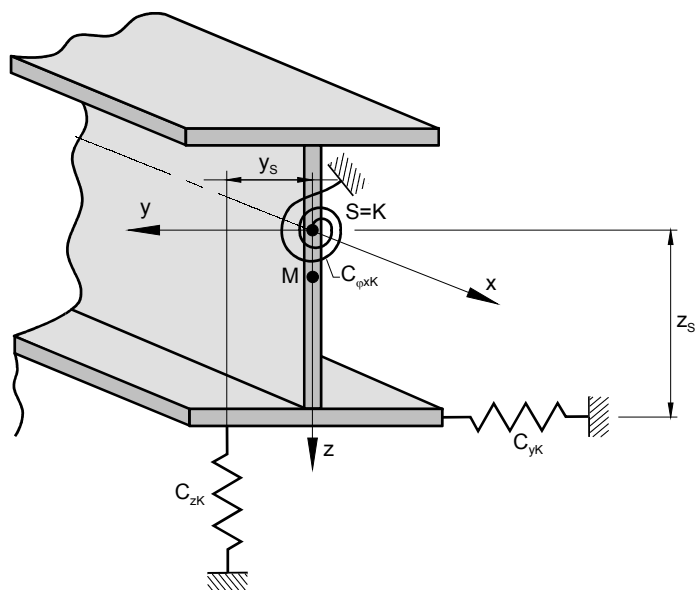


Bild 2.5: Exzentrische Knotenfeder

|                |                                                                                                          |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $x, y, z$      | Lokales Koordinatensystem                                                                                |
| $C_{yK}$       | Knotenfederkonstante in lokaler y-Richtung in [kN/cm]                                                    |
| $C_{zK}$       | Knotenfederkonstante in lokaler Z-Richtung in [kN/cm]                                                    |
| $C_{\phi XK}$  | Drehfederkonstante um lokale X-Achse in [kNcm]                                                           |
| $C_{\omega K}$ | Wölbfederkonstante in [kNcm <sup>3</sup> ] bezogen auf die lokale x-Achse<br>(im Bild nicht dargestellt) |
| $y_S$          | Abstand der Feder $C_{zK}$ vom Schwerpunkt S                                                             |
| $z_S$          | Abstand der Feder $C_{yK}$ vom Schwerpunkt S                                                             |

Die **kontinuierlichen Federn** (Elementfedern) sind im Bild 2.6 definiert. Diese Bettungsziffern sind auf das lokale Koordinatensystem bezogen und sind längs des Stabes konstant. Sie werden programmintern auf den Schubmittelpunkt  $M$  bezogen und umgerechnet.

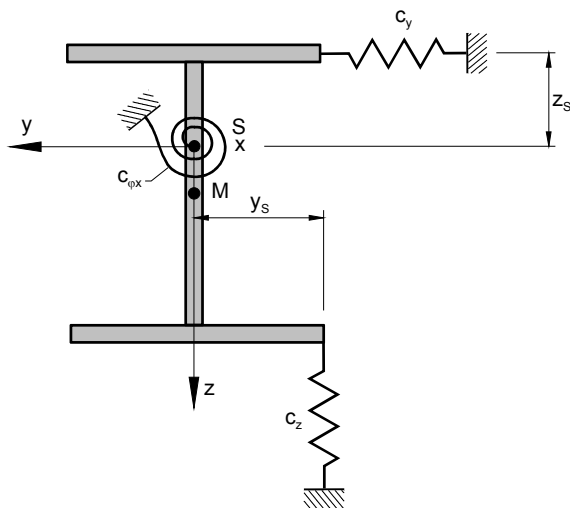


Bild 2.6: Kontinuierliche Federn

|              |                                                       |
|--------------|-------------------------------------------------------|
| $C_y$        | Knotenfederkonstante in lokaler y-Richtung in [kN/cm] |
| $C_z$        | Knotenfederkonstante in lokaler Z-Richtung in [kN/cm] |
| $C_{\phi X}$ | Drehfederkonstante um lokale X-Achse in [kNcm]        |
| $y_S$        | Abstand der Feder $C_z$ vom Schwerpunkt S             |
| $z_S$        | Abstand der Feder $C_y$ vom Schwerpunkt S             |

## 2.2.4 Lasten

Bild 2.7 zeigt Einzellasten, die als **zentrische Knotenlasten** definiert sind.

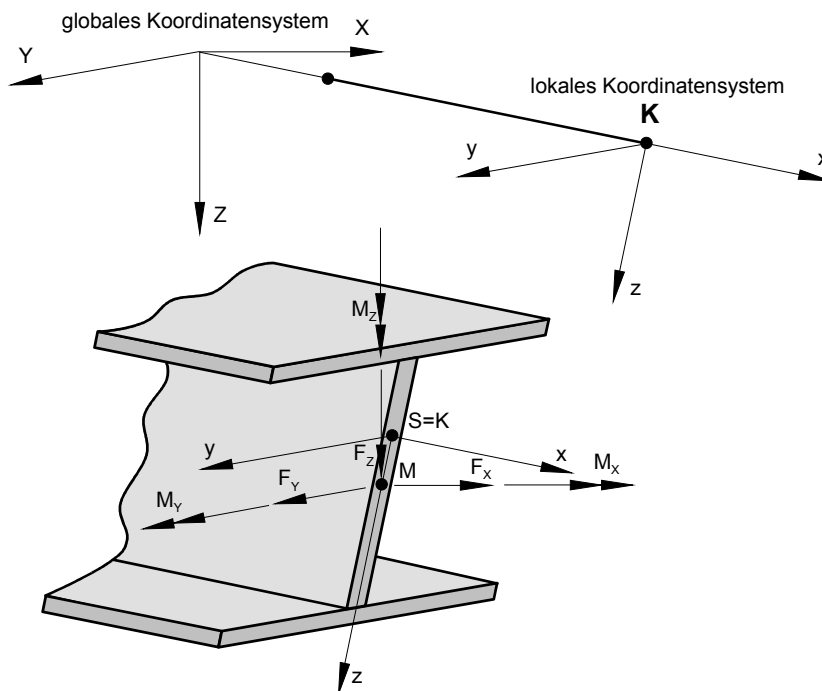


Bild 2.7: Zentrische Einzellasten

|       |                                                 |
|-------|-------------------------------------------------|
| $F_x$ | Einzellast in globaler X-Richtung bezogen auf M |
| $F_y$ | Einzellast in globaler Y-Richtung bezogen auf M |
| $F_z$ | Einzellast in globaler Z-Richtung bezogen auf M |
| $M_x$ | Einzelmoment um globale X-Achse, bezogen auf M  |
| $M_y$ | Einzelmoment um globale Y-Achse, bezogen auf M  |
| $M_z$ | Einzelmoment um globale Z-Achse, bezogen auf M  |

Greifen die Einzellasten zentrisch im Knoten  $K$  an und weisen in Richtung der lokalen Koordinaten, so besteht die einfache Möglichkeit, diese Lasten lokal als exzentrische Lasten einzugeben (Bild 2.8), indem die entsprechenden Koordinaten zu Null gesetzt werden.

**Exzentrische Einzellasten** am Knoten  $K$  sind auf das lokale Koordinatensystem zu beziehen.

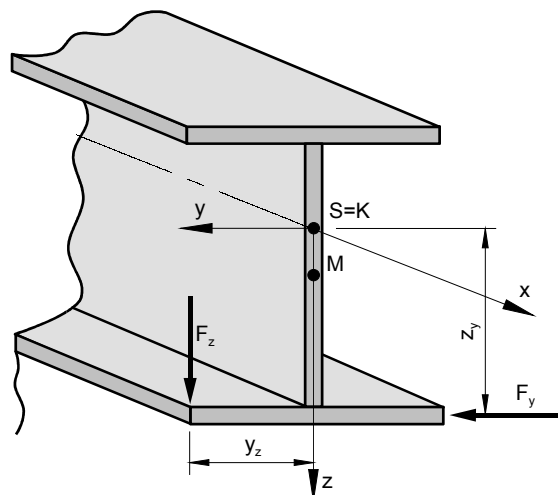


Bild 2.8: Exzentrische Einzellasten

- $F_y$  Einzellast in lokaler y-Richtung
- $F_z$  Einzellast in lokaler z-Richtung
- $z_y$  Abstand der Last  $F_y$  vom Schwerpunkt in z-Richtung
- $y_z$  Abstand der Last  $F_z$  vom Schwerpunkt in y-Richtung

Das folgende Bild zeigt die Definition der **Streckenlasten**.

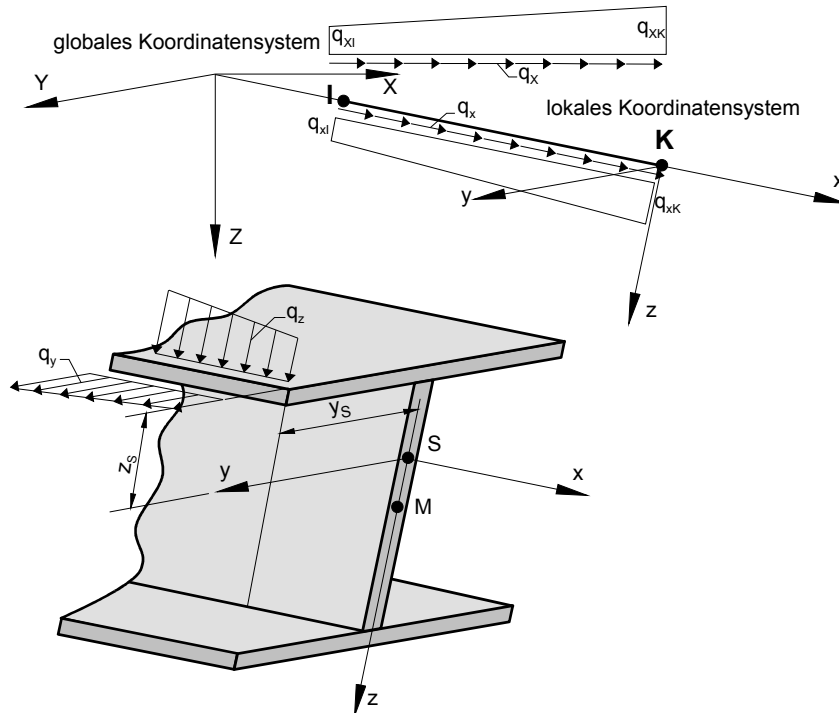


Bild 2.9: Streckenlasten

- $q_x / q_X$  Streckenlast in lokaler x- bzw. globaler X-Richtung
- $q_y / q_Y$  Streckenlast in lokaler y- bzw. globaler Y-Richtung
- $q_z / q_Z$  Streckenlast in lokaler z- bzw. globaler Z-Richtung
- $y_s$  Lokale y-Koordinate (bezogen auf S) der Streckenlasten  $q_z$
- $z_s$  Lokale z-Koordinate (bezogen auf S) der Streckenlasten  $q_y$
- $m_x / m_X$  Lokales bzw. globales Streckentorsionsmoment bezogen auf S



Die globalen Streckenlasten werden automatisch im Schubmittelpunkt  $M$  angenommen, die lokalen Streckenlasten sind in Bezug auf den Schwerpunkt  $S$  anzugeben.

Die Streckenlasten können sowohl global als auch lokal eingegeben werden. Exzentrische Streckenlasten können nur lokal bezogen definiert werden. Die Lasten sind zur Eingabe auf den Schwerpunkt  $S$  bezogen. Sie werden programmintern auf den Schubmittelpunkt  $M$  umgerechnet.

Globale Streckenlasten werden von FE-BGDK als im Schubmittelpunkt  $M$  angreifend angenommen. Die Bindungen des Tragwerkes durch Auflagerreaktionen (Randbedingungen) müssen in globaler Richtung vorgegeben werden (vgl. folgendes Kapitel 2.2.5).



Die Lasten beziehen sich immer auf die Hauptachsen des Querschnitts. Bei unsymmetrischen Querschnitten sind somit die Einzellasten  $F_u$  und  $F_v$  und die Streckenlasten  $q_v$  und  $q_u$  anzunehmen.

### 2.2.5 Randbedingungen

Das folgende Bild zeigt die verwendeten Kinematn zur Festlegung der Randbedingungen.

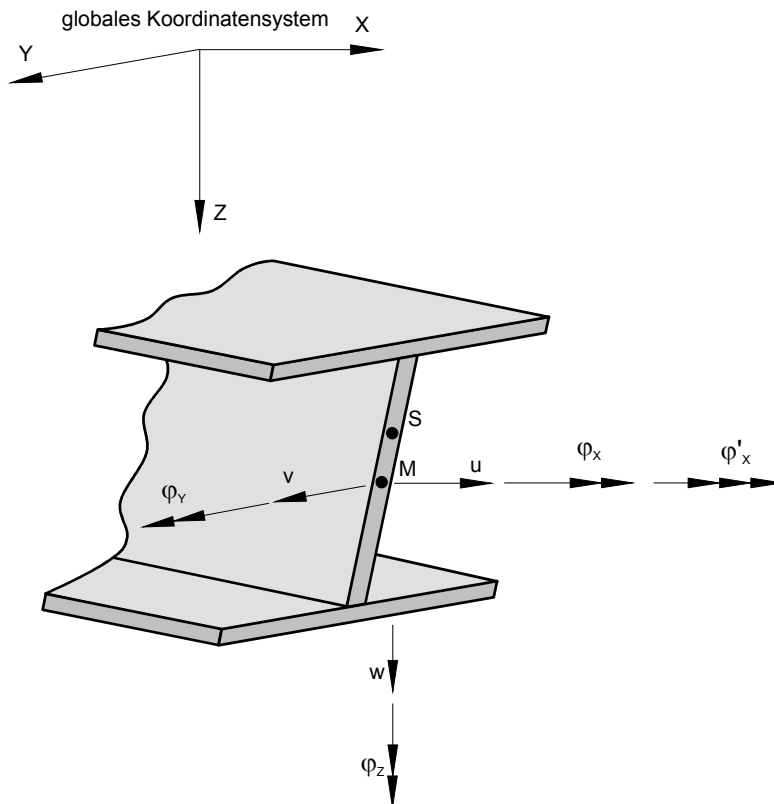


Bild 2.10: Randbedingungen

Die Randbedingungen werden in globaler Richtung vorgegeben, wobei die einzelnen Verschiebungs- und Verdrehungskomponenten durch Vorgabe von Kennziffern zu Null gesetzt oder freigegeben werden.

## 2.3 Spannungsberechnung

FE-BGDK berechnet sowohl Normal- als auch Schubspannungen sowie die Vergleichsspannung nach VON MISES an den maßgebenden Spannungspunkten  $i$  folgender Querschnittstypen:

- Walzprofile
- Einfach- oder doppelsymmetrische I-Profile
- T-Profile,
- U-Profile,
- C-Profile und
- Kreisring- und Hohlkastenprofile

Die Querschnittspunkte sind im Folgenden durch die Koordinaten  $(y_i, z_i)$  gekennzeichnet und werden weiter unten definiert. Alle Spannungen werden aus Schnittgrößen bestimmt, die nach der Theorie II. Ordnung unter  $\gamma_F$ -facher Belastung berechnet sind.

Die maßgebenden Punkte zur Spannungsermittlung hängen von der Querschnittsform ab. Sie sind im Bild 5.2 auf Seite 79 dokumentiert. Die in der Profilgrafik dargestellten Nummern visualisieren die in den Ausgabetafeln angegebenen Spannungspunkt-Nummern.

Mit Berücksichtigung der Wölbkrafttorsion treten bei den **Normalspannungen**  $\sigma_x$  nicht nur Anteile aus Normalkraft und Biegung, sondern auch aus dem Wölbmoment auf. Es ergibt sich folgende Normalspannung in einem Punkt  $i$  des Querschnitts:

$$\sigma_{x,i} = \frac{N}{A} + \frac{M_y}{W_y(y_i, z_i)} - \frac{M_z}{W_z(y_i, z_i)} - \frac{M_\omega}{I_\omega} \omega_M(y_i, z_i)$$

Gleichung 2.4: Normalspannung  $\sigma_x$

Die hierin enthaltenen Größen sind in folgender Tabelle erläutert.

| Größe           | Erläuterung                                         |
|-----------------|-----------------------------------------------------|
| N               | Normalkraft                                         |
| $M_y$           | Biegemoment um die y-Achse                          |
| $M_z$           | Biegemoment um die z-Achse                          |
| $M_\omega$      | Wölbmoment                                          |
| A               | Querschnittsfläche                                  |
| $W_y(y_i, z_i)$ | Widerstandsmoment um y-Achse für Punkt $(y_i, z_i)$ |
| $W_z(y_i, z_i)$ | Widerstandsmoment um z-Achse für Punkt $(y_i, z_i)$ |
| $I_\omega$      | Wölbflächenmoment 2. Grades (auch: $C_M$ )          |
| $\omega_M$      | Hauptverwölbung am Punkt $(y_i, z_i)$               |

Tabelle 2.1: Parameter für Normalspannungen  $\sigma_x$

Die **Schubspannungen** setzen sich aus Querkrafts- und Torsionsanteilen zusammen. Die primären Schubspannungen  $\tau_p$  in einem Punkt  $i$  des Querschnitts bestimmen sich wie folgt:

$$\tau_{pi} = \frac{V_y \cdot S_z(y_i, z_i)}{I_z \cdot t(y_i, z_i)} + \frac{V_z \cdot S_y(y_i, z_i)}{I_y \cdot s(y_i, z_i)} + \left| \frac{M_{x,p}}{W_T(y_i, z_i)} \right|$$

Gleichung 2.5: Primäre Schubspannungen  $\tau_p$

Die hierin auftretenden Größen sind in folgender Tabelle erläutert.

| Größe           | Erläuterung                                                    |
|-----------------|----------------------------------------------------------------|
| $V_y$           | Querkraft in Richtung der y-Achse                              |
| $V_z$           | Querkraft in Richtung der z-Achse                              |
| $M_{x,p}$       | Primäres Torsionsmoment                                        |
| $I_y$           | Trägheitsmoment bezüglich der y-Achse                          |
| $I_z$           | Trägheitsmoment bezüglich der z-Achse                          |
| $S_y(y_i, z_i)$ | Statisches Moment bezüglich der y-Achse für Punkt $(y_i, z_i)$ |
| $S_z(y_i, z_i)$ | Statisches Moment bezüglich der z-Achse für Punkt $(y_i, z_i)$ |
| $t(y_i, z_i)$   | Dicke der maßgebenden Querschnittsteile im Punkt $(y_i, z_i)$  |
| $s(y_i, z_i)$   | Dicke der maßgebenden Querschnittsteile im Punkt $(y_i, z_i)$  |
| $W_T(y_i, z_i)$ | Torsionswiderstandsmoment für Punkt $(y_i, z_i)$               |

Tabelle 2.2: Parameter für primäre Schubspannungen  $\tau_p$

Des Weiteren kann auch noch die sekundäre Schubspannung  $\tau_s$  infolge des sekundären Torsionsmomentes  $M_{x,s}$  berechnet werden.

$$\tau_{s,i} = \frac{M_{x,s} \cdot A_{\omega}(y_i, z_i)}{I_{\omega} \cdot t(y_i, z_i)}$$

Gleichung 2.6: Sekundäre Schubspannung  $\tau_s$

Die hierin auftretenden Größen sind in folgender Tabelle erläutert.

| Größe                  | Erläuterung                                                   |
|------------------------|---------------------------------------------------------------|
| $M_{x,s}$              | Sekundäres Torsionsmoment                                     |
| $A_{\omega}(y_i, z_i)$ | Wölfläche im Punkt $(y_i, z_i)$                               |
| $I_{\omega}$           | Wölbwiderstandsmoment                                         |
| $t(y_i, z_i)$          | Dicke der maßgebenden Querschnittsteile im Punkt $(y_i, z_i)$ |

Tabelle 2.3: Parameter für sekundäre Schubspannungen  $\tau_s$



Die Berechnung der sekundären Schubspannungen ist für Walzprofile, einfach- und doppel-symmetrische I-Profile und Hohlkastenprofile möglich.

In FE-BGDK liegt es im Ermessen des Anwenders, ob die sekundären Schubspannungen bei der Spannungsberechnung berücksichtigt werden sollen. Falls diese in die Spannungsberechnung eingehen sollen, werden sie direkt zu den primären Schubspannungen addiert.

Die **Vergleichsspannung**  $\sigma_v$  nach VON MISES ermittelt sich wie folgt aus der Normal- und Schubspannung:

$$\sigma_{v,i} = \sqrt{\sigma_{x,i}^2 + 3\tau_{p,s,i}^2}$$

Gleichung 2.7: Vergleichsspannung  $\sigma_v$

Im Standardfall wird bei der Vergleichsspannungsberechnung davon ausgegangen, dass die sekundären Schubspannungen vernachlässigt werden können. Falls diese aber berücksichtigt werden (siehe oben), so wird für  $\tau_{p,s}$  die Summe aus primärer und sekundärer Schubspannung eingesetzt. Die Schubspannungen infolge des primären Torsionsmoments gemäß Gleichung 2.5 gehen in Gleichung 2.7 immer ein.

Die Normal-, Schub- und Vergleichsspannungen werden für alle Punkte im Querschnitt, die bei der beim Biegedrillknicken entstehenden dreidimensionalen Beanspruchung maßgebend sein können, berechnet. In der Ausgabe wird die Stelle für jede Spannungsart (Normal-, Schub- und Vergleichsspannung) angegeben, bei der der maximale Wert auftritt.

Bei den Grenzlasterberechnungen wird diejenige Grenzlaster  $F_G$  berechnet, bei der an keiner Stelle im Tragwerksquerschnitt infolge der  $\gamma$ -fachen Einwirkungen die zulässigen Werte für die Spannungen überschritten werden. Dazu muss die maximale Spannung im Querschnitt bestimmt werden. Es sind demnach folgende Bedingungen einzuhalten:

$$\max_i(\sigma_{x,i}) \leq \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}; \quad \max_i(\tau_{p,s,i}) \leq \frac{f_{y,k}}{\gamma_M \cdot \sqrt{3}}; \quad \max_i(\sigma_{v,i}) \leq \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}$$

Gleichung 2.8: Bedingungen für Grenzlaster  $F_G$

Erfolgt der Nachweis nach DIN 18800 Teil 2, Element (121) und Teil 1, Element (749), so dürfen die Normal- bzw. Vergleichsspannungen diese Grenzwerte um 10 % überschreiten, (siehe Kapitel 2.6.1).

## 2.4 Ermittlung gebundener Drehachsen

Konstruktiv bedingt liegt bei praktischen Konstruktionen häufig ein Biegedrillknickproblem mit gebundener Drehachse im Abstand  $z_D$  vom Schwerpunkt vor. Diese Zwangsdrehachse wird im Programm durch kontinuierliche oder diskrete Wegfedern in y-Richtung realisiert, wobei für die Federsteifigkeiten Werte in der Größenordnung von  $10^8$  bis  $10^{10}$  für  $c_y$  anzusetzen sind, um die Verschiebungen in der Zwangsdrehachse zu unterdrücken.

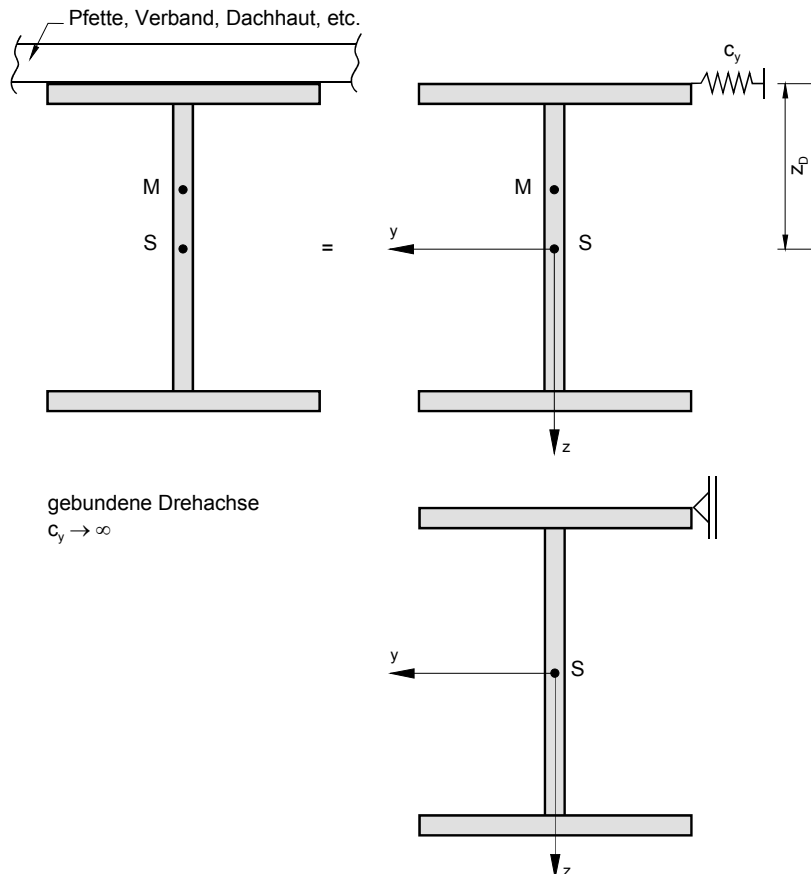


Bild 2.11: Gebundene Drehachse

Die gebundene Kippachse darf beim Nachweis einer ausreichenden seitlichen Verformungsbehinderung nach DIN 18800 Teil 2 [8] angesetzt werden. Eine ausreichende Behinderung kann z. B. durch ständig am Druckgurt anschließendes Mauerwerk erfolgen. Wenn am Träger Trapezprofile nach DIN 18807 [12] angeschlossen sind, und die Bedingung

$$\text{vorh } S \geq \text{erf } S$$

Gleichung 2.9: Bedingung Schubfeldsteifigkeit

mit

$$\text{erf } S = S_a = \left( E I_{\omega} \frac{\pi^2}{l^2} + G I_T + E I_z \frac{\pi^2}{4 l^2} h_p^2 \right) \frac{70}{h_p^2}$$

Gleichung 2.10: Erforderliche Schubfeldsteifigkeit bei Befestigung in jeder Sicke

für eine Befestigung in jeder Sicke erfüllt ist, dann darf die Anschlussstelle als in der Trapezblechebene unverschieblich gehalten angesehen werden.

$S_a$  bezeichnet den auf den untersuchten Träger entfallenden Anteil der Schubfestigkeit der Trapezbleche nach DIN 18800 Teil 1 [7] bei Befestigung in jeder Profilrippe. Hierzu ist  $l$  die Spannweite des auszusteienden Trägers und  $h_p$  seine Profilhöhe (I-Profil vorausgesetzt).

Erfolgt die Befestigung der Trapezprofile nur in jeder zweiten Profilrippe, so gilt:

$$\text{erf } S = S_b = 5 \cdot S_a$$

mit  $S_a$  siehe Gleichung 2.10

Gleichung 2.11: Erforderliche Schubfeldsteifigkeit bei Befestigung in jeder zweiten Sicke

Gleichung 2.10 und Gleichung 2.11 zur Bestimmung der seitlichen Unverschieblichkeit eines Trägers (gebundene Drehachse) kann bei entsprechender Ausbildung der Anschlussstellen auch für andere Bekleidungen als Trapezbleche angewendet werden, vgl. Anmerkung zu DIN 18800 Teil 2, Element (308).

Der ideale Schubmodul eines Trapezbleches ergibt sich zu

$$G_s = \frac{10^4}{K_1 + 100 \frac{K_2}{l_s}} \quad \left[ \frac{\text{kN}}{\text{m}} \right]$$

mit  $K_1$  Schubfeldwert nach Zulassung in [m/kN]  
 $K_2$  Schubfeldwert nach Zulassung in [m<sup>2</sup>/kN]  
 $l_s$  Schubfeldlänge in [cm], siehe Bild 2.12

Gleichung 2.12: Schubmodul Trapezblech

Für die auf den auszusteifenden Träger (z. B. den Riegel im Bild 2.12) entfallende Schubsteifigkeit folgt damit:

$$S_T = \frac{a}{100} G_s \quad [\text{kN}]$$

mit  $a$  Abstand der auszusteifenden Träger (Riegel) in [cm]

Gleichung 2.13: Schubsteifigkeit Trapezblech

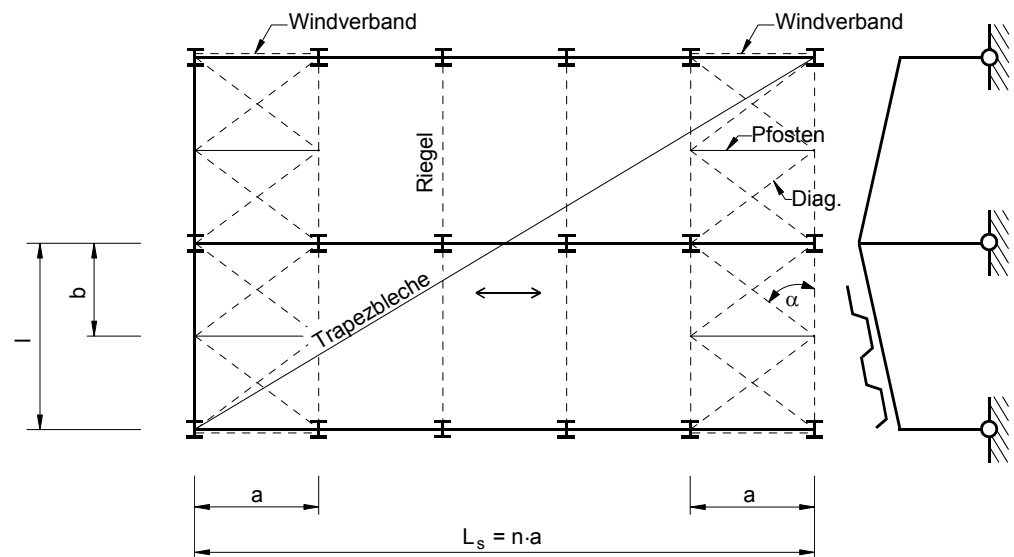


Bild 2.12: Riegel mit Trapezblechen und Verbänden

Die Schubfestigkeit der Wind- und Stabilisierungsverbände kann mit in Rechnung gestellt werden. Für die ideale Schubsteifigkeit eines Verbandes mit schlupffreien Anschlüssen ergibt sich (siehe [8] und [1]):

$$S_V = \frac{1}{\frac{1}{E \cdot A_D \cdot \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha} + \frac{1}{E \cdot A_P \cdot \cot \alpha}}$$

mit  $S_V$  Verbandschubsteifigkeit in [kN]  
 $A_D$  Fläche der Diagonalen in [cm]  
 $A_P$  Fläche der Pfosten in [cm]  
 $\alpha$  Winkel zwischen Diagonale und Riegelgurt

Gleichung 2.14: Verbandschubsteifigkeit

In der obigen Gleichung werden nur die Zugdiagonalen des Kreuzverbandes berücksichtigt. Sind verschiedene Pfosten bzw. Diagonalen vorgesehen, sind die minimalen Querschnittsflächen für  $A_P$  bzw.  $A_D$  einzusetzen.

Gleichung 2.14 lässt sich noch wie folgt umstellen.

$$S_V = \frac{a^2 b E}{\frac{(\sqrt{a^2 + b^2})^3}{A_D} + \frac{a^3}{A_P}}$$

Gleichung 2.15: Verbandschubsteifigkeit

Damit lässt sich näherungsweise die auf einen Riegel oder Träger entfallende Schubsteifigkeit (nur aus den Verbänden) berechnen.

$$S_R = m \frac{a}{l_s} S_V$$

mit  $m$  Anzahl der aussteifenden Verbände in Dachebene

Gleichung 2.16: Schubmodul Trapezblech

Werden die Schubsteifigkeiten aus Trapezblecheindeckung und Verband gleichzeitig angesetzt, so folgt mit Gleichung 2.10, Gleichung 2.14, Gleichung 2.15 und Gleichung 2.13:

- Befestigung in jeder Sicke:

$$\text{vorh } S = S_T + S_R$$

Gleichung 2.17: Schubfeldsteifigkeit

- Befestigung in jeder zweiten Sicke

$$\text{vorh } S = \frac{1}{5} S_T + S_R$$

Gleichung 2.18: Schubfeldsteifigkeit

Der Nachweis erfolgt dann mit Gleichung 2.9.



Eine kontinuierliche gebundene Drehachse ist in FE-BGDK entsprechend durch kontinuierliche seitliche Wegfedern  $c_y$  mit großer Steifigkeit zu idealisieren, z. B.  $10^6$  (kN/cm)/cm. Ein Beispiel hierzu findet sich im Kapitel 9.9 auf Seite 112.



Seitliche Halterungen, die in Längsrichtung unverschieblich gehalten sind (z. B. auf dem Riegel aufliegende Einzelpfetten), werden durch diskrete Einzelfedern  $c_y$  in diesen Punkten idealisiert, beispielsweise wie folgt:

$$c_y = \frac{E \cdot A}{l}$$

|     |     |                                     |
|-----|-----|-------------------------------------|
| mit | $l$ | Länge der Pfette bis zum Lagerpunkt |
|     | $E$ | Elastizitätsmodul                   |
|     | $A$ | Querschnittsfläche der Pfette       |

Gleichung 2.19: Wegfeder durch Einzelstützung

Ist der Nachweis einer gebundenen Kippachse nach DIN 18800 Teil 2 nicht erfüllt, kann über die ermittelte ideelle Schubsteifigkeit **vorh S** eine kontinuierliche Wegfeder berechnet werden (siehe Kapitel 2.5.2).

## 2.5 Ermittlung von Federsteifigkeiten

### 2.5.1 Drehfedern

Der Berechnung des vorhandenen Drehbettungskoeffizienten liegt das Modell von mehreren hintereinandergeschalteten Federn zu Grunde (vgl. [8], [13]).

$$\frac{1}{\text{vorh } c_{\vartheta,k}} = \frac{1}{c_{\vartheta M,k}} + \frac{1}{c_{\vartheta A,k}} + \frac{1}{c_{\vartheta P,k}}$$

Gleichung 2.20: Wirksame Drehbettung

Aus Vereinfachungsgründen ist die Gleichung 2.20 in DIN 18800 mit den charakteristischen Werten formuliert. Die Größen dieser Gleichung werden im Folgenden erläutert.

#### Drehbettung $c_{\vartheta M,k}$ aus abstützendem Bauteil

$$c_{\vartheta M,k} = \frac{E \cdot I_a}{a} \cdot k$$

Gleichung 2.21: Drehbettung aus abstützendem Bauteil

Der Wert  $c_{\vartheta M,k}$  stellt die theoretische Drehbettung aus der Biegesteifigkeit  $I_a$  des abstützenden Bauteils  $a$  bei Annahme einer starren Verbindung dar. In Gleichung 2.21 gilt weiterhin:

|       |                                                                    |         |                                                |
|-------|--------------------------------------------------------------------|---------|------------------------------------------------|
| $I_a$ | Trägheitsmoment des abstützenden Bauteils in [cm <sup>4</sup> /cm] |         |                                                |
| $a$   | Stützweite des abstützenden Bauteils in [cm]                       |         |                                                |
| $k$   | Beiwert:                                                           | $k = 2$ | für Ein- und Zweifeldträger, Endfeldträger     |
|       |                                                                    | $k = 4$ | für Durchlaufträger mit drei oder mehr Feldern |

Bei nicht kontinuierlicher Drehbettung (z. B. durch Pfetten) wird das Trägheitsmoment  $I_a$  des abstützenden Bauteils auf eine kontinuierliche Abstützung gemäß  $I_a = I / e$  umgerechnet, wobei  $e$  den Abstand der abstützenden Einzelträger (z. B. Pfetten) repräsentiert.

Falls der gestützte Träger sich nur in einer Richtung verdrehen kann, darf der  $c_{\vartheta M,k}$  - Wert nach Gleichung 2.21 mit dem Faktor 3,0 multipliziert werden. Dies ist beispielsweise dann der Fall, wenn ein gestützter Träger in einem Dach mit Dachneigung vorliegt.

### Drehbettung $c_{\vartheta A,k}$ aus Verformung des Anschlusses

$c_{\vartheta A,k}$  repräsentiert die Drehbettung aus der Verformung des Anschlusses. Bei Anschlüssen von Einzelträgern durch Schrauben ohne Schlupf (wechselseitig links und rechts vom Steg des auszusteienden Profils) kann näherungsweise von einer starren Verbindung ausgegangen werden, d. h.  $c_{\vartheta A,k}$  ist unendlich groß und entfällt in Gleichung 2.20.

Bei drehelastischer Stützung durch Trapezbleche ergibt sich:

$$c_{\vartheta A,k} = \bar{c}_{\vartheta A,k} \left( \frac{b_1}{10} \right)^2 \quad \text{für } \frac{b_1}{10} \leq 1,25$$

$$c_{\vartheta A,k} = 1,25 \bar{c}_{\vartheta A,k} \left( \frac{b_1}{10} \right) \quad \text{für } 1,25 < \frac{b_1}{10} \leq 2,0$$

mit  $b_1$  Breite des Obergurtes des gestützten Trägers in [cm]

Gleichung 2.22: Drehbettung aus Verformung des Anschlusses

Der charakteristische Wert für die Anschlusssteifigkeit  $\bar{c}_{\vartheta A,k}$  von Stahl-Trapezprofilen wird der Tabelle 7 der DIN 18 800 Teil 2 entnommen. Diese Tabelle ist im Programm enthalten.

Ist das Verhältnis  $b_1/10 > 2,0$ , wird in obiger Gleichung das Verhältnis auf der sicheren Seite liegend auf 2,0 begrenzt. Nach OSTERRIEDER [8] (Anmerkung dort im Abschnitt 4) können für  $\bar{c}_{\vartheta A,k}$  auch größere Werte als in Tabelle 7 angegeben eingesetzt werden. Auch diese Möglichkeit besteht im Programm.



Falls der Beiwert  $\bar{c}_{\vartheta A,k}$  nach Tabelle 7 ermittelt wird und die Trapezblechprofile größere Blechdicken  $t$  als 0,75 mm aufweisen, ergeben sich größere Anschlusssteifigkeiten. Näherungsweise dürfen die Tabellenwerte wie folgt mit einem Faktor vergrößert werden [14].

$$\left( \frac{t_{\text{vorh}}}{0,75} \right)^2 \quad t_{\text{vorh}} \text{ in [mm]}$$

Gleichung 2.23: Vergrößerungsfaktor für Blechdicken  $> 0,75$  mm

### Drehbettung $c_{\vartheta P,k}$ aus Profilverformung

$c_{\vartheta P,k}$  stellt die Drehbettung aus der Profilverformung des gestützten Trägers dar. Sie berechnet sich wie folgt [14].

$$c_{\vartheta P,k} = \frac{E}{4 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \frac{1}{\frac{h_m}{s^3} + 0,5 \cdot \frac{b_1}{t_1^3}}$$

mit  $b_1, t_1$  Breite bzw. Dicke des Obergurtes des gestützten Trägers in [cm]  
 $s$  Stegdicke des gestützten Trägers in [cm]  
 $h_m$  Abstand der Gurtschwerelinien des gestützten Trägers in [cm]  
 $\mu$  Querdehnzahl von Stahl, fest eingestellt mit  $\mu = 0,3$

Gleichung 2.24: Drehbettung aus Profilverformung

Die Ermittlung von  $c_{\vartheta P,k}$  nach Gleichung 2.24 setzt nach [14] zwingend voraus, dass im Falle der nichtkontinuierlichen Drehbettung die Einzellasten aus dem stützenden Bauteil (weitergeleitet in den gestützten Träger) nur maximal 50 % der Traglasten für steifenlose Konstruktion erreichen (siehe z. B. [7]). Weitere Werte finden sich im Handbuch zu BGDK [9] und im Kommentar [14] auf Seite 169.

Die kontinuierlichen Drehfedern nach Gleichung 2.20 ( $c_{\vartheta,k} = c_{\vartheta P,k}$ ) können als diskrete Drehfeder (Einzelfeder) verwendet werden, wenn die kontinuierliche Feder mit der zugehörigen Einflussbreite multipliziert wird.

## 2.5.2 Wegfedern

Für den in der Praxis relativ häufig vorkommenden Fall, dass ein Trägerfeld (z. B. Rahmenriegel, Bühnenträger, Deckenträger) durch einen oder mehrere Verbände stabilisiert wird, lassen sich die Wegfedern  $c_y$  nach PETERSEN [2] wie folgt ermitteln:

$$c_y = \text{vorh } S \cdot \frac{\pi^2}{l^2} \quad \left[ \frac{\text{kN/m}}{\text{m}} \right]$$

mit    vorh S    Anteilige Schubsteifigkeit eines Trägers gemäß Gleichung 2.17 oder Gleichung 2.18

l            Verbandlänge

Gleichung 2.25: Wegfederkonstante

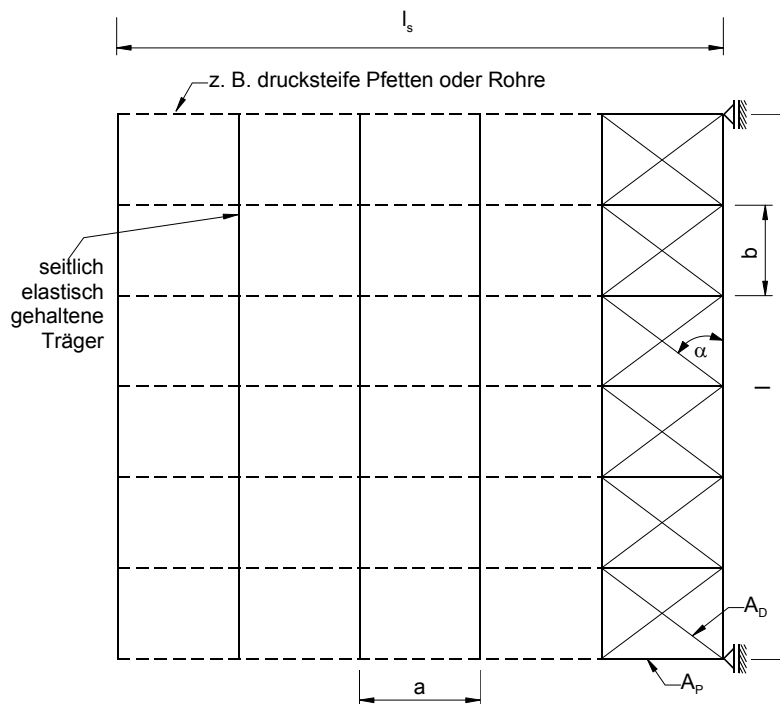


Bild 2.13: Riegel mit Trapezblechen und Verbänden

Der Verband sollte eine regelmäßige Struktur aufweisen, da die Gleichung für  $c_y$  durch eine „gleichförmige Verschmierung“ des Verbandes über die Länge  $l$  hergeleitet wurde.

Die Schubsteifigkeiten aus Verband und Trapezblech dürfen nur dann addiert werden, wenn die zu haltenden Träger durch seitlich angeschlossene drucksteife Profile und gleichzeitig oben aufliegende Trapezbleche an den Verband angeschlossen sind (siehe Bild 2.14).

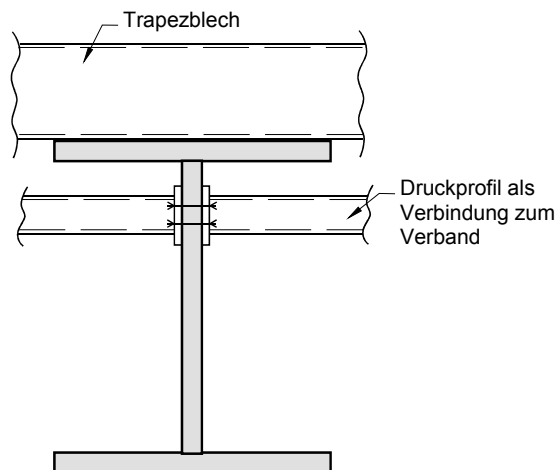


Bild 2.14: Aussteifung durch Trapezblech und Druckprofile

Das Trapezblech und der Verband wirken dann wie parallel geschaltete Federn, die additiv zu einer Gesamtfeder zusammengefasst werden. Sind die Träger nur durch aufliegende Pfetten miteinander verbunden (auf denen evtl. dann wiederum Trapezbleche aufliegen), so darf als *vorh S* nur der Anteil  $S_R$  (siehe Gleichung 2.16) aus dem Verband angesetzt werden.

Ein Beispiel für die Ermittlung einer seitlichen Wegfeder  $c_x$  findet sich bei PETERSEN [2], Kapitel 7.17.3. In [2] und im Stahlbau Handbuch [16], Kapitel 3.2 sind weitere Berechnungshinweise für Ersatzsteifigkeiten gegeben

### 2.5.3 Wölbfedern

Die Behinderung der Verwölbung erhöht die Torsionssteifigkeit eines Trägers mit offenem dünnwandigen Querschnitt. Diese Erhöhung kann durch diskrete Wölbfedern  $C_\omega$  erfasst werden.

#### Wölbbehinderung durch eine Stirnplatte [4], [9]

Die Wölbfeder ergibt sich in diesem Fall gemäß Gleichung 2.29 wie folgt:

$$C_\omega = \frac{1}{3} \cdot G \cdot b \cdot h \cdot t^3$$

Gleichung 2.26: Wölbfeder Stirnplatte

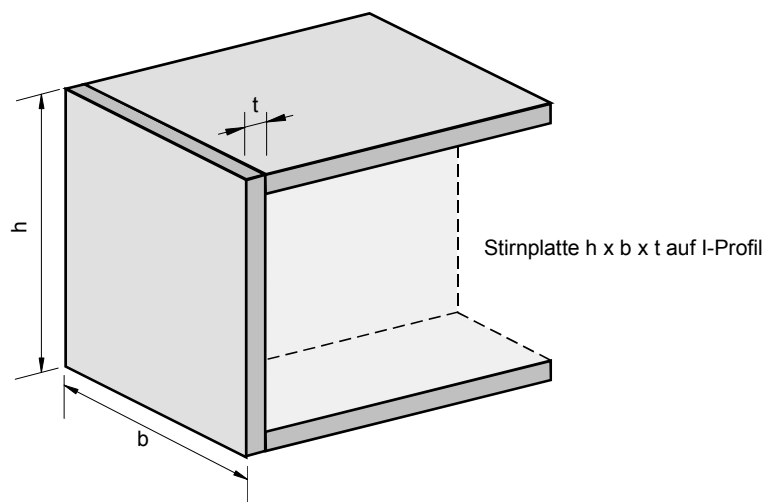


Bild 2.15: Wölbfeder durch Stirnplatte

## Wölbbehinderung durch einen Trägerüberstand [2]

Die Wölbfeder infolge eines Trägerüberstandes wird gemäß folgender Gleichung ermittelt:

$$C_{\omega} = G \cdot I_T \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot \tanh(\lambda \cdot l_k)$$

mit  $\lambda = \sqrt{\frac{G \cdot I_T}{E \cdot I_{\omega}}}$

$l_k$  Überstandslänge

Gleichung 2.27: Wölbfeder Trägerüberstand

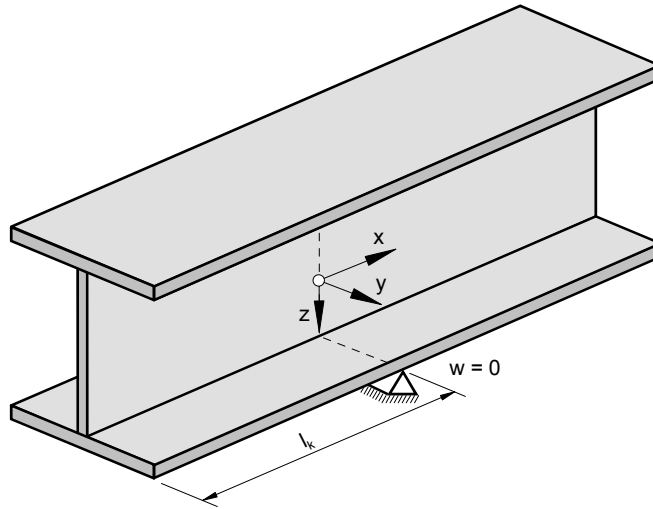


Bild 2.16: Wölbfeder durch Trägerüberstand

## Wölbbehinderung durch ein drillsteifes Querschott

Von den Wölbfedern aus Stirnplatten oder Trägerüberständen geht nur eine relativ geringe Stützung aus. Effektiver ist der planmäßige Einbau drillsteifer Querschotte in Form eingeschweißter U- oder Winkel-Profile [2]. Es entsteht dann ein geschlossener Kastenquerschnitt um die z-Achse (Hochachse).

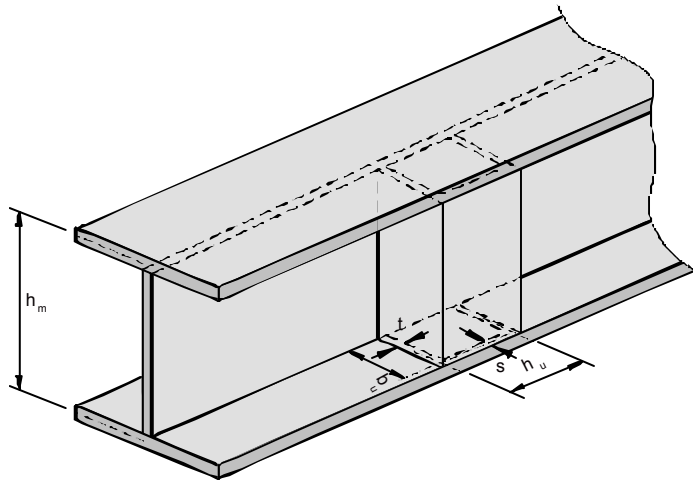


Bild 2.17: Wölbfeder durch Querschott

$$C_{\omega} = G \cdot h \cdot \frac{4 \cdot A_m^2}{\sum \frac{l_i}{t_i}} = G \cdot h \cdot \frac{4 (b_u \cdot t_u)^2}{2 \left( \frac{b_u}{t} + \frac{h_u}{s} \right)}$$

mit  $A_m$  von der Mittellinie eingeschlossene Fläche

$\sum \frac{l_i}{t_i}$  Summe über die Seitenlängen dividiert durch die jeweilige Blechdicke

Gleichung 2.28: Wölbfeder Querschott

### Wölbbehinderung durch einen Stützenanschluss

Die Wölbfeder  $C_{\omega}$  für den Riegel lässt sich nach der allgemeingültigen Formel berechnen:

$$C_{\omega} = \frac{1}{3} \cdot G \cdot b \cdot h_m \cdot t^3$$

mit  $G$  Schubmodul

$I_T$  Torsionsträgheitsmoment für

- geschlossene Profile:  $I_{T,Bredt} = \frac{4 A_m^2}{\sum \frac{l_i}{t_i}}$

$A_m$  die von der Profilmittellinie eingeschlossene Fläche

- offene Profile:  $I_{T,St.Ven.} = \sum \frac{1}{3} l_i \cdot t_i^3 \left[ 1 - 0,63 \frac{t_i}{l_i} + 0,052 \left( \frac{t_i}{l_i} \right)^5 \right]$

Der Klammerausdruck ist ein Korrekturfaktor, der die Dickwandigkeit der einzelnen Rechteckteile (Länge  $l_i$ , Dicke  $t_i$ ) berücksichtigt. Dieser Faktor kann bei dünnwandigen Profilen zu Eins gesetzt werden.

$h_m$  Abstand der Flanschlmittellinien

Gleichung 2.29: Wölbfeder Stützenanschluss

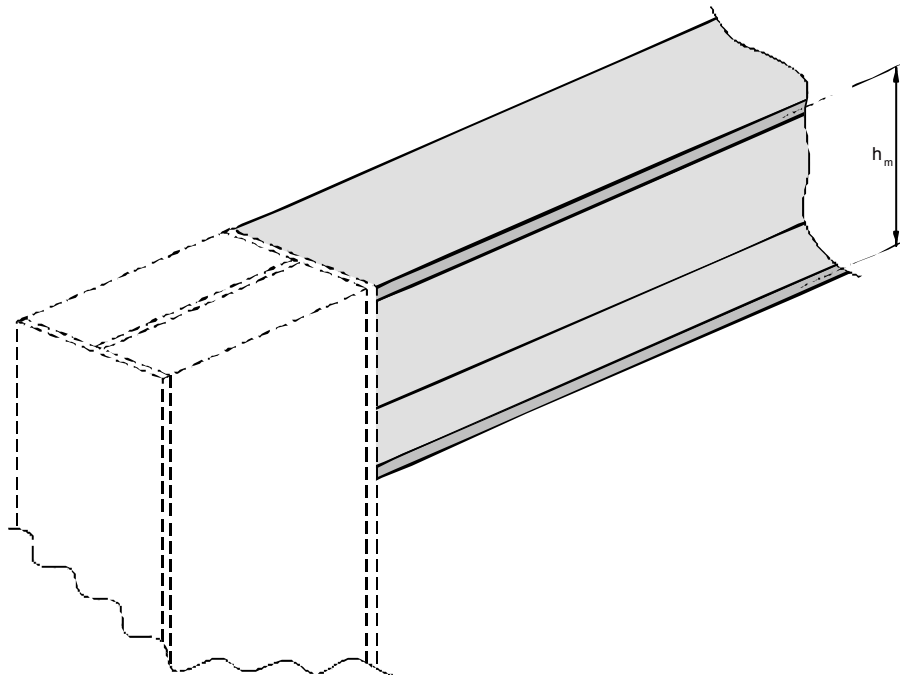


Bild 2.18: Wölbfeder durch Stützenanschluss

## 2.6 Nachweise nach DIN 18800

Das folgende Bild zeigt die möglichen DIN 18800-konformen Nachweismöglichkeiten, die vom Programm FE-BGDK unterstützt werden.

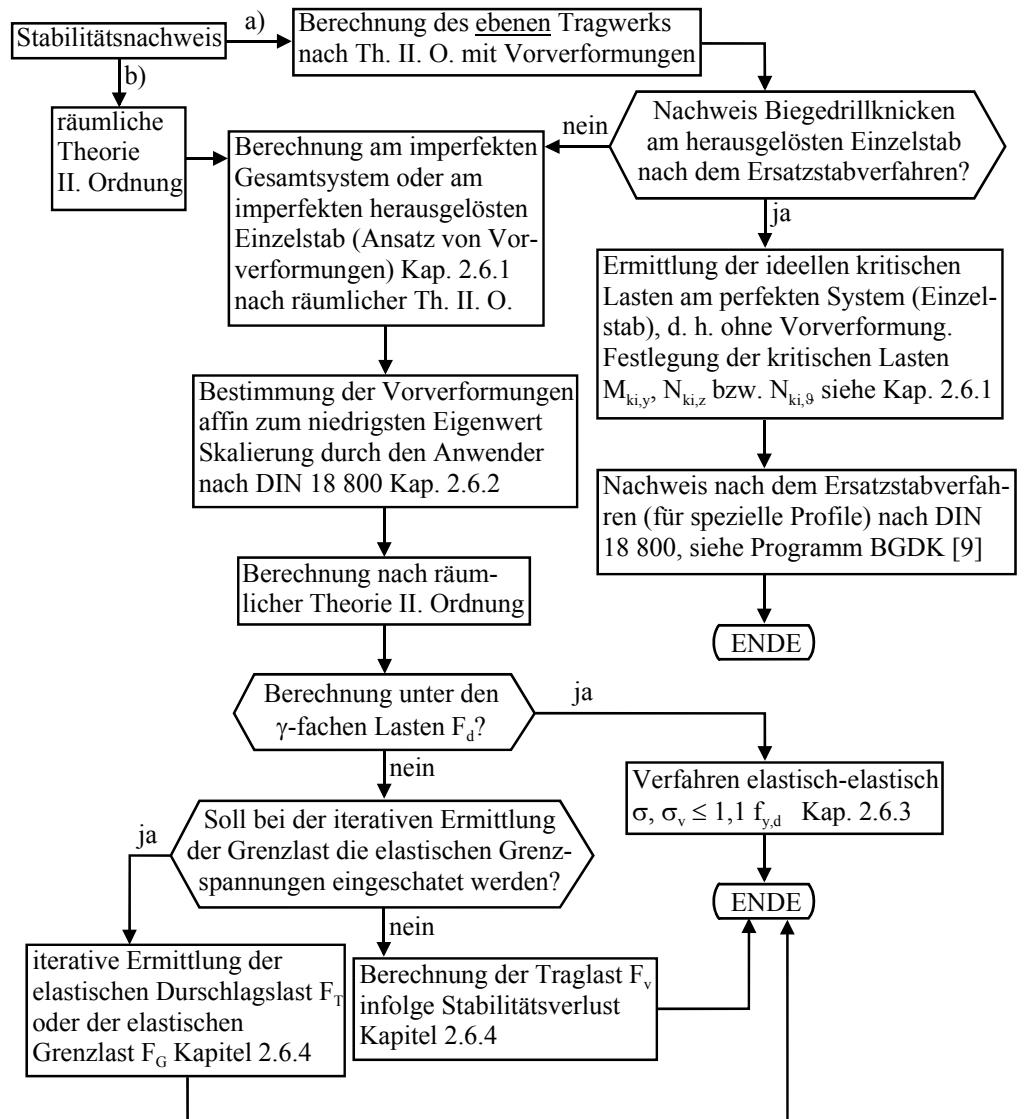


Bild 2.19: Nachweise nach DIN 18800 mit FE-BGDK

- a) Ebene Berechnung nach Theorie II. Ordnung  
b) Räumliche Berechnung nach Theorie II. Ordnung



Die Berechnung des Verzweigungslastfaktors am Gesamtsystem nach Theorie II. Ordnung bzw. der Nachweis der elastischen Grenzspannungen unter den ( $\gamma$ -fachen) Bemessungslasten nach Theorie II. Ordnung am Gesamtsystem sollte immer Vorrang vor einem Ersatzstabverfahren haben, da nur am Gesamtsystem die realen Rand- und Übergangsbedingungen erfasst werden.

Die idealen kritischen Lasten, die als Größen in die Ersatzstabverfahren eingehen, können ebenfalls mittels FE-BGDK am Gesamtsystem ermittelt werden (also genauer als mittels analytischer Formeln, die Rand- und Übergangsbedingungen nur annähernd erfassen), jedoch müssen die kritischen Lasten genau qualifiziert werden (vgl. Beispiel im Kapitel 2.6.1).

### 2.6.1 Ersatzstabverfahren

Nach DIN 18800 Teil 2 werden vereinfachend die Nachweise für Biegeknicken und Biegedrillknicken getrennt geführt. In der Regel wird wie in folgendem Bild gezeigt der Nachweis des **Biegeknickens** in der Tragwerksebene durch eine Berechnung des ebenen Tragwerks nach Theorie II. Ordnung als Spannungsnachweis unter den Bemessungslasten und unter Ansatz von Vorverformungen geführt.

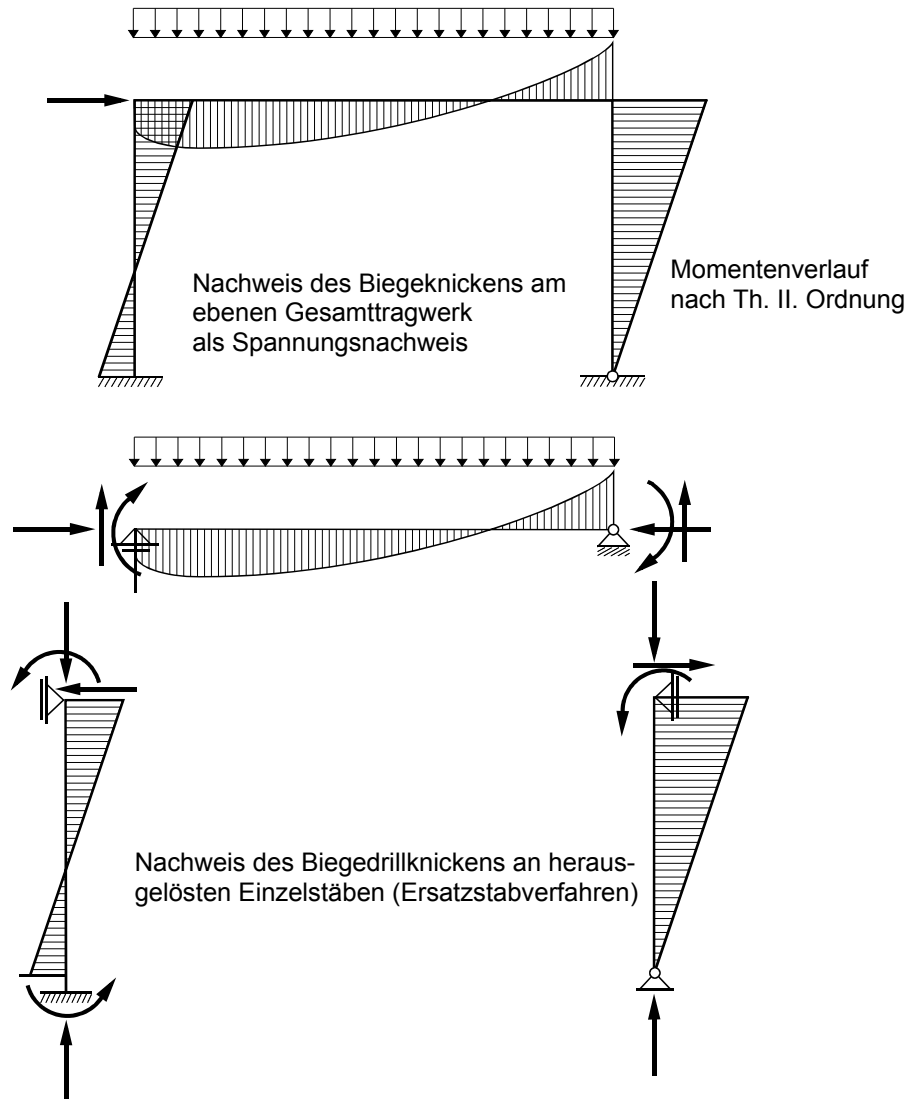


Bild 2.20: Nachweis eines Tragwerks – Biegeknicken in der Ebene und Biegedrillknicken am Einzelstab



Der Nachweis des **Biegedrillknickens** wird an einem aus dem Gesamtsystem herausgelösten Einzelstab mit den folgenden Randbedingungen und Lasten geführt:

- **Lasten**

Der Einzelstab wird durch die Bemessungslasten und an den Stabenden durch die am Gesamtsystem ermittelten Schnittgrößen belastet

- **Geometrische Randbedingungen und elastische Stützungen**

Die beim gedanklichen Herauslösen des Einzelstabes aus dem Gesamtsystem frei werdenden kinematischen Bedingungen sind als Randbedingungen vorzugeben, vor allem die hinsichtlich des Ausweichens senkrecht zur Tragwerksebene und Torsionsbehinderungen. Elastische Stützungen durch angrenzende Bauteile können dabei durch Ersatzfedern nach Kapitel 2.5 berücksichtigt werden.

Für den so definierten Einzelstab gibt es zwei Möglichkeiten für den Nachweis des Biegedrillknickens (siehe auch Bild 2.19):

### 2.6.1.1 Ersatzstabnachweis

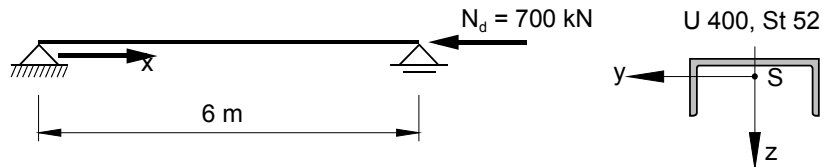
Der vereinfachte Nachweis nach DIN 18800 Teil 2, Element (306), (307), (311), (320) und (323) ist im Wesentlichen auf doppel- oder einfachsymmetrische I-Profile beschränkt (siehe Element (311), Anmerkung 1). Zudem ist diese Nachweisform nur für ausgewählte Belastungen anwendbar, die auf folgenden idealen kritischen Werten basieren:

$M_{Ki,y}$  Ideales Biegedrillknickmoment nach der Elastizitätstheorie bei alleiniger Wirkung von Momenten  $M_y$  ohne Normalkraft

$N_{Ki,z}$  Normalkraft unter der kleinsten Verzweigungslast nach der Elastizitätstheorie (die kleinste Last aus Knicken um die z-Achse oder Biegedrillknicken um diese Achse oder Drillknicken, siehe z. B. Handbuch zum Programm BGDK [9]).

Diese idealen kritischen Lasten lassen sich mit FE-BGDK am nicht vorverformten Einzelstab (perfektes System) berechnen. Da das Programm stets die kleinste Verzweigungslast liefert, beim Ersatzstabverfahren aber die Werte  $M_{Ki,y}$  und  $N_{Ki,z}$  eingehen, ist zu überprüfen, ob die vom Programm berechnete Verzweigungslast diesen Größen entspricht (siehe auch Beispiel 9.9 auf Seite 112, in dem  $N_{Ki,y}$  kleiner ist als  $N_{Ki,9}$ ).

### Beispiel



Linkes Lager:  $u = v = w = \varphi_x = 0$

Rechtes Lager:  $v = w = \varphi_x = 0$

Zentrische Druckkraft:  $N_d = 700 \text{ kN}$

Bild 2.21: U-Profil mit zentraler Druckkraft

Es ergeben sich folgende kritischen Lasten für Biegeknicken:

$$N_{Ki,z} = \frac{E \cdot I_z \cdot \pi^2}{l^2} = \frac{21000 \cdot 20350 \pi^2}{800^2} = 6590,3 \text{ kN}$$

$$N_{Ki,y} = \frac{E \cdot I_y \cdot \pi^2}{l^2} = \frac{21000 \cdot 846 \pi^2}{800^2} = 274,0 \text{ kN}$$

Gleichung 2.30: Kritische Lasten

Die ideale Drillknicklast  $N_{Ki,9}$  nach [9] wird nach folgender Gleichung ermittelt.

$$N_{Ki,9} = \frac{E \cdot I_z \cdot \pi^2}{\lambda_y^2 \cdot i_z^2}$$

Gleichung 2.31: Ideale Drillknicklast

Zur Lösung der Gleichung 2.31 wird die Vergleichsschlankheit  $\lambda_v$  benötigt.

$$\begin{aligned}\lambda_v^2 &= \left(\frac{l}{i_z}\right)^2 \cdot \frac{c^2 + i_M^2}{2 \cdot c^2} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{4 \cdot c^2 \cdot i_p^2}{(c^2 + i_M^2)^2}}\right) \\ &= \left(\frac{800}{14,9}\right)^2 \cdot \frac{10,54^2 + 16,04^2}{2 \cdot 10,54^2} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{4 \cdot 10,54^2 \cdot 15,21^2}{(10,54^2 + 16,04^2)^2}}\right) = 8939,5 \\ \Rightarrow \lambda_v &= 94,5\end{aligned}$$

Gleichung 2.32: Vergleichsschlankheit

Die Flächenwerte in Gleichung 2.32 werden wie folgt ermittelt.

$$\begin{aligned}i_p &= \sqrt{i_y^2 + i_z^2} = \sqrt{14,9^2 + 3,04^2} = 15,21 \text{ cm} \\ z_M &= -5,11 \text{ cm} \\ i_M &= \sqrt{i_y^2 + z_M^2} = \sqrt{15,21^2 + (-5,11)^2} = 16,04 \text{ cm}\end{aligned}$$

Gleichung 2.33: Flächenwerte

$c$  stellt den so genannten Drehradius dar.

$$\begin{aligned}c^2 &= \frac{I_\omega}{I_z} + \frac{l^2}{\pi^2} \cdot \frac{G \cdot I_T}{E \cdot I_z} = \frac{221000}{20350} + \frac{800^2}{\pi^2} \cdot \frac{8100 \cdot 81,6}{21000 \cdot 20350} = 111,15 \text{ cm}^2 \\ \Rightarrow c &= 10,54 \text{ cm}\end{aligned}$$

Gleichung 2.34: Drehradius

Damit lässt sich die ideale Drillknicklast gemäß Gleichung 2.31 bestimmen.

$$N_{Ki,9} = \frac{21000 \cdot 20350 \cdot \pi^2}{94,5^2 \cdot 14,9^2} = 2125,2 \text{ kN}$$

Gleichung 2.35: Ideale Drillknicklast

$N_{Ki,y}$  ist die Biegeknicklast um die y-Achse in der Tragwerksebene,  $N_{Ki,z}$  ist die Biegeknicklast für Knicken um die z-Achse (also Ausweichen in Richtung der y-Achse).  $N_{Ki,9}$  stellt die Drillknicklast dar, bei der der Querschnitt in y-Richtung verschoben und gleichzeitig um die Längsachse x verdreht wird. Da  $N_{Ki,9}$  kleiner als  $N_{Ki,z}$  ist, ist dieser Wert für den Ersatzstabnachweis nach Element (306) und (304) maßgebend.

Knickspannungslinie  $c \rightarrow \alpha = 0,49$

$$\begin{aligned}\bar{\lambda}_k &= \frac{\lambda_k}{\lambda_a} = \frac{94,5}{92,9} = 1,017 \\ k &= 0,5 \cdot \left[1 + 0,49 \cdot (1,017 - 0,2) + 1,017^2\right] = 1,217 \\ \kappa_z &= \frac{1}{1,217 + \sqrt{1,217^2 - 1,017^2}} = 0,530\end{aligned}$$

Gleichung 2.36: Abminderungsfaktor

$$N_{pl,d} = \frac{36}{1,1} \cdot 91,5 = 2994,5 \text{ kN}$$

Gleichung 2.37: Plastische Normalkraft

Nachweis:

$$\frac{N_d}{\kappa_z \cdot N_{pl,d}} = \frac{700}{0,53 \cdot 2994,5} = 0,44 \leq 1,0$$

Gleichung 2.38: Plastische Normalkraft

Damit wäre der Nachweis gegen Biegedrillknicken erfüllt, während der Biegeknicknachweis für Knicken um die y-Achse wegen  $N_d = 700 \text{ kN} > N_{ki,y} = 274 \text{ kN}$  nicht erfüllt wäre.

Das Programm FE-BGDK liefert nur die kleinste Verzweigungslast  $N_{ki,y} = 274 \text{ kN}$ . Zur Ermittlung der maßgebenden kritischen Last für Ausweichen in y-Richtung müsste beispielsweise in Feldmitte ein Lager in z-Richtung ( $w_{x=l/2} = 0$ ) angebracht werden. Es ergeben sich die in der Tabelle zusammengestellten Werte:

|                          | $N_{ki}$  | analytisch                     |
|--------------------------|-----------|--------------------------------|
| FE-BGDK $w_{l/2} \neq 0$ | 273,8 kN  | $N_{ki,y} = 274,0 \text{ kN}$  |
| FE-BGDK $w_{l/2} = 0$    | 2451,0 kN | $N_{ki,z} = 2125,2 \text{ kN}$ |

Tabelle 2.4: Verzweigungslasten

Die idealen Werte  $M_{ki,y}$  (ohne Normalkraft!) und  $N_{ki,z}$  bzw.  $N_{ki,y}$  (unter alleiniger Wirkung einer zentrischen Normalkraft) müssten getrennt mit FE-BGDK ermittelt werden, d. h. in zwei Rechengängen am jeweils perfekten System.

Anhand dieses Beispiels wird die Problematik des Ersatzstabverfahrens erkennbar. Eine bessere Methode stellt deshalb die zweite Möglichkeit für den Einzelstab dar, die nachfolgend kurz vorgestellt wird.

### 2.6.1.2 Tragsicherheitsnachweis mit Berechnung des räumlich imperfekten Einzelstabs

Als alternative Nachweismethode empfiehlt sich die Berechnung des räumlich imperfekten Einzelstabs nach der Elastizitätstheorie II. Ordnung nach Element (121) in Verbindung mit Element (201) mithilfe von FE-BGDK.

Die maximale Vergleichsspannung muss bei stabilem Gleichgewicht kleiner als die Grenzspannung  $f_{y,d}$  sein. In kleinen Bereichen darf die Vergleichsspannung die Grenzspannung  $f_{y,d}$  um 10 % überschreiten (siehe Kapitel 2.6.3, Seite 38). Die Imperfektionen sind dabei konform zu DIN 18800 Teil 2 anzusetzen (siehe folgendes Kapitel 2.6.2). Damit entspricht dieses Vorgehen dem Verfahren Elastisch-Elastisch.

## 2.6.2 Bestimmung der Vorverformungen

Nach DIN 18800 Teil 2 sind bei Berechnung nach Theorie II. Ordnung zur Berücksichtigung geometrischer und struktureller Imperfektionen geometrische Ersatzimperfektionen vorzugeben. Dies sind in der Regel bei verschieblichen Systemen **Vorverdrehungen** infolge von Stabdrehwinkeln und bei unverschieblichen Systemen **Vorverkrümmungen** in Form sinus- oder parabelförmiger Halbwellen.

Der Verlauf der Vorverformung sollte affin zur niedrigsten Knick- bzw. Biegedrillknick-eigenform angesetzt werden, siehe Element (202). Nach dem Kommentar zur DIN 18800 [14] ist es ausreichend, die Vorverformung so zu wählen, dass eine genügend große Komponente der niedrigsten Eigenform enthalten ist. Damit soll sichergestellt werden, dass die Lastverformungskurve gegen den ersten Eigenwert strebt.

Hierzu wird im Programm FE-BGDK die zum kleinsten Eigenwert gehörende Eigenform berechnet (vorweggeschaltete Eigenwertanalyse) und diese als Vorverformungsfigur gewählt. Dabei werden die Vorverformungsfiguren in Richtung der Hauptachsen  $y$  und  $z$  untersucht und die zum kleinsten Eigenwert gehörende Ausweichrichtung gewählt (Vorverformung in  $y$ -Richtung  $vv$ , in  $z$ -Richtung  $wv$ ). Unter Berücksichtigung dieser Vorverformungen ergeben sich beim eben belasteten Träger Biegemomente um beide Querschnittsachsen sowie Torsionsmomente.

Der Imperfektionsansatz erfolgt nun durch eine Skalierung der Eigenform durch den Anwender. Es stehen folgende Möglichkeiten zur Verfügung, die menügeführt und vom Programm unterstützt sind (siehe Kapitel 3.8.3, Seite 72):

- Direkte zahlenmäßige Vorgabe des maximalen Vorverformungsstichs über eine grafische Darstellung der Eigenform und der Stelle der Maximalverschiebung
- Berechnung des *Krümmungsstichmaßes* nach Element (204), Tabelle 3 unter Vorgabe der maßgebenden Knickspannungslinie und der Bezugslänge oder Berechnung der *Vorverdrehung* nach Element (205) mit Einbeziehung der Reduktionsfaktoren  $r_1$  und  $r_2$ . Bei Ermittlung der Vorverdrehung werden vom Anwender die notwendigen Daten (wie Bezugslängen und die Anzahl  $n$  der voneinander unabhängigen Ursachen für die Vorverdrehungen von Stäben) abgefragt.

Die nach [3] Kapitel 2.2 und 2.3 anzusetzenden Vorverformungen dürfen unter bestimmten Voraussetzungen reduziert werden. In FE-BGDK erfolgt diese Reduktion menügeführt:

### Reduktion 1) nach Element (201)

Die von den Knickspannungslinien abhängigen Vorkrümmungsstiche bzw. die Vorverdrehungen  $\varphi_0$  dürfen bei Anwendung des Verfahrens Elastisch-Elastisch mit dem Faktor  $2/3$  reduziert werden.

### Reduktion 2) nach Element (202)

Beim Nachweis des Biegedrillknickens dürfen die Amplituden der Vorkrümmungen aus der Hauptbeanspruchungsebene heraus nochmals um 50 % abgemindert werden.

Die Reduktion 2 ist nicht unproblematisch, darf doch diese Reduktion nur dann vorgenommen werden, wenn die Vorverformungsfigur für das Biegedrillknicken zur kleinsten Eigenform gehört. Dieser Effekt ist im nachfolgenden Bild 2.22 erläutert.

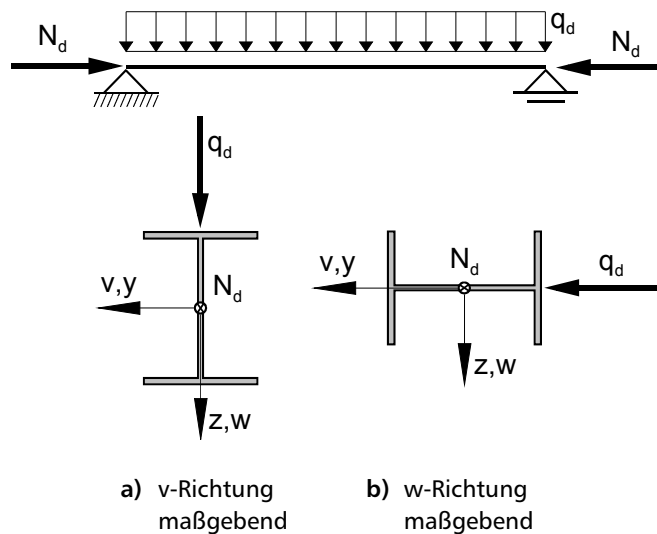


Bild 2.22: Zur Reduktion nach DIN 18800 Teil 2, Element (202) maßgebende Vorverformung

FE-BGDK untersucht beide Hauptachsenrichtungen  $y$  und  $z$ , denn in Abhängigkeit der räumlichen Anordnung des Stabes und der Lastkonstellation kann entweder die  $w$ - oder die  $v$ -Richtung maßgebend für das Biegedrillknicken sein.

Im Fall a) entspricht  $v$  der Ausweichrichtung für das Biegedrillknicken. Gehört die niedrigste Eigenform zu dieser Richtung, darf die Reduktion um 50 % vorgenommen werden.

Im Fall b) entspricht die Verschiebungsfigur  $w$  gedanklich der Vorverformungsfigur in Richtung von  $v$  nach DIN 18800 Teil 2. Somit darf nur dann eine Reduzierung um 50 % vorgenommen werden, wenn die zum niedrigsten Eigenwert gehörende Eigenform (die dann vom Anwender zu skalieren ist) in  $w$ -Richtung geht.

Eine genaue Beschreibung der Vorverformungsermittlung findet sich im Kapitel 3.8.3.

### 2.6.3 Tragfähigkeitsnachweis nach Theorie II. Ordnung

Das Programm FE-BGDK ermittelt die Schnittgrößen nach der Theorie II. Ordnung unter Berücksichtigung von räumlichen Vorverformungen (vgl. Kapitel 2.6.2).

Beim Nachweisverfahren Elastisch-Elastisch nach DIN 18800 Teil 2, Element (121) ist nachzuweisen, dass unter den Bemessungseinwirkungen ( $\gamma_F$ -fache Lasten) folgende Bedingungen eingehalten sind:

$$\begin{aligned} \max \sigma_x &\leq f_{y,d}; \quad \max \tau \leq \frac{1}{3} f_{y,d} \\ \max \sigma_v &\leq f_{y,d} = \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} \end{aligned}$$

Gleichung 2.39: Nachweisbedingungen für Spannungen

Gemäß DIN 18800 Teil 1, Element (749) darf in kleinen Bereichen die Vergleichsspannung  $\sigma_v$  die Grenzspannung um 10 % überschreiten:

$$\max \sigma_v \leq 1,1 f_{y,d}$$

Gleichung 2.40: Zulässige Spannungsüberschreitung

Für Stäbe mit Normalkraft und Biegung kann ein „kleiner Bereich“ unterstellt werden, wenn gleichzeitig gilt:

$$\left| \frac{N}{A} + \frac{M_y}{I_y} z \right| \leq 0,8 f_{y,d} \quad \text{und}$$

$$\left| \frac{N}{A} + \frac{M_z}{I_z} y \right| \leq 0,8 f_{y,d}$$

Gleichung 2.41: Erlaubnis örtlich begrenzter Plastizierung



In der Regel tritt die maximale Beanspruchung an einer Profilkante auf, an der die Schubspannungen aus den Querkraften zu Null werden. Dann reduzieren sich die Nachweise auf den Nachweis der Normalspannungen.

### 2.6.4 Traglasten $F_T$ oder $F_G$

FE-BGDK bietet noch die Möglichkeit, den Tragwerksnachweis durch den Vergleich der Grenzlaster (Traglasten) mit den Bemessungslasten  $F_d$  zu führen. Von praktischer Bedeutung ist dabei nur folgender Nachweis:

$$F_T \geq F_d \quad \text{oder} \quad F_G \geq F_d$$

Gleichung 2.42: Nachweisbedingungen Traglasten

Das Lastniveau  $F_T$  bzw.  $F_G$  wird vom Programm durch eine iterative Laststeigerung ermittelt (vgl. Bild 2.1, Seite 11).

$F_T$  Traglast infolge Stabilitätsverlust (Durchschlagslast) am imperfekten System unter Einhaltung der elastischen Grenzspannung

$F_G$  Elastische Grenzlaster am imperfekten System (alle Schub- Normal- und Vergleichsspannungen sind kleiner gleich der jeweiligen elastischen Grenzspannung)

Die zusätzlich mit FE-BGDK berechenbare Traglast  $F_v$  infolge Vorverformungen ohne Einhaltung der elastischen Grenzspannung ist nur von theoretischem Interesse.

## 3. Eingabedaten



Alle Eingaben zur Definition der Bemessungsfälle erfolgen in Masken. Eine [Pick]-Funktion ermöglicht es, die zu bemessenden Stabsätze grafisch auszuwählen.

Nach dem Aufruf des Zusatzmoduls wird in einem neuen Fenster links ein Navigator angezeigt, der alle aktuell anwählbaren Masken verwaltet. Darüber befindet sich eine Pulldownliste mit den eventuell bereits vorhandenen Bemessungsfällen (siehe Kapitel 8.1, Seite 99).

Wird FE-BGDK zum ersten Mal in einer RSTAB-Position aufgerufen, so liest das Zusatzmodul folgende bemessungsrelevante Daten automatisch ein:

- Stabsätze
- Lastfälle und Lastfallgruppen
- Materialien
- Querschnitte

Die Stabsätze werden aus dem RSTAB-Modell herausgelöst. Diese sind dann ohne Kopplung zu den ursprünglichen Stabsätzen von RSTAB. Lediglich Querschnitts- oder Geometrieänderungen werden automatisch nach FE-BGDK transferiert. Lasten sind an die Stabnummern gekoppelt, Imperfektionen werden nicht aus RSTAB übernommen.



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

Mit [OK] werden die getroffenen Eingaben gesichert und das Modul FE-BGDK verlassen, während [Abbruch] ein Beenden des Zusatzmoduls ohne Sicherung zur Folge hat.

### 3.1 Basisangaben

In Maske 1.1 *Basisangaben* werden die zu nachzuweisenden Stabsätze und Einwirkungen ausgewählt.

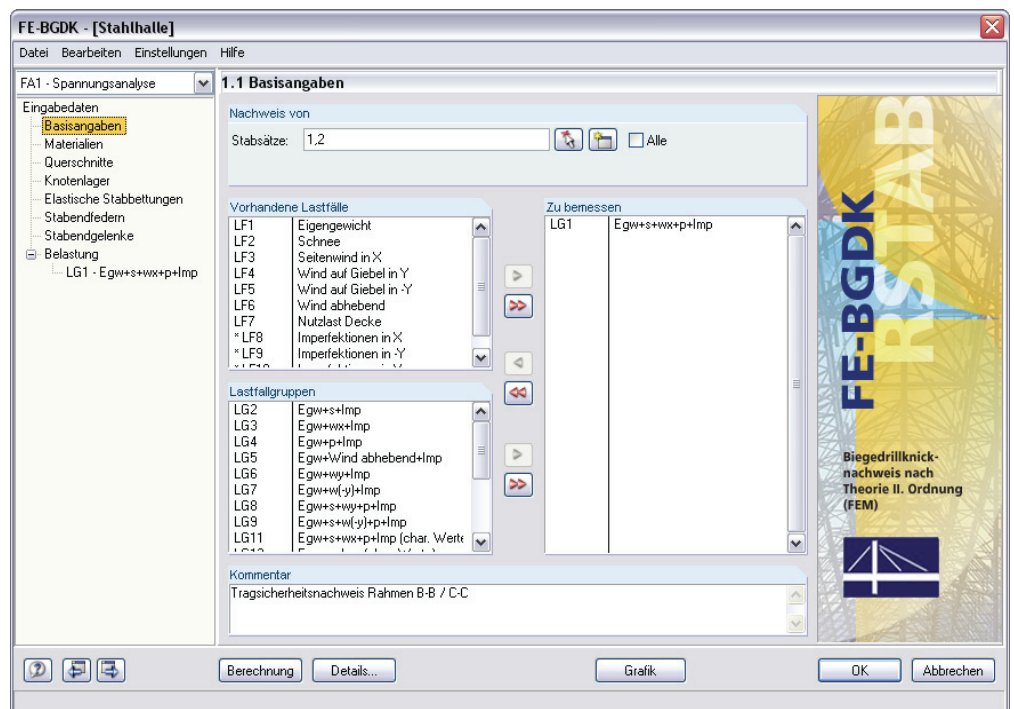


Bild 3.1: Maske 1.1 *Basisangaben*

#### Nachweis von



Der Tragsicherheitsnachweis erfolgt ausschließlich für Stabsätze des Typs ‚Stabzug‘. Wurden in RSTAB bereits Stabsätze definiert, können deren Nummern in die Liste *Stabsätze* eingetragen oder mit [Pick] grafisch im RSTAB-Arbeitsfenster ausgewählt werden. Mit dem Kontrollfeld *Alle* lassen sich sämtliche definierten Stabsätze zur Bemessung auswählen.



Dabei ist zu beachten, dass der Biegedrillknicknachweis nur für den Stabsatztyp **Stabzug** (mit zusammenhängenden, nicht verzweigenden Stäben) geführt werden kann. Ein Stabsatz des Typs ‚Stabgruppe‘ führt zu einer entsprechenden Fehlermeldung vor der Berechnung.



Bild 3.2: Warnung bei Bemessung einer Stabgruppe



Falls in RSTAB noch keine Stabsätze definiert wurden, so können diese über die Schaltfläche [Neu] auch im FE-BGDK-Modul angelegt werden. Es erscheint der aus RSTAB bekannte Dialog zum Anlegen eines neuen Stabzugs, in dem die weiteren Angaben erfolgen.

Im Zuge einer Stabsatzbemessung werden Stäbe aus dem System herausgelöst untersucht. Dabei sind die Randbedingungen einer mehrteiligen Stütze oder eines kompletten Rahmens als Ganzes zu erfassen. Dies geschieht in den folgenden Eingabemasken von FE-BGDK.

#### Vorhandene Lastfälle / Lastfallgruppen



In diesen beiden Abschnitten werden alle in RSTAB definierten Lastfälle und Lastfallgruppen gelistet, die für die Bemessung infrage kommen. Mit der Schaltfläche [►] können selektierte Lastfälle oder Lastfallgruppen in die Liste *Zu bemessen* rechts übertragen werden. Die Auswahl kann auch per Doppelklick erfolgen. Die Schaltfläche [►►] übergibt die komplette Liste nach rechts.

Sollten Lastfälle mit einem Sternchen (\*) gekennzeichnet sein wie beispielsweise die Lastfälle 8 und 9 in Bild 3.1, können diese nicht bemessen werden. Dies ist der Fall, wenn keine Lasten definiert sind oder wenn es sich wie im Beispiel um Imperfektionslastfälle handelt.

Lastfallkombinationen stehen nicht zur Auswahl, denn es müssen eindeutige Schnittgrößen für die Bemessung vorliegen. Lastfallkombinationen jedoch beinhalten für jede Stelle zwei Werte: Maximum und Minimum.

#### Zu bemessen



In der rechten Spalte werden die für den Nachweis ausgewählten Einwirkungen aufgelistet. Mit der Schaltfläche [◄] lassen sich selektierte Lastfälle oder Lastfallgruppen aus der Liste wieder entfernen. Auch hier kann die Auswahl per Doppelklick erfolgen. Mit der Schaltfläche [◄◄] wird die ganze Liste geleert.

Mit der Übergabe in die Spalte *Zu bemessen* werden die Lasten der Lastfälle und Lastfallgruppen automatisch in die Belastungsmasken 2.1 bis 2.3 eingetragen. Die Lastparameter können dort dann einzeln bearbeitet und ggf. ergänzt werden (vgl. Kapitel 3.8 ab Seite 66). Im Navigator von FE-BGDK werden die ausgewählten Lastfälle und Lastfallgruppen unter dem letzten Eintrag *Belastung* aufgelistet.

#### Kommentar

Dieses Eingabefeld steht für eine benutzerdefinierte Anmerkung zur Verfügung, die z. B. den aktuellen FE-BGDK-Bemessungsfall erläuternd beschreibt.

## 3.2 Materialien

Diese Maske ist zweigeteilt. Im oberen Abschnitt sind alle in RSTAB definierten Materialien angeführt. Im Abschnitt *Materialkennwerte* unterhalb werden die Eigenschaften des aktuellen Materials angezeigt, d. h. des Materials, dessen Zeile im oberen Abschnitt selektiert ist.

Bei der Bemessung nicht benutzte Materialien erscheinen in grauer, unzulässige Materialien in roter Schrift. Modifizierte Materialien werden in blauer Schrift dargestellt.

Die zur Schnittgrößenermittlung in RSTAB benötigten Materialkennwerte sind im Kapitel 5.2 des RSTAB-Handbuchs ausführlich beschrieben. Die bemessungsrelevanten Materialeigenschaften werden in der globalen Materialbibliothek mit gespeichert und sind automatisch voreingestellt.

Die Einheiten und Nachkommastellen der Materialkennwerte und Spannungen lassen sich über das Menü **Einstellungen** → **Einheiten und Dezimalstellen** ändern (siehe Bild 8.5, Seite 101).

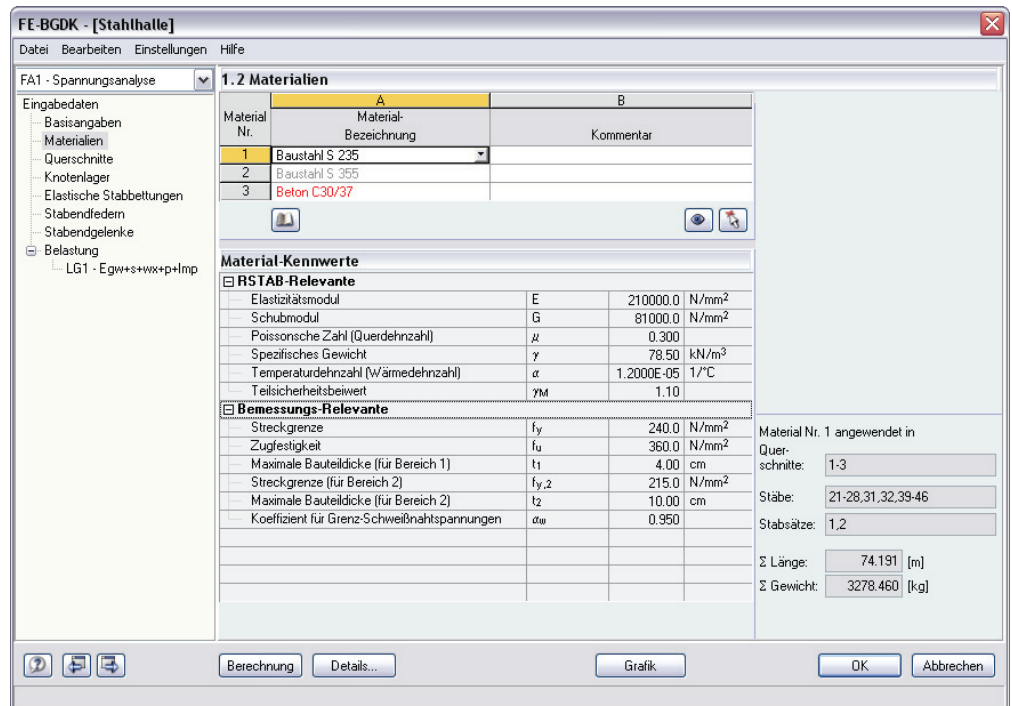


Bild 3.3: Maske 1.2 *Materialien*

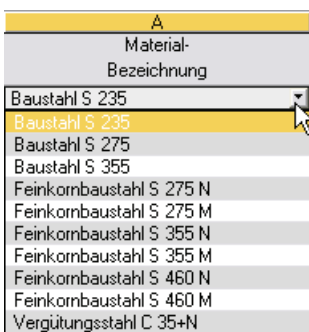
### Materialbezeichnung

Die in RSTAB definierten Materialien sind voreingestellt. In dieser Spalte lassen sich manuelle Einträge vornehmen. Wenn die *Materialbezeichnung* mit einem Eintrag der Materialbibliothek übereinstimmt, liest FE-BGDK die relevanten Materialkennwerte ein.

Die Auswahl eines Materials ist über die Liste möglich: Platzen Sie den Cursor in Spalte A und klicken dann die Schaltfläche [▼] an oder betätigen die Funktionstaste [F7]. Es öffnet sich die links dargestellte Liste. Nach der Übernahme werden die Kennwerte aktualisiert.

In der Liste werden dem Bemessungskonzept von FE-BGDK entsprechend nur Materialien der Kategorie **Stahl** angeführt. Es stehen die Stahlgüten verschiedener Stahlbaunormen zur Auswahl.

Die Übernahme von Materialien aus der Bibliothek ist nachfolgend beschrieben.



## Materialbibliothek

Eine Vielzahl von Materialien ist in einer Bibliothek hinterlegt. Diese wird aufgerufen über

**Bearbeiten → Materialbibliothek**

oder die links dargestellte Schaltfläche.

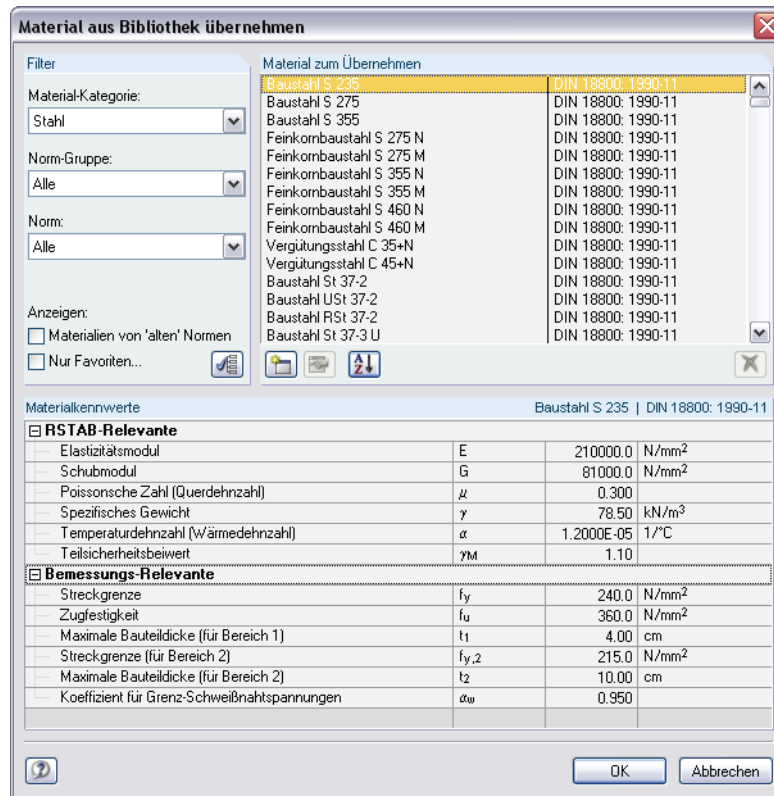


Bild 3.4: Dialog *Material aus Bibliothek übernehmen*

Im Abschnitt *Filter* ist die Materialkategorie *Stahl* voreingestellt. Die gewünschte Stahlgüte können Sie in der Liste *Material zum Übernehmen* auswählen und dessen Kennwerte im unteren Bereich des Dialogs kontrollieren.

Mit [OK] oder [↵] wird das gewählte Material in die FE-BGDK-Maske 1.2 übernommen.



Im Kapitel 5.2 des RSTAB-Handbuchs ist ausführlich beschrieben, wie Materialien gefiltert, ergänzt oder neu sortiert werden können. Auf diese Weise lässt sich über die Schaltfläche [Neu] ein neuer Stahl mit benutzerdefinierten Materialkennwerten anlegen und für spätere Anwendungszwecke speichern.

Über die Bibliothek können auch Materialien der Kategorien *Gusseisen*, *Nichtrostender Stahl* und *Aluminium* ausgewählt werden, obwohl diese Materialien vom Bemessungskonzept der DIN 18800 nicht abgedeckt sind. FE-BGDK führt Stabilitätsuntersuchungen auf Grundlage einer FEM-Analyse durch, die den Beschränkungen des Ersatzstabverfahrens nicht unterliegen.

## 3.3 Querschnitte

In dieser Maske werden die für den Nachweis infrage kommenden Querschnitte verwaltet.

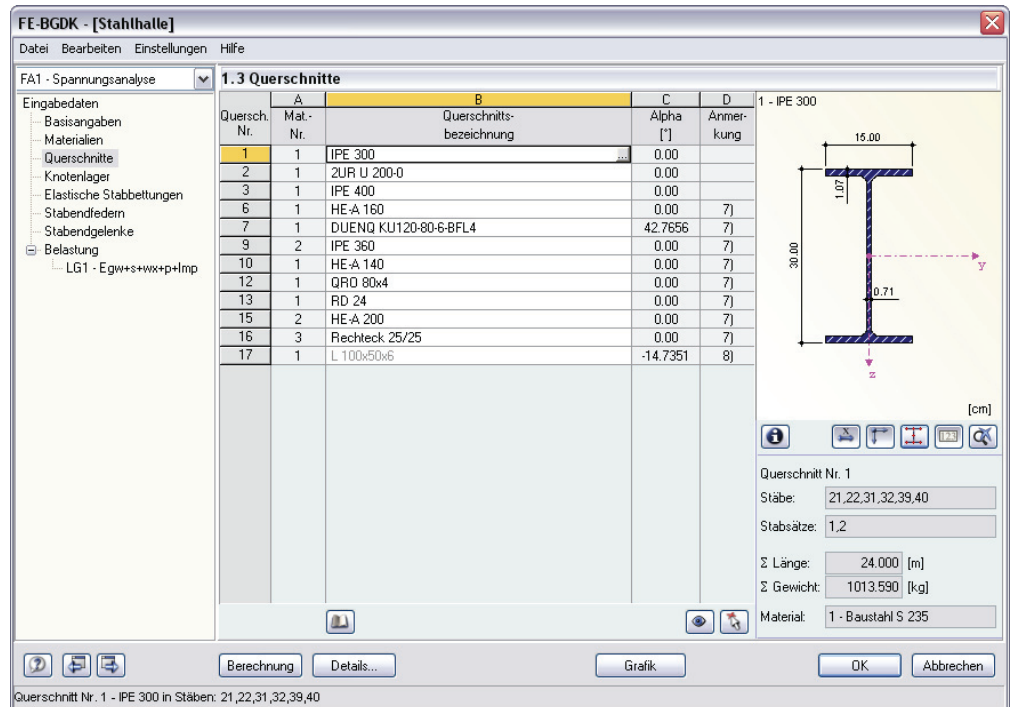


Bild 3.5: Maske 1.3 Querschnitte

### Querschnittsbezeichnung

Die in RSTAB verwendeten Querschnitte sind beim Aufruf der Maske voreingestellt, ebenso die zugeordneten Materialnummern.

Die vorgegebenen Querschnitte können für die Bemessung jederzeit abgeändert werden. Die Querschnittsbezeichnung eines modifizierten Profils wird in dieser Spalte mit blauer Schrift hervorgehoben.

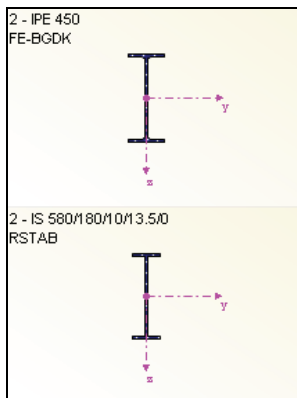


Zum Ändern eines Profils wird die neue Querschnittsbezeichnung in die entsprechende Zeile eingetragen oder das neue Profil aus der Bibliothek ausgewählt. Diese können Sie wie gewohnt mit der Schaltfläche [Querschnittsbibliothek] aufrufen. Alternativ platzieren Sie den Cursor in der gewünschten Zeile und drücken dann [...] oder die Funktionstaste [F7]. Es erscheint die aus RSTAB bekannte Querschnittsbibliothek bzw. Profilreihe.

Die Auswahl von Querschnitten aus der Bibliothek ist im Kapitel 5.3 des RSTAB-Handbuchs ausführlich beschrieben.



Bild 3.6: Querschnittsbibliothek



Liegen unterschiedliche Querschnitte in FE-BGDK und in RSTAB vor, so zeigt die Grafik rechts in der Maske beide Profile an.

Der Biegedrillknicknachweis gemäß DIN 18 800 Teil 2, Element (323) erstreckt sich auf alle einfach- und doppelsymmetrischen I-förmigen Querschnitte. FE-BGDK ist darüber hinaus in der Lage, alle Querschnitte der Profilbibliothek mit Ausnahme von ICU- und DICKQ-Querschnitten nachzuweisen (vgl. auch Kapitel 2.1.1, Seite 12). Die Bemessung schließt auch den Nachweis von DUENQ-Profilen ein.

### Stab mit Voutenquerschnitt

Bei gevouteten Stäben mit unterschiedlichen Profilen am Stabanfang und Stabende werden die beiden Querschnittsnummern gemäß der Definition in RSTAB in zwei Zeilen angegeben. FE-BGDK führt auch die Nachweise für Voutenstäbe durch, sofern die gleiche Anzahl von Spannungspunkten für den Anfangs- und Endquerschnitt vorliegt. Ist dies nicht der Fall, können keine Zwischenwerte interpoliert werden. Im Verlauf der Berechnung erscheint dann eine entsprechende Fehlermeldung.

| Fehlermeldungen und Hinweise |     |            |                          |
|------------------------------|-----|------------|--------------------------|
| Programm / Modul             | Nr. | Fehler Nr. | Bezeichnung              |
| FE-BGDK                      | FA1 | 13         | Fehlerhafte Querschnitte |
| FE-BGDK                      | FA1 | 13         | Fehlerhafte Querschnitte |

Bild 3.7: Fehlermeldung bei inkompatiblen Voutenquerschnitten



Zur Kontrolle lassen sich die Spannungspunkte eines Querschnitts mitsamt Nummerierung in der Querschnittsgrafik rechts einblenden (vgl. Abbildung neben Tabelle 3.1 auf Seite 46).

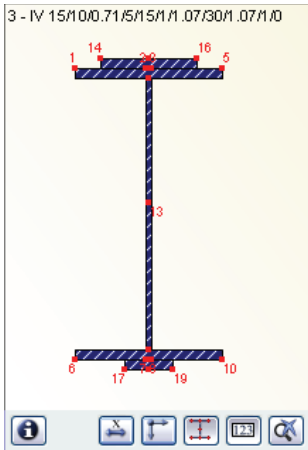
Für eine erfolgreiche Voutenbemessung ist somit die gleiche Anzahl an Spannungspunkten herzustellen, beispielsweise indem man den Querschnitt am Ende der Voute als Kopie des Anfangsprofils modelliert und dabei nur die Geometrieparameter modifiziert. Gegebenenfalls müssen beide Querschnitte als parametrisierte („Geschweißte“) Profile ausgebildet werden. Speziell für Vouten stehen dort die **IVU - Voutenprofile unten verstärkt** zur Verfügung.

### Alpha

Zur Kontrolle wird in dieser Spalte für jedes Profil der Hauptachseneckwinkel  $\alpha$  angegeben.

### Anmerkung

In dieser Spalte werden Hinweise in Form von Fußnoten angezeigt, die am unteren Ende der Querschnittsliste näher erläutert sind.



## Querschnittsgrafik

Im rechten Teil der Maske 1.3 wird der aktuelle Querschnitt grafisch angezeigt. Mit dem Maus-Scrollrad lässt sich die Darstellungsgröße der Profilgrafik ändern (Zoomfunktion).

Die Schaltflächen unterhalb der Profilgrafik sind mit folgenden Funktionen belegt:

| Schaltfläche                                                                      | Funktion                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
|  | Der Dialog <i>Info über Querschnitt</i> mit den Profildetails wird aufgerufen. |
|  | Die Bemaßung des Querschnitts wird ein- oder ausgeblendet.                     |
|  | Die Hauptachsen des Profils werden ein- oder ausgeschaltet.                    |
|  | Die Spannungspunkte werden angezeigt oder ausgeblendet.                        |
|  | Die Nummerierung der Spannungspunkte wird ein- oder ausgeblendet.              |
|  | Die Gesamtansicht des Querschnitts wird wiederhergestellt.                     |

Tabelle 3.1: Schaltflächen der Querschnittsgrafik

## 3.4 Knotenlager

In dieser Maske werden die singulären Lagerungsbedingungen des aus dem System herausgelösten Stabsatzes definiert. Die in RSTAB eingegebenen Knotenlager sind voreingestellt und können ggf. angepasst werden.



Außerdem können zusätzliche Lager definiert werden, um beispielsweise eine seitliche Stützung abzubilden, die im räumlichen Strukturmodell gegeben ist. Wird diese zusätzliche Lagerung beim herausgelösten Stabsatz nicht berücksichtigt, sind Instabilitäten die Folge.

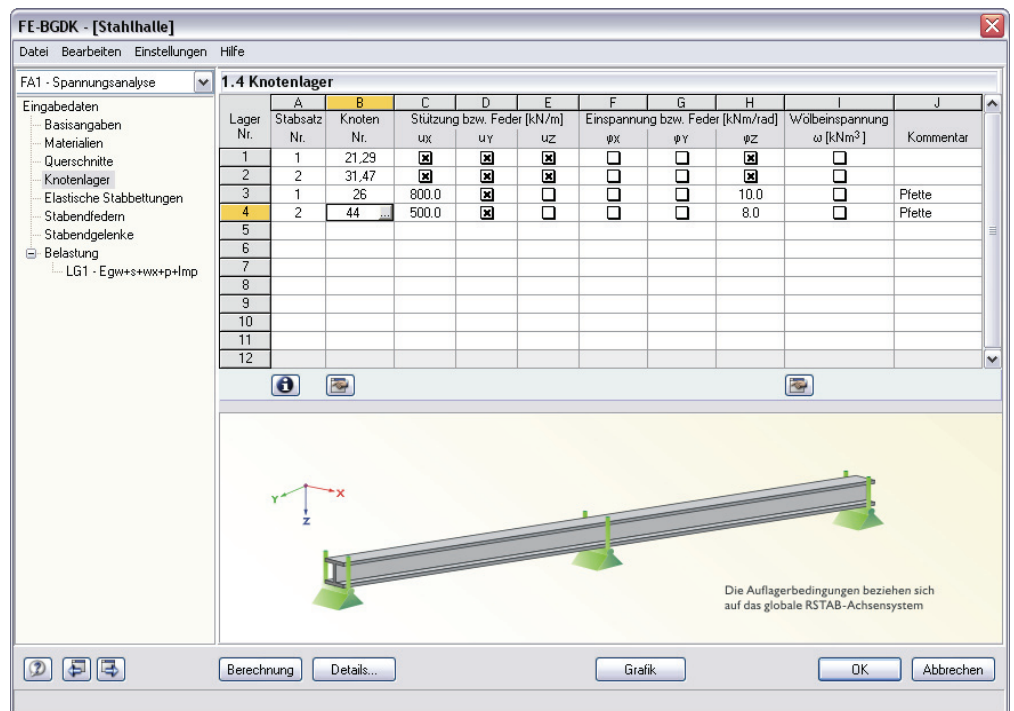


Bild 3.8: Maske 1.4 Knotenlager

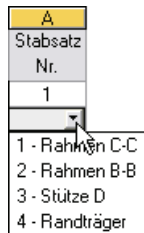
Die Einzelfedern sind zentrisch auf das globale Koordinatensystem bezogen (siehe Kapitel 2.2.3, Seite 16).

Die stabilisierende Wirkung angeschlossener Objekte lässt sich in der folgenden Maske 1.5 *Elastische Stabbettungen* an (vgl. Kapitel 3.5, Seite 52) erfassen. Dort können die Weg- und Drehfederkonstanten von Pfetten, Verbänden und Trapezblechen mitsamt Exzentrizitäten abgebildet und als kontinuierliche Stützungen realisiert werden.

### Stabsatz Nr.

Die Lagerungsbedingungen werden stabsatzweise definiert.

Um zusätzliche Knotenlager einzufügen, ist der Cursor in eine freie Zelle dieser Spalte zu setzen und der Stabsatz anzugeben oder aus der Liste zu wählen. In der nächsten Spalte *Knoten* können dann die zu lagernden Knoten festgelegt werden.



### Knoten Nr.

In dieser Spalte werden die gelagerten Knoten einzeln oder als Liste eingetragen bzw. über die Schaltfläche [...] (vgl. Bild 3.8) im RSTAB-Arbeitsfenster grafisch ausgewählt.

### Stützung / Einspannung bzw. Feder

In den Spalten C bis H werden die Lagerungsbedingungen der ausgewählten Knoten festgelegt. Durch Klicken in die Kontrollkästchen werden die Stützungen oder Einspannungen in den entsprechenden Freiheitsgraden aktiviert bzw. deaktiviert. Alternativ können die Konstanten der Weg- oder Drehfedern manuell eingetragen werden.

Über die Schaltfläche [Bearbeiten] am unteren Ende der Spalte B lassen sich die Lagerungsbedingungen ebenfalls anpassen. Es öffnet sich folgender Dialog.

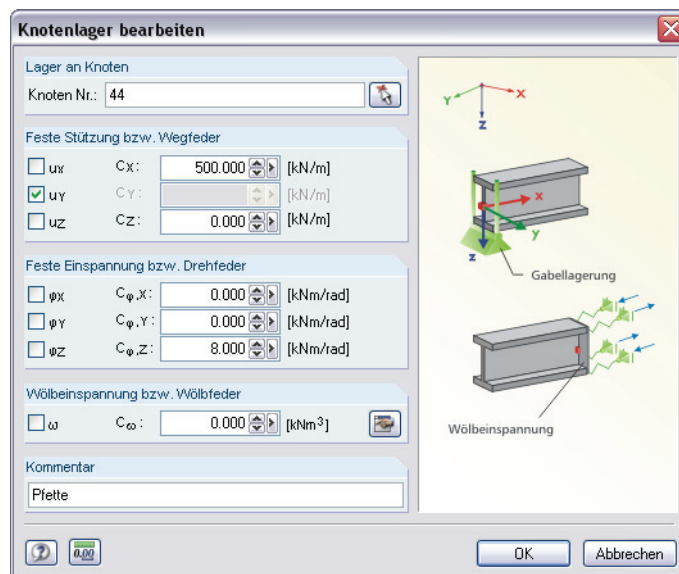


Bild 3.9: Dialog *Knotenlager bearbeiten*

### Wölbeinspannung

In der Spalte I werden die Wölbparameter der gelagerten Knoten festgelegt. Neben einer vollständigen Wölbeinspannung lassen sich auch die Konstanten von Wölbfedern manuell eintragen.

Die Behinderung der Verwölbung erhöht die Torsionssteifigkeit eines Trägers mit offenem dünnwandigen Querschnitt. Die theoretischen Erläuterungen zur Ermittlung der Wölbfedern finden Sie im Kapitel 2.5.3 ab Seite 29.



Die Schaltfläche [Bearbeiten] am unteren Ende der Spalte I ermöglicht die komfortable Ermittlung der Wölbfederkonstanten, die sich aus verschiedenen geometrischen Bedingungen ergeben können. FE-BGDK berechnet die Wölbfedern für folgende Gegebenheiten:

- Stirnplatte (→ Kapitel 2.5.3, Seite 29)
- U-Profil (→ Kapitel 2.5.3, Seite 30)
- Winkel (→ Kapitel 2.5.3, Seite 30)
- Angeschlossene Stütze (→ Kapitel 2.5.3, Seite 31)
- Trägerüberstand (→ Kapitel 2.5.3, Seite 30)

### Wölbfeder aus Stirnplatte

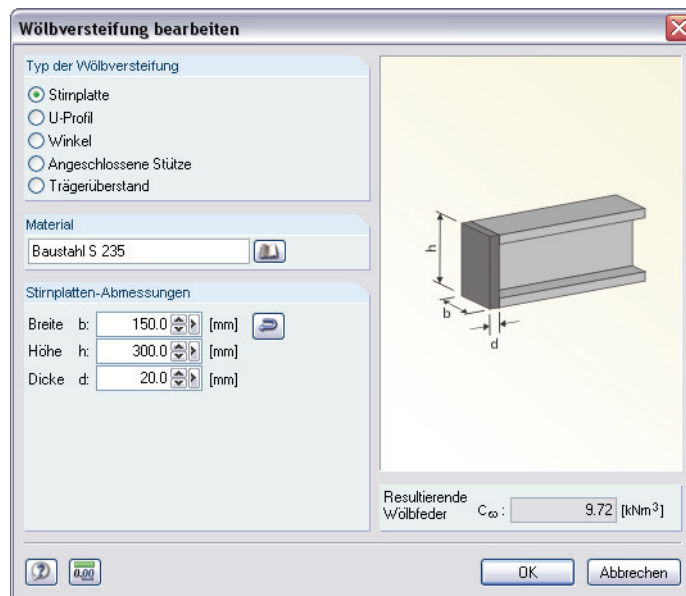


Bild 3.10: Dialog *Wölbversteifung bearbeiten* - *Stirnplatte*



Das voreingestellte *Material* der Stirnplatte lässt sich über die Materialbibliothek ändern.



Die Geometrie der *Stirnplatten-Abmessungen* kann manuell eingegeben werden. Über die Schaltfläche [Abmessungen übernehmen] besteht eine Zugriffsmöglichkeit auf das am Lagerknoten angeschlossene Profil, um dessen Breite und Höhe in den Dialog zu übernehmen.

Rechts unten im Dialog wird die *Resultierende Wölbfeder* angezeigt.

### Wölbfeder aus U-Profil

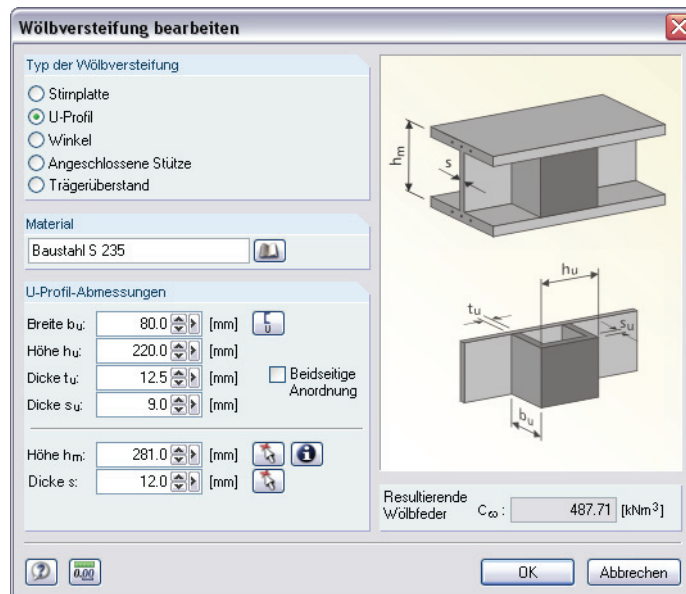


Bild 3.11: Dialog Wölbversteifung bearbeiten - U-Profil

Das voreingestellte *Material* des U-Profils lässt sich über die Materialbibliothek ändern.

Die *U-Profil-Abmessungen* können manuell eingetragen werden. Über die Schaltfläche [Abmessungen übernehmen] besteht eine Zugriffsmöglichkeit auf die Querschnittsbibliothek aller U-Profile, um die geeigneten Geometrieparameter in den Dialog zu übernehmen.

Der Abstand der Flanschmittellinien  $h_m$  und die Stegdicke  $s$  des Trägerquerschnitts können über die [Pick]-Funktion grafisch am Profil ausgewählt werden.

Rechts unten im Dialog wird die *Resultierende Wölbfeder* angezeigt.

### Wölbfeder aus Winkel

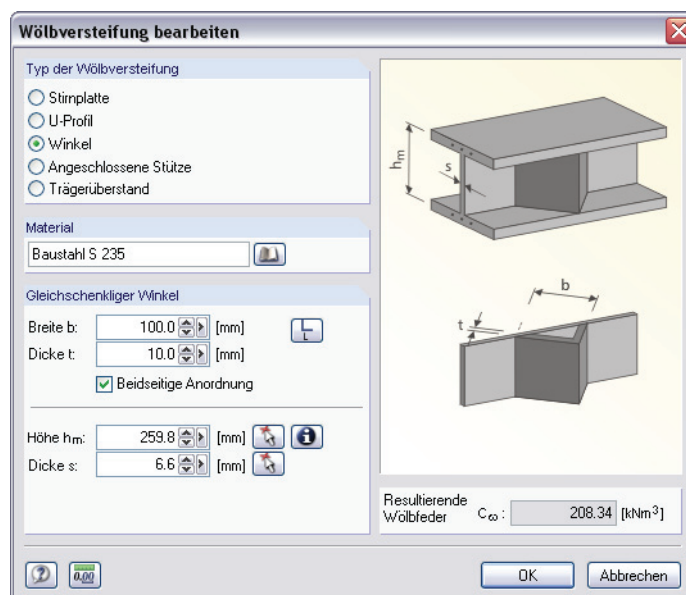


Bild 3.12: Dialog Wölbversteifung bearbeiten - Winkel

Das voreingestellte *Material* des Winkels lässt sich über die Materialbibliothek ändern.



Die Abmessungen des *Gleichschenkligen Winkels* können manuell eingetragen werden. Über die Schaltfläche [Abmessungen übernehmen] besteht eine Zugriffsmöglichkeit auf die Querschnittsbibliothek aller L-Profile, um die geeigneten Geometrieparameter in den Dialog zu übernehmen.



Der Abstand der Flanschmittellinien  $h_m$  und die Stegdicke  $s$  des Trägerquerschnitts können über die [Pick]-Funktion grafisch am Profil ausgewählt werden.

Rechts unten im Dialog wird die *Resultierende Wölbfeder* angezeigt.

#### Wölbfeder aus angeschlossener Stütze

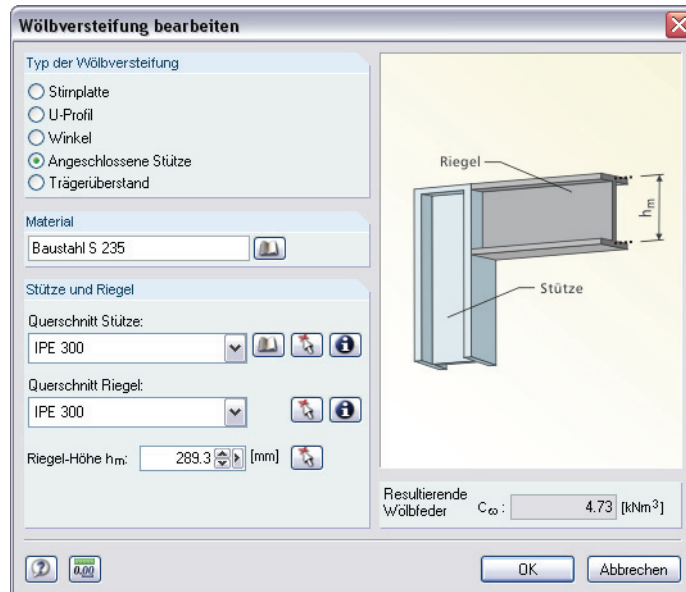


Bild 3.13: Dialog *Wölbversteifung bearbeiten* - Angeschlossene Stütze



Das voreingestellte *Material* der Stütze lässt sich über die Materialbibliothek ändern.



Der Querschnitt der *Stütze* kann aus der Liste ausgewählt oder mit [Pick] grafisch im RSTAB-Arbeitsfenster festgelegt werden. Über die [Bibliothek] besteht eine Zugriffsmöglichkeit auf die Profildatenbank, um einen neuen Stützenquerschnitt zu definieren. Der Querschnitt des Riegels wird automatisch voreingestellt, kann aber ggf. über [Pick] im RSTAB-Arbeitsfenster geändert werden.



Der Abstand der Riegel-Flanschmittellinien  $h_m$  lässt sich mit der [Pick]-Funktion grafisch am Profil bestimmen.



Rechts unten im Dialog wird die *Resultierende Wölbfeder* angezeigt.

### Wölbfeder aus Trägerüberstand

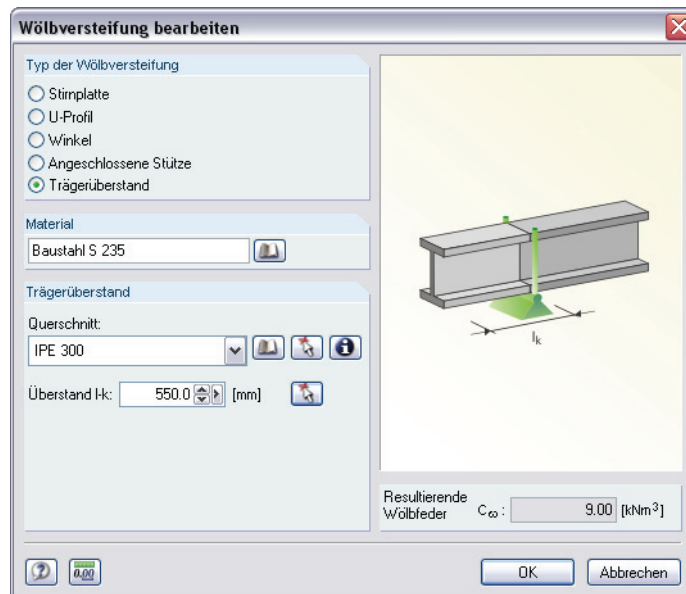


Bild 3.14: Dialog Wölbversteifung bearbeiten - Trägerüberstand

Das voreingestellte *Material* des Trägers lässt sich über die Materialbibliothek ändern.

Der überstehende *Querschnitt* wird mit dem Trägerprofil voreingestellt, kann jedoch mit [Pick] grafisch im RSTAB-Arbeitsfenster geändert werden. Über die [Bibliothek] besteht eine Zugriffsmöglichkeit auf die Profildatenbank, um einen neuen Querschnitt zu definieren.

Der Überstandslänge  $l_k$  kann direkt angegeben oder über die [Pick]-Funktion im RSTAB-Modell durch Anklicken von zwei Knoten bestimmt werden.

Rechts unten im Dialog wird die *Resultierende Wölbfeder* angezeigt.

### Kommentar

In der letzten Spalte dieser Maske sind für jeden Stabsatz benutzerdefinierte Anmerkungen möglich, um z. B. die gewählten Randbedingungen zu erläutern.

## 3.5 Elastische Stabbettungen

In dieser Maske werden die kontinuierlichen Stützungen der Stabsätze definiert. Wenn auf Rahmenriegeln Trapezbleche aufliegen, so bewirken diese eine Drehbettung der Riegel und wirken zudem als Schubfeld (siehe Kapitel 2.4, Seite 23). Außerdem kann die stabilisierende Wirkung von Pfetten und Verbänden erfasst werden.

Die Ermittlung der Federkonstanten ist in den Kapiteln 2.5.1 und 2.5.2 ab Seite 26 ausführlich beschrieben.

Werden Trapezbleche als Schubfelder eingesetzt, dann sind unbedingt die in den Normen genannten Bedingungen einzuhalten, vgl. [12].

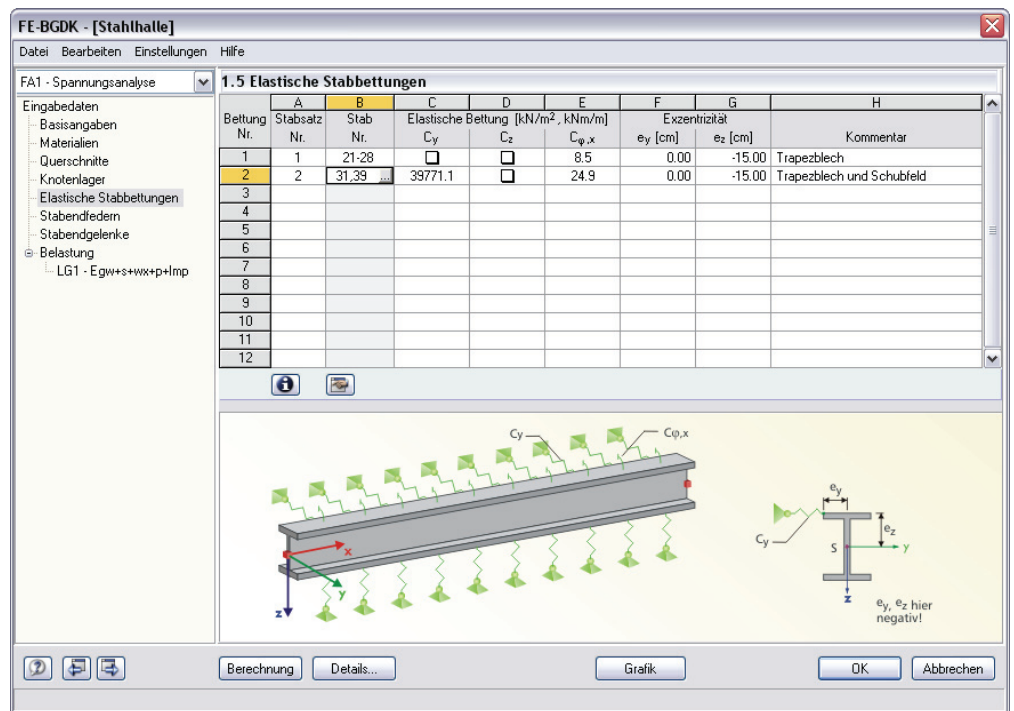


Bild 3.15: Maske 1.5 Elastische Stabbettungen

Die kontinuierlichen Federn sind auf das lokale Stabkoordinatensystem bezogen und sind längs des Stabes konstant (vgl. Kapitel 2.2.3, Seite 17).

### Stabsatz Nr.

Die Lagerungsbedingungen werden stabsatzweise definiert.

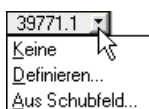
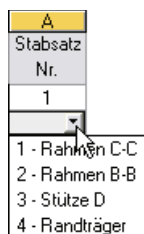
Um eine neue Stabbettung einzufügen, ist der Cursor in eine freie Zelle dieser Spalte zu setzen und der Stabsatz anzugeben oder aus der Liste zu wählen. In der nächsten Spalte *Stab* können dann die zu bettenden Stäbe festgelegt werden.

### Stab Nr.

In dieser Spalte werden die elastisch gebetteten Stäbe einzeln oder als Liste eingetragen bzw. über die Schaltfläche [...] (vgl. Bild 3.15) im RSTAB-Arbeitsfenster grafisch ausgewählt.

### Elastische Bettung $C_y / C_z / C_{\phi,x}$

In den Spalten C bis E werden die Weg- bzw. Drehfederkonstanten der ausgewählten Stäbe festgelegt (vgl. Kapitel 2.5.1 und 2.5.2). Durch Klicken in die Zellen wird das Kontextmenü zugänglich, das eine komfortable Ermittlung der Federkonstanten ermöglicht. Alternativ können die Konstanten der Weg- oder Drehfedern manuell eingetragen werden.





Über die Schaltfläche [Bearbeiten] am unteren Ende der Spalte B lassen sich die Federkonstanten ebenfalls ermitteln. Es öffnet sich folgender Dialog.

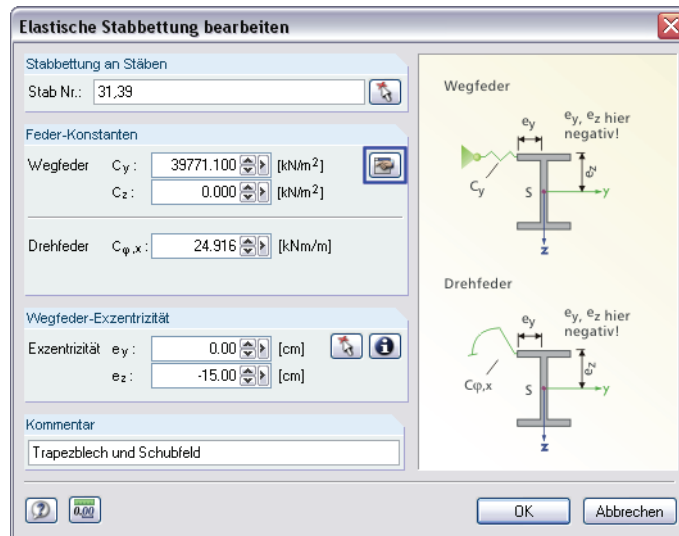


Bild 3.16: Dialog *Elastische Stabbettung bearbeiten*



Die Schaltfläche [Bearbeiten] im Abschnitt *Federkonstanten* (im Bild 3.16 hervorgehoben) eröffnet den Zugang zur programminternen Ermittlung der Weg- und Drehfederkonstanten für verschiedene Arten der kontinuierlichen Stützung. FE-BGDK berechnet die Federn für folgende Bedingungen:

- Schubfeld (→ Kapitel 2.4, Seite 24)
- Verband (→ Kapitel 2.4, Seite 25)
- Trapezblech (→ Kapitel 2.4, Seite 24)
- Pfetten (→ Kapitel 2.4, Seite 26)
- Profil (→ Kapitel 2.5.1, Seite 27)

Es wird ein neuer Dialog zur Eingabe der diversen Parameter geöffnet. Dieser Dialog gliedert sich in mehrere Register, die auf den folgenden Seiten im Einzelnen beschrieben sind.

Im Dialogabschnitt *Aktivieren* (siehe Bild 3.17) ist über die Kontrollfelder anzugeben, ob nur die seitliche Behinderung, nur die Drehbettung oder beide Wirkungen gleichzeitig berücksichtigt werden sollen.

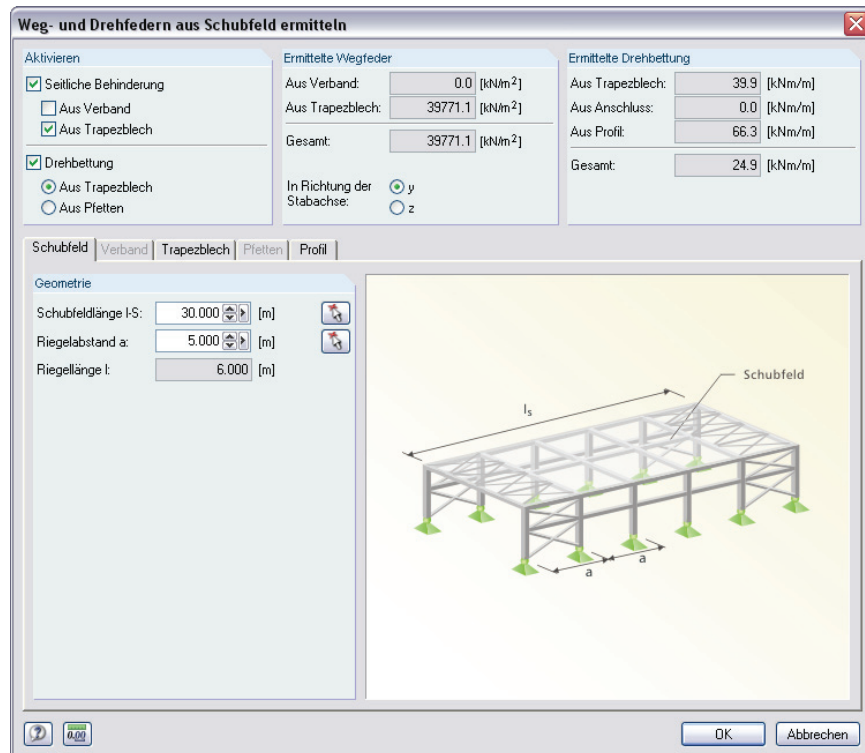
Die *Seitliche Behinderung* kann aus der Wirkung eines Verbands, eines Trapezblechs oder aus beiden Einflüssen resultieren. In der Regel wirkt die seitliche Behinderung in Richtung der Stabachse  $y$ . Die Wirkung kann jedoch im Abschnitt rechts davon auf die Stabachse  $z$  umgestellt werden.

Die *Drehbettung* der Riegel erfolgt entweder durch ein Trapezblech oder Pfetten – je nachdem, ob das Dachblech pfettenlos zwischen den Riegeln spannt oder auf Pfetten verlegt ist.

Die im Abschnitt *Aktivieren* gewählten Kontroll- und Auswahlfelder steuern, welche Register im unteren Bereich des Dialogs für weitere Eingaben zugänglich sind.

In den beiden übrigen Dialogabschnitten oben werden die ermittelten Weg- und Drehfederkonstanten angezeigt.

## Schubfeld



**Weg- und Drehfedern aus Schubfeld ermitteln**

**Aktivieren**

- ☒ Seitliche Behinderung
  - ☐ Aus Verband
  - ☒ Aus Trapezblech
- ☒ Drehbettung
  - ☒ Aus Trapezblech
  - ☐ Aus Pfetten

**Ermittelte Wegfeder**

Aus Verband: 0.0 [kNm<sup>2</sup>]  
 Aus Trapezblech: 39771.1 [kNm<sup>2</sup>]  
 Gesamt: 39771.1 [kNm<sup>2</sup>]

In Richtung der Stabachse: ☒ y ☐ z

**Ermittelte Drehbettung**

Aus Trapezblech: 39.9 [kNm/m]  
 Aus Anschluss: 0.0 [kNm/m]  
 Aus Profil: 66.3 [kNm/m]  
 Gesamt: 24.9 [kNm/m]

**Geometrie**

Schubfeldlänge I-S: 30.000 [m]  
 Riegelabstand a: 5.000 [m]  
 Riegeillänge l: 6.000 [m]

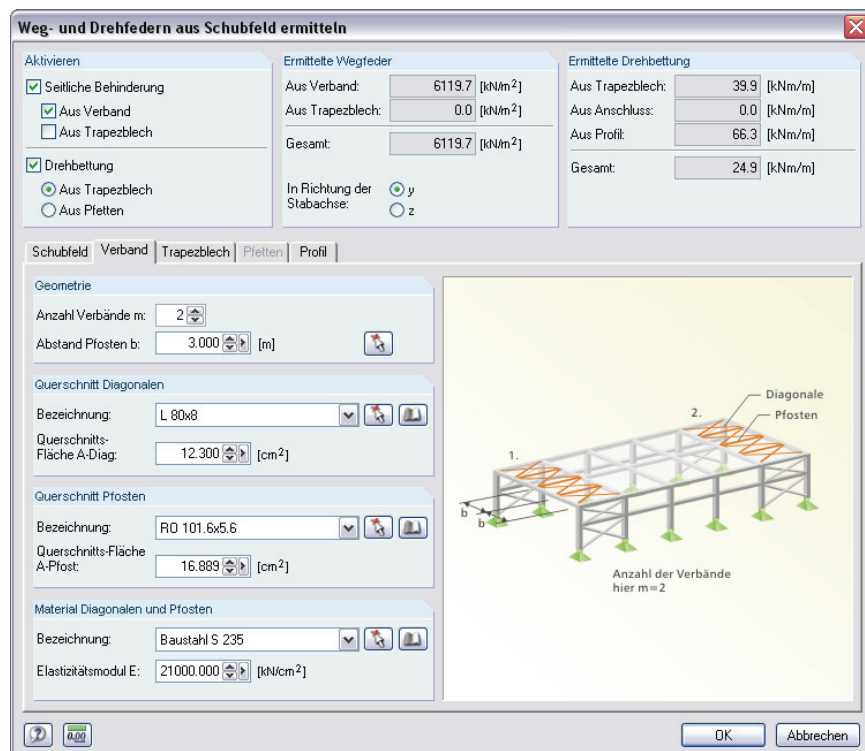
**Diagramm:** Ein 3D-Modell eines Schubfeldes mit den Dimensionen I<sub>S</sub> und a.

Buttons: OK, Abbrechen

Bild 3.17: Dialog Weg- und Drehfedern aus Schubfeld ermitteln, Register Schubfeld

Es sind nur die Länge des Schubfeldes  $I_S$  und der Abstand  $a$  der zu stabilisierenden Riegel einzugeben. Die geometrischen Angaben können auch über die [Pick]-Funktion im RSTAB-Arbeitsfenster durch Anklicken zweier Knoten erfolgen.

## Verband



**Weg- und Drehfedern aus Schubfeld ermitteln**

**Aktivieren**

- ☒ Seitliche Behinderung
  - ☒ Aus Verband
  - ☐ Aus Trapezblech
- ☒ Drehbettung
  - ☒ Aus Trapezblech
  - ☐ Aus Pfetten

**Ermittelte Wegfeder**

Aus Verband: 6119.7 [kNm<sup>2</sup>]  
 Aus Trapezblech: 0.0 [kNm<sup>2</sup>]  
 Gesamt: 6119.7 [kNm<sup>2</sup>]

In Richtung der Stabachse: ☒ y ☐ z

**Ermittelte Drehbettung**

Aus Trapezblech: 39.9 [kNm/m]  
 Aus Anschluss: 0.0 [kNm/m]  
 Aus Profil: 66.3 [kNm/m]  
 Gesamt: 24.9 [kNm/m]

**Geometrie**

Anzahl Verbände m: 2  
 Abstand Pfosten b: 3.000 [m]

**Querschnitt Diagonalen**

Bezeichnung: L 80x8  
 Querschnitts-Fläche A-Diag: 12.300 [cm<sup>2</sup>]

**Querschnitt Pfosten**

Bezeichnung: RO 101.6x5.6  
 Querschnitts-Fläche A-Pfost: 16.889 [cm<sup>2</sup>]

**Material Diagonalen und Pfosten**

Bezeichnung: Baustahl S 235  
 Elastizitätsmodul E: 21000.000 [kN/cm<sup>2</sup>]

**Diagramm:** Ein 3D-Modell eines Verbandes mit den Dimensionen m und b. Die Anzahl der Verbände hier m=2 ist angegeben.

Buttons: OK, Abbrechen

Bild 3.18: Dialog Weg- und Drehfedern aus Schubfeld ermitteln, Register Verband



Im Abschnitt *Geometrie* ist die Anzahl der Verbände  $m$  anzugeben, die die Dachebene stabilisieren. Der Abstand  $b$  der Verbandspfoeten kann direkt eingetragen oder über [Pick] grafisch im RSTAB-Arbeitsfenster durch Anklicken von zwei Knoten festgelegt werden.



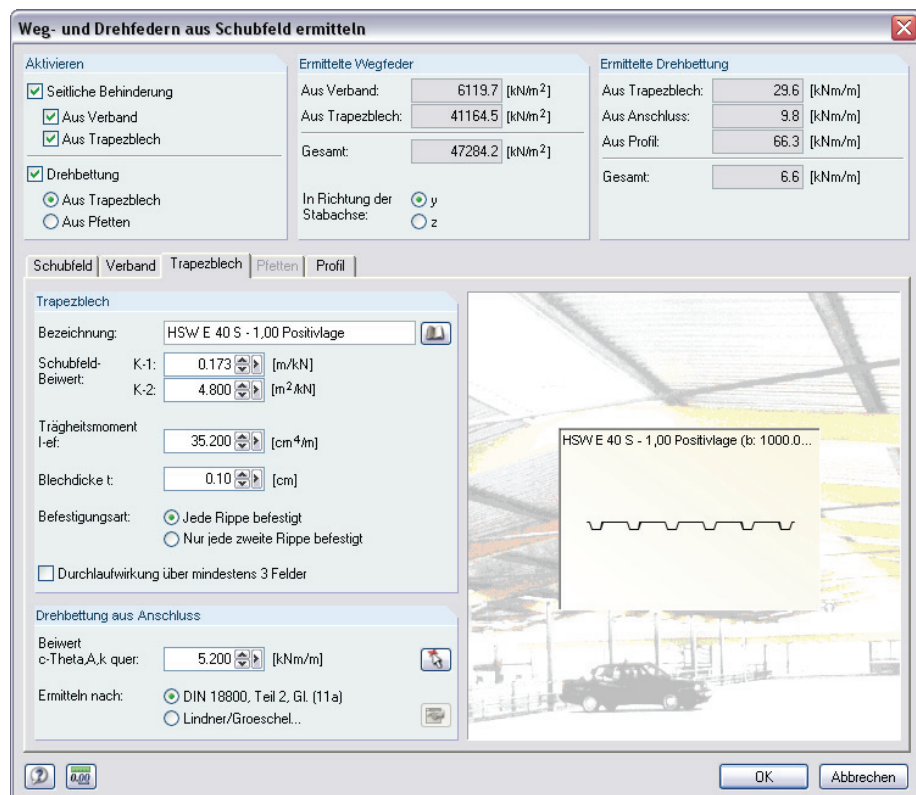
Um die Querschnittsfläche der *Diagonalen* und *Pfoeten* zu bestimmen, sind die jeweiligen Profile anzugeben. Die Auswahl kann in beiden Abschnitten über die Pull-downlisten oder grafisch über [Pick] erfolgen. Aus der [Bibliothek] lässt sich auch ein beliebiges Profil der RSTAB-Profildatenbank wählen. Die ermittelten Diagonalen- und Pfoetenquerschnittsflächen können ggf. noch manuell angepasst werden.



Das voreingestellte *Material* der Diagonalen und Pfoeten kann über die Liste oder über die [Bibliothek] geändert werden. Es ist auch eine direkte Eingabe des E-Moduls möglich.



### Trapezblech



**Weg- und Drehfedern aus Schubfeld ermitteln**

**Aktivieren**

- ☒ Seitliche Behinderung
  - ☒ Aus Verband
  - ☒ Aus Trapezblech
- ☒ Drehbettung
  - ☒ Aus Trapezblech
  - ☐ Aus Pfoeten

**Ermittelte Wegfeder**

Aus Verband: 6119.7 [kN/m<sup>2</sup>]  
 Aus Trapezblech: 41164.5 [kN/m<sup>2</sup>]  
 Gesamt: 47284.2 [kN/m<sup>2</sup>]

In Richtung der Stabachse: ☒ y ☐ z

**Ermittelte Drehbettung**

Aus Trapezblech: 29.6 [kNm/m]  
 Aus Anschluss: 9.8 [kNm/m]  
 Aus Profil: 66.3 [kNm/m]  
 Gesamt: 6.6 [kNm/m]

**Register Trapezblech**

Bezeichnung: HSW E 40 S - 1,00 Positivlage

Schubfeld-Beiwert: K-1: 0.173 [m/kN], K-2: 4.800 [m<sup>2</sup>/kN]

Trägheitsmoment I<sub>ef</sub>: 35.200 [cm<sup>4</sup>/m]

Blechdicke t: 0.10 [cm]

Befestigungsart: ☒ Jede Rippe befestigt ☐ Nur jede zweite Rippe befestigt

☐ Durchlaufwirkung über mindestens 3 Felder

**Drehbettung aus Anschluss**

Beiwert c-Theta<sub>A,k quer</sub>: 5.200 [kNm/m]

Ermitteln nach: ☒ DIN 18800, Teil 2, Gl. (11a) ☐ Lindner/Groeschel...

OK Abbrechen

Bild 3.19: Dialog *Weg- und Drehfedern aus Schubfeld ermitteln*, Register *Trapezblech*



Das *Trapezblech* lässt sich aus einer umfangreichen [Bibliothek] gebräuchlicher Trapezblechtypen auswählen (siehe Bild 3.20). Die Schubfeldbeiwerte  $K_1$  und  $K_2$ , das Trägheitsmoment  $I_{ef}$  und die Blechdicke  $t$  werden dann automatisch mit den Werten aus der Bibliothek gefüllt, können bei Bedarf jedoch per Hand angepasst werden.

Die Auswahlfelder der *Befestigungsart* steuern, ob das Trapezblech in jeder oder nur jeder zweiten Sicke befestigt ist. Diese Einstellung hat erheblichen Einfluss auf die Drehbettung (siehe Kapitel 2.4, Seite 25).

Wird das Trapezblech auf den Riegeln mindestens als Dreifeldträger verlegt, so kann diese *Durchlaufwirkung* durch Anhängen des entsprechenden Kontrollfelds aktiviert werden.

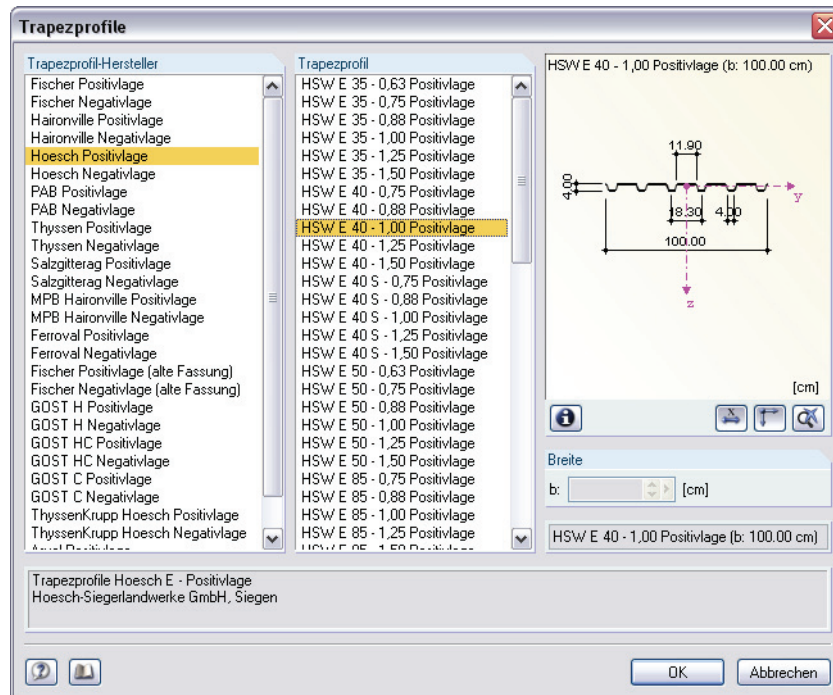
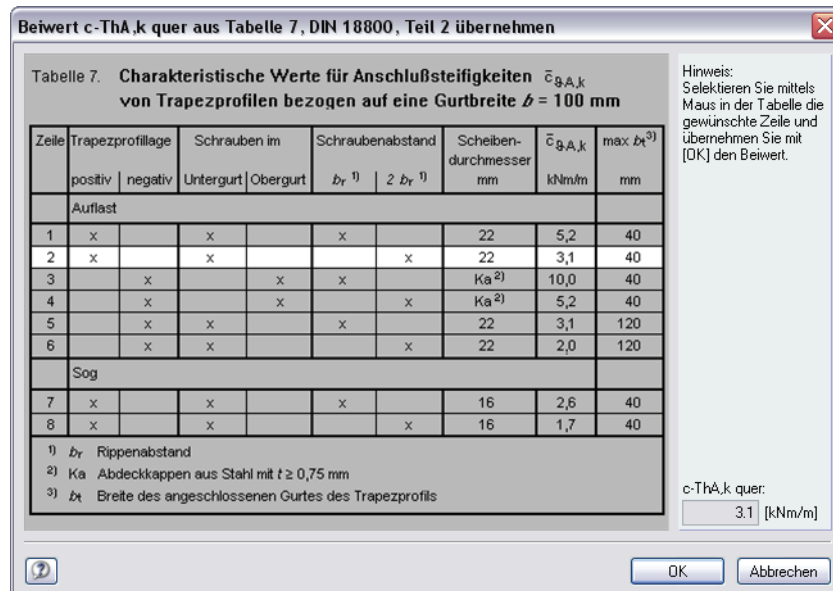


Bild 3.20: Bibliothek Trapezprofile



Im Abschnitt *Drehbettung aus Anschluss* kann der Drehbettingsbeiwert  $\bar{c}_{9A,k}$  angegeben werden (siehe Kapitel 2.5.1, Seite 27). Über [Pick] wird die Tabelle 7 der DIN 18800 Teil 2 angezeigt. Der geeignete Beiwert lässt sich je nach den Randbedingungen mit einem Klick in die entsprechende Zeile auswählen und in den Ausgangsdialog übernehmen.

Bild 3.21: Dialog Beiwert  $c_{ThA,k}$  quer aus Tabelle 7, DIN 18800 Teil 2 übernehmen

Alternativ erfolgt die Ermittlung des Drehbettingsbeiwerts  $\bar{c}_{9A,k}$  nach dem (günstigeren) Verfahren von LINDNER/GROESCHEL [17]. Hierbei sind noch weitere Angaben erforderlich. Diese erfolgen in einem Dialog, der über die Schaltfläche [Parameter bearbeiten] ganz unten im Register *Trapezblech* aufgerufen wird.

**c-Th,A,k nach Lindner/Groeschel [Stahlbau 6/96] ermitteln**

Trapezblech

Befestigungsbreite b:  [m]

☒ Positivlage    Dicke t: ☒ 0.75 mm  
☐ Negativlage    ☐ 1.00 mm

Auflast

Auflast A:  [kN/m]

Korrekturfaktoren

k-b:   
 k-t:   
 k-A:

Beiwert c-Th,A,k quer

Beiwert für die Anschlußsteifigkeit von Trapezprofilen nach Tabelle 7, DIN 18800, Teil 2

c-Th,A,k quer:  [kNm/m]

Resultierender Drehbettsbeiwert c-Th,A,k:  [kNm/m]

OK    Abbrechen

**Drehbettsbeiwerte für die Profilblechbefestigung mit Setzboizen bei unterschiedlich großen Auflasten**

Joachim Lindner  
Friedrich Groeschel

Bei der Bestimmung der Drehbettsbeiwerte  $k_b$ ,  $k_t$  und  $k_A$  sind die folgenden Voraussetzungen zu beachten:

- Größe der Befestigung: Die Befestigung muss die erforderliche Wirkung angründende Befestigung sein.
- Lage der Befestigung: Die Befestigung muss die erforderliche Wirkung angründende Befestigung sein.
- Lage der Befestigung: Die Befestigung muss die erforderliche Wirkung angründende Befestigung sein.

Die Drehbettsbeiwerte  $k_b$ ,  $k_t$  und  $k_A$  sind nach Tabelle 7, DIN 18800, Teil 2 zu ermitteln.

Die Drehbettsbeiwerte  $k_b$ ,  $k_t$  und  $k_A$  sind nach Tabelle 7, DIN 18800, Teil 2 zu ermitteln.

Die Drehbettsbeiwerte  $k_b$ ,  $k_t$  und  $k_A$  sind nach Tabelle 7, DIN 18800, Teil 2 zu ermitteln.

Bild 3.22: Dialog Beiwert  $c\text{-Th,A,k}$  quer nach Lindner/Groeschel ermitteln

Im Abschnitt *Trapezblech* ist die Befestigungsbreite  $b$  des Trapezblechs auf dem Riegel einzutragen. Zudem sind die Trapezprofilauflage und Dicke  $t$  sowie die Auflast  $A$  als Bemessungswert der Trapezblech-Auflagerkraft anzugeben. Aus diesen Vorgaben werden die *Korrekturfaktoren*  $k_b$ ,  $k_t$  und  $k_A$  ermittelt.



Der Beiwert  $\bar{c}_{9A,k}$  der Drehbettung lässt sich wiederum direkt aus Tabelle 7 der DIN 18800 Teil 2 auswählen (siehe Bild 3.21). Unten im Dialog wird die ermittelte Drehfeder angezeigt.

## Pfetten

**Weg- und Drehfedern aus Schubfeld ermitteln**

| Aktivieren                                                | Ermittelte Wegfeder                                                                   | Ermittelte Drehbettung     |
|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> Seitliche Behinderung | Aus Verband: 6119.7 [kN/m <sup>2</sup> ]                                              | Aus Pfetten: 197.6 [kNm/m] |
| <input checked="" type="checkbox"/> Aus Verband           | Aus Trapezblech: 41164.5 [kN/m <sup>2</sup> ]                                         | Aus Anschluss: 0.0 [kNm/m] |
| <input checked="" type="checkbox"/> Aus Trapezblech       | Gesamt: 47284.2 [kN/m <sup>2</sup> ]                                                  | Aus Profil: 66.3 [kNm/m]   |
| <input checked="" type="checkbox"/> Drehbettung           | In Richtung der Stabachse: <input checked="" type="radio"/> y <input type="radio"/> z | Gesamt: 49.7 [kNm/m]       |

Schubfeld | Verband | Trapezblech | **Pfetten** | Profil

**Geometrie**  
 Abstand Pfetten e: 4.600 [m]

**Material**  
 Bezeichnung: Baustahl S 235  
 Elastizitätsmodul E: 21000.000 [kN/cm<sup>2</sup>]

**Querschnitt**  
 Bezeichnung: IPE 140  
 Trägheitsmoment I<sub>y</sub>: 541.000 [cm<sup>4</sup>]

☒ Durchlaufwirkung der Pfetten über mindestens 3 Felder

OK Abbrechen

Bild 3.23: Dialog Weg- und Drehfedern aus Schubfeld ermitteln, Register Pfetten



Im Abschnitt *Geometrie* ist der Pfettenabstand  $e$  anzugeben. Der Abstand lässt sich mit [Pick] auch grafisch im RSTAB-Arbeitsfenster durch Anklicken zweier Knoten bestimmen.



Das voreingestellte *Material* der Pfetten lässt sich über die Liste oder die Materialbibliothek ändern. Der E-Modul wird in das Eingabefeld übernommen, kann aber bei Bedarf angepasst werden. Mit [Pick] kann ein Stab grafisch ausgewählt werden, um dessen Material zu übernehmen.



Der *Querschnitt* der Pfetten kann mit [Pick] grafisch im RSTAB-Arbeitsfenster ausgewählt werden. Über die [Bibliothek] besteht eine Zugriffsmöglichkeit auf die Profildatenbank, um den geeigneten Pfettenquerschnitt zu bestimmen. Dessen Trägheitsmoment  $I_y$  wird in das Eingabefeld unterhalb übernommen und kann dort bei Bedarf noch abgeändert werden.



Werden die Pfetten als Durchlaufträger über mindestens drei Felder verlegt, so kann das Kontrollfeld im untersten Abschnitt aktiviert werden.

#### Profil

**Weg- und Drehfedern aus Schubfeld ermitteln**

**Aktivieren**

- ☒ Seitliche Behinderung
  - ☐ Aus Verband
  - ☒ Aus Trapezblech
- ☒ Drehbettung
  - ☒ Aus Trapezblech
  - ☐ Aus Pfetten

**Ermittelte Wegfeder**

|                  |                                    |
|------------------|------------------------------------|
| Aus Verband:     | 0.0 [kNm/m <sup>2</sup> ]          |
| Aus Trapezblech: | 41164.5 [kNm/m <sup>2</sup> ]      |
| <b>Gesamt:</b>   | <b>41164.5 [kNm/m<sup>2</sup>]</b> |

In Richtung der Stabachse: ☒ y ☐ z

**Ermittelte Drehbettung**

|                  |                    |
|------------------|--------------------|
| Aus Trapezblech: | 29.6 [kNm/m]       |
| Aus Anschluss:   | 11.8 [kNm/m]       |
| Aus Profil:      | 66.3 [kNm/m]       |
| <b>Gesamt:</b>   | <b>7.5 [kNm/m]</b> |

**Profil**

Bezeichnung: IPE 300

Druckgurtbreite  $b$ : 15.00 [cm]

Druckgurtstärke  $t$ : 1.07 [cm]

Stegdick  $s$ : 0.71 [cm]

Gurtschwerlinien-Höhe  $h_m$ : 28.93 [cm]

**Berücksichtigen**

- ☒ Drehbettung aus Profilverformung

**Diagramm:** IPE 300

**Buttons:** OK, Abbrechen

Bild 3.24: Dialog Weg- und Drehfedern aus Schubfeld ermitteln, Register Profil

Das voreingestellte *Profil* des elastisch gebetteten Stabes lässt sich ggf. über die Liste oder die [Pick]-Funktion grafisch im RSTAB-Arbeitsfenster ändern. Des Weiteren kann aus der [Bibliothek] ein beliebiges I- oder U-Profil aus der Profildatenbank ausgewählt werden.

Die Druckgurtbreite  $b$ , Druckgurtstärke  $t$ , Stegdick  $s$  und Gurtschwerlinienhöhe  $h_m$  werden gemäß der Profilauswahl angezeigt. [Pick] ruft die Querschnittsgrafik auf, in der die entsprechenden Profileile oder -abstände für die Übernahme in die Eingabefelder gekennzeichnet werden können.

**Abstand wählen**

Picken Sie bitte zwei Spannungspunkte, deren Abstand voneinander übernommen wird.

**Diagramm:** IPE 300

**Buttons:** OK, Abbrechen

Bild 3.25: Dialog Abstand wählen

### Exzentrizität $e_y/e_z$

In den Spalten F und G der Maske 1.5 (vgl. Bild 3.15, Seite 52) werden die Exzentrizitäten der elastischen Stabbettungen festgelegt. Diese beziehen sich auf die lokalen Stabachsen  $y$  und  $z$  (bzw.  $u$  und  $v$  bei unsymmetrischen Querschnitten). Die Abstände der Federn vom Querschnittsschwerpunkt lassen sich auch im Dialog *Elastische Stabbettung bearbeiten* anpassen (siehe Bild 3.16, Seite 53).

Über die Schaltfläche [...] in der Tabellenzelle bzw. [Pick] im Dialog können die Exzentrizitäten am Profil durch Anklicken des entsprechenden Spannungspunkts grafisch ausgewählt werden (siehe Bild 3.25).

### Kommentar

In der letzten Spalte dieser Maske sind für jeden Stabsatz benutzerdefinierte Anmerkungen möglich, um z. B. die gewählten Randbedingungen zu erläutern.

## 3.6 Stabendfedern

In dieser Maske können Stabendgelenke mit Weg-, Dreh- und Wölbfedern für bestimmte Stäbe im Stabsatz definiert werden. Auf diese Weise lässt sich z. B. die Wölbbehinderung eines Riegels durch einen Kopfplattenanschluss abbilden.

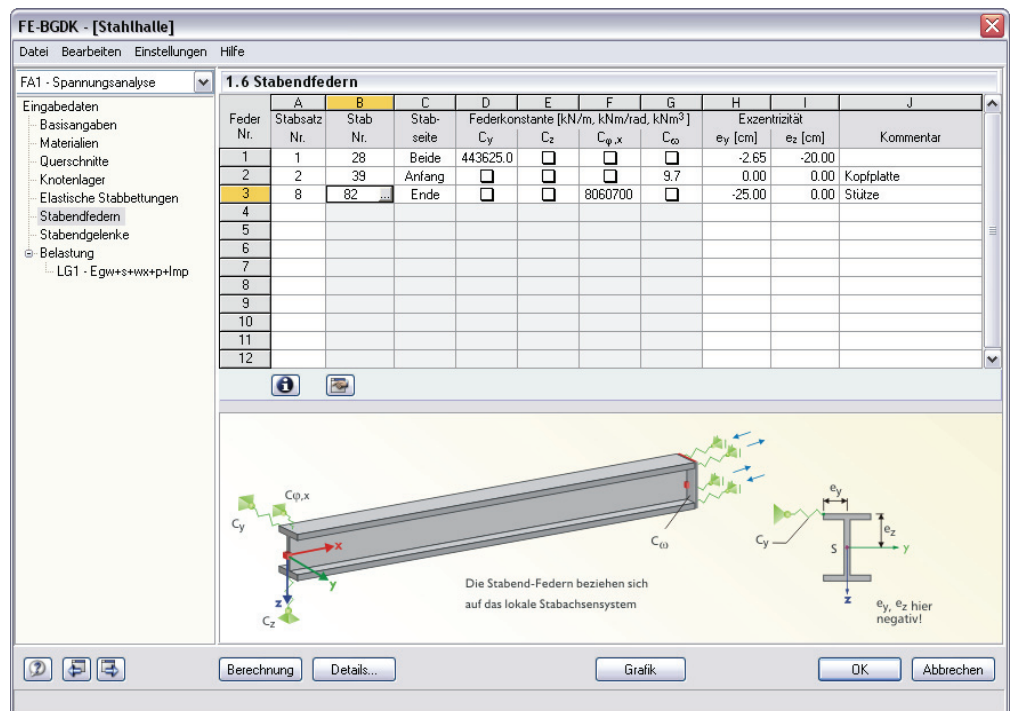
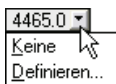
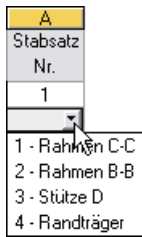


Bild 3.26: Maske 1.6 Stabendfedern

Die hier definierten Randbedingungen verstehen sich im Zusammenwirken mit den Knotenlager-Parametern der Maske 1.4. Bei der Eingabe ist darauf zu achten, dass versehentlich keine Doppelgelenke o. ä. definiert werden.

Im Unterschied zu den in Maske 1.4 definierten Knotenlagern lassen sich in der vorliegenden Maske auch Exzentrizitäten für die Einzelfedern festlegen.



### Stabsatz Nr.

Die Gelenkbedingungen werden stabsatzweise definiert.

Um eine neue Stabendfeder einzufügen, ist der Cursor in eine freie Zelle dieser Spalte zu setzen und der Stabsatz anzugeben oder aus der Liste zu wählen. In der nächsten Spalte *Stab* können dann die Stäbe festgelegt werden, an deren Enden sich die Federn befinden.

### Stab Nr.

In dieser Spalte werden die Stäbe mit Endfedern einzeln oder als Liste eingetragen bzw. über die Schaltfläche [...] (vgl. Bild 3.26) im RSTAB-Arbeitsfenster grafisch ausgewählt.

### Seite

Nach einem Klick in eine Zelle dieser Spalte erscheint die Schaltfläche [▼], über die die links dargestellte Auswahlliste zugänglich wird. In dieser Liste wird eingestellt, an welchen Enden der Stab federnd gehalten wird.

### Federkonstante $C_y$ / $C_z$ / $C_{\phi,x}$ / $C_{\omega}$

In den Spalten D bis G werden die Weg-, Dreh- und Wölbfederkonstanten für die angegebenen Stabenden festgelegt (siehe Kapitel 2.5). Diese Federkonstanten beziehen sich auf die lokalen Stabachsen  $y$ ,  $z$  und  $x$  (bzw.  $u$  und  $v$  bei unsymmetrischen Querschnitten).

Durch Klicken in die Kontrollkästchen werden die Stützungen oder Einspannungen in den entsprechenden Freiheitsgraden aktiviert bzw. deaktiviert. Alternativ können die Federkonstanten manuell eingetragen werden. Über die Option *Definieren* im Kontextmenü lassen sich die Federkonstanten komfortabel ermitteln.

Über die Schaltfläche [Bearbeiten] am unteren Ende der Spalte B lassen sich die Gelenk- bzw. Lagerungsbedingungen ebenfalls anpassen. Es öffnet sich folgender Dialog.

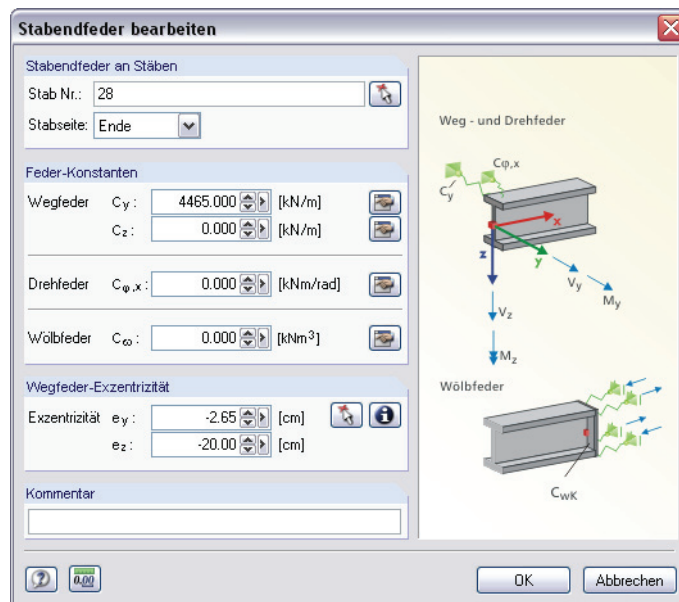


Bild 3.27: Dialog *Stabendfeder bearbeiten*

### Wegfeder

Die Schaltfläche [Bearbeiten] im Abschnitt *Federkonstanten* (Bild 3.27) ruft einen Dialog auf, in dem die Stützung des Stabendes durch ein anschließendes Bauteil erfasst werden kann. Die Wegfederkonstante lässt sich für die jeweils relevante lokale Stabachse  $y$  oder  $z$  ermitteln.

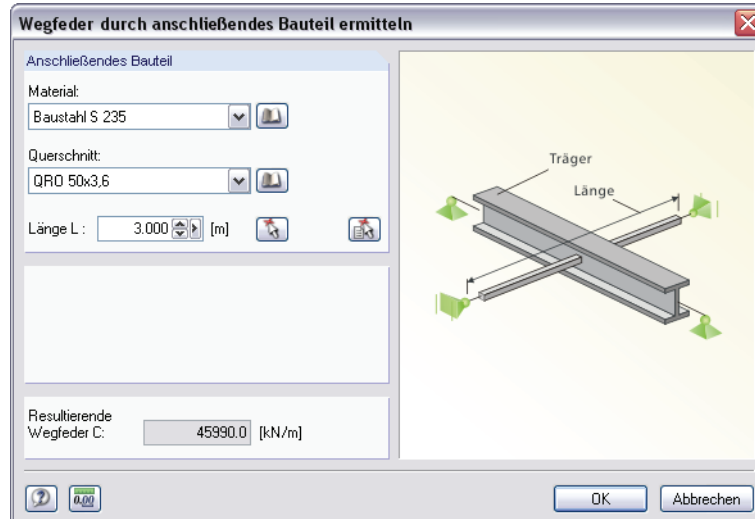


Bild 3.28: Dialog *Wegfeder durch anschließendes Bauteil ermitteln*

Das *Material* und der *Querschnitt* des anschließenden Bauteils lassen sich über die Liste oder die Material- bzw. Profilbibliothek auswählen. Die *Länge L* kann direkt eingetragen oder mit [Pick] im RSTAB-Arbeitsfenster grafisch durch Anklicken von zwei Knoten bestimmt werden.

Mit der Schaltfläche [Stabeigenschaften übernehmen] werden Material, Querschnitt und Länge eines grafisch ausgewählten Stabes übernommen.

### Drehfeder

Die Schaltfläche [Bearbeiten] im Abschnitt *Federkonstanten* (Bild 3.27) ruft einen Dialog auf, in dem anstelle einer Gabellagerung die elastische Einspannung des Stabendes erfasst werden kann, die sich durch eine angeschlossene Stütze ergibt.

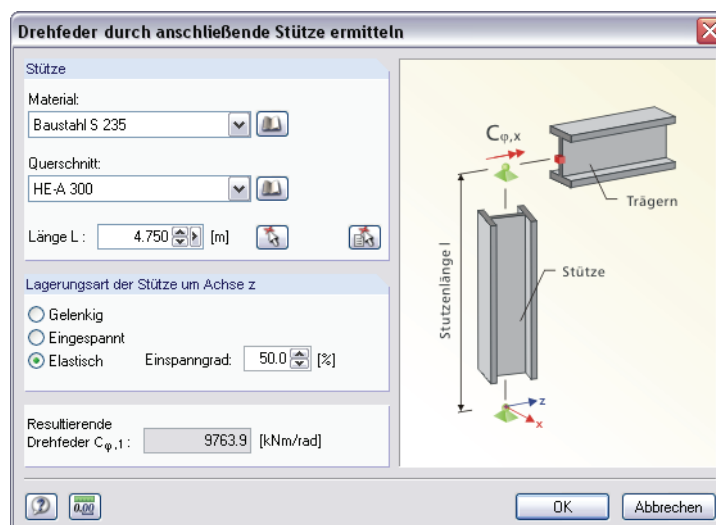


Bild 3.29: Dialog *Wegfeder durch anschließende Stütze ermitteln*



Das *Material* und der *Querschnitt* der anschließenden Stütze lassen sich über die Liste oder die Material- bzw. Profilbibliothek auswählen. Die *Länge*  $L$  kann direkt eingetragen oder mit [Pick] im RSTAB-Arbeitsfenster grafisch durch Anklicken von zwei Knoten bestimmt werden.



Mit der Schaltfläche [Stabeigenschaften übernehmen] werden Material, Querschnitt und Länge einer grafisch ausgewählten Stütze übernommen.

Bei der *Lagerungsart der Stütze* um deren schwache Achse  $z$  stehen die Optionen gelenkig, eingespannt und elastisch zur Wahl, wobei der Einspanngrad manuell zwischen 0 % (gelenkig) und 100 % (eingespannt) variiert werden kann.

#### Wölbfeder



Die Behinderung der Verwölbung erhöht die Torsionssteifigkeit des Trägers. Die Schaltfläche [Bearbeiten] im Abschnitt *Federkonstanten* (Bild 3.27) ruft folgenden Dialog auf, in dem die Wölbfeder durch eine Wölbversteifung erfasst werden kann.

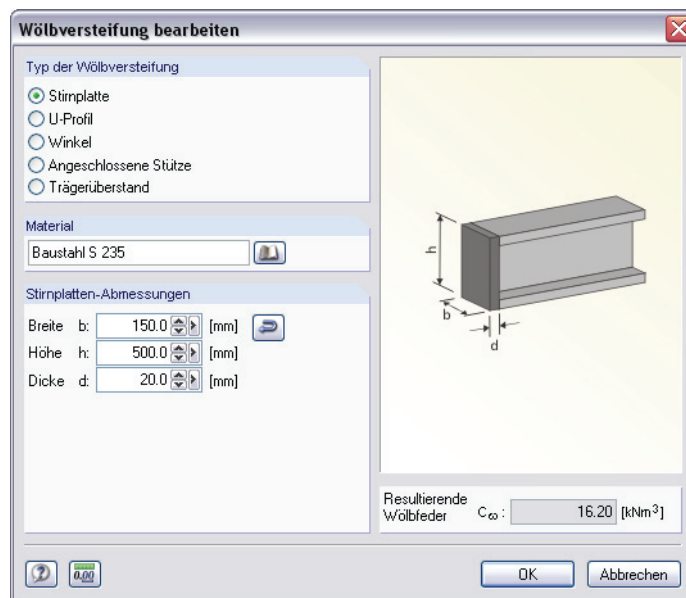


Bild 3.30: Dialog *Wölbversteifung bearbeiten*



Die theoretischen Erläuterungen zur Ermittlung der Wölbfedern finden Sie im Kapitel 2.5.3 ab Seite 29. FE-BGDK berechnet die Wölbfedern infolge einer Stirnplatte, eines U-Profiles oder Winkels, einer angeschlossenen Stütze oder eines Trägerüberstands.

Der Dialog *Wölbversteifung bearbeiten* ist im Kapitel 3.4 auf Seite 48 bis 51 ausführlich erläutert. Im Unterschied zur Maske 1.4 sind die Wölbfedern in der vorliegenden Maske nicht an ein Lager gebunden, sondern können einem beliebigen Stabende zugewiesen werden.

#### Exzentrizität $e_y/e_z$

In den Spalten H und I der Maske 1.6 (siehe Bild 3.26, Seite 60) werden die Exzentrizitäten der Federn festgelegt, die sich auf die lokalen Stabachsen  $y$  und  $z$  (bzw.  $u$  und  $v$  bei unsymmetrischen Querschnitten) beziehen. Die Abstände der Federn vom Profilschwerpunkt lassen sich auch im Dialog *Stabendfeder bearbeiten* (siehe Bild 3.27, Seite 61) anpassen.



Über die Schaltfläche [...] in der Tabellenzelle bzw. [Pick] im Dialog können die Exzentrizitäten am Profil durch Anklicken des entsprechenden Spannungspunkts grafisch bestimmt werden (siehe Bild 3.25).

#### Kommentar

In der letzten Spalte dieser Maske sind für jeden Stabsatz benutzerdefinierte Anmerkungen möglich, um z. B. die gewählten Randbedingungen zu erläutern.

## 3.7 Stabendgelenke

In dieser Maske können unabhängig von RSTAB Stabendgelenke zugewiesen werden. Die in RSTAB definierten Gelenke sind für die ausgewählten Stäbe des Stabsatzes voreingestellt.

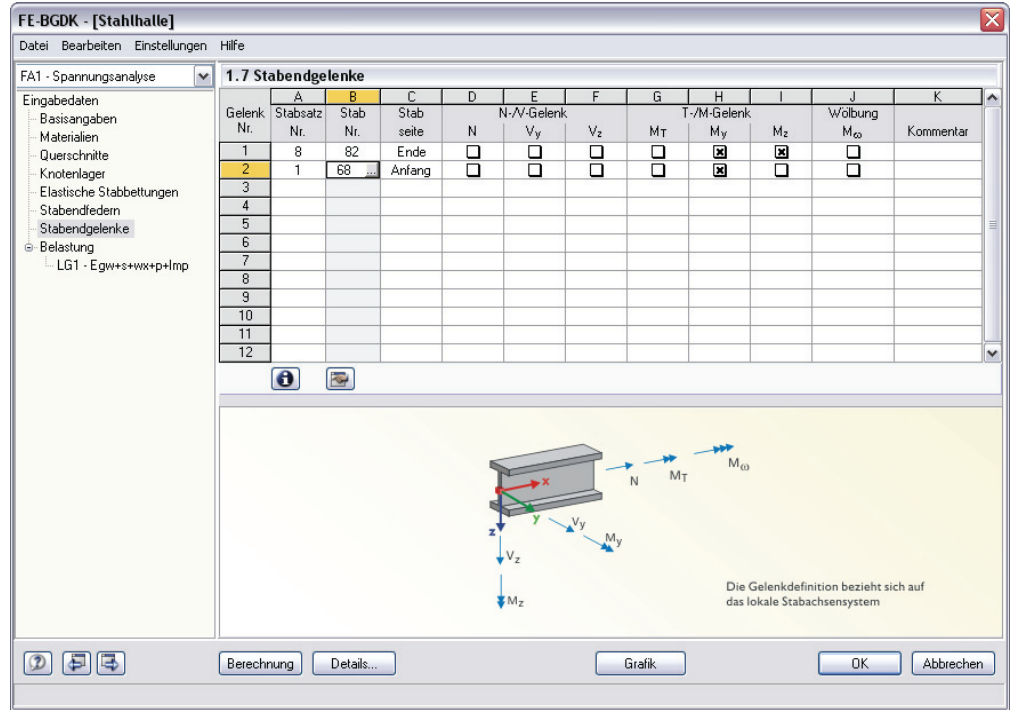
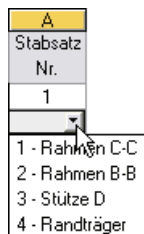


Bild 3.31: Maske 1.7 Stabendgelenke



### Stabsatz Nr.

Die Gelenkbedingungen werden stabsatzweise definiert.

Um ein neues Stabendgelenk einzufügen, ist der Cursor in eine freie Zelle dieser Spalte zu setzen und der Stabsatz anzugeben oder aus der Liste zu wählen. In der nächsten Spalte *Stab* können dann die Stäbe festgelegt werden, an deren Enden sich die Gelenke befinden.

### Stab Nr.

In dieser Spalte werden die Stäbe mit Endgelenken einzeln oder als Liste eingetragen bzw. über die Schaltfläche [...] (siehe Bild 3.31) im RSTAB-Arbeitsfenster grafisch ausgewählt.

### Stabseite

Nach einem Klick in eine Zelle dieser Spalte erscheint die Schaltfläche [▼], über die die links dargestellte Auswahlliste zugänglich wird. In dieser Liste wird eingestellt, an welchem Ende des Stabes sich das Gelenk befindet.

### N-/V-Gelenk

In den Spalten D bis F werden die Gelenkeigenschaften zur Übertragung von Normal- und Querkraften festgelegt. Diese Schnittgrößen sind auf die lokalen Stabachsen bezogen. Durch Klicken in die Kontrollkästchen werden die Freiheitsgrade aktiviert bzw. deaktiviert.

## T-/M-Gelenk

In den Spalten G bis I werden die Gelenkeigenschaften zur Übertragung von Torsions- und Biegemomente festgelegt. Diese Schnittgrößen sind auf die lokalen Stabachsen bezogen. Durch Klicken in die Kontrollkästchen werden die Freiheitsgrade aktiviert bzw. deaktiviert. Es können keine Federkonstanten manuell eingetragen werden.

## Wölbung

Die Spalte J regelt die Gelenkeigenschaften zur Übertragung des Wölbmoments.

Über die Schaltfläche [Bearbeiten] am unteren Ende der Spalte B können die Eigenschaften eines jeden Gelenktyps ebenfalls angepasst werden. Es öffnet sich folgender Dialog.

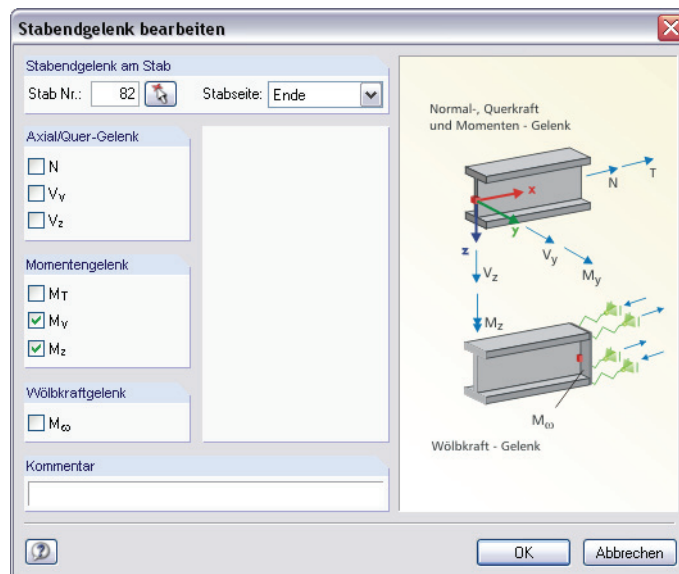


Bild 3.32: Dialog *Stabendgelenk bearbeiten*

## Kommentar

In der letzten Spalte dieser Maske sind benutzerdefinierte Anmerkungen möglich, um jedes Stabendgelenk zu erläutern.

## 3.8 Belastung

Die Eingabe der *Belastung* verteilt sich auf folgende drei Untermasken:

- 2.1 Knotenlasten
- 2.2 Stablasten
- 2.3 Imperfektionen

Die drei Untermasken können über die Registerreiter am unteren Rand angesteuert werden.

Links im Navigator von FE-BGDK ist zunächst der Lastfall bzw. die Lastfallgruppe auszuwählen, dessen bzw. deren Belastungsdaten man in der aktuellen Maske bearbeiten will. Der Navigator zeigt alle Lastfälle und Lastfallgruppen an, die in Maske 1.1 *Basisangaben* zur Bemessung ausgewählt wurden.



Wurden in RSTAB Knoten- oder Stablasten für die im Stabsatz enthaltenen Stäbe definiert, werden diese in den Tabellen voreingestellt. Die übernommenen Lasten können bei Bedarf geändert oder ergänzt werden. Imperfektionen werden nicht übernommen. Diese müssen separat in der Maske 2.3 *Imperfektionen* gemäß der Eigenform definiert werden.



**Achtung!** Leiten Bauteile, die nicht zum Stabsatz gehören, Lasten ein, dann werden diese Lasten nicht automatisch aus RSTAB übernommen. Diese eingeleiteten Lasten sind deshalb unbedingt zu ergänzen, um das Modell des herausgelösten Stabsatzes korrekt abzubilden. Dies betrifft insbesondere Hallenrahmen mit Kranbahnkonsolen oder 3D-Hallen mit Pfettendächern. Die Ergänzungen sind in der Regel als Knotenlasten vorzunehmen. Bei exzentrisch wirkenden Zusatzlasten empfiehlt sich die Maske 2.2 *Stablasten*.

### 3.8.1 Knotenlasten

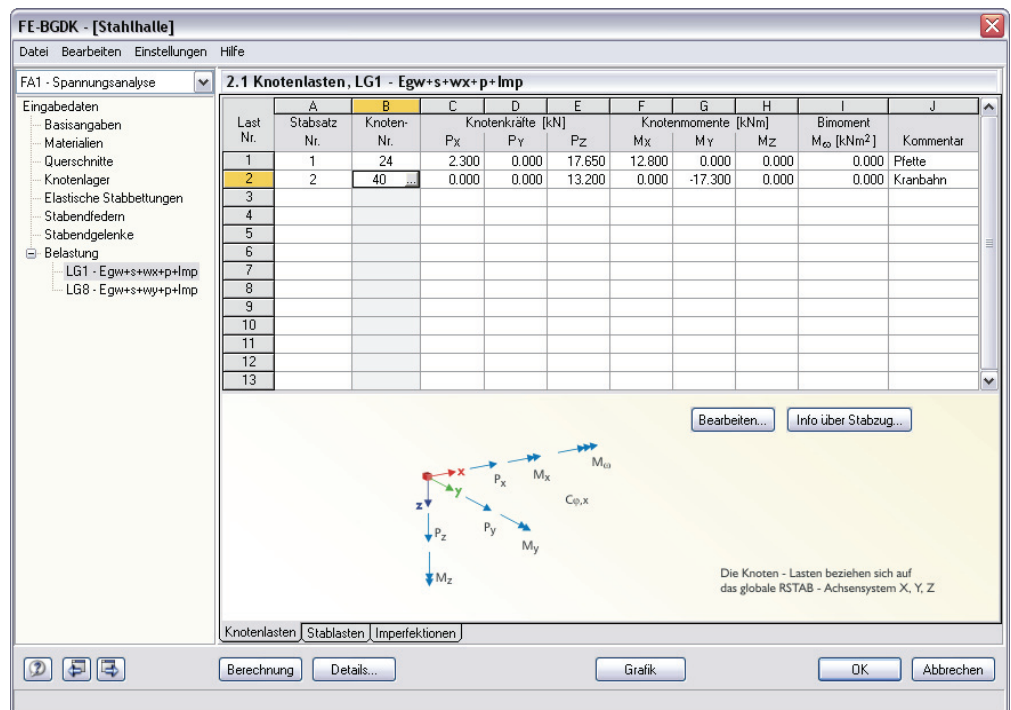
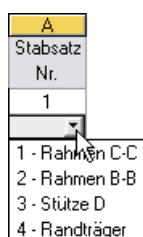


Bild 3.33: Maske 2.1 *Knotenlasten*

#### Stabsatz Nr.

Die Knotenlasten werden stabsatzweise definiert. Die in RSTAB definierten Knotenlasten der im Stabsatz enthaltenen Knoten sind bereits voreingestellt.



Um eine zusätzliche Knotenlast einzufügen, ist der Cursor in eine freie Zelle dieser Spalte zu setzen und der Stabsatz anzugeben oder aus der Liste zu wählen. In der nächsten Spalte können dann die *Knoten* festgelegt werden, an denen die jeweiligen Lasten wirken.

### Knoten Nr.



In dieser Spalte werden die Stäbe mit Endgelenken einzeln oder als Liste eingetragen bzw. über die Schaltfläche [...] (vgl. Bild 3.31) im RSTAB-Arbeitsfenster grafisch ausgewählt.

### Knotenkräfte $P_x / P_y / P_z$

In den Spalten C bis E lassen sich die in den Stabsatz eingeleiteten Schnittgrößen erfassen, die als Normal- und Querkräfte von anschließenden Bauteilen übertragen werden. Schnittgrößen von Stäben, die nicht Teil des Stabsatzes sind, werden nicht automatisch von RSTAB übernommen. Diese sind manuell zu definieren.

Da die Knotenkräfte in dieser Maske auf das globale XYZ-Koordinatensystem bezogen sind, ist Umsicht bei der Transformation von lokalen RSTAB-Stabschnittgrößen geboten.

### Knotenmomente $M_x / M_y / M_z$

Analog können in den Spalten F bis H Torsions- und Biegemomente erfasst werden, die in den Stabsatz an den Knoten eingeleitet werden. Diese Momente sind ebenfalls auf das globale XYZ-Achsensystem bezogen.

### Bimoment $M_{\omega}$

In dieser Spalte können zusätzlich wirkende Knoten-Wölbmomente eingetragen werden. RSTAB berechnet keine Schnittgrößen infolge Wölbkrafttorsion.

Bearbeiten...

Über die Schaltfläche [Bearbeiten] unterhalb der Knotenlasten-Liste lassen sich die Angaben zur aktuellen Knotenlast ebenfalls anpassen. Es öffnet sich folgender Dialog.

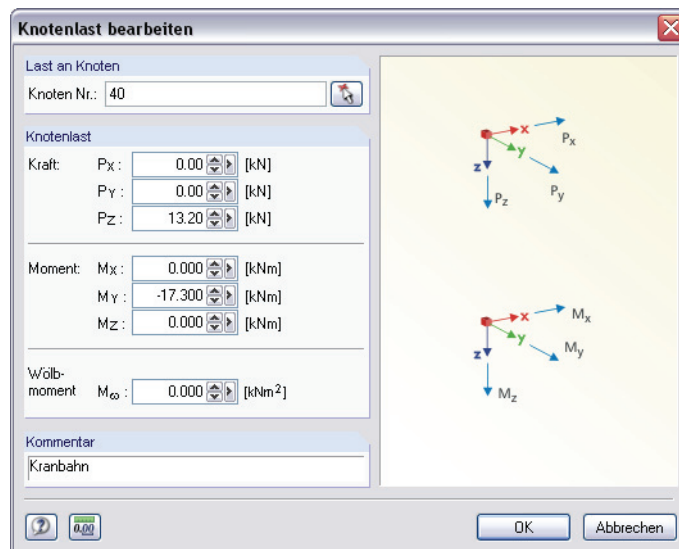


Bild 3.34: Dialog *Knotenlast bearbeiten*

### Kommentar

In der letzten Spalte dieser Maske sind benutzerdefinierte Anmerkungen möglich, um beispielsweise eine zusätzlich wirkende Knotenlast zu erläutern.

### 3.8.2 Stablasten

Auch in dieser Maske sind die in RSTAB definierten Lasten voreingestellt, die auf den im Stabsatz enthaltenen Stäben wirken. Falls exzentrisch in den Stabzug eingeleitete Lasten berücksichtigt werden müssen, lassen sich diese in der Maske als zusätzliche Einzelkräfte oder -momente erfassen.

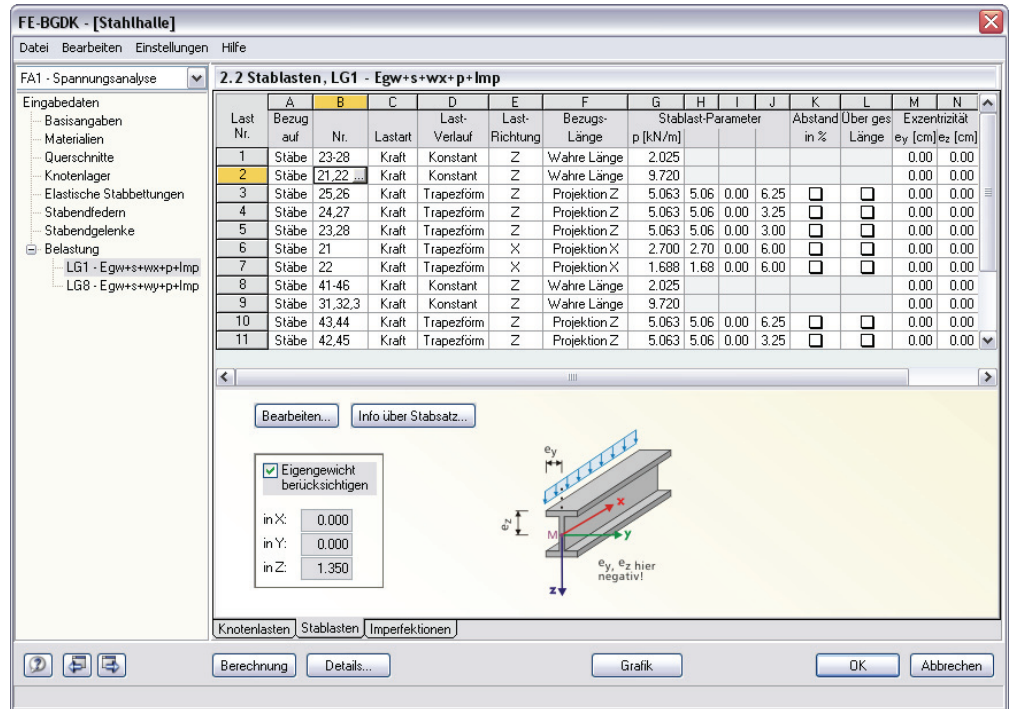


Bild 3.35: Maske 2.2 Stablasten

Das Kontrollfeld *Eigengewicht berücksichtigen* im unteren Teil dieser Maske steuert, ob das Eigengewicht der im Stabsatz enthaltenen Stäbe erfasst werden soll. Ist diese Option aktiv, wird der in RSTAB definierte Faktor zur Berücksichtigung des Eigengewichts fest eingestellt.

#### Bezug auf

Über die Auswahlliste dieser Zelle wird festgelegt, ob die Stablast auf einzelne Stäbe, eine Stabliste oder einen ganzen Stabsatz wirken soll. Die unterschiedliche Wirkungsweise für diese drei Optionen ist im Kapitel 7.2 des RSTAB-Handbuchs auf Seite 159 beschrieben.

Um eine zusätzliche Stablast einzufügen, ist der Cursor in eine freie Zelle dieser Spalte zu setzen und der Lastbezug aus der Liste zu wählen. In der nächsten Spalte können dann die *Nummern* der Objekte festgelegt werden, an denen die jeweiligen Lasten wirken.

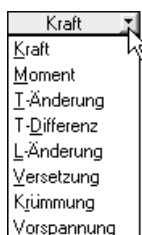
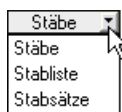
#### Stab / Stabliste / Stabsatz Nr.

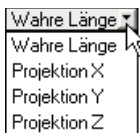
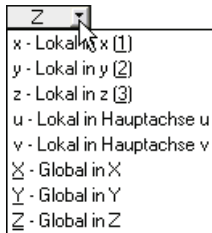
In dieser Spalte werden die Stäbe bzw. Stabsätze einzeln oder als Liste eingetragen oder über die Schaltfläche [...] (vgl. Bild 3.35) im RSTAB-Arbeitsfenster grafisch ausgewählt.

#### Lastart

Als Lastarten finden sich die in RSTAB möglichen Stablasttypen wieder, die ggf. über die Auswahlliste dieser Zelle abgeändert werden können. Die Lastarten sind in der Tabelle 7.1 des RSTAB-Handbuchs auf Seite 160 erläutert.

Bitte beachten Sie, dass die derzeitige Version von FE-BGDK ausschließlich Kräfte und Einzelmomente unterstützt.





### Lastverlauf

Für Kräfte bestehen die links in der Auswahlliste gezeigten Lastanordnungen. Diese sind in der Tabelle 7.2 des RSTAB-Handbuchs auf Seite 161 ausführlich beschrieben.

Momente lassen sich ebenfalls in FE-BGDK erfassen, sofern diese als punktuelle Einzel- oder Mehrfachlasten definiert werden. Streckenmomente werden in der derzeitigen Version noch nicht unterstützt.

### Lastrichtung

Die Kraft oder das Einzelmoment kann in Richtung der globalen Achsen X, Y und Z oder der lokalen Stabachsen x, y und z (bzw. u und v bei unsymmetrischen Querschnitten) wirksam sein. Die Beschreibung der Lastbezugsachsen finden Sie im Kapitel 7.2 des RSTAB-Handbuchs auf Seite 163.

Für die Analyse in FE-BGDK spielt es keine Rolle, ob eine Last lokal oder gleichwertig global definiert ist.

### Bezugslänge

Der Lasteintrag kann auf die gesamte, wahre Stab- bzw. Stabsatzlänge oder auf die Projektion des Stabes bzw. Stabsatzes in eine der Richtungen des globalen Koordinatensystems bezogen werden.

### Stablast-Parameter $P / M / p / p_1 / p_2 / n / A / B$

In den Spalten G bis J werden die Lastgrößen für  $P$ ,  $M$  oder  $p$  und eventuell zusätzliche Parameter angegeben. Die Eingabefelder sind in Abhängigkeit von den vorher aktivierten Auswahlfeldern zugänglich und entsprechend beschriftet.

Der Parameter  $n$  bezeichnet die Anzahl der Einzellasten, die Parameter  $A$  und  $B$  beschreiben die Abstände der Last vom Stab- bzw. Stabsatzanfang.

### Abstand in %

Ist das Kontrollfeld in der Spalte K aktiviert, können die Abstände von Einzel- oder Trapezlasten relativ zur Stab- bzw. Stabsatzlänge definiert werden.

### Über gesamte Länge

Das Kontrollfeld in Spalte L kann nur bei trapezförmigen Lasten aktiviert werden. In diesem Fall wird die linear veränderliche Last vom Anfang des Stabes bzw. Stabsatzes bis zum Ende angeordnet. Die Spalten I und J sind dann unzugänglich.

### Exzentrizität $e_y / e_z$

In den Spalten M und N werden die Exzentrizitäten des Lastansatzpunktes festgelegt. Diese sind auf die lokalen Stabachsen y und z bezogen.

Vertikale Lasten greifen im Allgemeinen nicht im Schubmittelpunkt des Profils an, sondern in der Schwerachse. Dies ist bei einfachsymmetrischen Querschnitten wie z. B. U-Profilen zu berücksichtigen, bei denen Schubmittelpunkt und Schwerpunkt nicht zusammenfallen. Auf diese Weise lässt sich die planmäßige Torsion in der Spalte M erfassen.

Meist greift die Last auch nicht in Höhe des Schubmittelpunkts an, sondern an der Profiloberseite. Diese Exzentrizität kann in der Spalte N angegeben werden. Bitte beachten Sie, dass beim Lastangriff am Obergurt ein **negativer** Wert für  $e_z$  eingegeben werden muss.

Über die Schaltfläche [...] in der Tabellenzelle bzw. [Pick] im Dialog (siehe Bild 3.37) können die Exzentrizitäten am Querschnitt durch Anklicken des entsprechenden Spannungspunkts grafisch bestimmt werden (siehe folgendes Bild).



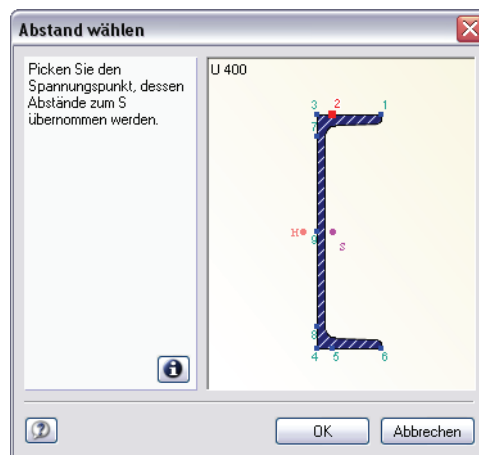


Bild 3.36: Dialog *Abstand wählen*

Bearbeiten...

Über die Schaltfläche [Bearbeiten] unterhalb der Stablasten-Liste lassen sich die Angaben zur aktuellen Stablast ebenfalls anpassen. Es öffnet sich folgender Dialog.

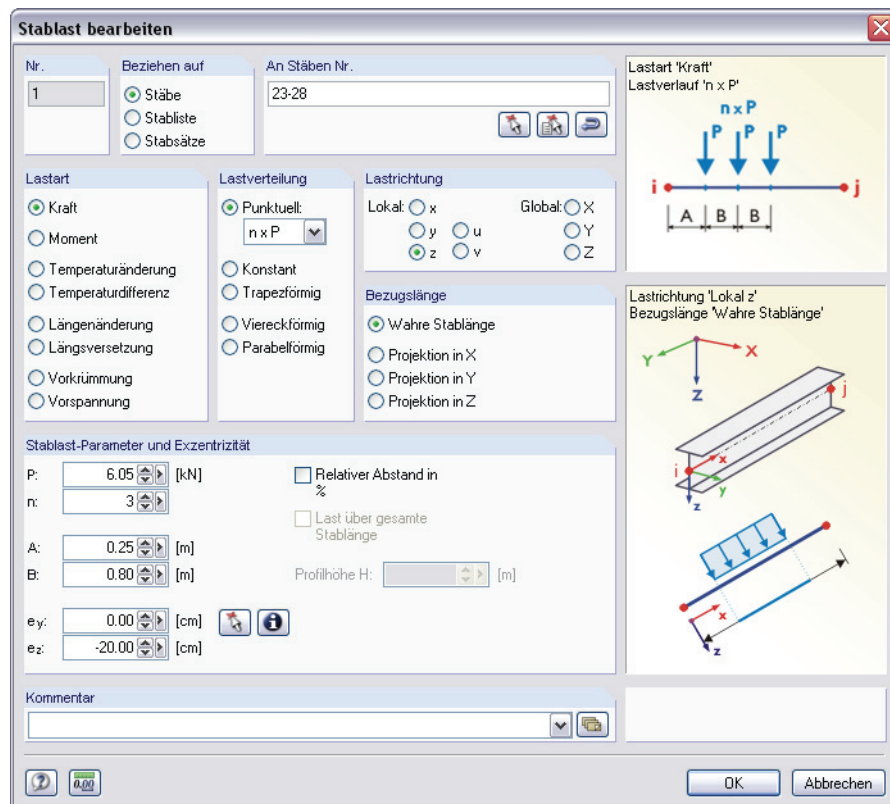


Bild 3.37: Dialog *Stablast bearbeiten*

### Kommentar

In der letzten Spalte dieser Maske sind benutzerdefinierte Anmerkungen möglich, um beispielsweise eine zusätzlich wirkende, exzentrische Stablast zu erläutern.

### 3.8.3 Imperfektionen

Die in den Imperfektionslastfällen von RSTAB definierten geometrischen Ersatzlasten werden nicht übernommen. FE-BGDK benutzt keine Ersatzlasten, sondern führt eine eigene Berechnung der Eigenformen durch. Aus diesem Grund ist es erforderlich, die Imperfektionen in dieser Maske separat zu definieren.

Nach DIN 18800 Teil 2 sind die Imperfektionen entsprechend der Verformungsfigur anzusetzen, die zum niedrigsten Knickwert gehört. FE-BGDK ermittelt diese niedrigste Eigenform. In der Maske 2.3 sind die geeignete Eigenform und das Stichmaß festzulegen.

Nähere Hinweise zu den Imperfektionen finden Sie im Kapitel 2.6.2 auf Seite 37.

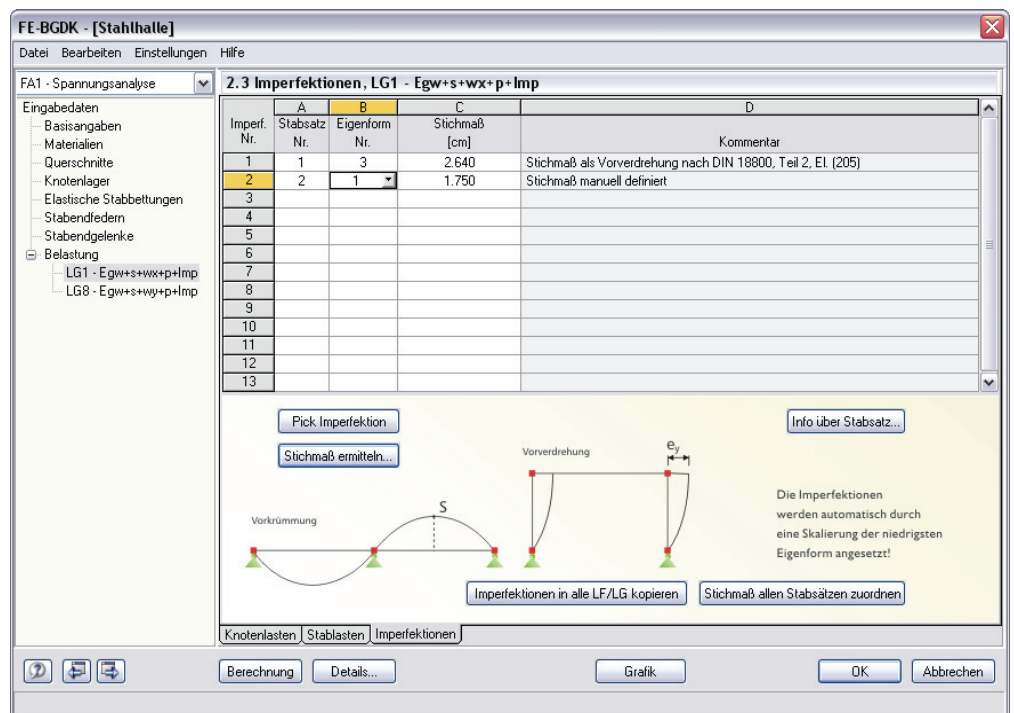


Bild 3.38: Maske 2.3 Imperfektionen

#### Stabsatz Nr.

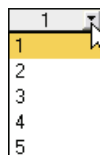
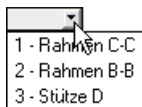
Die Imperfektionen werden stabsatzweise definiert. Um eine neue Imperfektion einzufügen, ist der Cursor in eine freie Zelle dieser Spalte zu setzen und der Stabsatz anzugeben oder aus der Liste auszuwählen.

#### Eigenform Nr.

In dieser Spalte kann die Nummer der maßgebenden Eigenform eingetragen oder aus der Liste gewählt werden. Es ist die erste Eigenform voreingestellt, die meist ausschlaggebend ist.

Da jedoch auch eine höhere Eigenform für das Biegedrillknicken maßgebend sein kann, sind eventuell verschiedene Eigenformen zu untersuchen. Die einzelnen Eigenformen lassen sich über die Schaltfläche [Pick Imperfektion], die sich unterhalb der Spalte B befindet, grafisch im RSTAB-Arbeitsfenster überprüfen (siehe Bild 3.34) und auch von dort übernehmen. Hierzu führt FE-BGDK vor der eigentlichen Berechnung eine Eigenwertanalyse durch.

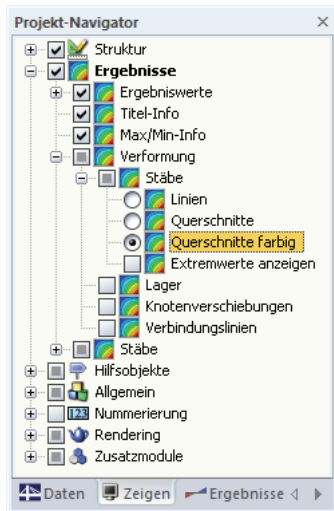
Die Anzahl der in der Liste angebotenen Eigenformen wird im Dialog *Details* geregelt (siehe Kapitel 4.1, Seite 74). Dieser Dialog ist mit der Schaltfläche [Details] zugänglich. Es sind dort zehn Imperfektionsfiguren voreingestellt. Zudem besteht in diesem Dialog die Option, die Eigenformen ohne Berücksichtigung von Dreh- und Schubfeldbettung ermitteln zu lassen.



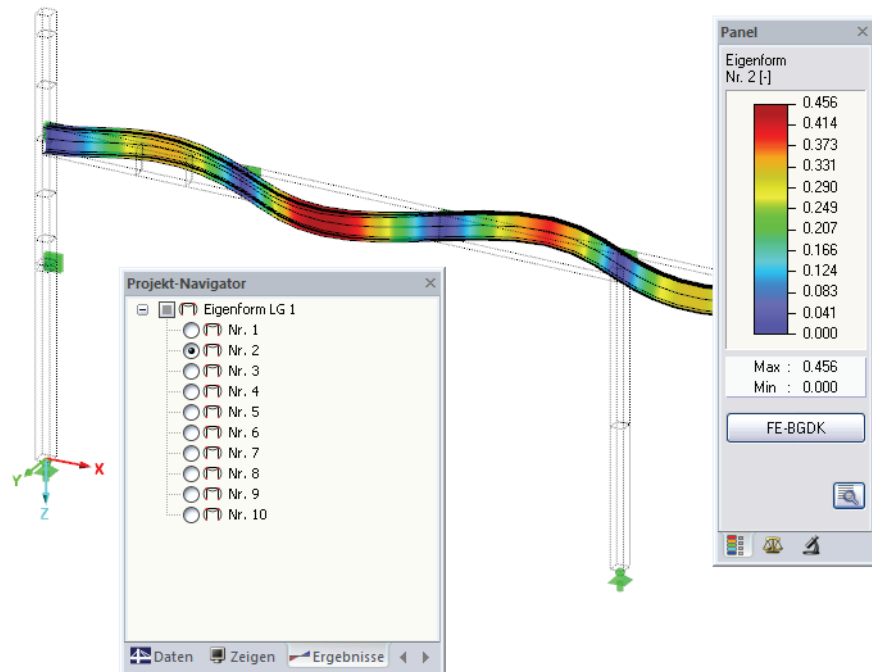
Pick Imperfektion

Details...

Eigenform Nr. 2  
FE-BGDK FA1 - Spannungsanalyse



Zeigen-Navigator:  
Rendering der Eigenform



Max Eigenform Nr. 2: 0.456, Min Eigenform Nr. 2: 0.000 -

Bild 3.39: Grafische Kontrolle der Eigenformen im RSTAB-Arbeitsfenster

## Stichmaß

In der Spalte C kann das Stichmaß direkt eingetragen werden. Komfortabler ist jedoch die Berechnung des Stichmaßes über den Dialog *Stichmaß ermitteln*, der sich über die gleichnamige Schaltfläche unterhalb der Spalte B aufrufen lässt.

Das Stichmaß kann über die Vorverdrehung oder die Vorkrümmung berechnet werden. Das Aussehen dieses Dialogs hängt von der Wahl im Abschnitt *Berechnung des Stichmaßes* ab.

## Vorverdrehung

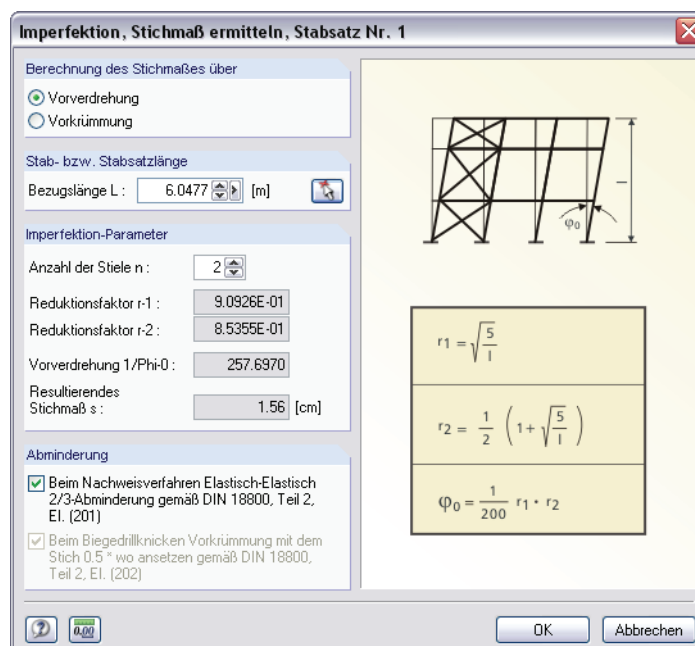


Bild 3.40: Dialog *Stichmaß ermitteln*, Option *Vorverdrehung*

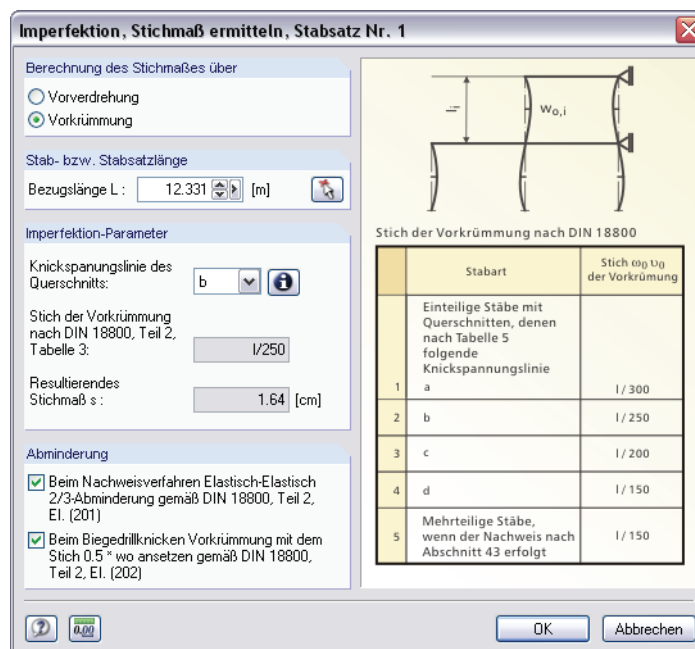


Die Ermittlung der Verformung nach dieser Methode ist bei verschieblichen Systemen sinnvoll. Die *Bezugslänge*  $L$  des maßgebenden Stabes wird direkt eingetragen oder mit [Pick] im RSTAB-Arbeitsfenster durch Anklicken von zwei Knoten grafisch bestimmt. Bei einem Rahmen ist die Bezugslänge in der Regel die Länge des Stiels. Mit der Stablänge werden dann der Reduktionsfaktor  $r_1$  und das Stichmaß  $s$  ermittelt.

Die *Anzahl der Stiele*  $n$  wird zur Berechnung des Reduktionsfaktors  $r_2$  benötigt. Dabei ist zu beachten, dass nur diejenigen Stiele berücksichtigt werden dürfen, die mindestens 25 % der Normalkraft des höchstbelasteten Stiels aufweisen, vgl. DIN 18800 Teil 2, Element (205).

Wird das Nachweisverfahren Elastisch-Elastisch angewandt, dürfen die Imperfektionen nach DIN 18800 Teil 2, Element (201) auf  $2/3$  der Werte abgemindert werden. Diese *Abminderung* lässt sich im untersten Dialogabschnitt aktivieren.

### Vorkrümmung



|   | Stichtyp                                                                                | Stich |
|---|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 1 | Einteilige Stäbe mit Querschnitten, denen nach Tabelle 5 folgende Knickspannungslinie a | 1/300 |
| 2 | b                                                                                       | 1/250 |
| 3 | c                                                                                       | 1/200 |
| 4 | d                                                                                       | 1/150 |
| 5 | Mehrteilige Stäbe, wenn der Nachweis nach Abschnitt 43 erfolgt                          | 1/150 |

Bild 3.41: Dialog *Stichmaß ermitteln*, Option *Vorkrümmung*



Die Ermittlung der Verformung nach dieser Methode ist bei unverschieblichen Systemen sinnvoll. Die *Bezugslänge*  $L$  des maßgebenden Stabes bzw. Stabsatzes ist einzutragen oder mit [Pick] im RSTAB-Arbeitsfenster durch Anklicken von zwei Knoten grafisch zu bestimmen.

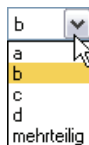
Als *Imperfektions-Parameter* ist in der Liste die Knickspannungslinie des Querschnitts gemäß DIN 18800 Teil 2, Tabelle 5 festzulegen. Bei Bibliotheksprofilen ist die Knickspannungslinie  $KL_z$  bereits voreingestellt, kann aber bei Bedarf abgeändert werden.

Beim Nachweisverfahren Elastisch-Elastisch kann wieder eine *Abminderung* des Stichmaßes auf  $2/3$  des Wertes vorgenommen werden. Zusätzlich ist eine Reduzierung der Vorkrümmung auf  $0,5 \cdot w_0$  gemäß DIN 18800 Teil 2, Element (202) möglich.

Ganz unten in der Maske 2.3 (siehe Bild 3.38, Seite 71) werden die beiden Schaltflächen [Imperfektionen in alle LF/LG kopieren] und [Stichmaß allen Stabsätzen zuordnen] angeboten. Damit können die aktuellen Imperfektionen für alle nachzuweisenden Lastkonstellationen übertragen bzw. das Stichmaß der aktuellen Zeile allen Stabsätzen zugewiesen werden.

### Kommentar

In der letzten Spalte dieser Maske sind benutzerdefinierte Anmerkungen möglich, um die gewählte Eigenform oder die Ermittlung des Stichmaßes zu erläutern.



Imperfektionen in alle LF/LG kopieren

Stichmaß allen Stabsätzen zuordnen

## 4. Berechnung

Berechnung

In jeder Eingabemaske kann die [Berechnung] über die gleichnamige Schaltfläche gestartet werden. Vorher empfiehlt sich jedoch noch eine kurze Kontrolle der Berechnungsparameter.

### 4.1 Berechnungsdetails

Details...

Der Dialog zur Kontrolle diverser Berechnungsparameter kann mit der Schaltfläche [Details] in jeder Maske von FE-BGDK aufgerufen werden.

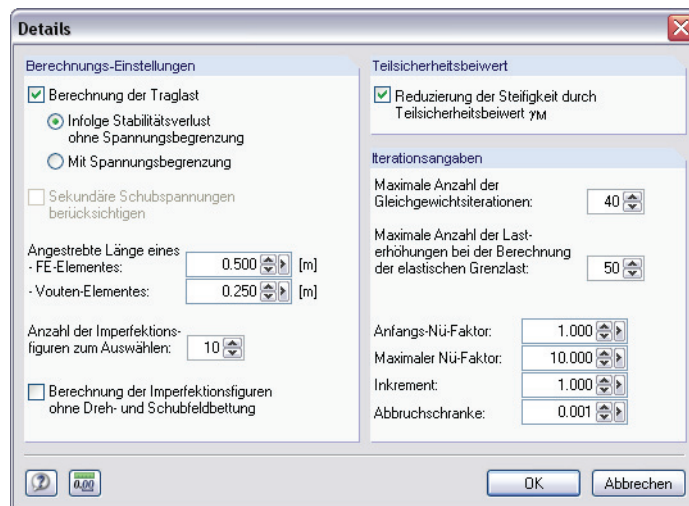


Bild 4.1: Dialog Details

### Berechnungseinstellungen

FE-BGDK führt die *Berechnung der Traglast* durch, wenn die entsprechende Option aktiv ist. Bei diesem Tragwerksnachweis wird untersucht, ob die Bemessungslasten  $F_d$  die Grenzlaster  $F_G$  bzw. Traglasten  $F_T$  des Tragwerks nicht überschreiten (vgl. Kapitel 2.6.4, Seite 39).

Die Traglast wird vom Programm durch eine iterative Laststeigerung ermittelt (vgl. Bild 2.1, Seite 11). Es stehen zwei Möglichkeiten zur Auswahl, die im Kapitel 2.1.4 ab Seite 13 ausführlich erläutert sind:

- Traglast infolge Stabilitätsverlust (Durchschlagslast) am imperfekten System ohne Spannungsbegrenzung
- Traglast infolge Stabilitätsverlust am imperfekten System unter Einhaltung der elastischen Grenzspannung (d. h. alle Schub- Normal- und Vergleichsspannungen sind kleiner gleich der jeweiligen elastischen Grenzspannung)

Optional lassen sich *Sekundäre Schubspannungen* bei der Berechnung berücksichtigen.

Die voreingestellten Längen der *FE-Elemente* können den Stabsatz-Abmessungen angepasst werden. Für Voutenstäbe besteht eine spezifische Verdichtungsmöglichkeit, um die Querschnittsänderungen durch eine entsprechende Diskretisierung zu erfassen.

Die *Anzahl der Imperpektionsfiguren* wirkt sich auf die Eigenwerte aus, die nach der vorweggenommenen Eigenwertanalyse in der Maske 2.3 *Imperfektionen* zur Auswahl stehen (vgl. Bild 3.38, Seite 71).

Werden die *Imperfektionsfiguren ohne Dreh- und Schubfeldbettung* ermittelt, so stehen in der Maske 2.3 die reinen Eigenformen zur Verfügung, die sich ohne Berücksichtigung der diversen Weg- und Drehbettungskoeffizienten infolge von Stabilisierungen ergeben.

## Teilsicherheitsbeiwert

Ist das Kontrollfeld in diesem Abschnitt aktiviert, werden die Steifigkeiten  $E \cdot I$  bzw.  $E \cdot A$  durch den Material-Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M$  dividiert. Dieser Beiwert kann in RSTAB für jedes Material separat festgelegt werden.

## Iterationsangaben

Der kritische Lastfaktor wird iterativ ermittelt. Über die Eingabefelder dieses Abschnitts kann der Berechnungsablauf beeinflusst werden. In der Regel ist es jedoch nicht erforderlich, die voreingestellten Werte zu verändern.

Ausgehend von einem *Anfangs-Lastfaktor*  $\nu$  wird die Belastung gemäß dem vorgegebenen *Inkrement* stetig erhöht, bis das System instabil wird. Der maximale Faktor  $\nu$  ist auf 10 beschränkt, da ab dieser Grenze kein Stabilitätsnachweis nach Theorie II. Ordnung mehr erforderlich ist.

## 4.2 Start der Berechnung

Berechnung

In jeder der Eingabemasken des Modul FE-BGDK kann die [Berechnung] über die gleichnamige Schaltfläche gestartet werden.

FE-BGDK führt eine eigenständige Analyse am herausgelösten System durch. Daher spielt es keine Rolle, ob die Schnittgrößen der nachzuweisenden Lastfälle oder Lastfallgruppen bereits in RSTAB berechnet sind.

Auch aus der RSTAB-Oberfläche kann die Berechnung der FE-BGDK-Ergebnisse gestartet werden. Alle Zusatzmodule werden im Dialog *Zu berechnen* wie ein Lastfall oder eine Lastfallgruppe aufgelistet. Dieser Dialog wird in RSTAB aufgerufen über Menü

**Berechnung → Zu berechnen.**

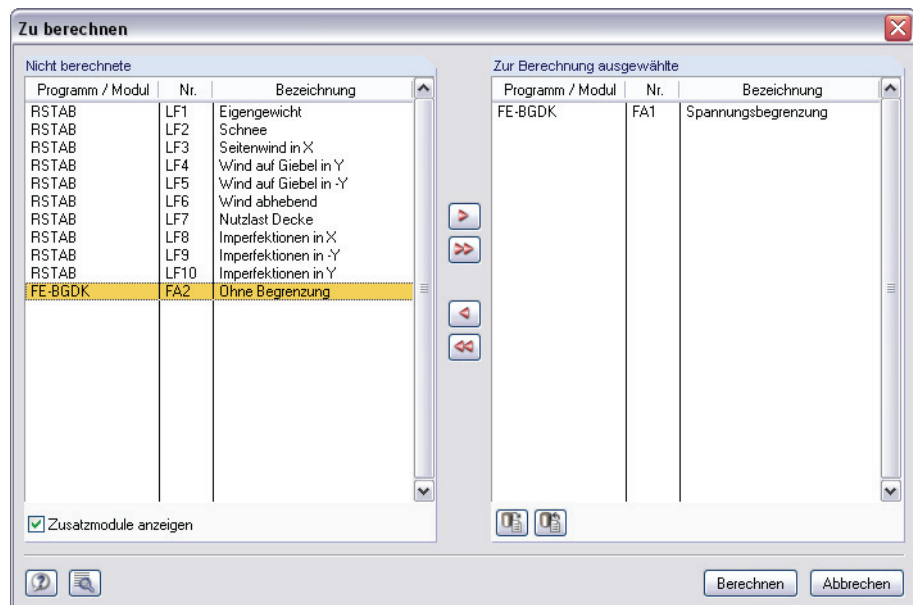


Bild 4.2: Dialog *Zu berechnen*

Falls die FE-BGDK-Bemessungsfälle in der Liste *Nicht berechnete* fehlen, muss das Kontrollfeld *Zusatzmodule anzeigen* am Ende der Liste aktiviert werden.

Mit der Schaltfläche [►] werden die selektierten FE-BGDK-Fälle in die rechte Liste übergeben. Die Berechnung wird dann mit der entsprechenden Schaltfläche gestartet.

Berechnen



Auch über die Liste der Symbolleiste kann ein bestimmter FE-BGDK-Fall direkt berechnet werden. Stellen Sie den gewünschten Bemessungsfall ein und klicken dann auf die Schaltfläche [Ergebnisse ein/aus].

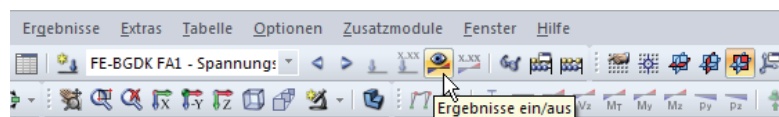


Bild 4.3: Direkte Berechnung eines FE-BGDK-Bemessungsfalls in RSTAB

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

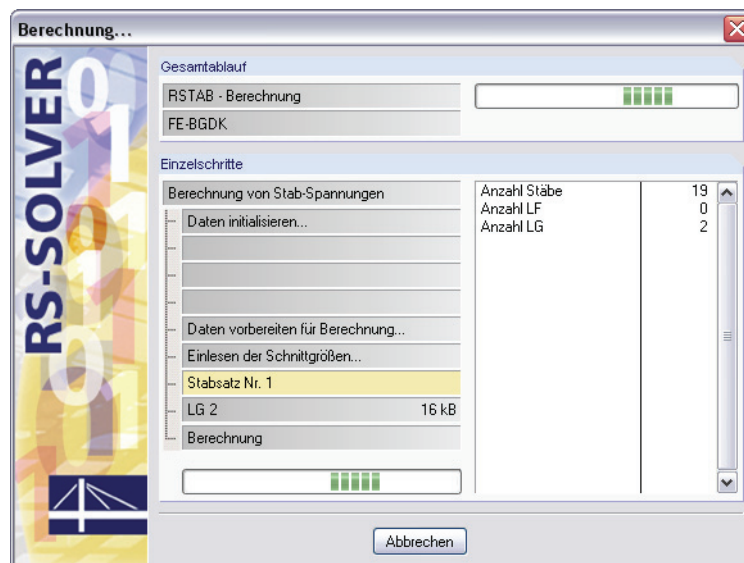


Bild 4.4: FE-BGDK-Berechnung

## 5. Ergebnisse

Nach der erfolgreichen Berechnung erscheint die Maske 3.1 *Spannungen querschnittsweise*. Bei instabilen Systemen hingegen wird der Dialog *Liste der Berechnungsfehler und Hinweise* angezeigt. Die Anmerkung *Keine Konvergenz in x Nachiterationen* ist als Hinweis auf ein Stabilitätsproblem zu interpretieren.



Die einzelnen Nachweise werden in den Ergebnismasken 3.1 bis 3.8 aufgelistet. Jede dieser Masken kann über den FE-BGDK-Navigator angesteuert werden. Alternativ benutzt man die beiden links dargestellten Schaltflächen oder die Funktionstasten [F2] und [F3], um eine Maske vor- oder zurückzublättern.

Mit [OK] werden die Ergebnisse gesichert und das Modul FE-BGDK wird verlassen.

In diesem Handbuchkapitel werden die Ergebnismasken der Reihe nach vorgestellt. Die Auswertung und Kontrolle der Resultate ist im folgenden Kapitel 6 *Ergebnisauswertung* ab Seite 87 beschrieben.



Nach der Berechnung sollte zunächst in Maske 3.8 *Kritische Lastfaktoren* überprüft werden, ob alle kritischen Lastfallfaktoren größer oder gleich 1 sind, denn nur dann ist die Stabilität des Systems gewährleistet.

### 5.1 Spannungen querschnittsweise

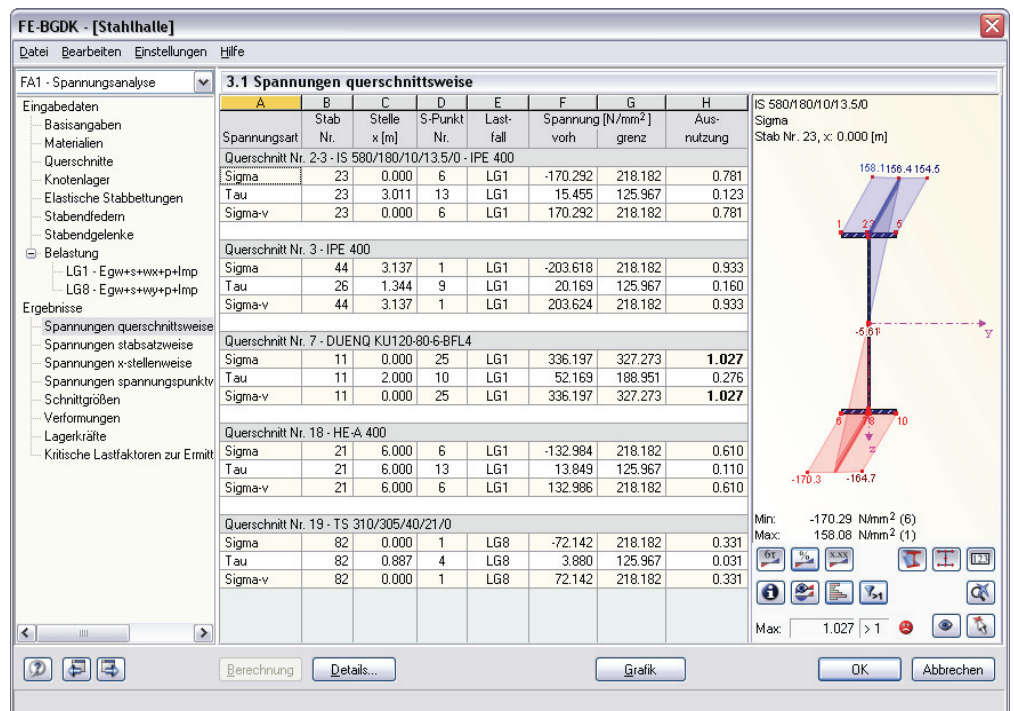


Bild 5.1: Maske 3.1 *Spannungen querschnittsweise*

In dieser Maske werden für alle nachgewiesenen Querschnitte die maximalen Spannungsausnutzungen ausgewiesen, die sich mit den Schnittgrößen der maßgebenden Lastfälle und Lastfallgruppen ergeben.

Die Auflistung erfolgt nach Querschnitten geordnet. Liegt ein Voutenträger vor, werden beide Querschnittsbezeichnungen in der Zeile neben der Querschnittsnummer angegeben.

## Spannungsart

FE-BGDK untersucht folgende Spannungsarten:

- Normalspannungen  $\sigma$
- Schubspannungen  $\tau$
- Vergleichsspannungen  $\sigma_v$

Die **Normalspannung** ermittelt sich aus den Anteilen der Normalkraft  $N$  und der Biegemomente  $M_y$  und  $M_z$  sowie des Wölbbimoment  $M_\omega$  (siehe Gleichung 2.4, Seite 21).

Die **Schubspannung** wird mit den Querkraften  $V_y$  und  $V_z$  und dem Torsionsmoment  $M_T$  bestimmt (siehe Gleichung 2.5, Seite 21).

Die **Vergleichsspannung** ermittelt sich aus den Anteilen der Normalspannung  $\sigma$  und der Schubspannung  $\tau$  (siehe Gleichung 2.7, Seite 22).

## Stab Nr.

Es wird für jeden Querschnitt und jede Spannungsart die Nummer des Stabes angegeben, der die größte Spannungsausnutzung aufweist.

## Stelle x

Es wird jeweils die x-Stelle im Stab angegeben, für die der Maximalwert der Spannung ermittelt wurde. Zur tabellarischen Ausgabe werden diese RSTAB-Stabstellen  $x$  herangezogen:

- Anfangs- und Endknoten
- FE-Teilungspunkte

Die FE-Teilung, die im Dialog *Details* für die Berechnung vorgegeben wurde (vgl. Kapitel 4.1, Seite 74), spiegelt sich auch in der Ausgabe dieser Maske wider. Zur Berechnung werden die Stäbe gemäß Vorgabe in finite Elemente unterteilt. In dieser Maske werden die Spannungen angezeigt, die an diesen Unterteilungen auftreten.

## S-Punkt Nr.

Die Bemessung erfolgt an so genannten Spannungspunkten des Profils. Hier handelt es sich um Stellen im Querschnitt, die durch die Schwerpunktabstände, statischen Momente und Profildicken definiert sind. Anhand dieser Querschnittseigenschaften wird die Bemessung nach Gleichung 2.4 und Gleichung 2.5 möglich.

Sämtliche Standardprofile der Bibliothek sowie die DUENQ- und DICKQ-Querschnitte sind bereits mit Spannungspunkten an den bemessungsrelevanten Querschnittsstellen versehen. Für eigendefinierte Profile müssen die Parameter manuell definiert bzw. importiert werden.

In der Spannungsgrafik rechts in dieser Maske werden die Spannungspunkte des Profils mit- samt Nummerierung dargestellt. Die Anzeige der [Spannungspunkte] und [Nummerierung] lässt sich mit den beiden Schaltflächen unterhalb der Grafik steuern.

Über die Schaltfläche [Querschnitt-Info] können die dem Spannungspunkt zugeordneten Kennwerte kontrolliert werden. Es öffnet sich zunächst der Dialog *Info über Querschnitt* mit der Auflistung sämtlicher Profilwerte. In diesem Dialog steht unterhalb der Grafik die Schaltfläche [Details der Spannungspunkte] zur Verfügung, die den Zugang zu den Spannungspunkteinformationen ermöglicht.



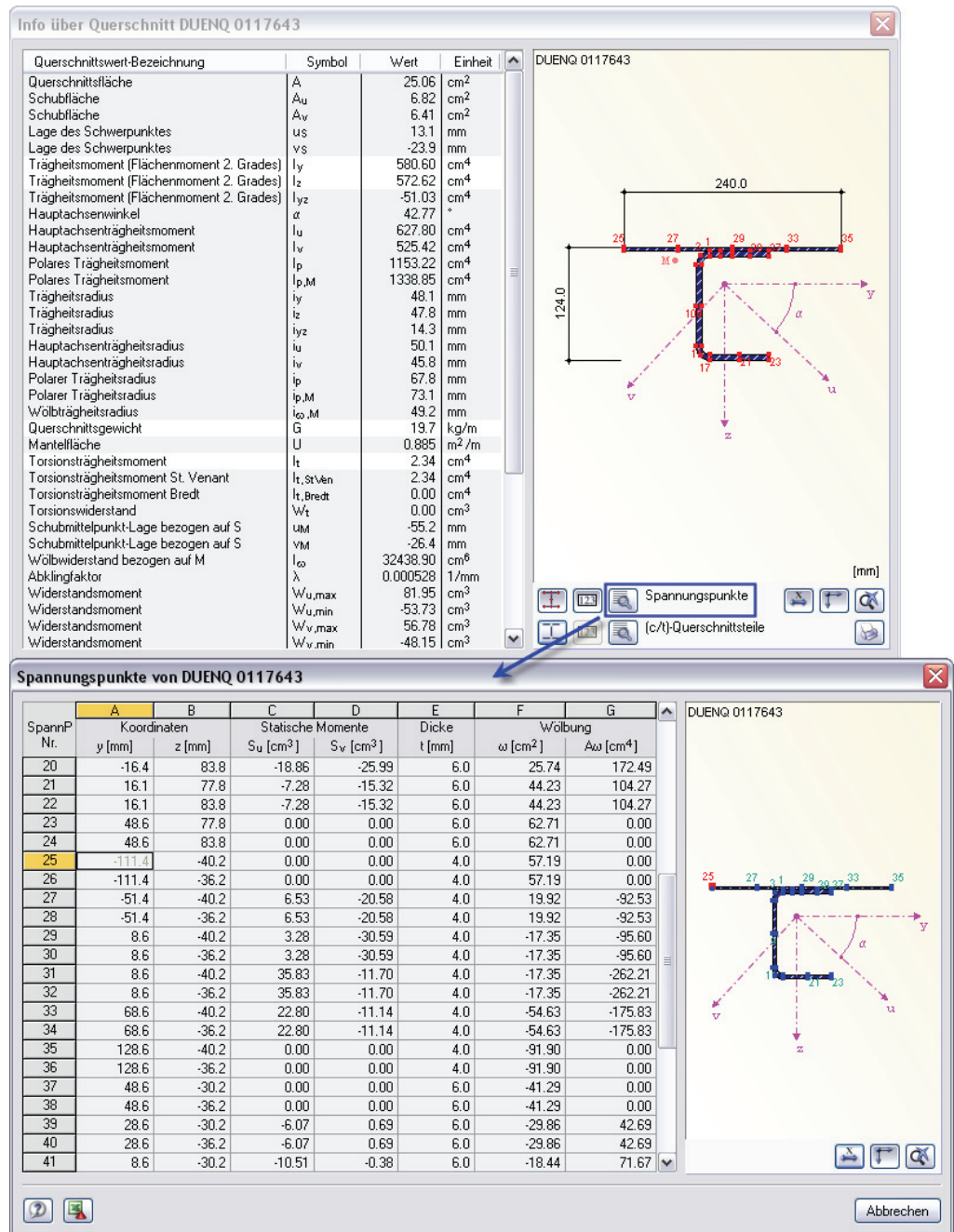


Bild 5.2: Info über Querschnitt: Spannungspunkte

In den Spalten *Koordinaten*  $y$  und  $z$  sind die Schwerpunktabstände  $e_y$  bzw.  $e_z$  aufgelistet, in den Spalten *Statische Momente*  $S_y$  und  $S_z$  die auf die Hauptachse  $y$  bzw.  $z$  bezogenen Flächenmomente 1. Grades. Die *Dicke*  $t$  stellt die Bauteildicke am jeweiligen Spannungspunkt dar. Die Spalten *Wölbung* geben Auskunft über die Wölbkoordinaten  $\omega$  und die Wölbflächenmomente 1. Grades  $A_\omega$ .



Die Spannungsanalyse erfolgt für jeden einzelnen Spannungspunkt, sodass für die kombinierte Betrachtung (z. B.  $\sigma_v$ ) in der Regel nicht die Anteile der Maximalspannungen addiert werden dürfen: Diese treten meist an unterschiedlichen Spannungspunkten auf. Es sind die Spannungsponenten zu überlagern, die an den gleichen Spannungspunkten vorliegen. Die Auswertung der Detailergebnisse kann in Maske 3.4 *Spannungen spannungspunktweise* (siehe Kapitel 5.4, Seite 81) erfolgen.

## Lastfall

In Spalte D wird jeweils der Lastfall bzw. die Lastfallgruppe ausgewiesen, deren Lasten die Maximalspannung verursacht.

## Spannung vorh

In dieser Spalte werden die Extremwerte der vorhandenen Spannungen ausgewiesen, die gemäß Gleichung 2.4, Gleichung 2.5 und Gleichung 2.7 (siehe Seite 21 und 22) ermittelt wurden.

## Spannung grenz

Hier finden sich die Grenzspannungen der Maske 1.2 wieder (siehe Kapitel 3.2, Seite 42), die mit dem Teilsicherheitsbeiwert des Materials  $\gamma_M$  (siehe Dialog *Details*, Seite 74) gültig sind.

Im Einzelnen handelt es sich um folgende Beanspruchbarkeiten:

- Grenznormalspannung  $\sigma$  als die zulässige Spannung für die Beanspruchung infolge Normalkraft, Biegung und Wölbung
- Grenzschubspannung  $\tau$  als die zulässige Schubspannung infolge Querkraft und Torsion
- Grenzvergleichsspannung  $\sigma_v$  als die zulässige Vergleichsspannung für die gleichzeitige Wirkung mehrerer Spannungen

## Ausnutzung

Für jede Spannungskomponente wird der Quotient aus vorhandener Spannung und Grenzspannung ermittelt. Wird die Grenzspannung nicht überschritten, so ist die Ausnutzung kleiner oder gleich 1. Der Spannungsnachweis gilt als erfüllt.

Max: 0.92 ≤ 1 

## 5.2 Spannungen stabsatzweise

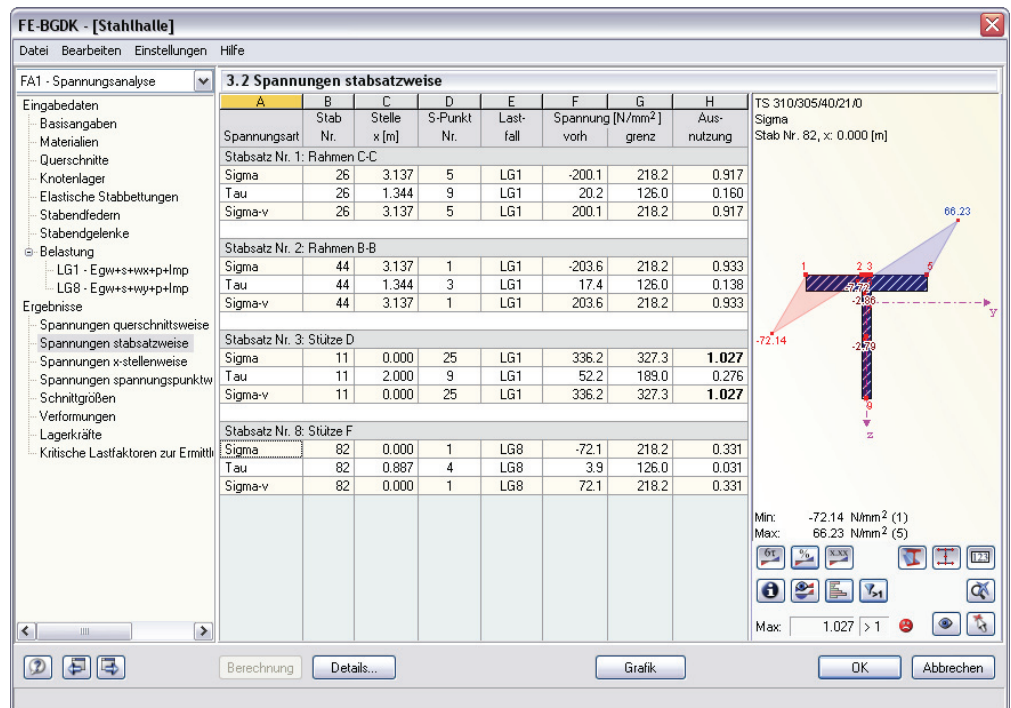


Bild 5.3: Maske 3.2 Spannungen stabsatzweise

In dieser Maske werden die Maximalspannungen nach Stabsätzen geordnet aufgelistet. Die einzelnen Spalten sind im vorherigen Kapitel 5.1 erläutert.

## 5.3 Spannungen x-stellenweise

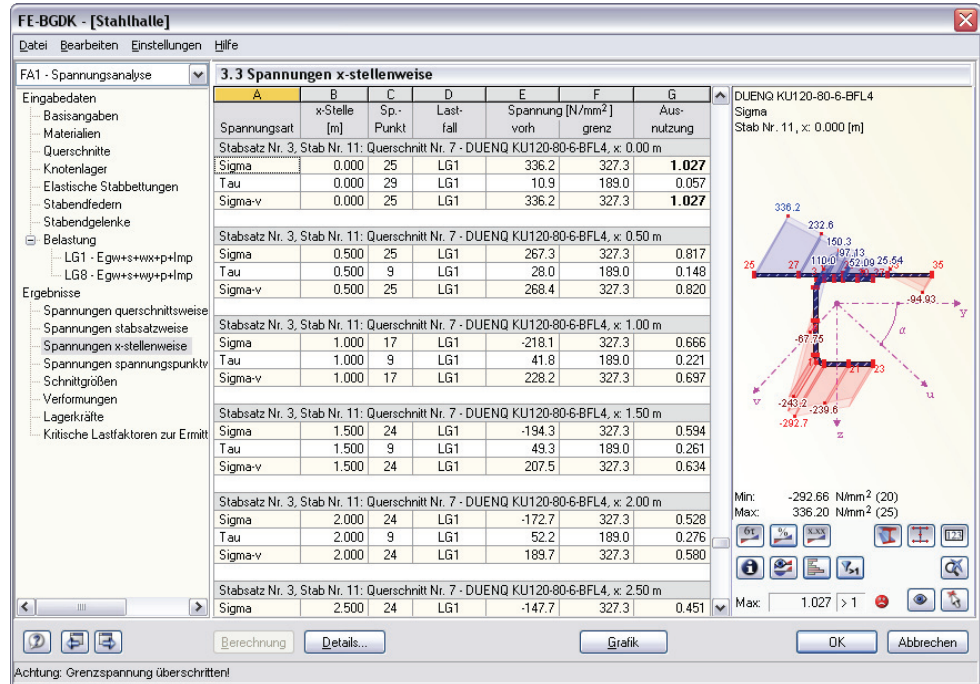


Bild 5.4: Maske 3.3 Spannungen x-stellenweise

Diese Maske listet die Spannungen auf, die an den FE-Teilungen gemäß Vorgabe im Dialog *Details* (siehe Seite 74) auftreten. Die einzelnen Spalten sind im Kapitel 5.1 erläutert.

## 5.4 Spannungen spannungspunktwise

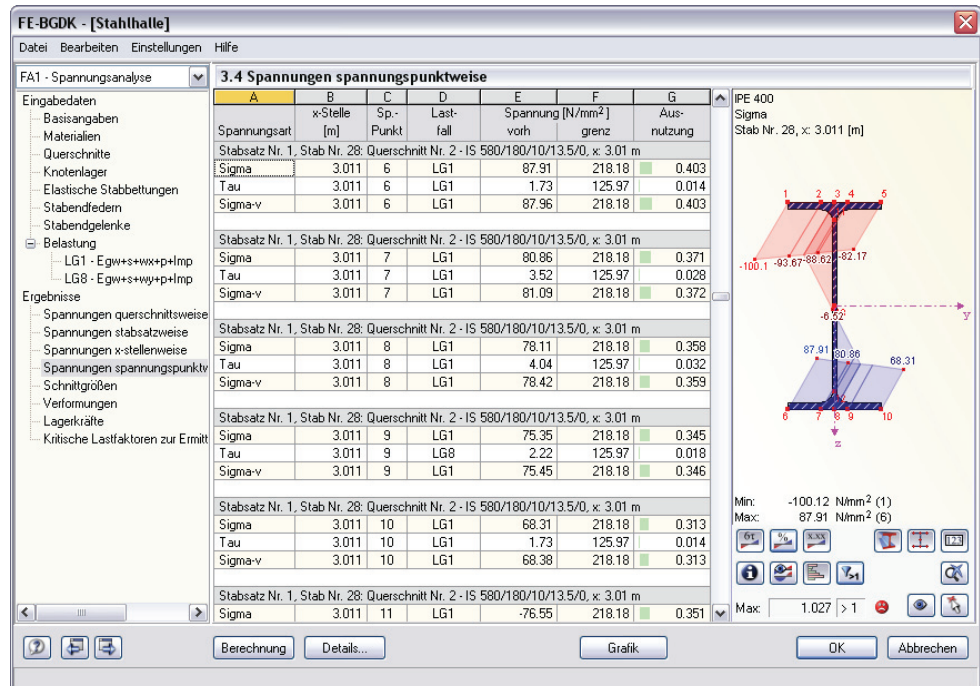
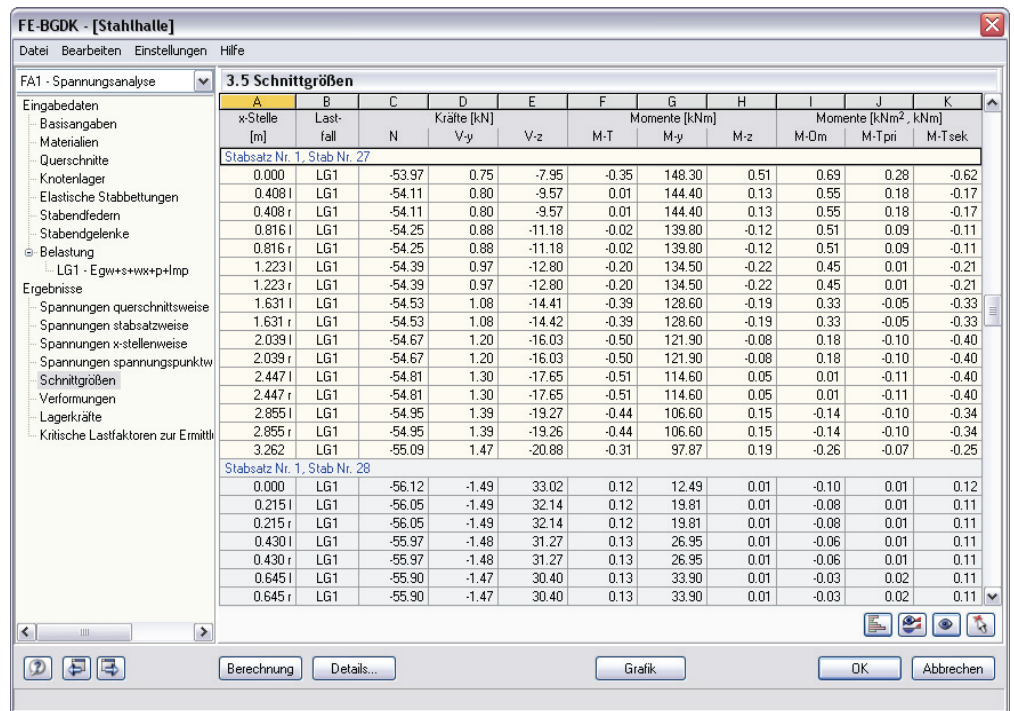


Bild 5.5: Maske 3.4 Spannungen spannungspunktwise

Es werden die Spannungen im Detail ausgewiesen, die an allen Spannungspunkten des Querschnitts (siehe Kapitel 5.1, Seite 79) ermittelt wurden.

## 5.5 Schnittgrößen



| 3.5 Schnittgrößen                  |          |             |       |        |               |        |       |                                  |        |        |
|------------------------------------|----------|-------------|-------|--------|---------------|--------|-------|----------------------------------|--------|--------|
| A                                  | B        | C           | D     | E      | F             | G      | H     | I                                | J      | K      |
| x-Stelle [m]                       | Lastfall | Kräfte [kN] |       |        | Momente [kNm] |        |       | Momente [kNm <sup>2</sup> , kNm] |        |        |
|                                    |          | N           | V-y   | V-z    | M-T           | M-y    | M-z   | M-0m                             | M-Tpri | M-Tsek |
| <b>Stabsatz Nr. 1, Stab Nr. 27</b> |          |             |       |        |               |        |       |                                  |        |        |
| 0.000                              | LG1      | -53.97      | 0.75  | -7.95  | -0.35         | 148.30 | 0.51  | 0.69                             | 0.28   | -0.62  |
| 0.408 l                            | LG1      | -54.11      | 0.80  | -9.57  | 0.01          | 144.40 | 0.13  | 0.55                             | 0.18   | -0.17  |
| 0.408 r                            | LG1      | -54.11      | 0.80  | -9.57  | 0.01          | 144.40 | 0.13  | 0.55                             | 0.18   | -0.17  |
| 0.816 l                            | LG1      | -54.25      | 0.88  | -11.18 | -0.02         | 139.80 | -0.12 | 0.51                             | 0.09   | -0.11  |
| 0.816 r                            | LG1      | -54.25      | 0.88  | -11.18 | -0.02         | 139.80 | -0.12 | 0.51                             | 0.09   | -0.11  |
| 1.223 l                            | LG1      | -54.39      | 0.97  | -12.80 | -0.20         | 134.50 | -0.22 | 0.45                             | 0.01   | -0.21  |
| 1.223 r                            | LG1      | -54.39      | 0.97  | -12.80 | -0.20         | 134.50 | -0.22 | 0.45                             | 0.01   | -0.21  |
| 1.631 l                            | LG1      | -54.53      | 1.08  | -14.41 | -0.39         | 128.60 | -0.19 | 0.33                             | -0.05  | -0.33  |
| 1.631 r                            | LG1      | -54.53      | 1.08  | -14.41 | -0.39         | 128.60 | -0.19 | 0.33                             | -0.05  | -0.33  |
| 2.039 l                            | LG1      | -54.67      | 1.20  | -16.03 | -0.50         | 121.90 | -0.08 | 0.18                             | -0.10  | -0.40  |
| 2.039 r                            | LG1      | -54.67      | 1.20  | -16.03 | -0.50         | 121.90 | -0.08 | 0.18                             | -0.10  | -0.40  |
| 2.447 l                            | LG1      | -54.81      | 1.30  | -17.65 | -0.51         | 114.60 | 0.05  | 0.01                             | -0.11  | -0.40  |
| 2.447 r                            | LG1      | -54.81      | 1.30  | -17.65 | -0.51         | 114.60 | 0.05  | 0.01                             | -0.11  | -0.40  |
| 2.855 l                            | LG1      | -54.95      | 1.39  | -19.27 | -0.44         | 106.60 | 0.15  | -0.14                            | -0.10  | -0.34  |
| 2.855 r                            | LG1      | -54.95      | 1.39  | -19.27 | -0.44         | 106.60 | 0.15  | -0.14                            | -0.10  | -0.34  |
| 3.262                              | LG1      | -55.09      | 1.47  | -20.88 | -0.31         | 97.87  | 0.19  | -0.26                            | -0.07  | -0.25  |
| <b>Stabsatz Nr. 1, Stab Nr. 28</b> |          |             |       |        |               |        |       |                                  |        |        |
| 0.000                              | LG1      | -56.12      | -1.49 | 33.02  | 0.12          | 12.49  | 0.01  | -0.10                            | 0.01   | 0.12   |
| 0.215 l                            | LG1      | -56.05      | -1.49 | 32.14  | 0.12          | 19.81  | 0.01  | -0.08                            | 0.01   | 0.11   |
| 0.215 r                            | LG1      | -56.05      | -1.49 | 32.14  | 0.12          | 19.81  | 0.01  | -0.08                            | 0.01   | 0.11   |
| 0.430 l                            | LG1      | -55.97      | -1.48 | 31.27  | 0.13          | 26.95  | 0.01  | -0.06                            | 0.01   | 0.11   |
| 0.430 r                            | LG1      | -55.97      | -1.48 | 31.27  | 0.13          | 26.95  | 0.01  | -0.06                            | 0.01   | 0.11   |
| 0.645 l                            | LG1      | -55.90      | -1.47 | 30.40  | 0.13          | 33.90  | 0.01  | -0.03                            | 0.02   | 0.11   |
| 0.645 r                            | LG1      | -55.90      | -1.47 | 30.40  | 0.13          | 33.90  | 0.01  | -0.03                            | 0.02   | 0.11   |

Bild 5.6: Maske 3.5 Schnittgrößen

In dieser Maske werden für jeden Stab sowie für jeden Lastfall und jede Lastfallgruppe die an den FE-Teilungsstellen ermittelten Schnittgrößen angezeigt.

### x-Stelle

Es wird für jeden Stab der bemessenen Stabsätze die x-Stelle im Stab angegeben, die die nachfolgenden Schnittgrößen aufweisen. Bei Unstetigkeiten im Schnittkraftverlauf sind die Schnitthufer mit dem Zusatz / (links) bzw. r (rechts) gekennzeichnet.

### Lastfall

In dieser Spalte erscheinen die Nummern der Lastfälle bzw. Lastfallgruppen, die zur Bemessung ausgewählt wurden.

### Kräfte / Momente

Die Schnittgrößen bedeuten im Einzelnen:

|                   |                                                        |
|-------------------|--------------------------------------------------------|
| N                 | Normalkraft                                            |
| V <sub>y</sub>    | Querkraft in Richtung der lokalen Stabachse y (bzw. u) |
| V <sub>z</sub>    | Querkraft in Richtung der lokalen Stabachse z (bzw. v) |
| M <sub>T</sub>    | Torsionsmoment                                         |
| M <sub>y</sub>    | Biegemoment um die lokale Stabachse y (bzw. u)         |
| M <sub>z</sub>    | Biegemoment um die die lokale Stabachse z (bzw. v)     |
| M <sub>ω</sub>    | Wölbbimoment                                           |
| M <sub>Tpri</sub> | Primäres Torsionsmoment (Saint Venantsche Torsion)     |
| M <sub>Tsek</sub> | Sekundäres Torsionsmoment (Wölbkrafttorsion)           |

Tabelle 5.1: Schnittgrößen



Es empfiehlt sich, die hier ausgewiesenen Schnittgrößen mit den Schnittkraftverläufen zu vergleichen, die in RSTAB für die bemessenen Lastfallgruppen ermittelt werden. Dadurch kann kontrolliert werden, ob die Randbedingungen der aus dem System herausgelösten Stabsätze korrekt erfasst sind (Knotenlager, Lasten, Imperfektionen etc.).

## 5.6 Verformungen

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [Stahlhalle]

FE-BGDK - [

Bild 5.7: Maske 3.6 Verformungen

In dieser Maske werden für jeden Stab sowie für jeden Lastfall und jede Lastfallgruppe die an den FE-Teilungsstellen ermittelten Verformungswerte angezeigt.

### x-Stelle

Es wird für jeden Stab der bemessenen Stabsätze die x-Stelle im Stab angegeben, die die nachfolgenden Verschiebungen und Verdrehungen aufweisen.

### Lastfall

In dieser Spalte erscheinen die Nummern der bemessenen Lastfälle bzw. Lastfallgruppen.

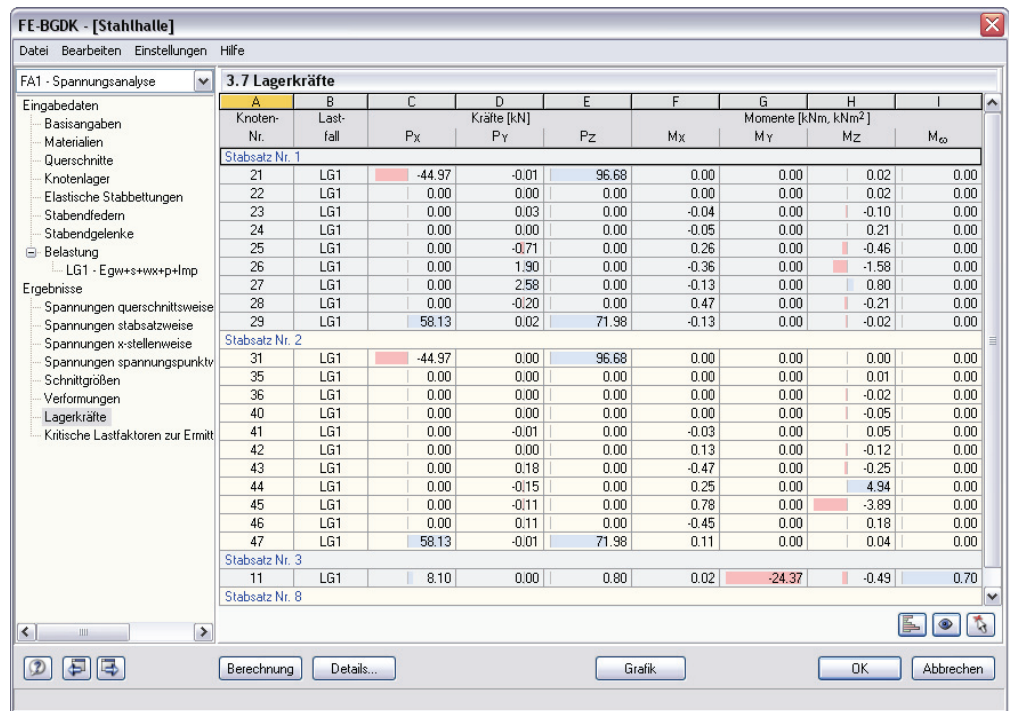
### Verschiebungen / Verdrehungen / Wölbung

Die Verformungen bedeuten im Einzelnen:

|          |                                               |
|----------|-----------------------------------------------|
| $u_x$    | Verschiebung in Richtung der globalen X-Achse |
| $u_y$    | Verschiebung in Richtung der globalen Y-Achse |
| $u_z$    | Verschiebung in Richtung der globalen Z-Achse |
| $\phi_x$ | Verdrehung um die globale X-Achse             |
| $\phi_y$ | Verdrehung um die globale Y-Achse             |
| $\phi_z$ | Verdrehung um die globale Z-Achse             |
| $\omega$ | Verwölbung                                    |

Tabelle 5.2: Verformungen

## 5.7 Lagerkräfte



| 3.7 Lagerkräfte       |          | Kräfte [kN] |       |       |       |        |       |      | Momente [kNm, kNm²] |  |  |  |
|-----------------------|----------|-------------|-------|-------|-------|--------|-------|------|---------------------|--|--|--|
| A                     | B        | C           | D     | E     | F     | G      | H     | I    |                     |  |  |  |
| Knoten-Nr.            | Lastfall | Px          | Py    | Pz    | Mx    | My     | Mz    | Mo   |                     |  |  |  |
| <b>Stabsatz Nr. 1</b> |          |             |       |       |       |        |       |      |                     |  |  |  |
| 21                    | LG1      | -44.97      | -0.01 | 96.68 | 0.00  | 0.00   | 0.02  | 0.00 |                     |  |  |  |
| 22                    | LG1      | 0.00        | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00   | 0.02  | 0.00 |                     |  |  |  |
| 23                    | LG1      | 0.00        | 0.03  | 0.00  | -0.04 | 0.00   | -0.10 | 0.00 |                     |  |  |  |
| 24                    | LG1      | 0.00        | 0.00  | 0.00  | -0.05 | 0.00   | 0.21  | 0.00 |                     |  |  |  |
| 25                    | LG1      | 0.00        | -0.71 | 0.00  | 0.26  | 0.00   | -0.46 | 0.00 |                     |  |  |  |
| 26                    | LG1      | 0.00        | 1.90  | 0.00  | -0.36 | 0.00   | -1.58 | 0.00 |                     |  |  |  |
| 27                    | LG1      | 0.00        | 2.58  | 0.00  | -0.13 | 0.00   | 0.80  | 0.00 |                     |  |  |  |
| 28                    | LG1      | 0.00        | -0.20 | 0.00  | 0.47  | 0.00   | -0.21 | 0.00 |                     |  |  |  |
| 29                    | LG1      | 58.13       | 0.02  | 71.98 | -0.13 | 0.00   | -0.02 | 0.00 |                     |  |  |  |
| <b>Stabsatz Nr. 2</b> |          |             |       |       |       |        |       |      |                     |  |  |  |
| 31                    | LG1      | -44.97      | 0.00  | 96.68 | 0.00  | 0.00   | 0.00  | 0.00 |                     |  |  |  |
| 35                    | LG1      | 0.00        | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00   | 0.01  | 0.00 |                     |  |  |  |
| 36                    | LG1      | 0.00        | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00   | -0.02 | 0.00 |                     |  |  |  |
| 40                    | LG1      | 0.00        | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00   | -0.05 | 0.00 |                     |  |  |  |
| 41                    | LG1      | 0.00        | -0.01 | 0.00  | -0.03 | 0.00   | 0.05  | 0.00 |                     |  |  |  |
| 42                    | LG1      | 0.00        | 0.00  | 0.00  | 0.13  | 0.00   | -0.12 | 0.00 |                     |  |  |  |
| 43                    | LG1      | 0.00        | 0.18  | 0.00  | -0.47 | 0.00   | -0.25 | 0.00 |                     |  |  |  |
| 44                    | LG1      | 0.00        | -0.15 | 0.00  | 0.25  | 0.00   | 4.94  | 0.00 |                     |  |  |  |
| 45                    | LG1      | 0.00        | -0.11 | 0.00  | 0.78  | 0.00   | -3.89 | 0.00 |                     |  |  |  |
| 46                    | LG1      | 0.00        | 0.11  | 0.00  | -0.45 | 0.00   | 0.18  | 0.00 |                     |  |  |  |
| 47                    | LG1      | 58.13       | -0.01 | 71.98 | 0.11  | 0.00   | 0.04  | 0.00 |                     |  |  |  |
| <b>Stabsatz Nr. 3</b> |          |             |       |       |       |        |       |      |                     |  |  |  |
| 11                    | LG1      | 8.10        | 0.00  | 0.80  | 0.02  | -24.37 | -0.49 | 0.70 |                     |  |  |  |
| <b>Stabsatz Nr. 8</b> |          |             |       |       |       |        |       |      |                     |  |  |  |

Bild 5.8: Maske 3.7 Lagerkräfte

In dieser Ergebnismaske werden die Lagerkräfte eines jeden Knotenlagers angezeigt. Dabei handelt es sich um die Kräfte und Momente, die in die Lager eingeleitet werden. Die Werte stellen also vorzeichenmäßig nicht die Reaktionskräfte vonseiten der Lager dar.

### Knoten Nr.

Es werden die Nummern aller Knoten aufgelistet, für die in Maske 1.4 (siehe Kapitel 3.4, Seite 46) Lagerungsbedingungen definiert wurden.

### Lastfall

In dieser Spalte erscheinen die Nummern der bemessenen Lastfälle bzw. Lastfallgruppen.

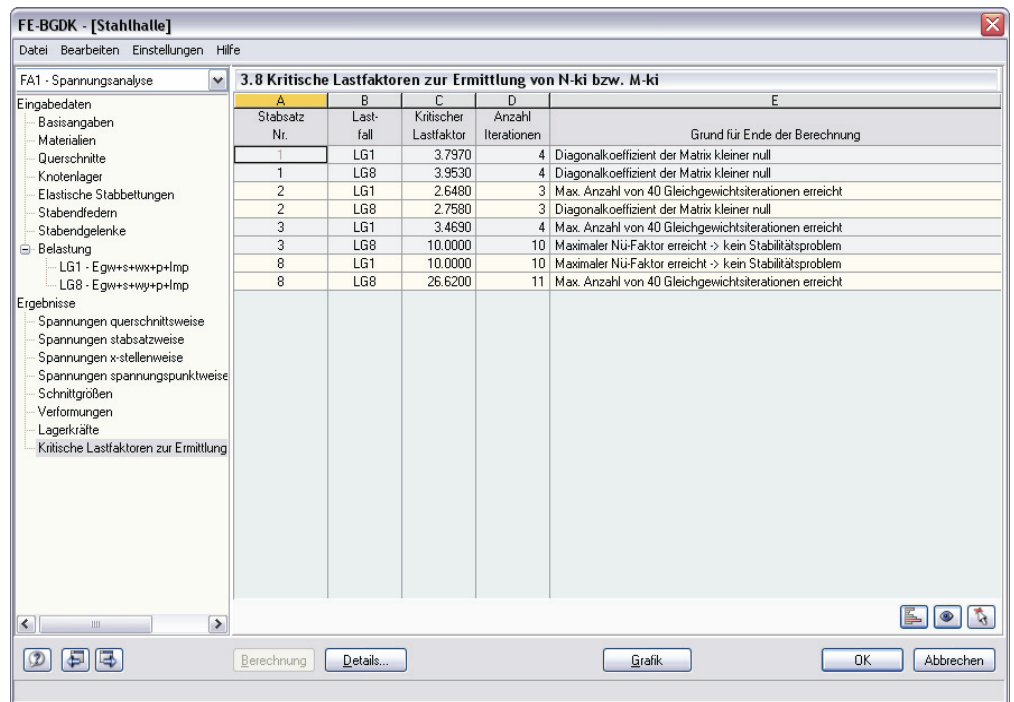
### Kräfte / Momente

Die Lagerkräfte bedeuten im Einzelnen:

|            |                                             |
|------------|---------------------------------------------|
| $P_x$      | Lagerkraft in Richtung der globalen X-Achse |
| $P_y$      | Lagerkraft in Richtung der globalen Y-Achse |
| $P_z$      | Lagerkraft in Richtung der globalen Z-Achse |
| $M_x$      | Lagermoment um die globale X-Achse          |
| $M_y$      | Lagermoment um die globale Y-Achse          |
| $M_z$      | Lagermoment um die globale Z-Achse          |
| $M_\omega$ | Wölbbimoment am Lager                       |

Tabelle 5.3: Lagerkräfte und -momente

## 5.8 Kritische Lastfaktoren



| 3.8 Kritische Lastfaktoren zur Ermittlung von N <sub>ki</sub> bzw. M <sub>ki</sub> |          |                       |                    |                                                         |
|------------------------------------------------------------------------------------|----------|-----------------------|--------------------|---------------------------------------------------------|
| A                                                                                  | B        | C                     | D                  | E                                                       |
| Stabsatz Nr.                                                                       | Lastfall | Kritischer Lastfaktor | Anzahl Iterationen | Grund für Ende der Berechnung                           |
| 1                                                                                  | LG1      | 3.7970                | 4                  | Diagonalkoeffizient der Matrix kleiner null             |
| 1                                                                                  | LG8      | 3.9530                | 4                  | Diagonalkoeffizient der Matrix kleiner null             |
| 2                                                                                  | LG1      | 2.6480                | 3                  | Max. Anzahl von 40 Gleichgewichtssimulationen erreicht  |
| 2                                                                                  | LG8      | 2.7580                | 3                  | Diagonalkoeffizient der Matrix kleiner null             |
| 3                                                                                  | LG1      | 3.4690                | 4                  | Max. Anzahl von 40 Gleichgewichtssimulationen erreicht  |
| 3                                                                                  | LG8      | 10.0000               | 10                 | Maximaler Nü-Faktor erreicht -> kein Stabilitätsproblem |
| 8                                                                                  | LG1      | 10.0000               | 10                 | Maximaler Nü-Faktor erreicht -> kein Stabilitätsproblem |
| 8                                                                                  | LG8      | 26.6200               | 11                 | Max. Anzahl von 40 Gleichgewichtssimulationen erreicht  |

Bild 5.9: Maske 3.8 Kritische Lastfaktoren zur Ermittlung von N<sub>ki</sub> bzw. M<sub>ki</sub>

Die letzte Ergebnismaske enthält sehr wichtige Angaben zur Stabilität des Tragwerks: Für jeden bemessenen Stabsatz und jeden Stabsatz wird der kritische Lastfaktor angegeben, der eine Beurteilung des Stabilitätsverhaltens ermöglicht.

### Stabsatz Nr.

Die Ausgabe der kritischen Lastfaktoren erfolgt nach Stabsätzen geordnet.

### Lastfall

In dieser Spalte werden die Nummern der Lastfälle und Lastfallgruppen angegeben, deren Lasten die jeweiligen kritischen Lastfaktoren zur Folge haben.

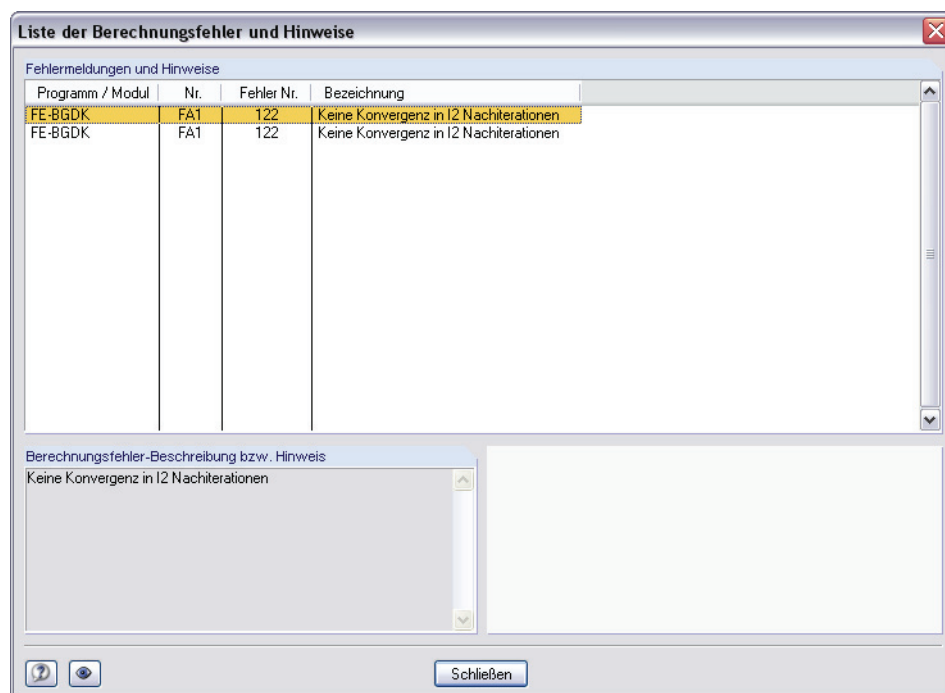
### Kritischer Lastfaktor

Ein kritischer Lastfaktor von beispielsweise 3,797 (siehe Bild 5.9) bedeutet, dass die Belastung dieser Lastfallgruppe um den Faktor 3,797 gesteigert werden muss, damit das System instabil wird (d. h. der Diagonalkoeffizient der Matrix wird kleiner null). Dabei wird von einem elastischen Verhalten des Werkstoffs ausgegangen.

Wird ein kritischer Lastfaktor kleiner 1 ermittelt, so bedeutet dies, dass das System schon vor dem Erreichen der Bemessungslast instabil wird. Nach der Berechnung muss also neben der Spannungsausnutzung (vgl. Maske 3.1) auch überprüft werden, ob die kritischen Lastfaktoren einer jeden Lastfallgruppe größer als 1 sind.

Wenn sich gleich zu Beginn der Berechnung ein kritischer Lastfaktor von 0 ergibt, kann keine Konvergenz erreicht werden (siehe Bild 5.10, Seite 86). Es liegt eine generelle Instabilität vor. In diesem Fall sind die in den Eingabemasken festgelegten Lagerungs- oder Gelenkdefinitionen zu überprüfen. Mit hoher Wahrscheinlichkeit ist das aus dem RSTAB-Gesamtmodell herausgelöste System kinematisch.



Bild 5.10: Dialog *Liste der Berechnungsfehler und Hinweise*

### Anzahl Iterationen

In dieser Spalte wird die Anzahl der Iterationen angegeben, die jeweils zum Erreichen der Instabilität benötigt wurde.

### Grund für Ende der Berechnung

Die in dieser Spalte ausgewiesenen Kommentare lassen Rückschlüsse auf das Stabilitätsverhalten des jeweiligen Stabsatzes zu.

Die Iterationsvorgaben werden im Dialog *Details* getroffen (siehe Bild 4.1, Seite 74).

## 6. Ergebnisauswertung

Nach der Berechnung lassen sich die Ergebnisse auf verschiedene Weise auswerten. Hierfür erweisen sich die Schaltflächen als hilfreich, die in den Masken 3.1 bis 3.4 rechts unterhalb der Grafik angeboten werden.

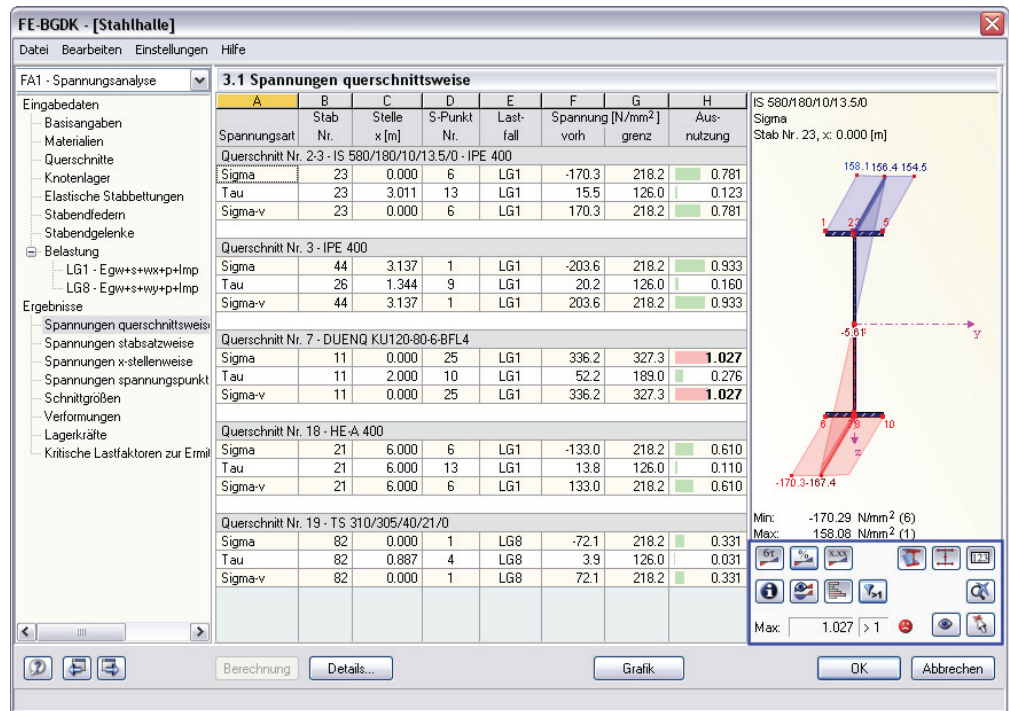


Bild 6.1: Schaltflächen zur Ergebnisauswertung

Die Schaltflächen sind mit folgenden Funktionen belegt:

| Schaltfläche                                                                        | Bezeichnung        | Funktion                                                                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | Spannungsverlauf   | Blendet die grafische Darstellung der Spannungen am Querschnitt ein und aus                  |
|  | Ausnutzung         | Blendet alternativ zum Spannungsverlauf die grafische Darstellung der Ausnutzung ein und aus |
|  | Werte              | Schaltet die Werteangaben in der Spannungs- oder Ausnutzungsgrafik ein und aus               |
|  | Querschnittskontur | Steuert die Anzeige des Profilumrisses in der Querschnittsgrafik                             |
|  | Spannungspunkte    | Blendet die Anzeige der Spannungspunkte in der Querschnittsgrafik ein und aus                |
|  | Nummerierung       | Schaltet die Nummerierung der Spannungspunkte ein und aus                                    |
|  | Querschnittsinfo   | Ruft den Dialog <i>Info über Querschnitt</i> mit den Kennwerten des aktuellen Profils auf    |
|  | Ergebnisverläufe   | Öffnet das Diagramm <i>Ergebnisverläufe im Stab</i><br>→ Kapitel 6.3, Seite 94               |

|                                                                                   |                 |                                                                                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | Relationsbalken | Blendet in den Ergebnismasken die farbigen Bezugsskalen ein und aus                                  |
|  | Überschreitung  | Stellt nur Zeilen dar, in denen die Ausnutzung größer als 1 und damit der Nachweis nicht erfüllt ist |
|  | Gesamtansicht   | Stellt die Spannungsgrafik wieder vollständig dar (Zoomen mit Scrollrad, Verschieben per Drag&Drop)  |
|  | Sichtmodus      | Ermöglicht den Sprung in das RSTAB-Arbeitsfenster, um dort eine andere Ansicht einzustellen          |
|  | Stabauswahl     | Ermöglicht die Auswahl eines Stabs im RSTAB-Fenster, um dessen Spannungen in der Tabelle anzuzeigen  |

Tabelle 6.1: Schaltflächen in den Ergebnismasken 2.1 bis 2.5

## 6.1 Spannungen am Querschnitt

In den Ergebnismasken 3.1 bis 3.4 wird die tabellarische Auflistung der Spannungen durch eine Spannungsgrafik veranschaulicht. Diese Grafik ist dynamisch, denn sie zeigt den Spannungsverlauf der aktuellen x-Stelle bzw. des aktuellen Spannungspunkts an, der durch die Cursorposition in der Tabelle links festgelegt ist.

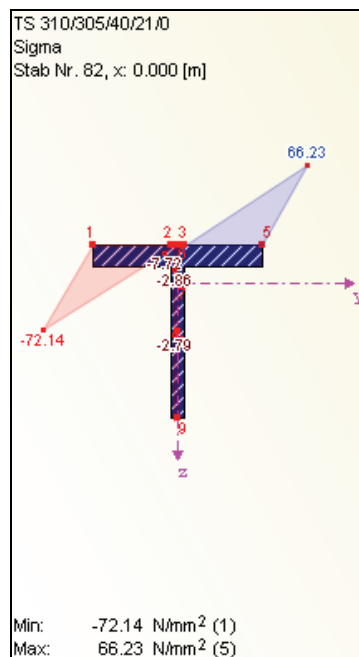


Bild 6.2: Verlauf der Normalspannungen am Querschnitt



Mit dem Maus-Scrollrad kann die Spannungsgrafik vergrößert bzw. verkleinert werden, per Drag & Drop lässt sich die Spannungsgrafik an eine andere Stelle verschieben. Die links dargestellte Schaltfläche stellt die Gesamtansicht wieder her.

Die Bedeutung und Funktion der Schaltflächen unterhalb der Grafik ist oben in Tabelle 6.1 erläutert. Damit kann gesteuert werden, ob in der Grafik

- der Spannungs- oder Ausnutzungsverlauf mitsamt Werten,
- die Querschnittskontur,
- die Spannungspunkte und deren Nummerierung

zur Anzeige kommen sollen.



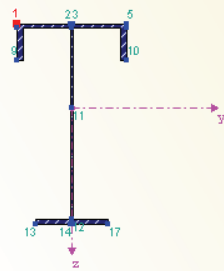


Über die Schaltfläche [Querschnitt-Info] lassen sich die Kennwerte des aktuellen Profils überprüfen. Es öffnet sich der Dialog *Info über Querschnitt* mit der Auflistung aller Querschnittsdaten (siehe Bild 5.2, Seite 79). In diesem Dialog steht unterhalb der Grafik auch die Schaltfläche [Details der Spannungspunkte] zur Verfügung, die den Zugang zu den Spannungspunktinformationen ermöglicht.

Spannungspunkte von UI 300/10/16/10/550/200/15/100/0/0

| SpannP<br>Nr. | A<br>Koordinaten |        | C<br>Statische Momente   |                          | E<br>Dicke<br>t [mm] | F<br>Wölbung                |                               |
|---------------|------------------|--------|--------------------------|--------------------------|----------------------|-----------------------------|-------------------------------|
|               | y [mm]           | z [mm] | $S_y$ [cm <sup>3</sup> ] | $S_z$ [cm <sup>3</sup> ] |                      | $\omega$ [cm <sup>2</sup> ] | $A_\omega$ [cm <sup>4</sup> ] |
| 1             | -150.0           | -228.7 | -272.40                  | -218.84                  | 10.0                 | 39.60                       | -1627.11                      |
| 2             | -5.0             | -228.7 | -572.53                  | -316.83                  | 10.0                 | 1.39                        | -1907.89                      |
| 3             | 0.0              | -228.7 | -582.90                  | -316.94                  | 10.0                 | 0.00                        | -1908.24                      |
| 4             | 5.0              | -228.7 | -572.53                  | -316.83                  | 10.0                 | -1.39                       | -1907.89                      |
| 5             | 150.0            | -228.7 | -272.40                  | -218.84                  | 10.0                 | -39.60                      | -1627.11                      |
| 6             | -150.0           | -218.7 | -253.36                  | -206.60                  | 16.0                 | 46.70                       | -1592.59                      |
| 7             | 0.0              | -218.7 | -1175.42                 | 0.00                     | 10.0                 | 0.00                        | 0.00                          |
| 8             | 150.0            | -218.7 | -253.36                  | -206.60                  | 16.0                 | -46.70                      | -1592.59                      |
| 9             | -150.0           | -128.7 | 0.00                     | 0.00                     | 16.0                 | 174.50                      | 0.00                          |
| 10            | 150.0            | -128.7 | 0.00                     | 0.00                     | 16.0                 | -174.50                     | 0.00                          |
| 11            | 0.0              | 0.0    | -1410.50                 | 0.00                     | 10.0                 | 0.00                        | 0.00                          |
| 12            | 0.0              | 306.3  | -950.99                  | 0.00                     | 10.0                 | 0.00                        | 0.00                          |
| 13            | -100.0           | 321.3  | 0.00                     | 0.00                     | 15.0                 | -509.62                     | 0.00                          |
| 14            | -5.0             | 321.3  | -444.36                  | 74.78                    | 15.0                 | -25.48                      | -3812.56                      |
| 15            | 0.0              | 321.3  | -466.80                  | 74.96                    | 15.0                 | 0.00                        | -3822.11                      |
| 16            | 5.0              | 321.3  | -444.36                  | -74.78                   | 15.0                 | 25.48                       | -3812.56                      |
| 17            | 100.0            | 321.3  | 0.00                     | 0.00                     | 15.0                 | 509.62                      | 0.00                          |

UI 300/10/16/10/550/200/15/100/0/0



Abbrechen

Bild 6.3: Spannungspunkte eines zusammengesetzten Profils

Die *Koordinaten* eines jeden Spannungspunkts werden hier als die Schwerpunktabstände  $e_y$  und  $e_z$  angegeben. Die Spalten *Statische Momente* enthalten die jeweiligen Flächenmomente 1. Grades  $S_y$  und  $S_z$ . Die für die Schubspannungsermittlung relevante *Dicke*  $t$  des Bauteils wird in der nächsten Spalte ausgewiesen. Die beiden letzten Spalten geben Auskunft über die Wölbordinaten  $\omega$  und die Wölbflächenmomente 1. Grades  $A_\omega$ .

## 6.2 Ergebnisse am RSTAB-Modell

Zur grafischen Auswertung der Nachweise kann das RSTAB-Arbeitsfenster genutzt werden.

### RSTAB-Hintergrundgrafik

Die RSTAB-Grafik im Hintergrund kann hilfreich sein, um die Lage eines bestimmten Stabes im Modell zu kontrollieren. Ist in der Ergebnismaske von FE-BGDK eine Tabellenzeile selektiert, so wird der betreffende Stab in der RSTAB-Hintergrundgrafik in der Selektionsfarbe hervorgehoben. Ein Pfeil kennzeichnet zusätzlich die x-Stelle am Stab, die in der aktuellen Tabellenzeile von FE-BGDK als maßgebend deklariert ist.

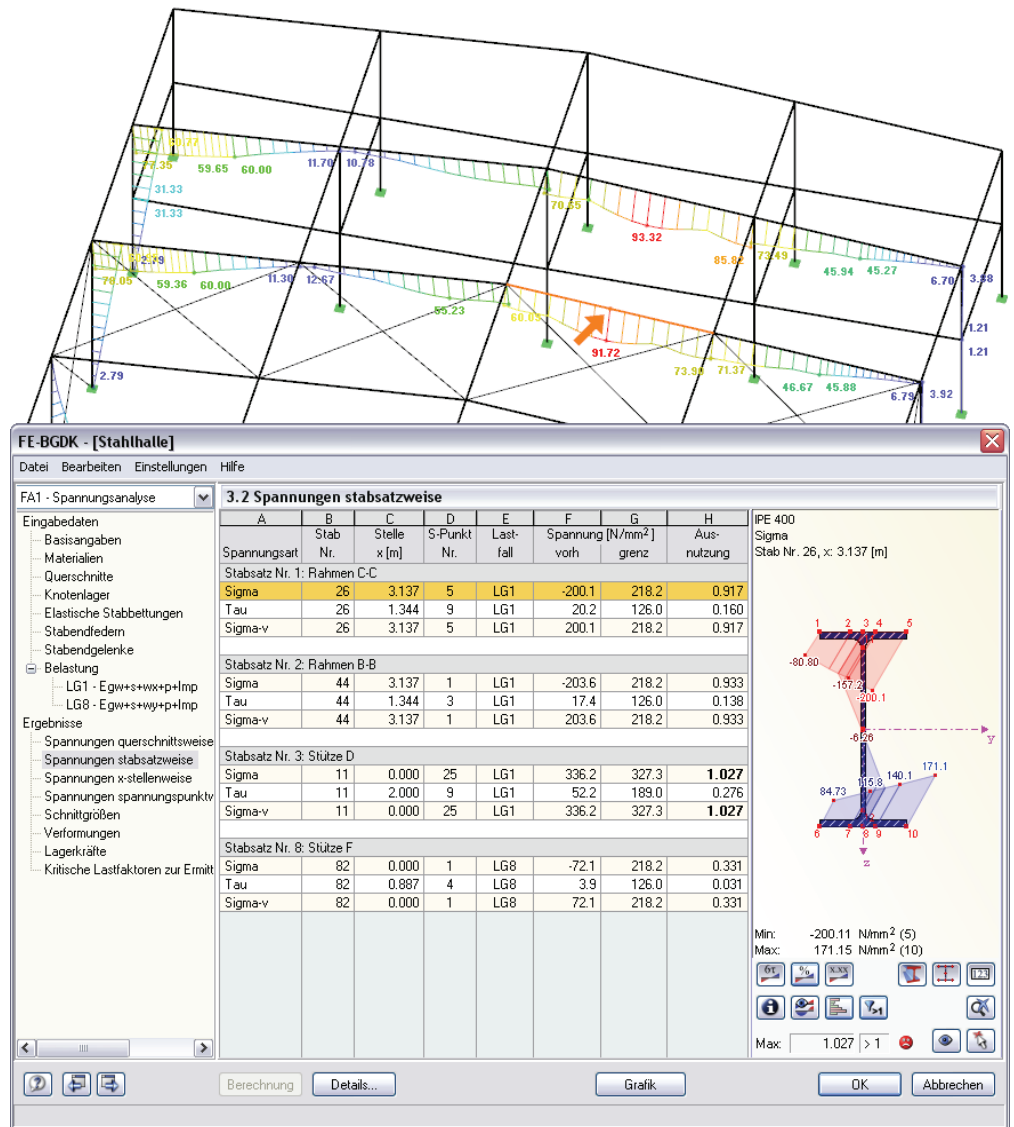


Bild 6.4: Kennzeichnung des Stabes und der aktuellen Stelle x im RSTAB-Modell



Sollte sich eine ungünstige Ansicht auch durch das Verschieben des FE-BGDK-Fensters nicht beheben lassen, kann man über die Schaltfläche [Ansicht ändern] in den so genannten *Sichtmodus* wechseln: Das FE-BGDK-Fenster wird ausgeblendet und in der RSTAB-Oberfläche kann nun die Anzeige geändert werden. In diesem Modus stehen nur die Funktionen des Menüs *Ansicht* zur Verfügung, z. B. Zoomen, Verschieben oder Drehen der Ansicht.

Grafik

### RSTAB-Arbeitsfenster

Zum anderen lassen sich die Spannungen, Ausnutzungsgrade, Verformungen, Schnittgrößen und Eigenformen direkt am Strukturmodell visualisieren. Mit der Schaltfläche [Grafik] wird das Modul FE-BGDK verlassen. Im RSTAB-Arbeitsfenster werden die diversen Nachweisgrößen grafisch wie die Schnittgrößen oder Verformungen eines RSTAB-Lastfalls dargestellt. Die Steuerung der Anzeige erfolgt über den *Ergebnisse*-Navigator von FE-BGDK.

Der *Ergebnisse*-Navigator ist an die Nachweise des Moduls FE-BGDK angepasst. Es stehen die einzelnen Spannungskomponenten, die Ausnutzungen bezogen auf die jeweiligen Spannungsanteile, die Verformungen, Schnittgrößen und Eigenformen zur Auswahl.

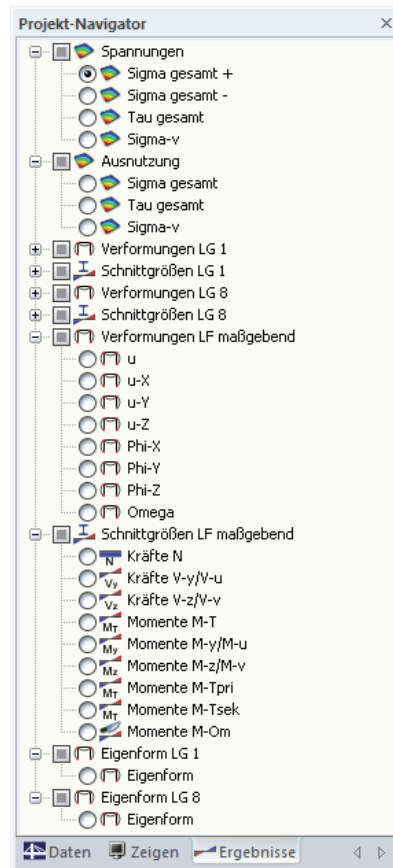


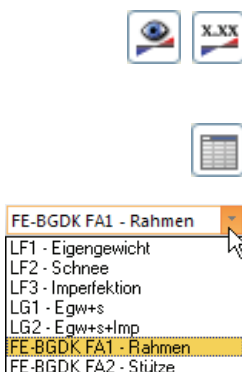
Bild 6.5: *Ergebnisse*-Navigator von FE-BGDK

Wie bei den RSTAB-Schnittgrößen blendet die Schaltfläche [Ergebnisse ein/aus] die Darstellung der Nachweisergebnisse ein oder aus. Die rechts davon angeordnete Schaltfläche [Ergebnisse mit Werten anzeigen] steuert die Anzeige der Ergebniswerte in der Grafik.

Da die RSTAB-Tabellen für die Auswertung der Ergebnisse von FE-BGDK keine Funktion haben, können sie ggf. deaktiviert werden.

Die Auswahl der Bemessungsfälle erfolgt wie gewohnt über die Liste in der RSTAB-Menüleiste.

Die Darstellungsart der Ergebnisse wird wie in RSTAB üblich im *Zeigen*-Navigator unter dem Eintrag *Ergebnisse* → *Stäbe* gesteuert. Standardmäßig werden die Spannungen, Ausnutzungen und Schnittgrößen *zweifarb* dargestellt und die Verformungen und Eigenformen als *Linien* angetragen (siehe folgendes Bild).



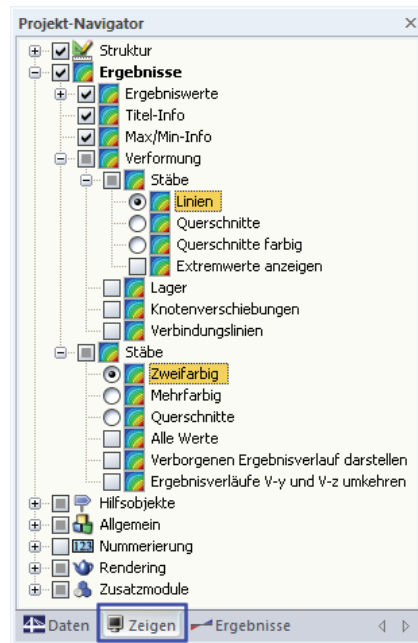
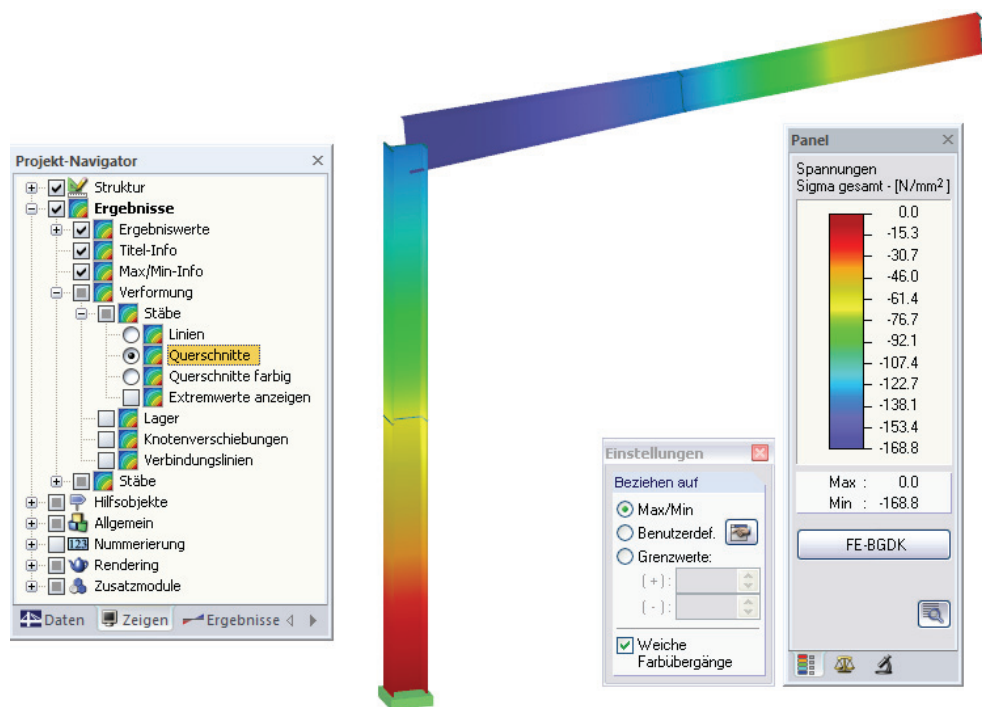


Bild 6.6: Zeigen-Navigator: Ergebnisse → Verformung / Stäbe



Bei einer mehrfarbigen Darstellung (Optionen *Querschnitte farbig* oder *Mehrfarbig*) steht das Farbpanel mit den üblichen Steuerungsmöglichkeiten zur Verfügung. Die Funktionen sind im RSTAB-Handbuch, Kapitel 4.4.6 ab Seite 68 ausführlich beschrieben.

Bild 6.7: Spannungsausnutzung mit Darstellungsoption *Querschnitte*

Das Bild 3.39 auf Seite 72 zeigt die Eigenform als Profilverformung. Hierfür ist im Zeigen-Navigator die Option *Ergebnisse → Verformung → Stäbe → Querschnitte farbig* zu wählen.

Wie bei den Stabschnittgrößen kann im mittleren Register *Faktoren* eine Skalierung der Bemessungsergebnisse vorgenommen werden. Gibt man dort im Eingabefeld *Stabverläufe* den Faktor 0 vor, erfolgt die Darstellung der Spannungen, Ausnutzungen und Schnittgrößen ohne Überhöhung in einer stärkeren Strichdicke.

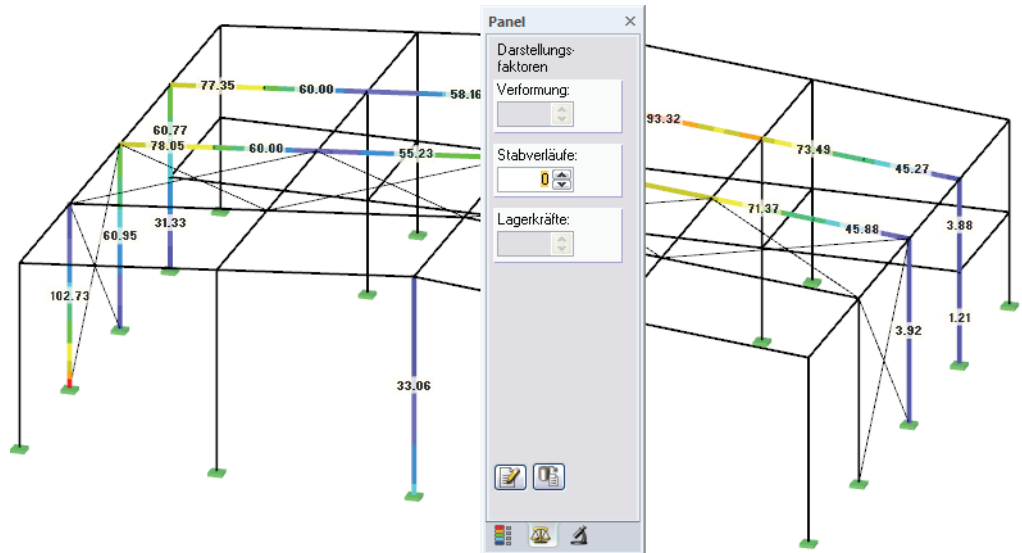


Bild 6.8: Panel-Register *Faktoren*

Alle Ergebnisdarstellungen lassen sich wie RSTAB-Grafiken in das zentrale Ausdruckprotokoll übertragen (siehe Kapitel 7.2, Seite 98).



Die in der Grafik ausgewiesenen Schnittgrößen lassen sich gut mit den Schnittkraftverläufen vergleichen, die in RSTAB für die bemessenen Lastfallgruppen ermittelt werden. Dadurch kann kontrolliert werden, ob die Randbedingungen der aus dem System herausgelösten Stabsätze in FE-BGDK korrekt erfasst sind (Knotenlager, Lasten, Imperfektionen etc.).

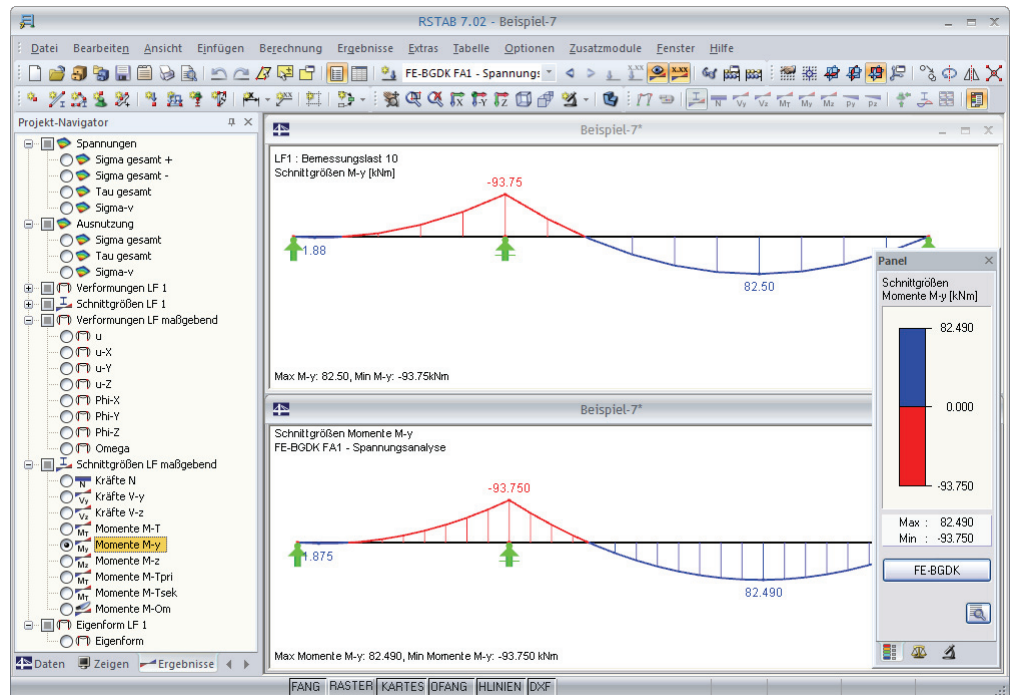


Bild 6.9: Momente  $M_y$  in RSTAB (oben) und FE-BGDK (unten)

FE-BGDK

Die Rückkehr in das Modul FE-BGDK erfolgt über die Schaltfläche [FE-BGDK] im Panel.

## 6.3 Ergebnisverläufe



Um für einen bestimmten Stabsatz den Ergebnisverlauf grafisch abzulesen, kann das aus RSTAB bekannte Ergebnisdigramm genutzt werden. Selektieren Sie in einer der Ergebnismasken 3.1 bis 3.4 von FE-BGDK den relevanten Stabsatz, indem Sie den Cursor in einer Tabellenzeile dieses Stabsatzes platzieren. Das Ergebnisdigramm lässt sich dann über die links gezeigte Schaltfläche aufrufen. Diese ist unterhalb der Querschnittsgrafik zu finden.

In der RSTAB-Grafik sind die Ergebnisverläufe zugänglich über Menü

**Ergebnisse → Ergebnisverläufe an selektierten Stäben**

oder die entsprechende Schaltfläche in der RSTAB-Symbolleiste.



Es öffnet sich ein Fenster, das den Verlauf der Spannungen und Ausnutzungen am gewählten Stabsatz zeigt.

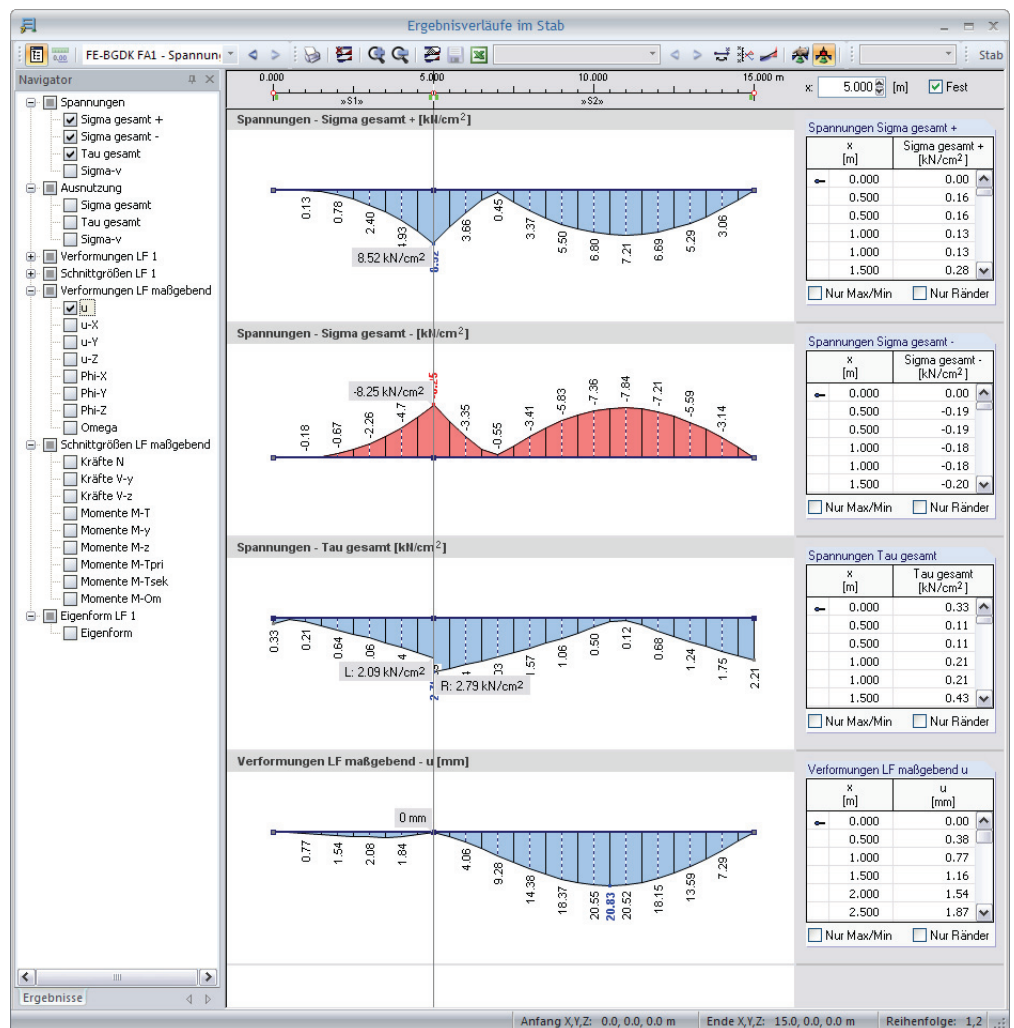


Bild 6.10: Dialog *Ergebnisverläufe im Stab*



Im Navigator links werden die Spannungen, Ausnutzungen, Verformungen, Schnittgrößen oder Eigenformen festgelegt, die im Ergebnisdigramm zur Anzeige kommen sollen. Über die Listen in der Symbolleiste kann zwischen den Bemessungsfällen von FE-BGDK gewechselt werden.

Eine ausführliche Beschreibung des Dialogs *Ergebnisverläufe* finden Sie im Kapitel 9.8.4 des RSTAB-Handbuchs ab Seite 205.

## 6.4 Filter für Ergebnisse

Neben den Ergebnismasken, die durch ihre Struktur bereits eine Auswahl nach bestimmten Kriterien erlauben, stehen die im RSTAB-Handbuch beschriebenen Filtermöglichkeiten zur grafischen Auswertung der Nachweise zur Verfügung.

Zum einen kann auf bereits definierte Ausschnitte zurückgegriffen werden (siehe RSTAB-Handbuch, Kapitel 9.8.6 ab Seite 208), die es gestatten, Objekte in geeigneter Weise zu gruppieren.

Zum anderen ist es möglich, Spannungen oder Ausnutzungen als Filterkriterium im RSTAB-Arbeitsfenster zu benutzen. Hierzu muss das Panel angezeigt werden. Sollte es nicht aktiv sein, kann es einblendet werden über das RSTAB-Menü

### Ansicht → Steuerpanel

oder die entsprechende Schaltfläche in der *Ergebnisse*-Symbolleiste.

Das Panel ist im Kapitel 4.4.6 des RSTAB-Handbuchs ab Seite 68 beschrieben. Die Filtereinstellungen für die Ergebnisse werden im Panel-Register *Farbskala* vorgenommen. Da dieses Register bei der zweifarbig Schnittgrößenanzeige nicht angeboten wird, muss im *Zeigen*-Navigator auf die Darstellungsarten *Mehrfarbig* oder *Querschnitte* umgeschaltet werden.

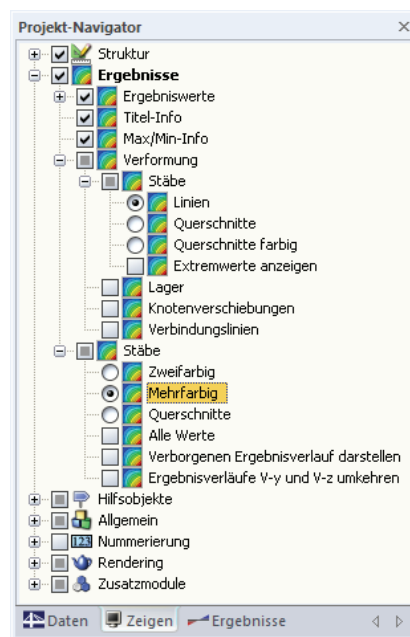


Bild 6.11: *Zeigen*-Navigator: Ergebnisse → Stäbe → Mehrfarbig

Bei einer mehrfarbigen Ergebnisanzeige kann im Panel beispielsweise eingestellt werden, dass nur Ausnutzungen größer als 50 % angezeigt werden. Die Farbskala lässt sich zudem z. B. so anpassen, dass ein Farbbereich jeweils 5 % abdeckt (siehe Bild 6.12 auf der folgenden Seite).

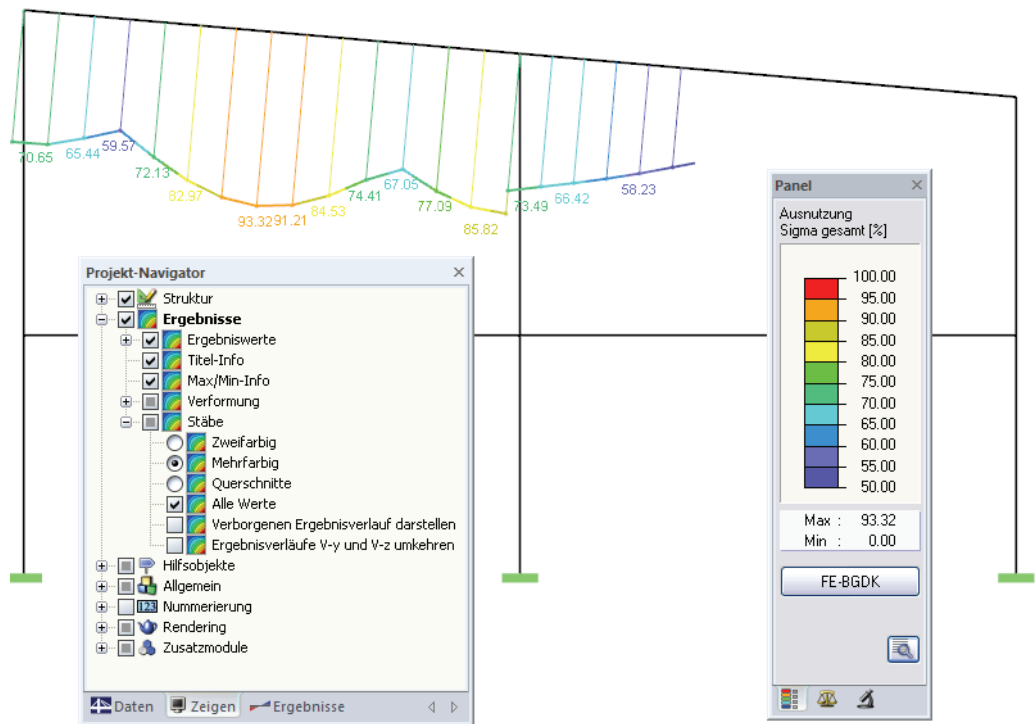


Bild 6.12: Filtern der Spannungsausnutzungen mit angepasster Farbskala

Über die Option *Verborgenen Ergebnisverlauf darstellen* (im *Zeigen*-Navigator unter dem Eintrag *Ergebnisse* → *Stäbe*) ließen sich die Ergebnisse einblenden, die die Panelvorgaben nicht erfüllen. Sie würden dann strichlinienhaft dargestellt werden.

### Filtern von Stäben

Im Register *Filter* des Steuerpanels können die Nummern der Stäbe bestimmt werden, deren Ergebnisse in der Grafik gefiltert zur Anzeige kommen sollen. Die Beschreibung dieser Funktion finden Sie im Kapitel 4.4.6 des RSTAB-Handbuchs auf Seite 71.

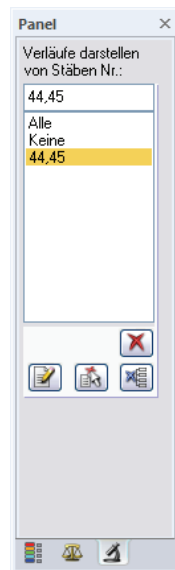


Bild 6.13: Filtern von Stäben im Panel

Im Unterschied zur Ausschnittfunktion wird die Struktur vollständig mit angezeigt.

# 7. Ausdruck

## 7.1 Ausdruckprotokoll

Wie für RSTAB wird zunächst ein Ausdruckprotokoll mit den FE-BGDK-Daten generiert, das mit Grafiken und Erläuterungen ergänzt werden kann. Zudem kann in dieser Druckvorschau festgelegt werden, welche Ergebnisse der Biegedrillknickuntersuchung schließlich im Ausdruck erscheinen.



Bei sehr großen Strukturen ist es ratsam, anstelle eines einzigen, umfangreichen Protokolls die Daten auf mehrere kleine Protokolle aufzuteilen. Legt man ein separates Protokoll für FE-BGDK an, kann dieses Ausdruckprotokoll relativ schnell aufgebaut werden.

Das Ausdruckprotokoll ist im RSTAB-Handbuch ausführlich beschrieben. Insbesondere das Kapitel 10.1.3.4 *Selektion der Zusatzmodul-Daten* auf Seite 226 behandelt die Auswahl der Ein- und Ausgabedaten in den Zusatzmodulen.

Es bestehen die üblichen Selektionsmöglichkeiten zur Auswahl der Bemessungsfälle sowie der Eingabe- und Ergebnisdaten von FE-BGDK.

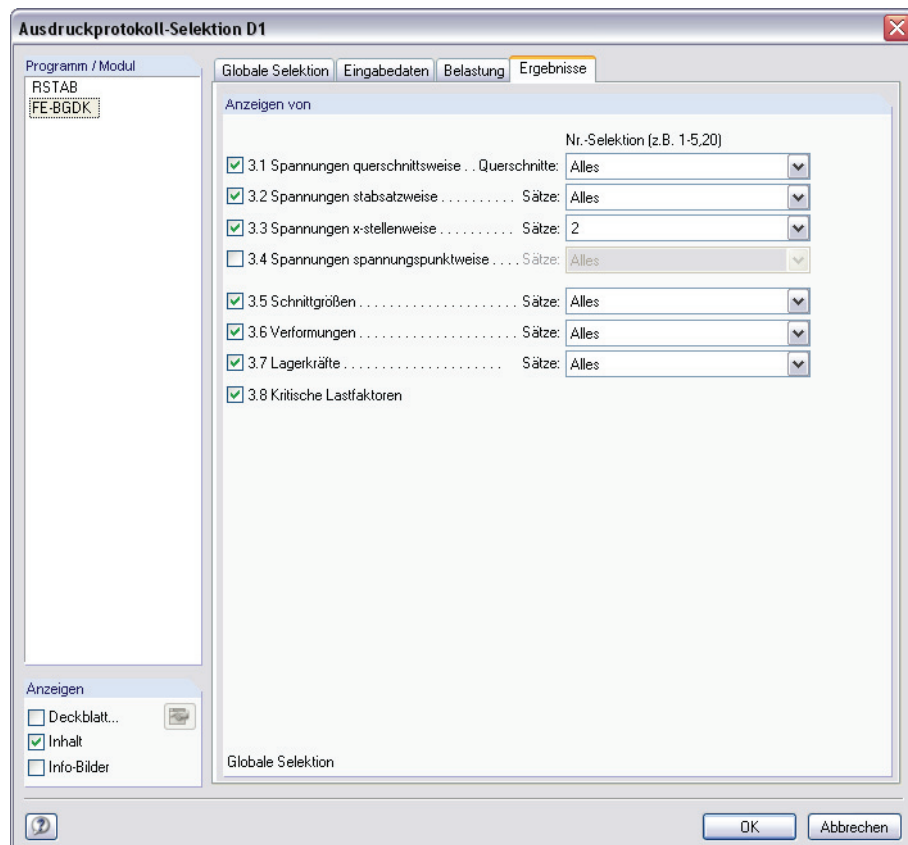


Bild 7.1: Ausdruckprotokoll-Selektion der Ergebnisse von FE-BGDK

## 7.2 Grafikausdruck

Die Nachweisgrafiken können entweder in das Ausdruckprotokoll eingebunden oder direkt auf den Drucker geleitet werden. Im Kapitel 10.2 des RSTAB-Handbuchs wird das Drucken von Grafiken ausführlich erläutert.



Wie in RSTAB kann jedes Bild, das im Grafikfenster des Hauptprogramms angezeigt wird, in das Ausdruckprotokoll übernommen werden. In gleicher Weise lassen sich auch die Stab-Ergebnisverläufe mit der [Drucken]-Schaltfläche in das Protokoll aufnehmen.

Die aktuelle FE-BGDK-Grafik im RSTAB-Arbeitsfenster kann gedruckt werden über Menü

**Datei → Drucken**

oder die entsprechende Schaltfläche in der Symbolleiste.

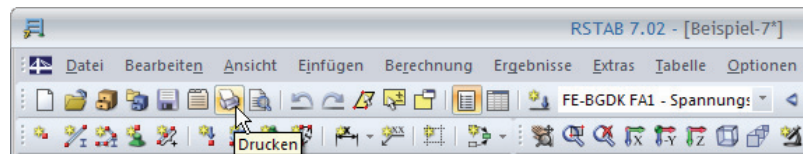


Bild 7.2: Schaltfläche *Drucken* in der Symbolleiste des Hauptfensters



Bild 7.3: Schaltfläche *Drucken* in der Symbolleiste des Ergebnisverläufe-Fensters

Es wird folgender Dialog angezeigt.

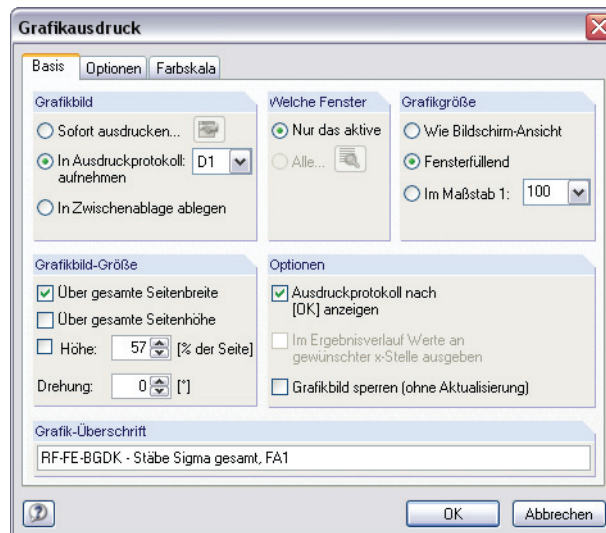
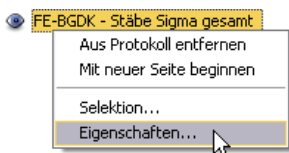


Bild 7.4: Dialog *Grafikausdruck*, Register *Basis*

Dieser Dialog ist im Kapitel 10.2 des RSTAB-Handbuchs ab Seite 242 ausführlich beschrieben. Dort sind auch die beiden weiteren Register *Optionen* und *Farbskala* erläutert.

Eine FE-BGDK-Grafik kann im Ausdruckprotokoll per Drag & Drop an eine andere Stelle verschoben werden. Zudem lassen sich eingefügte Grafiken nachträglich anpassen: Klicken Sie den entsprechenden Eintrag im Protokoll-Navigator mit der rechten Maustaste an und wählen im Kontextmenü dessen *Eigenschaften*. Es erscheint wieder der *Grafikausdruck*-Dialog mit diversen Modifikationsmöglichkeiten.



## 8. Allgemeine Funktionen

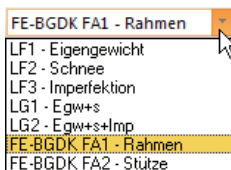
Dieses Kapitel stellt einige Menüfunktionen sowie Exportmöglichkeiten für die Bemessungsergebnisse vor.

### 8.1 FE-BGDK-Bemessungsfälle

Es besteht die Möglichkeit, Stabsätze in separaten Bemessungsfällen zu gruppieren. Damit können beispielsweise Bauteilgruppen mit spezifischen Bemessungsvorgaben (Materialien, Teilsicherheitsbeiwerte, Lagerungsbedingungen etc.) beaufschlagt werden.

Es bereitet kein Problem, einen Stabsatz in unterschiedlichen Bemessungsfällen zu untersuchen.

Die FE-BGDK-Fälle sind im RSTAB-Arbeitsfenster wie ein Lastfall oder eine Lastfallgruppe in der Liste der Symbolleiste zugänglich.



#### Neuen FE-BGDK-Fall anlegen

Ein neuer Bemessungsfall wird angelegt über das FE-BGDK-Menü

**Datei → Neuer Fall.**

Es erscheint der folgende Dialog.

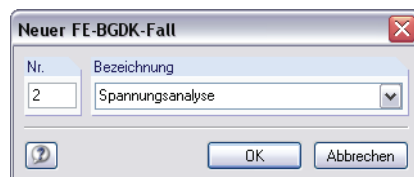


Bild 8.1: Dialog *Neuer FE-BGDK-Fall*

In diesem Dialog sind eine (noch nicht belegte) *Nummer* sowie eine *Bezeichnung* für den neuen Biegedrillknickfall anzugeben. Nach Bestätigen mit [OK] erscheint die FE-BGDK-Maske 1.1 *Basisangaben* zur Eingabe der neuen Bemessungsdaten.

#### FE-BGDK-Fall umbenennen

Die Bezeichnung eines Bemessungsfalls kann geändert werden über FE-BGDK-Menü

**Datei → Fall umbenennen.**

Es erscheint der Dialog *FE-BGDK-Fall umbenennen*.

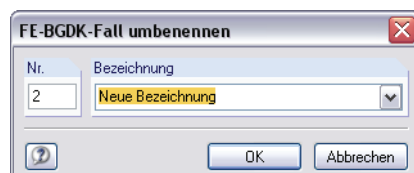


Bild 8.2: Dialog *FE-BGDK-Fall umbenennen*

## FE-BGDK-Fall kopieren

Die Eingabedaten des aktuellen Bemessungsfalls werden kopiert über FE-BGDK-Menü

**Datei → Fall kopieren.**

Es erscheint der Dialog *FE-BGDK-Fall kopieren*, in dem die Nummer und Bezeichnung des neuen Falls festzulegen sind.



Bild 8.3: Dialog *FE-BGDK-Fall kopieren*

## FE-BGDK-Fall löschen

Es besteht die Möglichkeit, Bemessungsfälle zu löschen über das FE-BGDK-Menü

**Datei → Fall löschen.**

Im Dialog *FE-BGDK-Fall löschen* ist in der Liste *Vorhandene Fälle* ein Nachweisfall auszuwählen, der dann mit [OK] gelöscht wird.

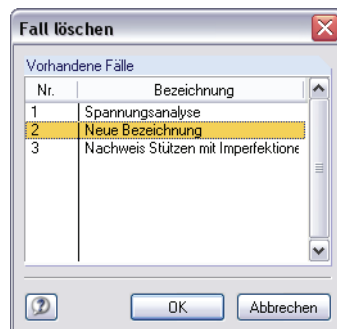


Bild 8.4: Dialog *Fall löschen*

## 8.2 Einheiten und Dezimalstellen

Die Einheiten und Nachkommastellen werden für RSTAB sowie für sämtliche Zusatzmodule zentral verwaltet. In FE-BGDK ist der Dialog zum Einstellen der Einheiten zugänglich über das Menü

**Einstellungen → Einheiten und Dezimalstellen.**

Es wird der aus RSTAB bekannte Dialog aufgerufen. Das Modul FE-BGDK ist voreingestellt.

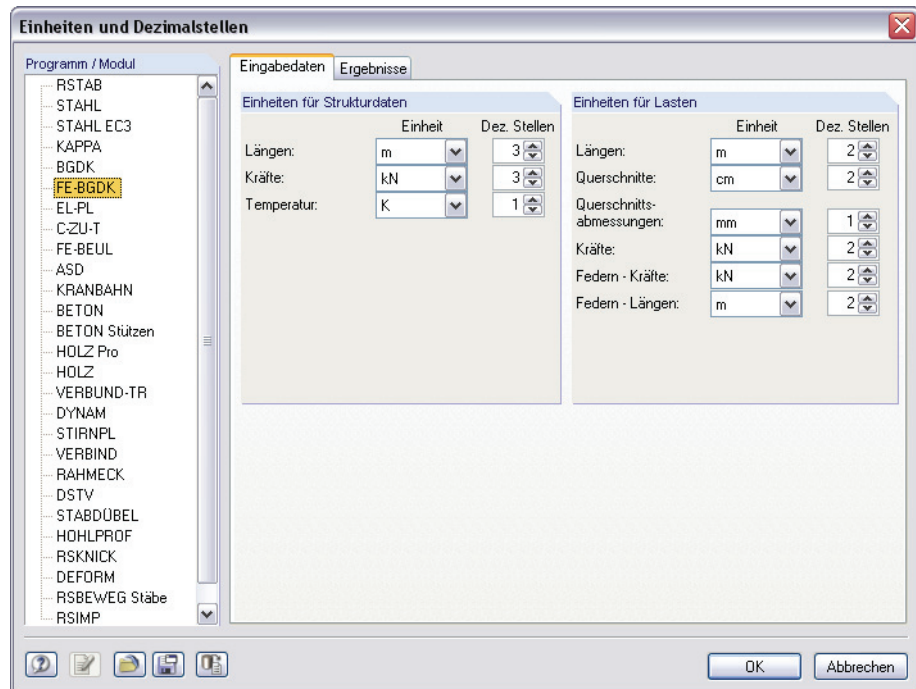


Bild 8.5: Dialog *Einheiten und Dezimalstellen*



Die Einstellungen können als Benutzerprofil gespeichert und in anderen Positionen wieder verwendet werden. Die Beschreibung dieser Funktionen finden Sie im Kapitel 11.6.2 des RSTAB-Handbuchs auf Seite 334.

## 8.3 Export der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Biegedrillknickuntersuchung können auf verschiedene Weise für andere Programme bereitgestellt werden.

### Zwischenablage

Markierte Zellen der FE-BGDK-Ergebnismasken lassen sich mit [Strg]+[C] in die Zwischenablage kopieren und mit [Strg]+[V] z. B. in ein Textverarbeitungsprogramm einfügen. Die Überschriften der Tabellenspalten werden dabei nicht berücksichtigt.

### Ausdruckprotokoll

Die FE-BGDK-Daten können in das Ausdruckprotokoll gedruckt (vgl. Kapitel 7.1, Seite 97) und von dort dann exportiert werden über Menü

**Datei → Export in RTF-Datei bzw. BauText.**

Diese Funktion ist im Kapitel 10.1.11 des RSTAB-Handbuchs auf Seite 238 beschrieben.

## Excel / OpenOffice

FE-BGDK ermöglicht den direkten Datenexport zu MS Excel und OpenOffice.org Calc. Diese Funktion wird aufgerufen über Menü

**Datei → Tabellen exportieren.**

Es öffnet sich folgender Exportdialog.

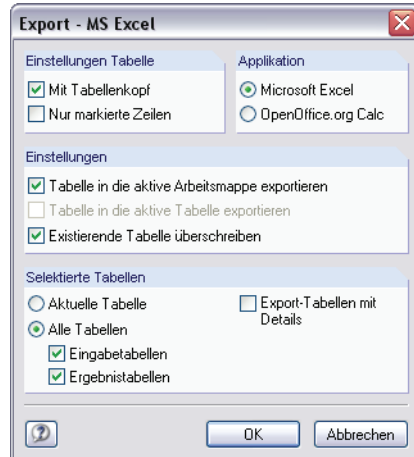
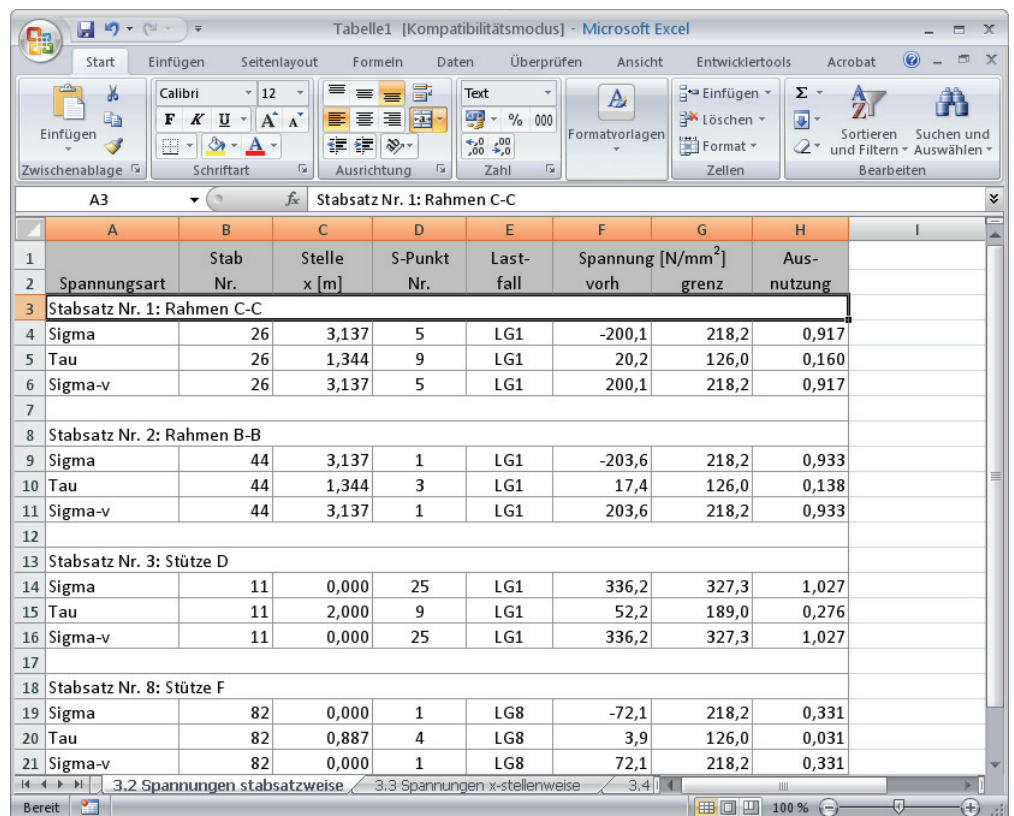


Bild 8.6: Dialog *Export - MS Excel*

Sind die gewünschten Parameter ausgewählt, kann der Export mit [OK] gestartet werden. Excel bzw. OpenOffice werden automatisch aufgerufen. Die Programme brauchen nicht im Hintergrund geöffnet sein.



|    | A                          | B    | C      | D       | E         | F                      | G                       | H           |
|----|----------------------------|------|--------|---------|-----------|------------------------|-------------------------|-------------|
| 1  |                            | Stab | Stelle | S-Punkt | Last-fall | Spannung [N/mm²] vorh. | Spannung [N/mm²] grenz. | Aus-nutzung |
| 2  | Spannungsart               | Nr.  | x [m]  | Nr.     |           |                        |                         |             |
| 3  | Stabsatz Nr. 1: Rahmen C-C |      |        |         |           |                        |                         |             |
| 4  | Sigma                      | 26   | 3,137  | 5       | LG1       | -200,1                 | 218,2                   | 0,917       |
| 5  | Tau                        | 26   | 1,344  | 9       | LG1       | 20,2                   | 126,0                   | 0,160       |
| 6  | Sigma-v                    | 26   | 3,137  | 5       | LG1       | 200,1                  | 218,2                   | 0,917       |
| 7  |                            |      |        |         |           |                        |                         |             |
| 8  | Stabsatz Nr. 2: Rahmen B-B |      |        |         |           |                        |                         |             |
| 9  | Sigma                      | 44   | 3,137  | 1       | LG1       | -203,6                 | 218,2                   | 0,933       |
| 10 | Tau                        | 44   | 1,344  | 3       | LG1       | 17,4                   | 126,0                   | 0,138       |
| 11 | Sigma-v                    | 44   | 3,137  | 1       | LG1       | 203,6                  | 218,2                   | 0,933       |
| 12 |                            |      |        |         |           |                        |                         |             |
| 13 | Stabsatz Nr. 3: Stütze D   |      |        |         |           |                        |                         |             |
| 14 | Sigma                      | 11   | 0,000  | 25      | LG1       | 336,2                  | 327,3                   | 1,027       |
| 15 | Tau                        | 11   | 2,000  | 9       | LG1       | 52,2                   | 189,0                   | 0,276       |
| 16 | Sigma-v                    | 11   | 0,000  | 25      | LG1       | 336,2                  | 327,3                   | 1,027       |
| 17 |                            |      |        |         |           |                        |                         |             |
| 18 | Stabsatz Nr. 8: Stütze F   |      |        |         |           |                        |                         |             |
| 19 | Sigma                      | 82   | 0,000  | 1       | LG8       | -72,1                  | 218,2                   | 0,331       |
| 20 | Tau                        | 82   | 0,887  | 4       | LG8       | 3,9                    | 126,0                   | 0,031       |
| 21 | Sigma-v                    | 82   | 0,000  | 1       | LG8       | 72,1                   | 218,2                   | 0,331       |

Bild 8.7: Ergebnis in Excel

## 9. Beispiele

In diesem Abschnitt sind einige Literaturbeispiele zu finden, die der Verifikation des Moduls FE-BGDK dienen sollen.

Für die Beispiele existieren in der Regel keine analytischen Lösungen. Die in der Literatur verwendeten Lösungsansätze sind entweder numerischer Art oder sie beruhen auf der Anwendung von RITZ- oder GALERKIN-Verfahren mit ein- oder mehrgliedrigen Ansätzen, die für sich auch Näherungslösungen der das Biegedrillknicken beschreibenden Differentialgleichungen darstellen. Aus diesem Grund kann nicht erwartet werden, dass die Ergebnisse des Moduls FE-BGDK mit den in der Literatur angegebenen Ergebnissen vollständig übereinstimmen.

### 9.1 Träger mit Einzellast

#### System

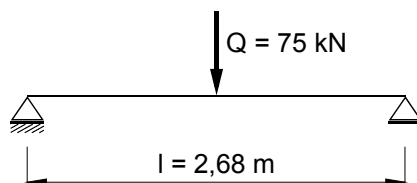


Bild 9.1: System und Belastung

Querschnittswerte und Material: IPE 200, Stahl S235

Das System ist an beiden Rändern gabelgelagert, aber nicht wölbbehindert. Daraus resultieren folgende Randbedingungen:

Linkes Lager:  $u = v = w = \varphi_x = 0$

Rechtes Lager:  $v = w = \varphi_x = 0$

Es sollen zwei Fälle berechnet werden:

erster Fall: reine Biegung ohne Drehbettung

zweiter Fall: reine Biegung mit Drehbettung

#### 9.1.1 Biegung ohne Drehbettung

$N = 0, c_\varphi = 0$

Das ideale Biegedrillknickmoment nach ROIK, CARL, LINDNER [3] beträgt in diesem Fall:

$$M_{Ki,y} = \zeta \frac{\pi^2 E I_z}{l^2} \sqrt{\frac{C_M + 0,039 l^2 I_T}{I_z}}$$

Mit  $\zeta = 1,35$  ergibt sich nach Einsetzen der entsprechenden Werte:  $M_{Ki} = 83,9 \text{ kNm}$

FE-BGDK liefert folgende Lastfaktoren  $v$  und idealen Momente  $M_{Ki,y}$ , wenn eine Vorverformung von  $l/400$  angesetzt wird.

| Vorverformung | Verschiebungsrichtung | $v$  | $M_{Ki,y} \text{ [kNm]}$   |
|---------------|-----------------------|------|----------------------------|
| keine         |                       | 1,68 | $50,25 \cdot 1,68 = 84,42$ |
| Eigenvektoren | $v$                   | 1,66 | $50,40 \cdot 1,66 = 83,66$ |



Das ideale Biegedrillknickmoment sollte stets ohne Vorverformung berechnet werden, da es zur Verzweigungslast des Systems gehört. Wird bei der Berechnung des idealen Moments eine Vorverformung angesetzt, so ist das ideale Moment kleiner als dasjenige, das ohne Vorverformung bestimmt wurde.

Der Wert von  $M_{ki,y} = 84,42 \text{ kNm}$  sollte bei der Berechnung nach dem Ersatzstabverfahren gemäß DIN 18800 Teil 2 benutzt werden (Programm BGDK).

### 9.1.2 Biegung mit Drehbettung

$N = 0$ ,  $c_g = 50 \text{ kNm/m}$

Mit der Gleichung für das ideale Torsionsträgheitsmoment

$$I_{Tid} = I_T + c_g \frac{l^2}{\pi^2 G}$$

ergibt sich  $M_{ki,y} = 191,1 \text{ kNm}$ .

FE-BGDK liefert folgende Lastfaktoren  $v$  und zugehörige ideale Momente, wenn wieder die Vorverformung  $l/400$  angesetzt wird.

| Vorverformung | Verschiebungsrichtung | $v$  | $M_{ki,y} \text{ [kNm]}$    |
|---------------|-----------------------|------|-----------------------------|
| keine         |                       | 3,67 | $50,25 \cdot 3,67 = 184,42$ |
| Eigenvektoren | $v$                   | 3,58 | $50,40 \cdot 3,55 = 178,92$ |

## 9.2 Träger mit Gleichlast

### System

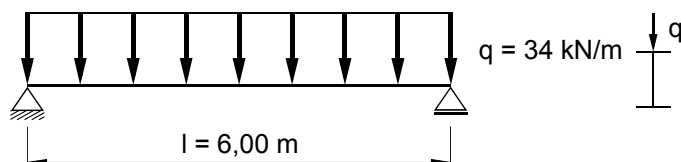


Bild 9.2: System und Belastung

Dieses Beispiel ist den SCHNEIDER Bautabellen (17. Auflage, Seite 8.46) [5] entnommen.

Querschnittswerte und Material: IPE 400, Stahl S235

Das System ist an beiden Rändern gabelgelagert, aber nicht wölbbehindert. Daraus resultieren folgende Randbedingungen:

Linkes Lager:  $u = v = w = \varphi_x = 0$

Rechtes Lager:  $v = w = \varphi_x = 0$

Die Gleichlast  $q$  greift am Obergurt des Trägers an.

FE-BGDK liefert ohne und mit Vorverformung erwartungsgemäß unterschiedliche elastische Stabilitätslasten. Diese sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst, wobei eine Konvergenzstudie durchgeführt wurde, um die Genauigkeit der Berechnung in Abhängigkeit der Elementanzahl festzustellen. Für die Berechnung mit Vorverformung durch Eigenvektoren wurde in diesem Beispiel exemplarisch als Stich  $l/400$  angesetzt.

| Elemente | $\nu$ | $M_{Kl,y}$ [kNm]           | $\nu_E$ | $q_{max}$ [kN]          |
|----------|-------|----------------------------|---------|-------------------------|
| 4        | 1,31  | $153,0 \cdot 1,31 = 200,4$ | 1,29    | $0,84 \cdot 34 = 28,56$ |
| 8        | 1,28  | $153,0 \cdot 1,28 = 195,8$ | 1,25    | $0,82 \cdot 34 = 27,88$ |
| 16       | 1,27  | $153,0 \cdot 1,27 = 194,3$ | 1,25    | $0,82 \cdot 34 = 27,88$ |
| 32       | 1,26  | $153,0 \cdot 1,26 = 192,8$ | 1,25    | $0,82 \cdot 34 = 27,88$ |
| 64       | 1,26  | $153,0 \cdot 1,26 = 192,8$ | 1,25    | $0,82 \cdot 34 = 27,88$ |
| 128      | 1,26  | $153,0 \cdot 1,26 = 192,8$ | 1,25    | $0,82 \cdot 34 = 27,88$ |

In dieser Tabelle bezeichnet  $\nu$  den Lastfaktor am perfekten System und  $\nu_E$  den Lastfaktor des imperfekten Systems. Aus den Ergebnissen ist erkennbar, dass bei allen Berechnungsarten (mit/ohne Vorverformung und bei Spannungsbegrenzung) bereits mit acht Elementen eine Genauigkeit von 99 % erreicht wird. Die Berechnung mit 32 Elementen stellt die konvergierte Lösung dar, da die weiteren Untersuchungen mit jeweils doppelter Anzahl von Elementen keine Abweichungen zu der Lösung mit 32 Elementen aufweisen.

In den SCHNEIDER Bautabellen [5] wird der Wert  $M_{Kl,y} = 169,2 \text{ kNm}$  angegeben.

Die Beschränkung der elastischen Spannung auf  $f_{y,k} = 24 \text{ kN/cm}^2$  liefert mit FE-BGDK die maximale aufnehmbare Gleichlast von  $q_{max} = 0,82 \cdot 34 = 27,88 \text{ kN/m}$ . Diese Gleichlast ist geringer als der in [5] angegebene Wert. Dies liegt daran, dass die plastische Reserve des Querschnitts bei der Bestimmung der elastischen Grenzlaster  $F_G$  nicht berücksichtigt ist. Dies kann für dieses Beispiel jedoch mit dem Programm BGDK erfolgen.

### 9.3 Kragträger mit Wölbbehinderung

In diesem Beispiel soll das Wölbbimoment  $M_\omega$  berechnet werden.

#### System

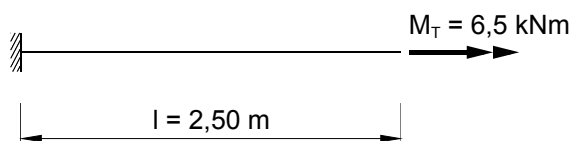


Bild 9.3: System und Belastung

Querschnittswerte und Material: HEB 240, Stahl S235

Der Querschnitt ist an der Einspannung wölbbehindert.

Daraus resultieren folgende Randbedingungen am linken Trägerende:

$$u = v = w = \varphi_x = \varphi_y = \varphi_z = \omega = 0$$

Die Berechnung dieses Beispiels in den SCHNEIDER Bautabellen (17. Auflage, Seite 8.20) [5] ergibt das **Wölbbimoment**  $M_\omega = -70494 \text{ kNcm}^2$ .

Die Untersuchung mit FE-BGDK liefert den Wert  $M_\omega = -70410 \text{ kNcm}^2$ .

Die zugehörige **Verdrehung**  $\vartheta$  wird in [5] mit  $6,3^\circ$  angegeben.

FE-BGDK ermittelt den Wert  $\varphi_x = 0,1214 \cdot 180/\pi = 6,96^\circ$ .

Ein Vergleich der Spannungen von [5] und FE-BGDK führt zu folgendem Ergebnis:

| Spannung          | SCHNEIDER [5] [kN/cm <sup>2</sup> ] | FE-BGDK [kN/cm <sup>2</sup> ] |
|-------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| $\sigma_{\omega}$ | $\pm 19,4$                          | $\pm 19,35$                   |
| $\tau_{Mx,p}$     | 8,5                                 | 8,73                          |
| $\tau_{Mx,s}$     | 1,07                                | 1,07                          |

## 9.4 Kragträger mit Gleichlast

In diesem Beispiel aus PETERSEN [2], Seite 732 sollen die Kipplast und das zugehörige ideale Kippmoment berechnet werden.

### System

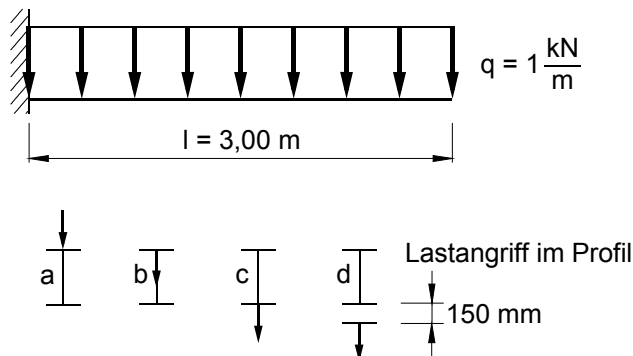


Bild 9.4: System und Belastung

Querschnittswerte und Material: IPE 200, Stahl S235

### 9.4.1 Kragträgerende ohne Lagerung

Der Querschnitt ist an der Einspannung wölbbehindert.

Daraus resultieren folgende Randbedingungen am linken Trägerende:

$$u = v = w = \varphi_x = \varphi_y = \varphi_z = \omega = 0$$

| Lastangriff      | $v_4$ | $v_{E4}$ | $v_8$ | $v_{E8}$ | $v_{64}$ | $v_{E64}$ | $v_{\text{Petersen}}$ |
|------------------|-------|----------|-------|----------|----------|-----------|-----------------------|
| oben (a)         | 20,27 | 20,06    | 20,52 | 20,28    | 20,56    | 20,31     | 19,06                 |
| Schwerpunkt (b)  | 36,81 | 35,63    | 37,78 | 36,38    | 38,06    | 36,78     | 38,13                 |
| unten (c)        | 52,75 | 50,63    | 54,02 | 51,63    | 54,25    | 51,75     | 57,19                 |
| untergehängt (d) | 66,56 | 63,75    | 67,75 | 64,75    | 68,25    | 65,13     | 76,25                 |

Die  $v$ -Werte bedeuten:  $v_n$  ist das Ergebnis von FE-BGDK ohne Imperfektion für  $n$  Elemente,  $v_{En}$  das Ergebnis mit Vorverformung über skalierte Eigenvektoren. Die Skalierung erfolgt mit dem Wert 0,75 cm (Verschiebung senkrecht zur Zeichenebene an der Kragarmspitze). Auch hier liegt die Untersuchung mit acht Elementen nahe bei der konvergierten Lösung.

### 9.4.2 Kragträgerende mit seitlicher Stützung

Der Querschnitt ist an der Einspannung wölbbehindert und auf der rechten Seite seitlich durch einen Verband gehalten. Gleichzeitig ist eine Verdrillung am Kragende behindert. Daraus resultieren die Randbedingungen.

Linkes Lager:  $u = v = w = \varphi_x = \varphi_y = \varphi_z = \omega = 0$

Rechtes Lager:  $v = \varphi_x = 0$

| Lastangriff      | $v$    | $v_E$  | $v_{\text{Petersen}}$ |
|------------------|--------|--------|-----------------------|
| oben (a)         | 68,75  | 67,25  | 67,10                 |
| Schwerpunkt (b)  | 90,56  | 87,75  | 91,51                 |
| unten (c)        | 114,50 | 110,30 | 115,9                 |
| untergehängt (d) | 146,30 | 140,50 | 149,5                 |

Die  $v$ -Werte stellen die Ergebnisse von FE-BGDK ohne Vorverformung für acht Elemente dar,  $v_E$  das Ergebnisse mit Imperfektion über skalierte Eigenvektoren. Wie man sieht, spielt hier die Vorverformung keine entscheidende Rolle.

Die Werte für den Lastfaktor  $v$ , die in PETERSEN [2] aus Kippnomogrammen folgen, werden in FE-BGDK bereits bei acht Elementen mit einer maximalen Abweichung von 3 % ermittelt.

## 9.5 Träger mit Gleichlast

Bei diesem Beispiel aus PETERSEN [2], Seite 731 wird der kritische Lastfaktor  $v$  ermittelt.

### System

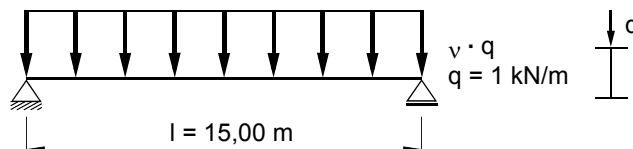


Bild 9.5: System und Belastung

Querschnittswerte und Material: HEB 800, Stahl S235

Das System ist an beiden Rändern gabelgelagert, aber nicht wölbbehindert. Daraus resultieren folgende Randbedingungen:

Linkes Lager:  $u = v = w = \varphi_x = 0$

Rechtes Lager:  $v = w = \varphi_x = 0$

Die Gleichlast  $q$  greift am Obergurt, im Schwerpunkt und am Untergurt des Trägers an.

FE-BGDK liefert folgende Lastfaktoren  $v$  bzw.  $v_E$  mit einer Vorverformung von  $l/400$ .

| Lastangriff | $v$   | $v_E$ | $v_{\text{Petersen}}$ |
|-------------|-------|-------|-----------------------|
| oben        | 37,63 | 37,13 | 39,50                 |
| Schwerpunkt | 46,88 | 45,88 | 48,61                 |
| unten       | 58,25 | 57,75 | 57,73                 |

## 9.6 Durchlaufträger mit zwei Einzellasten

Für folgenden Zweifeldträger finden sich Berechnungen in LINDNER [6] und DICKEL et al. [4]. Die beiden Einzellasten der Größe  $F = 37,5 \text{ kN}$  greifen beide jeweils in Feldmitte im Profilschwerpunkt an.

### System

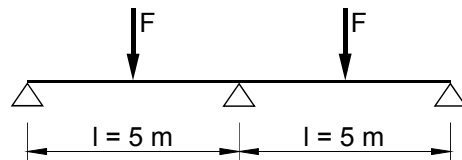


Bild 9.6: System und Belastung

Querschnittswerte und Material: IPE 200, Stahl S235

Der Träger ist an allen Lagern gabelgelagert. Dies führt zu folgenden Randbedingungen:

Linkes Lager:  $u = v = w = \varphi_x = 0$

Mittleres Lager:  $v = w = \varphi_x = 0$

Rechtes Lager:  $v = w = \varphi_x = 0$

Die Berechnung wird mit acht Elementen durchgeführt. Es ergeben sich folgende Werte für das ideale Biegedrillknickmoment  $M_{Ki,y}$  in [kNm] über dem mittleren Lager.

| $M_{Ki,y}$ Lindner | $M_{Ki,y}$ Dickel | $M_{Ki,y}$                 | $M_{Ki,y}$ E               |
|--------------------|-------------------|----------------------------|----------------------------|
| 51,24              | 51,06             | $1,46 \cdot 35,16 = 51,33$ | $1,43 \cdot 35,13 = 50,24$ |

Die Ergebnisse von FE-BGDK stimmen sehr gut mit denen von [4] und [6] überein.

Zur Ermittlung von  $M_{Ki,y E}$  wurde als Vorverformung der Wert  $l/400$  angenommen.

## 9.7 Durchlaufträger mit Gleichlasten

In DICKEL et al. [4] werden die idealen Biegedrillknickmomente für folgenden Zweifeldträger ermittelt. Die Streckenlast der Größe  $q = 10 \text{ kN/m}$  wirkt konstant auf dem gesamten Träger. Sie greift am Obergurt im Abstand von 14,5 cm vom Profilschwerpunkt an.

### System

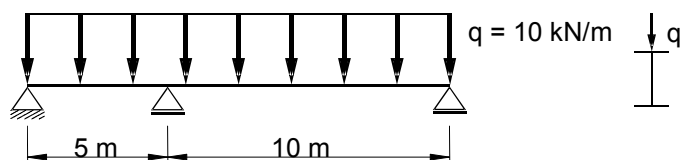


Bild 9.7: System und Belastung

Querschnittswerte und Material: HEA 300, Stahl S235

Der Träger ist an allen Lagern gabelgelagert. Dies führt zu folgenden Randbedingungen:

Linkes Lager:  $u = v = w = \varphi_x = 0$

Mittleres Lager:  $v = w = \varphi_x = 0$

Rechtes Lager:  $v = w = \varphi_x = 0$

Die Berechnung wird mit 18 Elementen durchgeführt. Am mittleren Lager ergeben sich folgende Werte für das ideale Biegedrillknickmoment  $M_{Ki,y}$  und die zugehörige Gleichstreckenlast  $q_{Ki,z}$ .

|                   | DICKEL et al. [4] | FE-BGDK | PETERSEN [2] | ROIK et al. [3] |
|-------------------|-------------------|---------|--------------|-----------------|
| $q_{Ki,z}$ [kN/m] | 42,84             | 43,0    | 35,86        | 37,08           |
| $M_{Ki,y}$ [kNm]  | 401,6             | 403,2   | 336,2        | 347,58          |

Die Ergebnisse von FE-BGDK stimmen sehr gut mit denen von [4] überein.

Die Berechnung der Spannungen am vorverformten System liefert maximale Vergleichsspannungen für verschiedene Streckenlastwerte. Ferner bestimmt FE-BGDK die maximale Gleichstreckenlast, bei der die Spannung  $\sigma_v = 24 \text{ kN/cm}^2$  noch eingehalten wird.

| $q$ [kN/m] | $\max \sigma_v$ [kN/cm <sup>2</sup> ] |
|------------|---------------------------------------|
| 10         | 7,54                                  |
| 20         | 18,49                                 |
| 28,9       | 24,0                                  |

Eine analytische Vergleichsrechnung mit den in [9] angegebenen Formeln ergibt ( $r_y = z_M = 0$ ) für das ideale Feldmoment:

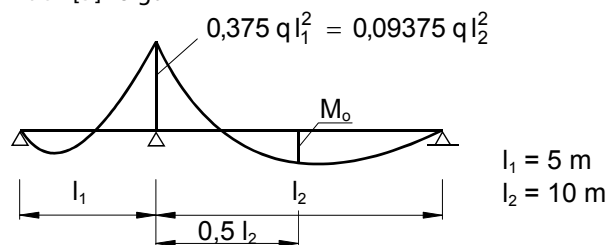
$$M_{Ki,y} = \zeta \frac{\pi^2 E I_z}{l^2} \left( \sqrt{0,25 z_p^2 + c^2} + 0,5 z_p \right) = 28965 \text{ kNcm} = 289,65 \text{ kNm}$$

mit  $\zeta = 1,08$  (siehe unten) und  $z_p = -14,5 \text{ cm}$  und

$$c^2 = \frac{I_\omega}{I_z} + \frac{l^2 G I_T}{\pi^2 E I_z} = \frac{1200000}{6310} + \frac{1000^2 \cdot 8100 \cdot 85,2}{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 6310} = 717,9 \text{ cm}^2$$

Der  $\zeta$ -Wert nach [3] stellt den Korrekturfaktor dar, mit dem die Lösung  $M_{Ki,y}$  eines beidseitig gabelgelagerten, durch gleiche Endmomente beanspruchten Stabes zu multiplizieren ist.

Nach [3] folgt:



$$M_o = q \frac{l_2^2}{8} - \frac{0,09375}{2} q l_2^2 = 0,078125 q l_2^2$$

$M_o$  wurde in [3] zur Berechnung von  $v_{Ki}$ , d. h.  $M_{Ki}$  herangezogen, das in [3] angegebene ideale Biegedrillknickmoment ist also auf die Feldmitte Feld 2 bezogen!

$$\chi = \frac{EI_{\omega}}{l^2 GI_T} = \frac{21000 \cdot 1200 \cdot 10^3}{(1000)^2 \cdot 8100 \cdot 85,2} = 0,037$$

Tafel 5.23 [3]

$$\bar{M} = -\frac{ql_2^2}{8} = \psi M_{\text{Stütze}} = \psi \cdot (-0,09375) q \cdot l_2^2$$

$$\Rightarrow \psi = 0,09375 \cdot 8 = 0,75 \quad \Rightarrow \zeta \cong 1,08$$

Damit beträgt das ideelle Stützenmoment als das maximale Moment, das sowohl von FE-BGDK als auch von DICKEL [4] berechnet wird:

$$M_{K_i, y \text{ Feld}} = 0,078125 q_{ki} \cdot 10^2 = 289,65$$

$$\Rightarrow q_{ki} = 37,08 \text{ kN/m}$$

$$M_{K_i, \text{Stütze}} = 0,09375 \cdot 37,08 \cdot 10^2 = 347,58 \text{ kNm}$$

Nach Petersen [2], Tafel 7.23 ergeben sich für das Endfeld eines Durchlaufträgers mit  $0,09375/0,125 \cdot 100 = 75\%$  Einspannungsgrad folgende idealen Werte:

$$\mu = \frac{EI_{\omega}}{l^2 GI_T} = 0,0365, \quad \chi = +\left(\frac{z_p}{l}\right)^2 \frac{EI_z}{GI_T} = 0,04$$

$$\Rightarrow \gamma_{ki} \cong 37,5 \quad \Rightarrow q_{ki} = \frac{\gamma_{ki}}{l^3} \sqrt{EI_z GI_T} = 35,86 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\Rightarrow M_{ki} (\text{Stütze}) = 0,09375 \cdot 35,86 \cdot 10^2 = 336,2 \text{ kNm}$$

Die nach [3] bzw. [4] ermittelten idealen Werte sind kleiner als die hier ermittelten, da in die analytischen Formeln die Stützeffekte durch die Wölbbehinderung des ersten Feldes nicht eingehen.

## 9.8 Dreifeldträger mit Gleichlasten

In PETERSEN [1], Seite 405 und DICKEL et al. [4] werden die idealen Biegedrillknickmomente eines Durchlaufträgers ermittelt. Die Streckenlast der Größe  $q = 30,5 \text{ kN/m}$  wirkt im ersten Fall konstant auf dem gesamten Träger. Sie greift am Obergurt im Abstand von 18 cm vom Profilschwerpunkt an.

### System mit gleichen Lasten

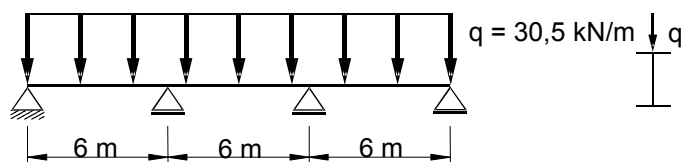


Bild 9.8: System und Belastung

Querschnittswerte und Material: IPE 360, Stahl S235

Der Träger ist an allen Lagern gabelgelagert. Dies führt zu folgenden Randbedingungen:

Linkes Lager:  $u = v = w = \varphi_x = 0$

Mittleres Lager:  $v = w = \varphi_x = 0$

Rechtes Lager:  $v = w = \varphi_x = 0$

Die Berechnung wird mit 18 und mit 72 Elementen durchgeführt. Am mittleren Lager ergeben sich folgende Werte für das ideale Biegedrillknickmoment  $M_{Ki,y}$  und die zugehörige Gleichstreckenlast  $q_{Ki,z}$ .

|                   | PETERSEN [1] | DICKEL [4] | FE-BGDK<br>18 Elemente     | FE-BGDK<br>72 Elemente     |
|-------------------|--------------|------------|----------------------------|----------------------------|
| $q_{Ki,z}$ [kN/m] | 45,32        | 48,8       | $1,30 \cdot 35,5 = 44,0$   | $1,20 \cdot 35,5 = 42,6$   |
| $M_{Ki,y}$ [kNm]  | 163,2        | 175,7      | $1,66 \cdot 109,8 = 182,3$ | $1,63 \cdot 109,8 = 179,0$ |

Die Ergebnisse von FE-BGDK stimmen sehr gut mit denen von [1] und [4] überein.

Für eine Vorverformung von  $l/400 = 600/400 = 1,5$  cm erhält man bei der vorgegebenen Streckenlast die maximale Vergleichsspannung  $\sigma_v = 16,7$  kN/cm<sup>2</sup>. Bei einer Beschränkung auf  $\sigma_v = 24$  kN/cm<sup>2</sup> beträgt die maximal aufnehmbare Last  $q_{\max} = 42,6$  kN/m.

### System mit verschiedenen Lasten

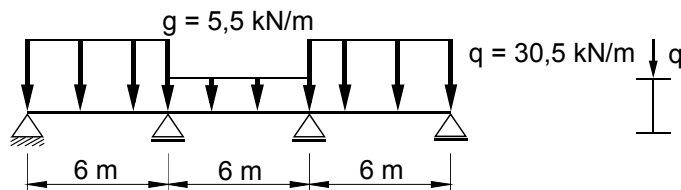


Bild 9.9: System und Belastung

Im zweiten Fall wird das mittlere Feld anstelle von  $q = 30,5$  kN/m durch eine reduzierte Streckenlast von  $g = 5,5$  kN/m belastet.

Für diese Belastung ergeben sich folgende idealen Biegedrillknickmomente. In diesem Fall ist nicht das Stützenmoment, sondern das Feldmoment der äußeren Felder maßgebend.

|                  | PETERSEN [1] | DICKEL et al. [4] | FE-BGDK                    |
|------------------|--------------|-------------------|----------------------------|
| $M_{Ki,y}$ [kNm] | 137,8        | 162,24            | $1,59 \cdot 104,8 = 166,6$ |

Die Ergebnisse von FE-BGDK stimmen mit denen von [1] und [4] überein. Sie sind  $\approx 5$  % größer als die in [4] angegebenen. Die in [1] angegebenen Werte liegen stark auf der sicheren Seite, weil dort die Wölbbehinderungen über den Stützen sowie die Stützeffekte durch die Wölbbehinderung des weniger stark belasteten Nachbarfeldes vernachlässigt wurden.

Für eine Vorverformung von  $l/400 = 600/400 = 1,5$  cm erhält man bei der vorgegebenen Streckenlast eine maximale Vergleichsspannung  $\sigma_v = 20,08$  kN/cm<sup>2</sup>. Bei einer Beschränkung auf  $\sigma_v = 24$  kN/cm<sup>2</sup> beträgt die maximal aufnehmbare Last  $q_{\max} = 1,10 \cdot 30,5 = 33,55$  kN/m und die maximal aufnehmbare Last  $q_{\max} = 1,10 \cdot 5,5 = 6,05$  kN/m.

## 9.9 Gebetteter Träger mit Normalkraft

Ein gabelgelagerter Träger ist seitlich am Obergurt gehalten und zusätzlich drehelastisch gelagert. Die analytische Lösung kann der Veröffentlichung von WITTEMANN [11] entnommen werden, in der die ideale Biegedrillknicklast eines drehelastisch gebetteten Druckstabes mit gebundener Drehachse bestimmt wird. Die dort berechneten Werte für  $N_{Ki,y}$  werden mit den Ergebnissen von FE-BGDK verglichen. Dazu wird das folgende System betrachtet.

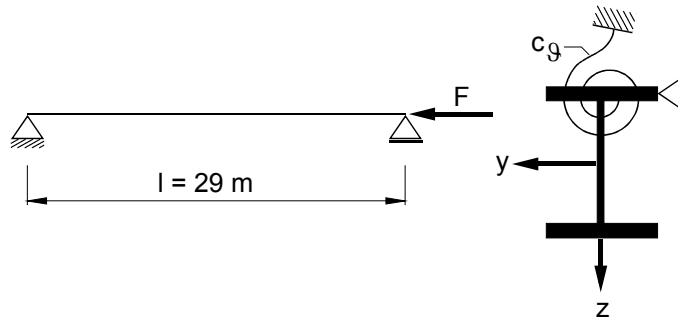


Bild 9.10: System und Belastung

Querschnittswerte und Material: IPE 400, Stahl S235

Der Träger ist beidseits gabelgelagert, aber nicht wölbbehindert. Es liegen somit folgende Randbedingungen vor:

Linkes Lager:  $u = v = w = \varphi_x = 0$

Rechtes Lager:  $v = w = \varphi_x = 0$

Der Träger ist am Obergurt seitlich durch eine Aussteifung gehalten. Diese seitliche Halterung wird in FE-BGDK durch eine sehr steife Federung realisiert. Weiterhin liegt eine Drehbettung von  $c_y = 9,936 \text{ kNm/m}$  vor.

Die Berechnung in FE-BGDK, die ohne Vorverformung abläuft, liefert zunächst den Wert

$$N_{Ki,y} = 100 \cdot 5,7 = 570,0 \text{ kN}.$$

Dieses Ergebnis entspricht jedoch der Knicklast um die starke Achse:

$$N_{Ki,y} = \frac{21000 \cdot 23130 \cdot \pi^2}{2900^2} = 570,0 \text{ kN}$$

Dieser Wert wird automatisch von FE-BGDK mit ermittelt, falls er geringer als die Biegedrillknicklast ist. Durch Einführen eines vertikalen Lagers, d. h.  $w(l/2) = 0$ , in Trägermitte wird diese Knicklast vervierfacht, ohne dass sich die Biegedrillknicklast ändert. Jetzt liefert das Programm folgenden Wert:

$$N_{Ki,y} = 100 \cdot 22,78 = 2278 \text{ kN}$$

Diese Knicklast ist in relativ guter Übereinstimmung mit dem Ergebnis des analytischen Verfahrens nach WITTEMANN [11]. Dort wird für dieses Beispiel  $N_{Ki,y} = 1941,1 \text{ kN}$  angegeben.

Damit ist also erkennbar, dass durchaus auch das Biegeknicken maßgebend sein kann. Für FE-BGDK ist die Ursache des Stabilitätsverlusts jedoch nicht entscheidend, das Programm liefert den jeweils kleinsten Wert für das Versagen.

## 9.10 Dachträger Bürogebäude

Die Dachträger eines Bürogebäudes sind im Abstand von 5,0 m angeordnet. Sie werden durch ein aufliegendes Trapezblech Thyssen T135.1 - 0,75 und einen angeschlossenen Kreuzverband ausgesteift.

Die Schubfeldlänge des Trapezblechs beträgt  $l_s = 20$  m. Der Kreuzverband besteht aus nur einem Feld mit gekreuzten Diagonalen und zwei Pfosten. Der Neigungswinkel der Diagonale beträgt demnach  $\alpha = \arctan(5,0/7,75) = 32,8^\circ$ .

### System

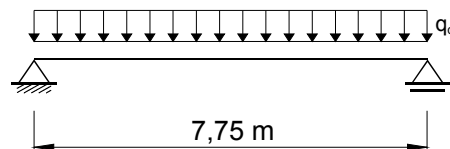


Bild 9.11: System und Belastung

Querschnittswerte und Material: IPE 270, Stahl S235

Aufgrund der Querkraftanschlüsse mittels Stirnplatten an die seitlich gehaltenen Stützen (durch Vertikalverband) kann von einer beidseitigen Gabellagerung des Trägers ausgegangen werden. Es liegen folgende Lagerungsbedingungen vor:

Linkes Lager:  $u = v = w = \varphi_x = 0$

Rechtes Lager:  $v = w = \varphi_x = 0$

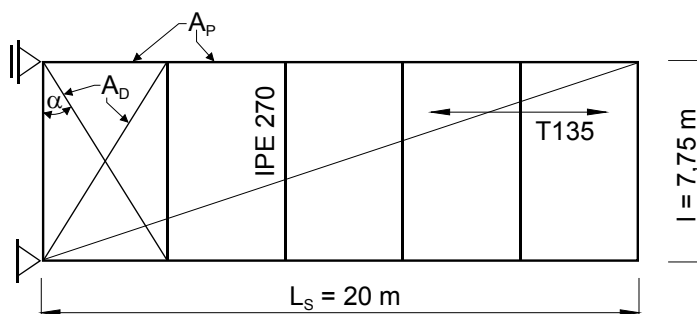


Bild 9.12: Träger in Dachebene

Durch das Trapezblech ist der Dachträger in Höhe seines Obergurts seitlich elastisch gestützt und drehelastisch gefedert.

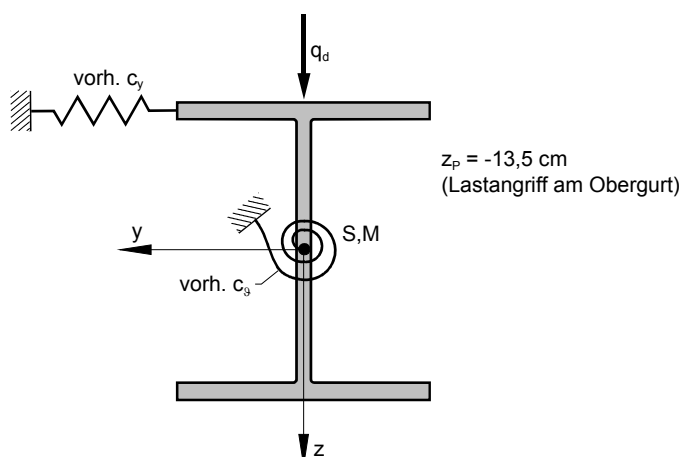


Bild 9.13: Lagerung des Trägers und Lastansatz

Die Bemessungslast aus Eigengewicht und Schnee beträgt:

$$q_d = 1,35 g + 1,5 p = 11,79 \text{ kN/m}$$

### Ermittlung der Horizontalfeder

Die Berechnung der Federkonstanten für die Schubsteifigkeit aus dem Dachverband ist im Kapitel 2.5.2 auf Seite 28 sowie in [2] und [9] beschrieben.

Kontinuierliche seitliche Wegfeder:

$$c_y = \text{vorh } S_a \frac{\pi^2}{l^2} = 1158 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Da das Trapezblech nur in jeder 2. Sicke befestigt ist, darf  $S_T$  nur mit 1/5 bei der Gesamtschubsteifigkeit angesetzt werden.

$$\text{vorh } S_a = \frac{1}{5} S_T + S_R$$

### Verband

$$S_R = m \cdot \frac{a}{l_s} \cdot S_V = 3347 \text{ kN}$$

mit  $m = 1$

ein Verband

$$a = 5,0 \text{ m}$$

$$l_s = 20,0 \text{ m}$$

$$S_V = \frac{a^2 \cdot b \cdot E}{\left( \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{A_D} \right)^3 + \frac{a^3}{A_P}} = 13389 \text{ kN}$$

$$a = 500 \text{ cm}$$

$$b = 750 \text{ cm}$$

$$E = 21000 \text{ kN/cm}^2$$

$$A_D = 2,63 \text{ cm}^2$$

$$A_P = 8,00 \text{ cm}^2$$

Diagonalenfläche

Pfostenfläche

### Trapezblech

$$S_T = \frac{a}{100} \cdot G_S = 16250 \text{ kN}$$

$$\text{mit } G_S = \frac{10^4}{k_1 + 100 \cdot \frac{k_2}{l_s}} = 3252 \text{ kN/m}$$

Ideeller Schubmodul

$$k_1 = 0,275 \text{ m/kN}$$

$$k_2 = 56 \text{ m}^2/\text{kN}$$

$$l_s = 20 \text{ m}$$

Die Feder  $c_y$  wird am Obergurt seitlich angesetzt.

### Ermittlung der Drehfeder

Die Berechnung der Federkonstanten aus dem aufliegenden Trapezblech ist im Kapitel 2.5.1 auf Seite 26 sowie in [2], [8] und [9] beschrieben.

$$\frac{1}{\text{vorh } c_{9,k}} = \frac{1}{c_{9M,k}} + \frac{1}{c_{9A,k}} + \frac{1}{c_{9P,k}} = \frac{1}{499} + \frac{1}{5,23} + \frac{1}{59,6} = 0,20999$$

$$\Rightarrow \text{vorh } c_{9,k} = 4,76 \frac{\text{kNcm}}{\text{cm}}$$

### Abstützendes Bauteil

Die Drehbettung aus der Biegesteifigkeit  $I_a = 297 \text{ cm}^4/\text{m}$  des Trapezblechs ( $k = 4$  für Durchlaufträger mit drei Feldern) ermittelt sich wie folgt:

$$c_{9M,k} = \frac{EI_a}{a} \cdot k = \frac{21000 \cdot 2,97}{500} \cdot 4 = 499 \frac{\text{kNcm}}{\text{cm}}$$

### Profilverformung

Die Drehbettung aus der Profilverformung des gestützten Trägers ermittelt sich wie folgt:

$$c_{9P,k} = \frac{E}{4 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \frac{1}{\frac{h_m}{s^3} + 0,5 \cdot \frac{b_1}{t_1^3}} = \frac{21000}{4 \cdot (1 - 0,3^2)} \cdot \frac{1}{\frac{27 - 1,02}{0,66^3} + 0,5 \cdot \frac{13,5}{1,02^3}} = 59,6 \frac{\text{kNcm}}{\text{cm}}$$

mit  $b_1$  Flanschbreite des Druckgurtes

### Anschlussverformung

Die Drehbettung aus der Verformung des Anschlusses wird für  $1,25 \leq b_1/10 \leq 2,0$  wie folgt ermittelt:

$$c_{9A,k} = \bar{c}_{9,Ak} \cdot 1,25 \cdot \frac{b_1}{10} = 3,1 \cdot 1,25 \cdot \frac{13,5}{10} = 5,23 \frac{\text{kNcm}}{\text{cm}}$$

mit  $\bar{c}_{9,Ak}$  Charakteristischer Wert für Anschlusssteifigkeit nach Tabelle 7 [8]

### Wahl der Eigenform

Die Berechnung des elastisch gestützten Trägers erfolgt nach Theorie II. Ordnung am imperfekten System. Dabei wird eine Vorverformung in Richtung  $y$  mit folgendem Parabelstich (siehe Kapitel 2.6.2, Seite 37) angesetzt:

$$v_0 = 0,5 \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{l}{250} = \frac{l}{750} = 1,03 \text{ cm}$$

Dieser Wert ergibt sich nach Tabelle 3 [8] für die Knickspannungslinie  $b$  und den Reduktionen nach Element (201) und (202) [8].

In diesem Beispiel werden die Eigenformen verglichen, um den maßgebenden Eigenwert zu finden (siehe folgendes Bild).

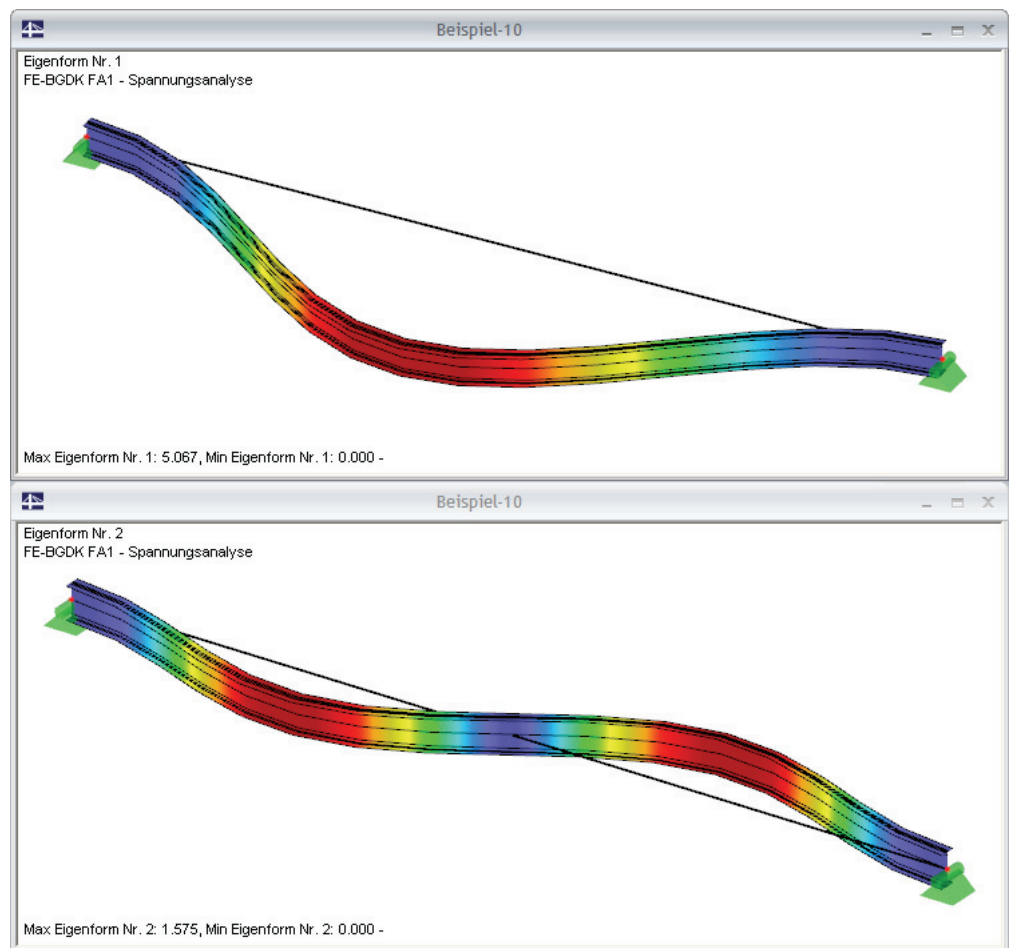


Bild 9.14: Erste und zweite Eigenform

Anhand der Grafik der Eigenformen wird deutlich, dass der erste Eigenwert maßgebend ist.

### Ermittlung des Stichmaßes

Für die beiden Eigenformen werden unterschiedliche Stichmaße relevant.

Eigenform Nr. 1:

$$v_0 = 0,5 \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{l}{250} = \frac{775}{750} = 1,03 \text{ cm}$$

Eigenform Nr. 2:

$$v_0 = 0,5 \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{l}{250} = \frac{0,5 \cdot 775}{750} = 0,517 \text{ cm}$$

Für die zweite Eigenform wird nur die Länge einer Halbwelle als Bezugsmaß angesetzt.

In folgender Tabelle sind die Vergleichsspannungen, die sich mit den unterschiedlichen Eigenformen und Stichmaßen ergeben, gegenübergestellt.

|                                  | Eigenform Nr. 1 | Eigenform Nr. 2 |
|----------------------------------|-----------------|-----------------|
| $\sigma_v$ [kN/cm <sup>2</sup> ] | 21,25           | 20,50           |

### 9.11 Träger mit exzentrischer Gleichlast

Es wird ein Stahlträger unter Doppelbiegung nach Theorie II. Ordnung berechnet. Die Normalspannung im Spannungspunkt Nr. 1 wurde von PETERSEN [2] in Tafel 7.29 analytisch berechnet. Die Lasten greifen 5 cm oberhalb des Obergurts an.

## System

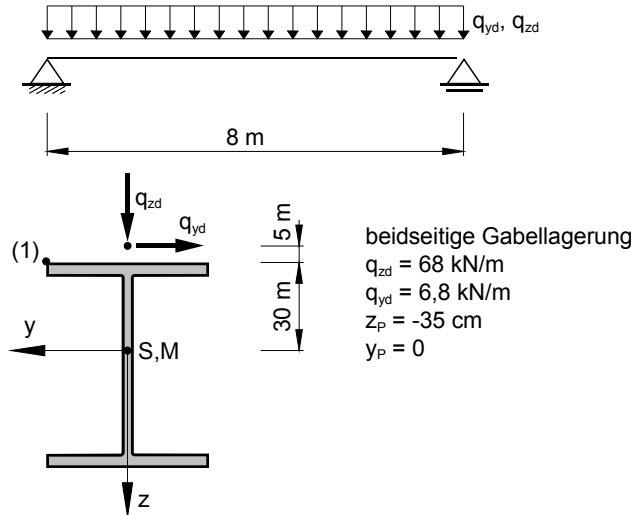


Bild 9.15: System und Belastung

Querschnittswerte und Material: HEB 600, Stahl S235

Als Imperfektion wird eine Vorverformung in Richtung der Stabachse  $y$  mit folgendem Stich angesetzt (vgl. Tabelle 3 in [8]):

$$v_0 = 0,5 \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{l}{250} = 1,07 \text{ cm}$$

Die Berechnung wird mit acht Elementen durchgeführt. Es ergeben sich folgende Spannungen und Verdrehungen:

|                                         | PETERSEN [2]          | FE-BGDK             |
|-----------------------------------------|-----------------------|---------------------|
| $\sigma_x$ in (1) [kN/cm <sup>2</sup> ] | 22,55                 | 24,79               |
| Verdrehung $\varphi_x$ in l/2           | $3,645 \cdot 10^{-2}$ | $4,9 \cdot 10^{-2}$ |

# A Literatur

- [1] PETERSEN, C.: Stahlbau, Vieweg und Sohn, Braunschweig/Wiesbaden, 3. Auflage 1993
- [2] PETERSEN, C.: Statik und Stabilität der Baukonstruktionen, Vieweg und Sohn, Braunschweig/Wiesbaden, 2. Auflage 1982
- [3] ROIK, K./ CARL, J./ LINDNER, J.: Biegetorsionsprobleme gerader dünnwandiger Stäbe, Ernst und Sohn, Berlin/München/Düsseldorf, 1971
- [4] DICKEL, T./ KLEMENS, H.-P./ ROTHERT, H.: Ideale Biegedrillknickmomente, Vieweg und Sohn, Braunschweig/Wiesbaden 1991
- [5] SCHNEIDER Bautabellen, 17. Auflage, Werner Verlag, 2006
- [6] LINDNER, J.: Biegedrillknicken in Theorie, Versuch und Praxis. Berichte aus der Forschung und Entwicklung (DAST Heft 9/1980), Stahlbau-Verlags-GmbH, Köln 1980
- [7] DIN 18 800 Teil 1: Stahlbauten - Bemessung und Konstruktion, 1990
- [8] DIN 18 800 Teil 2: Stahlbauten - Stabilitätsfälle, Knicken von Stäben und Stabwerken, 1990
- [9] Handbuch BGDK (Software für Biegedrillknicksicherheitsnachweis nach DIN 18800, Teil 1 und 2), Ing.-Software DLUBAL GmbH, Tiefenbach 2009
- [10] RAMM, E./ HOFMANN, T. J.: Stabtragwerke. Der Ingenieurbau, Baustatik/Baudynamik, Ernst und Sohn, Berlin 1996
- [11] WITTEMANN, K.: Ideale Biegedrillknicklast für einen drehgebeteten Druckstab mit gebundener Achse. Stahlbau 61 (1992), 125-126
- [12] DIN 18807: Stahltrapezprofile, 1987
- [13] LINDNER, J.: Stabilisierung von Biegeträgern durch Drehbettung - eine Klarstellung. Stahlbau 56 (1987), 365-373
- [14] LINDNER, J./ SCHEER, J./ SCHMIDT, H.: Stahlbauten - Erläuterungen zu DIN 18 800 Teil 1 bis 4, Beuth, 2. Auflage 1994
- [15] OSTERRIEDER, P./ VOIGT, M./ SAAL, H.: Zur Neuregelung des Biegedrillknicknachweises nach EDIN 1880 Teil 2 (Ausgabe März 1988). Stahlbau 58 (1989), 341-347
- [16] Stahlbau Handbuch, Band 1, Stahlbau-Verlags-GmbH, Köln 1982
- [17] LINDNER, J./ GROESCHEL, F.: Drehbettungswerte für die Profilblechbefestigung mit Setzbolzen. Stahlbau 65 (1996), 218-224

# B Index

## A

|                                |        |
|--------------------------------|--------|
| Abstützendes Bauteil .....     | 26     |
| Aluminium .....                | 43     |
| Anfangs-Lastfaktor $\nu$ ..... | 75     |
| Anmerkung .....                | 45     |
| Anschlussverformung .....      | 27, 56 |
| Ausdruckprotokoll .....        | 97     |
| Ausnutzung .....               | 80     |
| Ausschnitt .....               | 95     |

## B

|                                      |             |
|--------------------------------------|-------------|
| Basisangaben .....                   | 40          |
| Bauteildicke .....                   | 79, 89      |
| Beenden von FE-BGDK .....            | 40          |
| Befestigungsart .....                | 55          |
| Belastung .....                      | 66          |
| Bemessungsfall .....                 | 91, 99, 100 |
| Benutzerprofil .....                 | 101         |
| Berechnung .....                     | 74          |
| Berechnung starten .....             | 75          |
| Berechnungsdetails .....             | 74          |
| Berechnungsfehler .....              | 77, 86      |
| Bezugslänge .....                    | 69, 73      |
| BGDK .....                           | 10          |
| Biegedrillknicken .....              | 10          |
| Biegedrillknickmoment $M_{Ki}$ ..... | 11, 34      |
| Biegeknicklast $N_{Ki}$ .....        | 11, 34      |
| Biegemoment .....                    | 82          |
| Biegetorsion .....                   | 12          |
| Bimoment $M_\Theta$ .....            | 67          |
| Blättern in Masken .....             | 40          |

## D

|                                 |            |
|---------------------------------|------------|
| Dezimalstellen .....            | 42, 101    |
| Diagonale .....                 | 55         |
| DIN 18800 .....                 | 32         |
| Drehbettung .....               | 26, 27, 53 |
| Drehbettungsbeiwert .....       | 56         |
| Drehfeder .....                 | 26, 62     |
| Drehradius .....                | 24         |
| Drillknicklast $N_{Ki,9}$ ..... | 11         |
| Drucken .....                   | 98         |

|                        |        |
|------------------------|--------|
| DUENQ-Profil .....     | 45     |
| Durchlaufwirkung ..... | 55, 58 |

## E

|                                    |            |
|------------------------------------|------------|
| Eigendefiniertes Profil .....      | 78         |
| Eigenform .....                    | 37, 71, 91 |
| Eigengewicht .....                 | 68         |
| Eigenwertanalyse .....             | 37, 74     |
| Eingeleitete Lasten .....          | 66, 68     |
| Einheiten .....                    | 42, 101    |
| Einspannung .....                  | 47, 61     |
| Einzellast .....                   | 18         |
| Elastische Bettung .....           | 52         |
| Elastisch-Elastisch .....          | 38, 73     |
| Ergebnisauswertung .....           | 87         |
| Ergebnisdiagramm .....             | 94         |
| Ergebnismasken .....               | 77         |
| Ergebnisse mehrfarbig .....        | 95         |
| Ergebnisse Rendering .....         | 95         |
| <i>Ergebnisse</i> -Navigator ..... | 91         |
| Ergebnisverläufe .....             | 94, 98     |
| Ergebniswerte .....                | 91         |
| Ersatzstabverfahren .....          | 10, 33     |
| Excel .....                        | 102        |
| Export Ergebnisse .....            | 101        |
| Exzentrizität .....                | 60, 63, 69 |

## F

|                          |                    |
|--------------------------|--------------------|
| Farbskala .....          | 95                 |
| FE-BGDK-Fall .....       | 75, 99             |
| Feder .....              | 12, 16, 47, 52, 61 |
| FE-Teilungslänge .....   | 74, 78             |
| Filter .....             | 95                 |
| Filtern von Stäben ..... | 96                 |
| Finite Elemente .....    | 12                 |

## G

|                           |                |
|---------------------------|----------------|
| Gebundene Drehachse ..... | 23, 25         |
| Gelenk .....              | 64             |
| Grafik .....              | 91             |
| Grafik drucken .....      | 98             |
| Grenzlaster $F_G$ .....   | 11, 22, 39, 74 |
| Grenzspannung .....       | 80             |

**H**

Hintergrundgrafik ..... 90

**I**

Imperfektionen ..... 37, 66, 71, 74

Inkrement ..... 75

Instabilität ..... 85

Installation ..... 8

Iterationen ..... 86

Iterationsangaben ..... 75

**K**

Kippen ..... 10

Knickeigenwert ..... 71

Knickspannungslinie ..... 73

Knotenkräfte ..... 67

Knotenlager ..... 46

Knotenlasten ..... 66

Knotenmomente ..... 67

Kommentar ..... 41, 60, 70

Konvergenz ..... 85

Koordinaten Spannungspunkt ..... 89

Korrekturfaktoren ..... 57

Kranbahnkonsole ..... 66

Kritischer Lastfaktor ..... 77, 85

**L**

Lagerkräfte ..... 84

Lastart ..... 68

Lastfall ..... 41, 66, 80, 82

Lastfallgruppe ..... 41, 66, 82

Lastfallkombination ..... 41

Lastrichtung ..... 69

Laststeigerung ..... 74

Lastverlauf ..... 69

Lindner/Groeschel ..... 56

**M**

Masken ..... 40

Material ..... 42

Materialbezeichnung ..... 42

Materialbibliothek ..... 43

Materialkennwerte ..... 42

**N**

Nachweis ..... 41

Navigator ..... 40

Nichtkontinuierliche Drehbettung ..... 26

Nichtrostender Stahl ..... 43

Normalkraft ..... 82

Normalspannungen  $\sigma$  ..... 21, 78

**O**

OpenOffice ..... 102

**P**

Panel ..... 9, 92, 95

Pfetten ..... 26, 58

Pfosten ..... 55

Profilreihen ..... 45

Profilverformung ..... 27, 59

Programmaufruf ..... 8

**Q**

Querkraft ..... 82

Querlast ..... 69

Querschnitte ..... 12, 20, 44

Querschnittsbezeichnung ..... 44

Querschnittsbibliothek ..... 44, 45

Querschnittsgrafik ..... 46

Querschott ..... 30

**R**

Randbedingungen ..... 20, 93

Reduktionsfaktor ..... 73

RSTAB ..... 83, 93

RSTAB-Arbeitsfenster ..... 90

**S**

Schaltflächen ..... 87

Schnittgrößen ..... 82

Schubfeld ..... 24, 54

Schubmittelpunkt ..... 19, 69

Schubspannungen  $\tau$  ..... 21, 22, 78

Seitliche Behinderung ..... 53

Selektion Ausdruck ..... 97

Sichtmodus ..... 90

Sicke ..... 23, 25

Skalierung ..... 93

Spannungen ..... 20, 77, 80

Spannungsbegrenzung ..... 74

Spannungsgrafik ..... 88

Spannungskomponenten ..... 91

Spannungsnachweis ..... 33, 80

Spannungspunkt ..... 20, 45, 69, 78, 79, 81, 89

|                           |                |
|---------------------------|----------------|
| Stabbettung .....         | 52             |
| Stabendfeder .....        | 60             |
| Stabengelenk .....        | 64             |
| Stabilitätsproblem .....  | 10, 77         |
| Stabilitätsverlust .....  | 74             |
| Stablasten .....          | 68, 69         |
| Stabliste .....           | 68             |
| Stabsatz .....            | 41, 68, 80, 85 |
| Stabverläufe .....        | 93             |
| Stabzug .....             | 41             |
| Starten von FE-BGDK ..... | 8              |
| Statisches Moment .....   | 79, 89         |
| Stelle x .....            | 78             |
| Steuerpanel .....         | 95             |
| Stichmaß .....            | 71, 72         |
| Stiel .....               | 73             |
| Stirnplatte .....         | 29, 48         |
| Streckenlast .....        | 19             |
| Stütze .....              | 31, 50         |
| Stützung .....            | 47, 61         |

## **T**

|                                         |            |
|-----------------------------------------|------------|
| Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_M$ ..... | 75         |
| Theorie II. Ordnung .....               | 10, 13, 32 |
| Torsion .....                           | 69         |
| Torsionsmoment .....                    | 82         |
| Trägerüberstand .....                   | 30, 51     |
| Traglast $F_T$ .....                    | 11, 39, 74 |
| Trapezblech .....                       | 55, 57     |
| Trapezprofil .....                      | 23, 25, 28 |

## **U**

|                |    |
|----------------|----|
| U-Profil ..... | 49 |
|----------------|----|

## **V**

|                                       |            |
|---------------------------------------|------------|
| Verband .....                         | 25, 28, 54 |
| Verdrehungen .....                    | 83         |
| Verformungen .....                    | 83         |
| Vergleichsspannungen $\sigma_v$ ..... | 22, 38, 78 |
| Verschiebungen .....                  | 83         |
| Verzweigungslast .....                | 11, 14, 34 |
| Verzweigungslastfaktor .....          | 32         |
| Visualisierung .....                  | 91         |
| Vorkrümmung .....                     | 37, 73     |
| Vorverdrehung .....                   | 37, 72     |
| Vorverformung .....                   | 11, 12, 37 |
| Vorzeichen Lagerkräfte .....          | 84         |
| Voute .....                           | 45, 74, 77 |

## **W**

|                            |                |
|----------------------------|----------------|
| Wegfeder .....             | 28, 62         |
| Winkelprofil .....         | 49             |
| Wölbeinspannung .....      | 47             |
| Wölbfeder $C_\omega$ ..... | 29, 31, 47, 63 |
| Wölbkrafttorsion .....     | 21             |
| Wölbtorsionstheorie .....  | 10             |
| Wölbung .....              | 79, 83, 89     |

## **X**

|                |            |
|----------------|------------|
| x-Stelle ..... | 78, 81, 82 |
|----------------|------------|

## **Z**

|                        |        |
|------------------------|--------|
| Zeigen-Navigator ..... | 91, 95 |
|------------------------|--------|