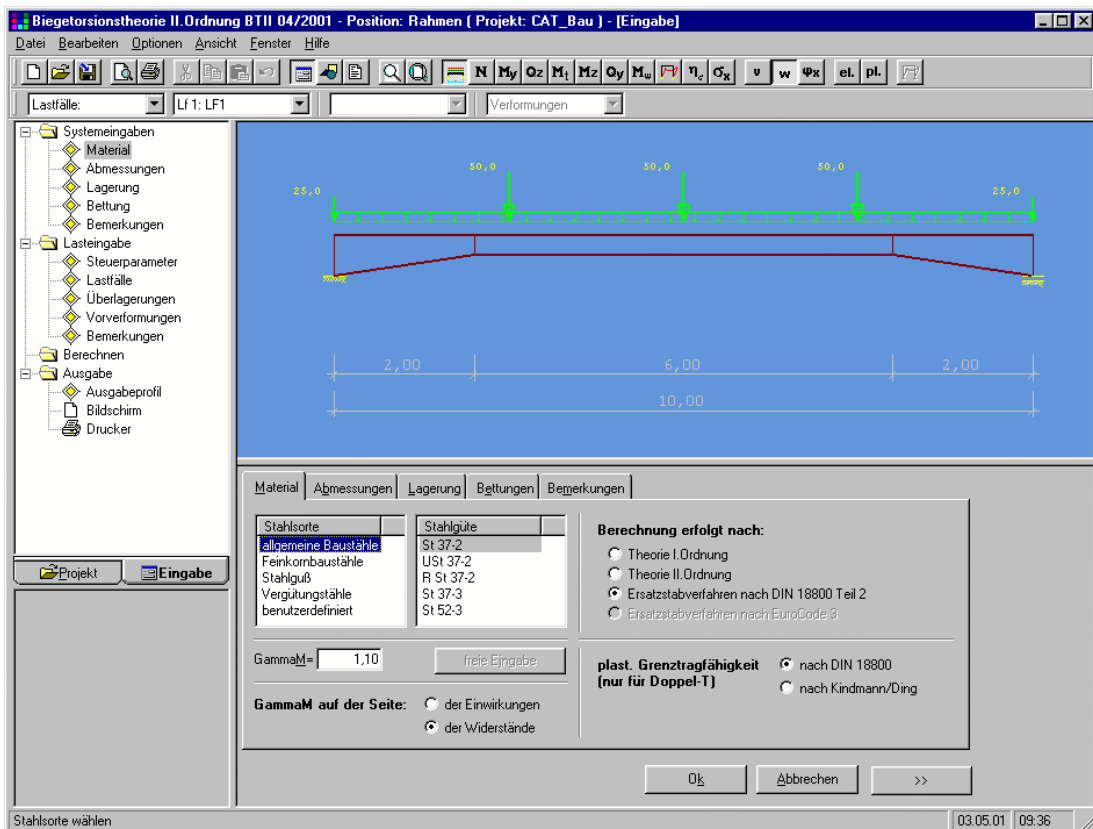


# Biegetorsionstheorie II. Ordnung BTII

Handbuch für Anwender von F+L-Statikprogrammen für Windows



© Friedrich + Lochner GmbH 2001

F+L im Internet

www.frilo.de

Email: info@frilo.de

BTII Handbuch, Revision 3/2001

## F+L-Windows-Programm: BTII

Die F+L-Windows-Programme sind mit einer weitgehend einheitlichen Oberfläche ausgestattet, so dass die grundlegenden Bedienungshinweise in diesem Handbuch zusammengefasst wurden. Die programmspezifische Bedienung wird jeweils in der Online-Hilfe der einzelnen Programme erläutert, die Sie über den Menüpunkt Hilfe aufrufen können.

### Inhaltsverzeichnis

<b>Anwendungsmöglichkeiten .....</b>	<b>5</b>
<b>Profiltypen alt/neu .....</b>	<b>8</b>
<b>Berechnungsgrundlagen.....</b>	<b>9</b>
<b>Finites Elementkonzept.....</b>	<b>9</b>
<b>Wölbkrafttorsion .....</b>	<b>11</b>
<b>Vereinbarungen.....</b>	<b>12</b>
<b>Systemeingaben.....</b>	<b>13</b>
<b>Materialeingabe.....</b>	<b>13</b>
Material nach DIN 18800 Teil 1 .....	13
Benutzerdefinierte Angabe der Werkstoffkennwerte .....	13
Berechnungsarten .....	14
Plastische Grenztragfähigkeit .....	14
<b>Abmessungen .....</b>	<b>15</b>
Querschnitt definieren.....	15
Profilauswahl .....	16
Querschnittsabmessungen .....	17
Doppel-T.....	17
Einfach-T .....	18
Rechteck-Profil .....	18
U-Profil .....	18
Doppel-T mit Obergurtwinkeln.....	19
Dünnwandig, offen .....	19
Querschnittswerte I A W .....	20
Querschnitt einem Feld zuordnen.....	21
Querschnitt ändern .....	21
Querschnittsänderungen - Sprünge - Vouten .....	21
<b>Lagerung .....</b>	<b>22</b>
<b>Bettung .....</b>	<b>23</b>
<b>Bemerkungen.....</b>	<b>24</b>
<b>Lasteingabe .....</b>	<b>25</b>
<b>Steuerparameter .....</b>	<b>25</b>

Lasteinleitung .....	25
Art der Einzellasten: Bewegte Lasten / Statische Lasten .....	25
<b>Lastfälle .....</b>	<b>26</b>
<b>Lasten .....</b>	<b>27</b>
Lastarten .....	29
<b>Überlagerungen .....</b>	<b>31</b>
<b>Vorverformungen (geometrische Ersatzimperfektion).....</b>	<b>32</b>
<b>Bemerkungen.....</b>	<b>33</b>
<b>Berechnung.....</b>	<b>34</b>
Berechnen - Elementierung .....	34
Minimale Elementausdehnung .....	34
Mindestelementanzahl am Träger.....	34
Diskretisierung des Systems .....	34
Dimensionen.....	35
<b>Ausgabe / Ergebnisse .....</b>	<b>36</b>
<b>Ausgabeprofil.....</b>	<b>36</b>
Tabellarische Ausgaben.....	36
Grafische Ausgaben.....	36
<b>Anzeige der Ergebnisgrafiken über Symbole .....</b>	<b>37</b>
<b>Auswahllisten-Leiste .....</b>	<b>37</b>
<b>Anwendungshinweise.....</b>	<b>39</b>
<b>Ermittlung der Federsteifigkeiten.....</b>	<b>39</b>
Pfetten mit drehelastischer Stützung durch die Dachhaut.....	39
Binder mit drehelastischer Stützung durch Pfetten .....	39
Binder mit elastischer Translationsstützung am Obergurt durch Pfetten.....	39
Binder mit elastischer Torsionsstützung durch die anschließende Stütze.....	40
Träger mit elastischer Wölbstützung .....	40
Träger mit Schubfeldstützung.....	41
<b>Biegedrillknicken mit gebundener Drehachse.....</b>	<b>42</b>
<b>Stabilitätsnachweise nach DIN 18800 T2.....</b>	<b>43</b>
Vereinfachter Biegedrillknicknachweis (Ersatzstabnachweis).....	44
Vereinfachter BDK-Nachweis: Allgemeine Hinweise.....	47
Tragfähigkeitsnachweise nach Th. II. Ordnung Elastisch-Elastisch und Elastisch-Plastisch .....	47
<b>Symmetrie und Antimetrie .....</b>	<b>49</b>
<b>Torsion bei Vollquerschnitten .....</b>	<b>49</b>
<b>Spannungsberechnung.....</b>	<b>50</b>
Spannungen nach Balkentheorie - globale Balkenspannungen .....	50
Lasteinleitungsspannungen - Spannungen aus örtlicher Trägerbeanspruchung .....	50

<b>Kippen von Biegeträgern nach DIN 1052.....</b>	<b>51</b>
Stabilisierung von Biegeträgern nach DIN 1052 Teil1 Kapitel 8.6.....	51
Der Kippschlankheitsgrad nach DIN 1052.....	51
Berechnung von $M_{yKi}$ mit dem Programm BTII.....	52
<b>Kranbahnträger mit BTII.....</b>	<b>54</b>
<b>Literatur .....</b>	<b>55</b>

# Anwendungsmöglichkeiten

*BTII* ermittelt an ebenen oder räumlich belasteten Krag-, Einfeld- oder Durchlaufträgern Schnittgrößen, Verformungen und Spannungen mit und ohne Vorverformungen nach Biegetorsionstheorie II. Ordnung mit Berücksichtigung der Wölbkrafttorsion sowie ideale Biegedrillknicklasten, Schlankheiten und Abminderungsfaktoren für den vereinfachten Biegedrillknicknachweis nach DIN 18800 T2.

## Anwendungsbereiche

Biegedrillknicknachweise mittels Spannungsnachweis Theorie II. Ordnung (Verfahren E - E oder E-P nach DIN 18800 T2) oder in Form eines vereinfachten Nachweises auf der Grundlage idealer Verzweigungslasten mit und ohne Normalkraft z.B. für:

- Pfetten (mit Bettung durch die Dachhaut)
- Riegel (mit Stützung durch die Pfetten) mit oder ohne Vouten
- Stützen (mit Stützung durch Wandverkleidung und/oder Verbände)
- Kranbahnträger (ohne/mit Horizontalverband)
- Verbandsstäbe
- Schlanke Spannbettbinder
- Schlanke Träger und Stützen im Holzbau, z.B. hohe Brettschichtträger

## Was kann *BTII*?

- *BTII* erhält die Querschnittswerte für warm gewalzte Profile der Reihen I, IPE, HE-A, HE-B, HE-M und U aus der Profildatenbank STDAT. Für einfachsymmetrische U- oder I-Querschnitte oder I-Querschnitte mit Obergurtwinkel ermittelt das Programm aus den Profilabmessungen die erforderlichen Querschnittsgrößen. Werte für beliebig asymmetrische, offene, dünnwandige und polygonal berandete Profile ermittelt *BTII* aus der Querschnittsgeometrie. Zusätzlich können Träger mit beliebigen benutzerdefinierten doppelt- oder einfachsymmetrischen Profilen berechnet werden.
- *BTII* gestattet die Erfassung veränderlicher Streckenlasten, Normalkräfte, Verschiebe- und Drehbettungen.
- Es können Kräfte, Momente und Wölbmomente als äußere Belastung möglich.
- Es können diskrete Federsteifigkeiten vorgesehen werden.
- Lasten und Federsteifigkeiten dürfen exzentrisch angreifen.
- Zur Berücksichtigung von Vorverformungen als Vorverkrümmungen in Richtung der beiden Querschnittshauptachsen oder als Vorverdrehungen um die Längsachse sind lediglich die Nullpunkte sowie die Amplituden der sinus- oder parabelförmigen Halbwellen zu spezifizieren.
- Querschnittssprünge, Vouten

## Einschränkungen

- Das Material verhält sich elastisch.
- Elastizitätsmodul und Schubmodul sind für den gesamten Träger konstant.
- Bei einfachsymmetrischen Querschnitten ist die z-Achse Symmetrieachse.
- Die finiten Elemente haben konstante Querschnitte.

## Bewegte Lasten

Knotenlasten können als 'Lastenzug' deklariert werden. Dieser Lastenzug wird programmintern über den betrachteten Träger 'geschoben'. Die Grenzlaststellungen für das in Fahrtrichtung vorderste Rad sind vom Anwender vorzugeben. Als Zielvorgabe für die maßgebende Laststellung können entweder minimale oder maximale Schnittgrößen oder die absolut größte Normalspannung gewählt werden. Letzteres ist möglich bei IPE, HEA, HEB, HEM, I-Querschnitten (früher

Typ 1-5), Doppel-T (früher Typ 9), Doppel-T mit Obergurtwinkel (früher Typ 16), Doppel-T ungleich (früher Typ 17) und U-Profil (früher Typ 18).

Siehe auch *Profiltypen alt/neu*, Seite 8

Für jede Laststellung wird eine lineare Berechnung des Trägers nach Biegetorsionstheorie II. Ordnung durchgeführt sowie Ort und Größe der entsprechenden Schnittgröße oder der maximalen Spannung ermittelt. Wird als Zielgröße für die maßgebende Laststellung die maximale Normalspannung gewählt, stehen dazu zwei alternative Kriterien zur Verfügung. Nach Vorgabe des Anwenders sind dies entweder die absolut größte Balkennormalspannung oder die absolut größte Spannung unter Berücksichtigung der unten beschriebenen Lasteinleitungsspannungen. Für die maßgebende Laststellung berechnet das Programm anschließend automatisch Verformungen, Schnittgrößen und Spannungen nach Theorie I. oder II. Ordnung.

### Örtliche Trägerbeanspruchung

Bei Unterflanschkränen sowie bei Kränen mit Unterflanschlaufkatzen greifen Kranrad- bzw. Katzlasten exzentrisch zum Trägersteg an. In der Umgebung des Lastangriffspunktes treten demzufolge sekundäre Flanschbiegespannungen in zwei Richtungen auf. Das Programm errechnet lokale Lasteinleitungsspannungen auf der Grundlage von [1] und überlagert diese nach der von-Mises-Fließbedingung mit den globalen Balkenspannungen.

### Koordinaten für Lager, Federn und konzentrierte Einzellasten

Die Punkte zur Ortsbezeichnung von Lagern, diskreten Federn, konzentrierten Lasten, Elementgrenzen sowie der Nullpunkte von Vorverformungshalbwellen werden durch Angabe der von x-Koordinaten definiert. Programmintern werden unter Lagern, Federn, Lasten und Vorverformungsnulppunkten Knoten generiert. Ist der nächstliegende Knoten weniger als der vom Anwender angegebene Wert für die minimale Elementausdehnung von der entsprechenden Stelle entfernt, wird kein Knoten eingefügt und die Koordinate wird in den nächstliegenden Knoten verschoben. Kann diese Verschiebung für den Nachweis nicht akzeptiert werden, ist anschließend die minimale Elementausdehnung entsprechend abzuändern und eine Neuberechnung durchzuführen.

### Veränderliche Querschnitte

Das Programm erlaubt die Kopplung asymmetrischer Querschnitte. Dabei ist zu beachten, dass bei unterschiedlichen Querschnittsformen die relative Lage von Schwerpunkt und Schubmittelpunkt nicht übereinstimmt. Da jedoch Schnittgrößen und Verformungen teils auf den Schwerpunkt und teils auf den Schubmittelpunkt bezogen sind, werden dabei streng genommen an den Knoten Verträglichkeit und Gleichgewicht verletzt! Bei gevouteten Trägern ist dies zu vernachlässigen.

### Profiltyp dünnwandig offen (früher Typ 20, siehe auch *Profiltypen alt/neu*, Seite 8)

Beliebig asymmetrischer, polygonal begrenzter, offener, dünnwandiger Querschnitt:

Damit ist die Definition eines beliebigen offenen Querschnittes (→ siehe Seite 19) in einem vom Benutzer gewählten lokalen Koordinatensystem möglich. Die Anzahl der Abschnitte (Segmente), aus denen der Querschnitt zusammengesetzt wird, ist derzeit auf 19 beschränkt. Die Eingabe von Elementlasten, Knotenlasten und elastischen Bettungen sind möglich. Diese werden in dem Lokalsystem komponentenweise eingegeben, in welchem der Querschnitt selbst definiert wurde.

### Torsionsträgheitsmoment

Bei der Ermittlung des St.Venantschen Torsionsträgheitsmomentes durch das Programm wird für die Profiltypen Doppel-T (früher 9'dsi'), Doppel-T mit Obergurtwinkeln (früher Typ 16), Doppel-T ungleich (früher Typ 17), U-Profil (früher Typ 18) und "dünnwandig, offen" (früher Typ 20) die Dickwandigkeit näherungsweise berücksichtigt.

Siehe auch *Profiltypen alt/neu*, Seite 8

## Systemgrafik mit Belastung

Die Darstellung des Systems mit Lasten und Randbedingungen zur Kontrolle der Benutzereingaben bereits bei der Eingabe ist jetzt möglich. Dazu kann im Systemmenü der Punkt Grafik gewählt werden.

## Vereinfachter Biegedrillknicknachweis

Um in Bereichen geringer und mittlerer Schlankheiten die im Vergleich zum Spannungsnachweis Theorie II.Ordnung (Verfahren E-E) höheren Tragfähigkeiten zu nutzen, bietet *BTII* jetzt die Möglichkeit für die in DIN 18800 T2 dafür zugelassenen Querschnitte und Belastungen einen vereinfachten Nachweis auf der Grundlage idealer Biegedrillknicklasten zu führen.

## Örtliche Trägerbeanspruchung

Örtliche Trägerbeanspruchungen durch den Betrieb von Unterflanschkränen wurden bisher auf der Grundlage experimenteller und theoretischer Untersuchungen von Hannover/Reichwald in *BTII* für die Profiltypen 1 ÷ 5 und 9 ('dsi') berücksichtigt. Künftig ist die Erfassung lokaler Lasteinleitungsspannungen und Überlagerung mit den globalen Spannungen nach Balkentheorie auch bei Profiltyp 17 (einfach symmetrischer I-Querschnitt) möglich.

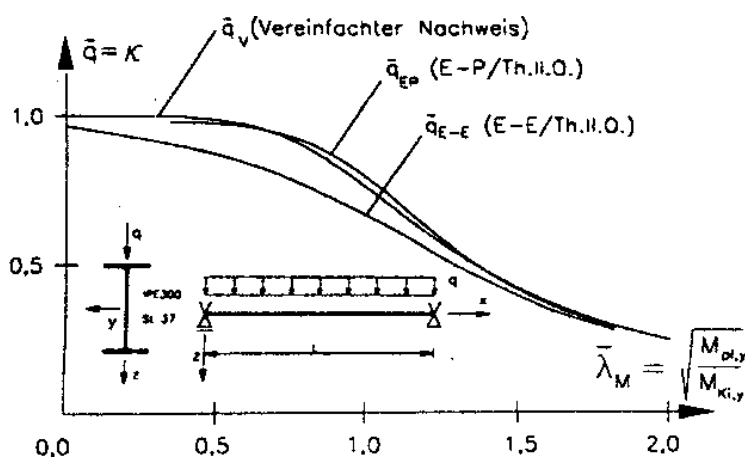
Siehe auch Profiltypen alt/neu, Seite 8

## Beliebige gewalzte I-Profile

Innerhalb der Profilgruppe 9 ('dsi') können beliebige - auch nicht in DIN 1025 enthaltene - doppelt symmetrische, gewalzte I-Querschnitte durch Angabe von Profilhöhe, Flanschbreite, Dicken und Ausrundungsradien definiert werden. Die ausgerundeten Bereiche werden bei Berechnung aller erforderlichen Querschnittsgrößen berücksichtigt.

## Tragfähigkeitsnachweis Elastisch - Plastisch (E-P)

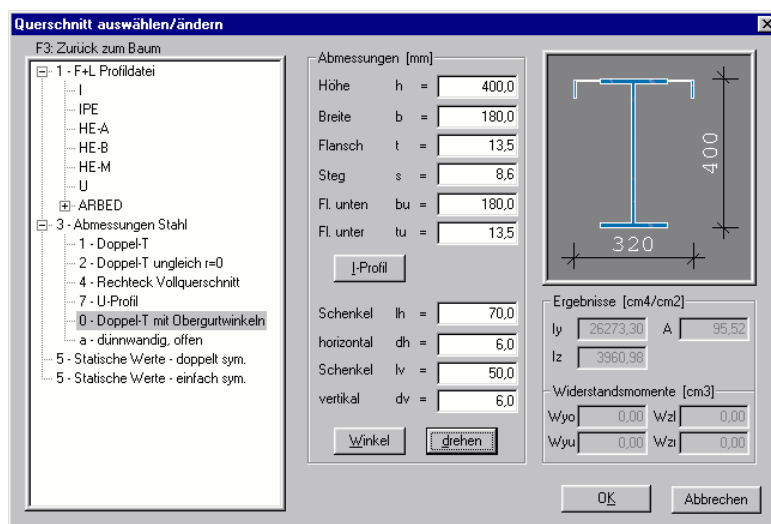
Diese Option erlaubt die Nutzung plastischer Tragfähigkeitsreserven im Rahmen eines Nachweises nach Theorie II.Ordnung. *BTII* ermittelt dazu im Anschluss an eine Berechnung des räumlich vorverformten Systems an jedem Elementende den Wert der Fließfunktion nach DIN 18800 T1 Gl.(41) und Gl.(42) mit der in [6] angegebenen Erweiterung für Wölbmomente. Ergänzend werden die in DIN 18800 T1 Element (757) vorgegebenen Grenzwerte für die bezogenen Querkräfte  $v_y = V_y/V_{pl,y}$  und  $v_z = V_z/V_{pl,z}$  bestimmt.



## Profiltypen alt/neu

In den früheren DOS-Versionen wurden die Profiltypen mit Nummern (Typ 1 bis Typ 20) bezeichnet. Anwender, die sich an die Typnummern gewöhnt haben, finden in diesem Kapitel die Gegenüberstellung "alte und neue Bezeichnung".

- Typ 1 **IPE** (DIN EN 10025, früher DIN 1025 T5 und Euronorm 19-57)  
Typ 2 **HEA** (DIN EN 10025, früher DIN 1025 T3 und Euronorm 53-62)  
Typ 3 **HEB** (DIN EN 10025, früher DIN 1025 T2 und Euronorm 53-62)  
Typ 4 **HEM** (DIN EN 10025, früher DIN 1025 T4 und Euronorm 53-62)  
Typ 5 **I** (DIN EN 10025, früher DIN 1025 T1)  
Typ 9 Benutzerdefinierter, allgemein doppelsymmetrischer Querschnitt  
**Heute:** Benutzerdefinierter Querschnitt unter "Abmessungen Stahl" – Doppel-T. Profile aus dem Walzprogramm der Firma TradeArbed-Luxemburg werden als Typ 9 verarbeitet  
Typ 16 Einfachsymmetrischer I-Querschnitt mit Obergurtwinkel  
**Heute:** Benutzerdefinierter Querschnitt unter "Abmessungen Stahl" – Doppel-T mit Obergurtwinkeln  
Typ 17 Einfachsymmetrischer I-Querschnitt  
Typ 18 Einfachsymmetrischer U-Querschnitt  
**Heute:** Benutzerdefinierter Querschnitt unter "Abmessungen Stahl" – U-Profil.  
Typ 181 U-Querschnitt nach DIN 1026  
**Heute:** Benutzerdefinierter Querschnitt unter "Abmessungen Stahl" – U-Profil  
Typ 19 Beliebig einfach unsymmetrischer, benutzerdefinierter Querschnitt  
**Heute:** Benutzerdefinierter Querschnitt unter "statische Werte – I,A,W"  
Typ 20 Beliebig unsymmetrischer, polygonal begrenzter offener, dünnwandiger Querschnitt  
**Heute:** Benutzerdefinierter Querschnitt unter "Abmessungen Stahl" – dünnwandig, offen





# Berechnungsgrundlagen

## Finites Elementkonzept

Die theoretischen Grundlagen des Programms in ausführlicher Form sind dem angegebenen Schrifttum (insbesondere [ 7] und [10]) zu entnehmen. In den meisten aller praxisrelevanten Fälle sind die exakten Verformungen der allgemeinen Biegetorsionsaufgabe nicht mehr geschlossen darstellbar. Deshalb wird entsprechend der Methode der finiten Elemente der zu berechnende Träger in eine vom Benutzer vorzugebende Anzahl von Abschnitten unterschiedlicher Länge (finite Elemente) unterteilt.

Der Verformungszustand innerhalb eines Elementes wird hierbei durch kubische Polynome für die Verschiebungen quer zur Stabachse sowie für die Torsionsverdrehung beschrieben. Die Elemente sind an den Knoten zwischen den Elementen verbunden. Die Elemente besitzen am linken und rechten Knoten je 6 Freiheitsgrade:

- Verschiebung  $v$  in  $y$ -Richtung
- Verschiebung  $w$  in  $z$ -Richtung
- Verdrehung  $\Theta_x$  um die  $x$ -Achse
- Verdrehung  $\Theta_y$  um die  $y$ -Achse
- Verdrehung  $\Theta_z$  um die  $z$ -Achse
- Verwölbung  $\Theta_x'$

Je Feld sind i.d.R. zwischen **5 und 15** Elemente vorzusehen um bei mittleren Verschiebungsgradienten Abweichungen von weniger als 5% in den Verformungen gegenüber der exakten Lösung zu erreichen. Die **Anzahl der erforderlichen Elemente** richtet sich nach der Gradienten der Biegelinie. Bei steilen Gradienten, z.B. bei Einzellasten, Einzelfedern und Steifigkeitssprüngen sowie bei elastischer Bettung in Verbindung mit stabilitätsgefährdender Belastung muss die Elementanzahl erhöht werden. Besteht Unsicherheit hinsichtlich der erforderlichen Elementanzahl, so liefert am einfachsten eine erneute Berechnung mit Elementverfeinerung Aufschluss. Weichen die Resultate der beiden Berechnungen stark von einander ab, so ist gegebenenfalls eine weitere Berechnung mit weiterer Elementverfeinerung durchzuführen.

Der Anwender kann auf die Anzahl der Elemente Einfluss nehmen, indem er die minimale und maximale Elementausdehnung ( $\rightarrow$  siehe Seite 34) angibt.

Die **Berechnung nach Theorie II.Ordnung geschieht iterativ**. Der erste Schritt einer jeden Berechnung erfolgt nach Theorie I. Ordnung. Die dabei ermittelten Schnittgrößen bilden im nächsten Iterationsschritt die Grundlage zur Ermittlung der das nichtlineare Verhalten beschreibenden geometrischen Steifigkeitsmatrix. Wie im Bauwesen üblich, bleibt dabei die Änderung der Schnittgrößen in den folgenden Iterationsschritten bei der Erstellung der geometrischen Matrix unberücksichtigt ("Vernachlässigung der Änderung der Hauptkrümmung"). Dies entspricht beim ebenen Stabilitätsproblem einem "Einfrieren" der Stabnormalkräfte nach dem 1. Iterationsschritt. Damit ist die Iteration nach dem 2. Schritt beendet. Weder Verschiebungen, noch Schnittgrößen ändern sich bei weiteren Schritten. Sind die vorgegebenen **Lasten** größer als die Knick- bzw. die Biegedrillknicklasten, existiert zwar für das Last-Verformungsproblem eine Lösung, jedoch ist das Gleichgewicht in diesem Zustand nicht mehr stabil. Die Determinante der Systemsteifigkeitsmatrix ist in diesem Fall negativ. *BTII* bricht daher an dieser Stelle mit einer entsprechenden Meldung die Berechnung ab.

Wird ein Lastniveau nur wenig kleiner als das zum niedrigsten Eigenwert (= kleinste Biegedrillknicklast) gehörende vorgegeben, nehmen die Verformungen stark zu. Die Ergebnisse sind in diesem Fall nur noch bedingt brauchbar, da die zugrunde gelegte Theorie das Gleichgewicht zwar am verformten System formuliert, jedoch davon ausgeht, dass die Verformungen klein sind.

Die aus der Berechnung nach Theorie II.Ordnung ermittelten **Kräfte und Momente** sind bereits auf das verschobene und verdrehte Querschnittskordinatensystem bezogen und brauchen deshalb für die nachfolgende Spannungsuntersuchung nicht transformiert zu werden.

Die **Spannungsberechnung** wird in bekannter Weise unter Verwendung der eingegebenen oder den Profildateien entnommenen Querschnittswerte vorgenommen.

Bei Anwendung des vereinfachten Nachweises nach DIN 18800 T2 für die Biegedrillknickuntersuchung führt **BTII** eine **Eigenwertberechnung** unter Verwendung der Unterraummethode durch.

Die Eigenwertbestimmung des FE-Problems erfordert die Lösung des folgenden allgemeinen Matrizeigenwertproblems für den kleinsten Eigenwert  $\eta_k$ :

$$K_e + \eta \cdot K_g = 0$$

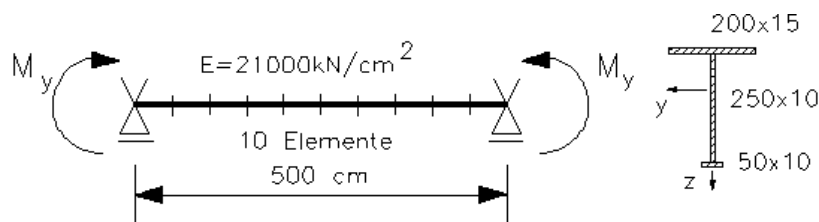
Darin ist  **$K_e$**  die elastische, lineare Systemsteifigkeitsmatrix und  **$K_g$**  die geometrische Systemsteifigkeitsmatrix.  **$K_g$**  ist eine Funktion der Normalkräfte und Momente nach Theorie I.Ordnung sowie gegebenenfalls exzentrisch in Lastrichtung angreifender Strecken- oder Einzellasten. Stark veränderliche Schnittgrößen, komplexe Eigenformen oder unsymmetrische Querschnitte können das Konvergenzverhalten nachteilig beeinflussen.

Dabei können folgende Probleme auftreten:

- **Im gewählten Unterraum (Startgröße = 2) findet BTII keinen positiven Eigenwert!**

*BTII* erhöht beim Ausbleiben positiver Eigenwerte automatisch die Anzahl der Startvektoren sukzessive um jeweils 2 bis zu einer Gesamtgröße des Unterraumes von 20. Die Vergrößerung des Unterraumes hat eine erhebliche Zunahme des Speicherplatzbedarfes sowie der Rechenzeit zur Folge.

*Beispiel:* Um für das dargestellte Problem den kleinsten positiven Eigenwert  $M_y, K_i = 265 \text{ kNm}$  zu finden, erhöht *BTII* die Anzahl der Startvektoren von anfänglich 2 schrittweise um jeweils 2 auf insgesamt 8.

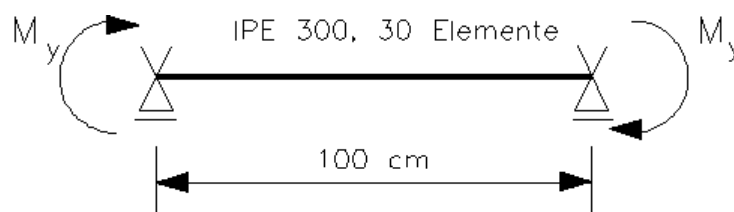


Falls als Folge der Vergrößerung des Unterraumes der verfügbare Speicherplatz überschritten wird, ist die Anzahl der Elemente zu verringern.

Findet *BTII* auch bei einer maximalen Unterraumgröße von 20 keinen positiven Eigenwert, wird mit einer entsprechenden Meldung abgebrochen.

- **Abbruch der Eigenwertberechnung wegen eines numerischen Fehlers!**

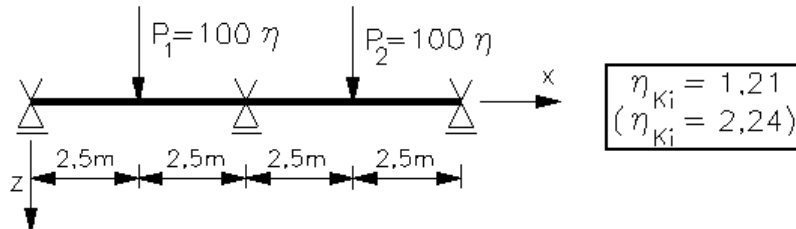
*Beispiel:* *BTII* findet in diesem (nur theoretisch interessierenden) Fall eine Lösung mit ausreichender Genauigkeit bei Reduzierung der Anzahl der Elemente von 30 auf 20.



- **BTII findet nicht den kleinsten Eigenwert!**

*Beispiel:* Bei Berechnung des dargestellten Zweifeldträgers mit Lastangriff der Einzelasten auf dem Obergurt und Modellierung mit insgesamt 40 Elementen findet BTII nicht die angegebenen, kleinsten Eigenwerte (Klammerwert für Lastangriff im Schwerpunkt). Bei einer durch den Anwender vorzunehmenden Reduzierung auf 20 Elemente erhält man jedoch mit großer Genauigkeit die für den anschließenden vereinfachten Nachweis benötigten Verzweigungslastfaktoren  $\eta_{ki}$ .

Profil IPE300, Stahl St37



Die Genauigkeit der Untersuchung kann und sollte in den beiden letzten Fällen geprüft werden, indem nach Auffinden des kleinsten Eigenwertes eine weitere Berechnung mit weiter reduzierter Elementanzahl durchgeführt und mit dem vorhergehenden Ergebnis verglichen wird.

## Wölbkrafttorsion

Offene dünnwandige Profile tragen Torsionsbelastungen über St.Venantsche Torsion  $M_{tp}$  (primäres Torsionsmoment) und Wölbkrafttorsion  $M_{ts}$  (sekundäres Torsionsmoment) ab. Je größer die Behinderung der Querschnittsverwölbung, desto größer ist der Anteil der über Wölbkrafttorsion abgetragen wird und umgekehrt. Die Behinderung hängt von der Form des Querschnittes sowie dem Torsionsmomentenverlauf ab. Die Wölbbehinderung ist gering z.B. bei Vollquerschnitten und Kreisringquerschnitten sowie im Bereich eines konstanten Torsionsmomentenverlaufes. Entsprechend überwiegt dabei die Lastabtragung über St.Venantsche Torsion. Im Gegensatz dazu dominiert insbesondere bei Sprüngen im Torsionsmomentenverlauf sowie bei Wölbbeanspruchungen die Abtragung über Wölbkrafttorsion.

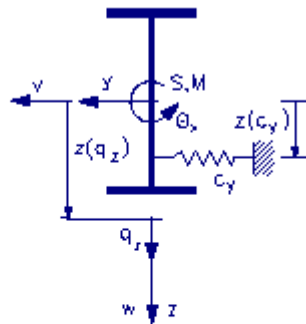
Infolge Wölbbehinderung treten Wölbnormalspannungen in Stablängsrichtung und Wölbmomente, auch Bimomente genannt, auf. Im Spannungsnachweis sind deshalb bei offenen Querschnitten zusätzlich zu den Normalspannungen aus Normalkraft und Biegemomenten Wölbspannungen aus Wölbkrafttorsion zu berücksichtigen. Für die Gesamtnormalspannungen erhält man somit

$$\sigma_x = \frac{N}{A} + \frac{M_y}{W_y} + \frac{M_z}{W_z} + \frac{M_\omega}{I_\omega} \cdot \omega$$

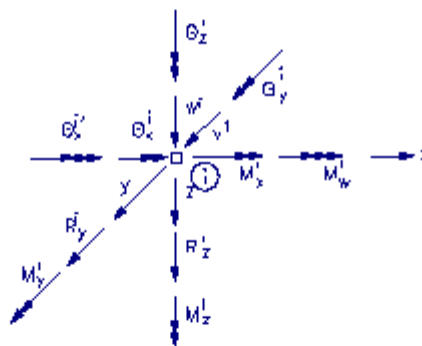
N	Normalkraft
$M_y, M_z$	Biegemomente um die y- bzw. z-Achse am verformten Querschnitt
M	Wölbmoment, auch als $M_w$ oder B bezeichnet
A	Querschnittsfläche
$W_y, W_z$	Widerstandsmomente um y- bzw. z-Achse
$I_\omega$	Wölbträgheitsmoment, auch als $I_w$ oder C bezeichnet
$\omega$	normierte Hauptverwölbung, auch als $w_m$ bezeichnet

# Vereinbarungen

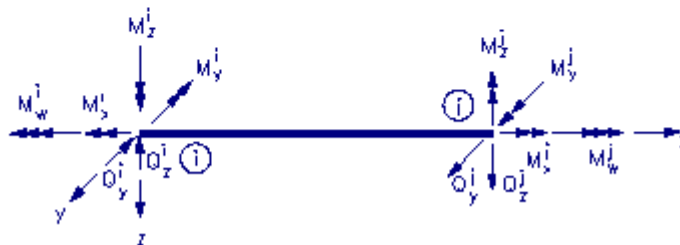
Querschnittskordinaten



Knotenlasten und Knotenverformungen



Schnittgrößen



# Systemeingaben

Die einzelnen Eingabedialoge sind in Form von Registerkarten angelegt und durch Mausklick auf das entsprechende Register oder Doppelklick auf den entsprechenden Punkt in der Hauptauswahl zu aktivieren.

Sie können Material nach DIN 18800 Teil 1, Tabelle 1, aus den Listen wählen oder benutzerdefinierte Werte eingeben. BTII setzt dabei voraus, dass am gesamten Träger der Elastizitätsmodul  $E_k$  und die Fließspannung  $f_{yk}$  konstant sind.

## Materialeingabe

### Material nach DIN 18800 Teil 1

Für die Auswahl von Material nach DIN 18800 Teil 1 wählen Sie zunächst die Stahlsorte in der linken Liste mit der Überschrift 'Stahlsorte' und im Anschluss daran die Stahlgüte aus der rechten Liste mit der Überschrift 'Stahlgüte'.

Für diese Stähle werden die Elastizitäts- und Schubmoduli entsprechend den Spalten 5 und 6 der Tabelle 1 als charakteristische Werte angesetzt. Beim Spannungsnachweis ist zu beachten, dass der charakteristische Wert der Streckgrenze  $f_{yk}$  mit den Standardwerten belegt ist, jedoch die Erzeugnisdicken der Querschnitte berücksichtigt und ggf. entsprechend abgemindert werden müssen.

### Benutzerdefinierte Angabe der Werkstoffkennwerte

Für die benutzerdefinierte Angabe der Werkstoffkennwerte wählen Sie zunächst den Listeneintrag 'benutzerdefiniert' in der linken Liste mit der Überschrift 'Stahlsorte'. Klicken Sie dann auf den Schalter "freie Eingabe", um den Eingabedialog für die benutzerdefinierte Angabe der Werkstoffkennwerte aufzurufen. Für die Werkstoffkennwerte sind die charakteristischen Werte anzugeben.

Stahlsorte	Stahlgüte
allgemeine Baustähle	
Feinkornbaustähle	
Stahlguß	
Vergütungsstähle	
benutzerdefiniert	

GammaM= 1,10 [freie Eingabe]

### Freie Eingabe der Werkstoffkenngrößen

Geben Sie eine Bezeichnung für das Material ein sowie die charakteristischen Werte für Streckgrenze  $f_{yk}$ , Zugfestigkeit  $f_{uk}$ ,  $E_k$ - und  $G_k$ -Modul.

Geben Sie wie im o.a. Beispiel Werkstoffkennwerte an, die einem Stahl nach DIN 18800 T1, Tabelle 1 entsprechen, so wird die Einstellung auf die entsprechende Stahlsorte und Stahlgüte zurückgestellt.

### Teilsicherheitsfaktor $\Gamma_{M}$

Der Materialfaktor  $\Gamma_{M}$  ist der Teilsicherheitsbeiwert für Widerstandsgrößen.  $\Gamma_{M}$  kann zwischen 1,0 und 2,0 gewählt werden. Vorgabewert ist 1,1.

**$\Gamma_{M}$  auf der Seite:**  der Einwirkungen  
 der Widerstände

Nach DIN 18800 Teil 1, Abs. 7.3.1 darf der Teilsicherheitsbeiwert bei der Berechnung nach Theorie I.Ordnung auch auf der Seite der Einwirkungen angesetzt werden. Der Nachweis mit den  $\gamma_M$ -fachen Bemessungswerten der Einwirkungen und den charakteristischen Werten der Widerstandsgrößen führt zum gleichen Ergebnis wie der Nachweis mit den Bemessungswerten der Einwirkungen und der Widerstandsgrößen, wenn für alle Widerstandsgrößen derselbe Wert  $\gamma_M$  gilt.

Bei der alternativen Berücksichtigung des Teilsicherheitsbeiwertes für Beanspruchbarkeiten ist grundsätzlich darauf zu achten, dass unabhängig vom gewählten Verfahren die Bemessungswerte der Einwirkungen und die charakteristischen Werte der Widerstände anzuwenden sind. Die Bemessungswerte der Einwirkungen ergeben sich dabei aus den eingegeben Lasten und den Faktor, mit dem der Lastfall, dem die Lasten zugeordnet worden sind, in die Überlagerung eingeht. Die charakteristischen Werte der Widerstände ergeben sich aus den eingegebenen Werten der Werkstoffkenngrößen, Lagerungen und Bettungen.

Ist die Option "GammaM auf der Seite der Einwirkungen" ausgewählt, werden die Beanspruchungen aus den  $\gamma_M$ -fachen Bemessungswerten der Einwirkungen ermittelt und den charakteristischen Größen der Grenztragfähigkeiten gegenübergestellt.

Ist die Option "GammaM auf der Seite der Widerstände" ausgewählt, werden die Beanspruchungen aus den Bemessungswerten der Einwirkungen und den Bemessungswerten der Grenztragfähigkeiten gegenübergestellt.

## Berechnungsarten

Der Träger kann nach verschiedenen Verfahren berechnet werden:

### Theorie I.Ordnung

Berechnung von Schnittgrößen, Verformungen und Spannungen nach Theorie I.Ordnung infolge der Bemessungswerte der Einwirkungen.

### Theorie II.Ordnung

Die Berechnung nach Theorie II.Ordnung geschieht iterativ. Der erste Schritt einer jeden Berechnung erfolgt nach Theorie I. Ordnung. Die dabei ermittelten Schnittgrößen bilden im nächsten Iterationsschritt die Grundlage zur Ermittlung der das nichtlineare Verhalten beschreibenden geometrischen Steifigkeitsmatrix. Wie im Bauwesen üblich, bleibt dabei die Änderung der Schnittgrößen in den folgenden Iterationsschritten bei der Erstellung der geometrischen Matrix unberücksichtigt.

### Ersatzstabverfahren nach DIN 18800 Teil 2

Bei Anwendung des vereinfachten Nachweises nach DIN 18800 T2 für die Biegedrillknickuntersuchung führt BTII eine Eigenwertberechnung unter Verwendung der Unterraummethode durch. Aus dem aus der Eigenwertberechnung resultierenden  $\mathbf{M}_{kiy}$  und  $\mathbf{N}_{ki}$  kann das vereinfachte Verfahren angewendet werden.

### Ersatzstabverfahren nach Eurocode 3 1-1

[Steht in dieser Version noch nicht zur Verfügung!](#)

Berechnung erfolgt wie beim Nachweisverfahren nach DIN 18800 T2, jedoch wird der Nachweis mit den Nachweisgleichung des EC3 geführt.

## Plastische Grenztragfähigkeit

BTII erlaubt für doppelt symmetrische I-Querschnitte die Anwendung des **Verfahrens Elastisch-Plastisch (E-P)** nach DIN 18800 Teil 1. Bei Trägersystemen, die aus mehreren Querschnittstypen zusammengesetzt sind, werden die plastischen Grenztragfähigkeiten nur für die Trägerbereiche mit doppelt symmetrischen I-Querschnitten berechnet.

Für weitergehende Informationen → [siehe Seite 47](#)

## Abmessungen

- L** Gesamtlänge des Trägers  
**x** x-Koordinate eines Schnittes am Träger.

Der Träger kann in mehrere Abschnitte aufgeteilt werden. Ein Abschnitt liegt grundsätzlich zwischen zwei Schnitten, die die Stelle und den Querschnitt definieren. Mit der Definition von Trägerabschnitten mittels der Schnitte, ist es möglich, Querschnittsprünge oder Vouten zu beschreiben.

Gevoutete Träger können für die Standardprofile als auch für die Profiltypen (→ Seite 8) "doppelsymmetrische, benutzerdefinierte I-Profile", "einfachsymmetrische I-Profile mit Obergurtwinkeln", "einfachsymmetrische I-Profile" und "einfachsymmetrische U-Profile" angegeben werden.

Für den ersten Abschnitt muss  $x = 0$  sein (oder  $x = L$ , bei nur einem Abschnitt).

Bezugspunkt für **x** ist die linke Trägerkante.

- Q1** Querschnitte werden über eine Querschnittsnummer (Spalte "Q1") zugeordnet. Dem Träger können über die Angabe der Unstetigkeitsstellen **x** mehrere Querschnitte zugeordnet werden.

Für konstante Querschnitte in einem Feld setzen Sie  $x = L$ .

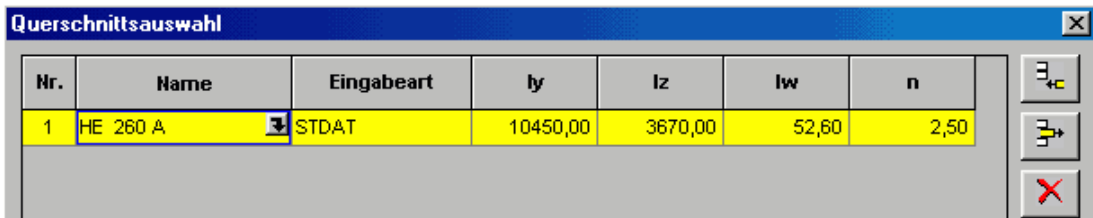
## Querschnitt definieren

Um einen neuen Querschnitt zu definieren, geben Sie in die Spalte "Q1" (im Dialog Abmessungen) eine "0" ein und betätigen die Returntaste

oder

drücken Sie die Taste <F5> in der Spalte "Q1"

Sie erhalten dann den Dialog "Querschnittsauswahl".



Das hervorgehobene Feld (Spalte "Name") ist ggf. ohne Bezeichnung. Drücken Sie <F5>, um die Profilauswahl aufzurufen.

In der Profilauswahl wählen Sie per Mausklick oder Tastatur (Pfeiltasten, TAB-Taste) den passenden Querschnitt aus und bestätigen mit OK.

## Profilauswahl

Das Fenster der Profilauswahl erscheint, wenn ein neuer Querschnitt eingegeben oder ein vorhandener Querschnitt geändert wird.



Die Abb. zeigt einen Ausschnitt der Profilauswahl für Stahl

Abhängig vom gewählten Material gibt es im linken Fensterbereich folgende Möglichkeiten Querschnitte zu beschreiben:

- F + L Profildatei
- Abmessungen → *siehe Seite 17*
- Statische Werte - I, A, W → *siehe Seite 20*

Die verborgene Baumstruktur z.B. bei der F+L Profildatei wird durch einen Klick auf das "+"-Kästchen oder durch die 1-Taste geöffnet.

Im rechten Fensterbereich wird entweder das gewünschte Profil ausgewählt oder die Abmessungen bzw. statischen Werte eingegeben.

Mit dem OK Button wird die Eingabe bestätigt und die Profilauswahl verlassen.

## F+L Profildatei

Die Profildatei STDAT.DB enthält in der Grundausstattung eine Reihe von Sonderprofilen (Doppel-T) der Firma ARBED.

Genormte Walzprofile (DIN-Profile) sind in der Datei nur abgelegt, wenn sie als Zusatzmodul erworben wurden.

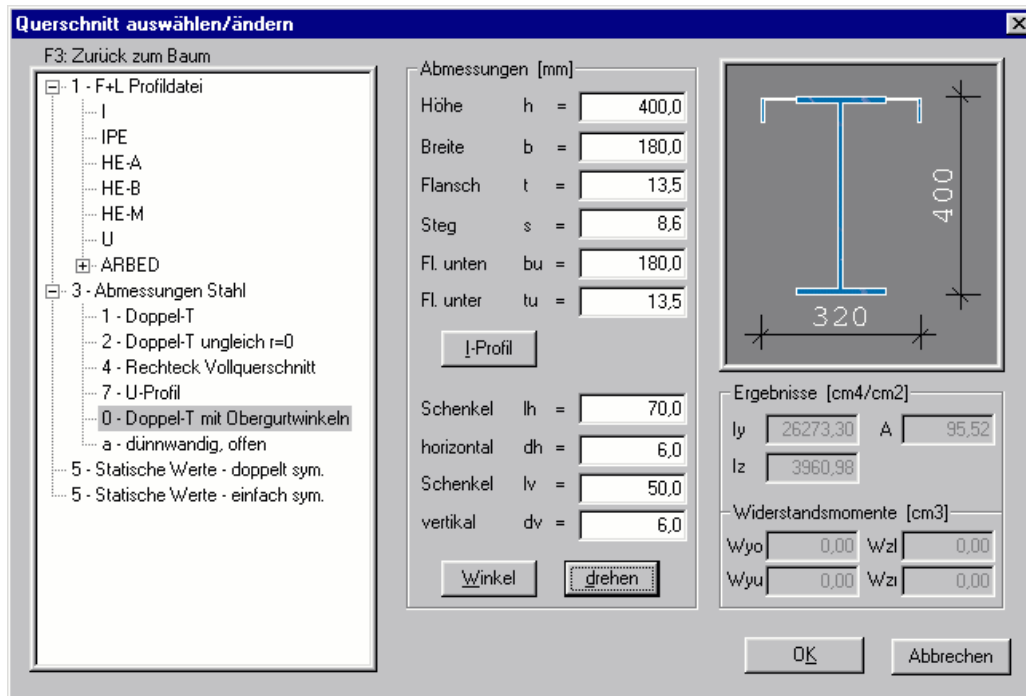
Kurzzeichen	Bezeichnung	Norm
I	Schmale I-Träger	DIN 1025, Teil 1
IPE	Mittelbreite I-Träger	DIN 1025, Teil 5 (EN 19-57)
HE-A = IPBI	Breite I-Träger, leicht	DIN 1025, Teil 3
HE-B = IPB	Breite I-Träger, große Höhe	DIN 1025, Teil 2
HE-M = IPBv	Breite I-Träger, verstärkt	
Arbed	Sonderprofile der Fa. Arbed	
U	U-Stahl rundkantig	EIN 1026 (EN 24)



## Querschnittsabmessungen

Hier wird ein Querschnitt über seine Abmessungen definiert. Zunächst wählen Sie den Querschnittstyp (Doppel-T, U, ...), die entsprechenden Eingabefelder für die Maße werden angezeigt. Über die Querschnittsgrafik in diesem Fenster werden die eingegebenen Abmessungen sofort angezeigt, so dass die Eingaben optisch kontrolliert werden können.

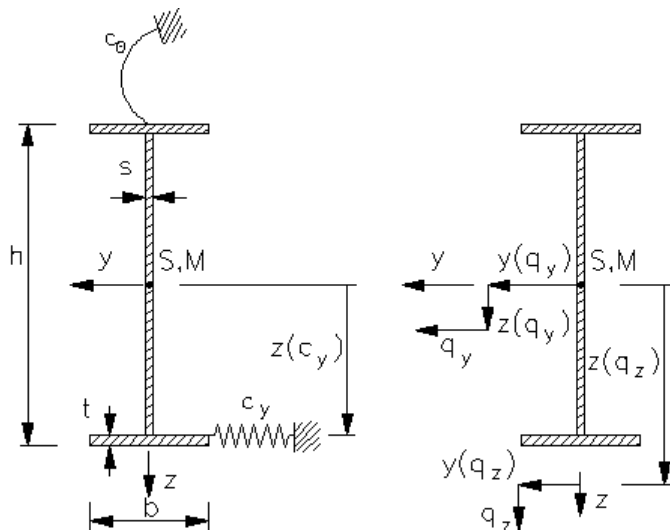
*Hinweis:* Die im alten DOS-Programm aufgeführten Profiltypbezeichnungen (1,2,3,4,5,9,16,17,18,181,19 und 20, → siehe Seite 8) werden nicht mehr verwendet, sind jedoch der Übersicht wegen jeweils in Klammern angegeben.



Die Widerstandsgrößen werden aufgrund Ihrer Eingaben ermittelt und in der unteren rechten Fensterhälfte angeschrieben.

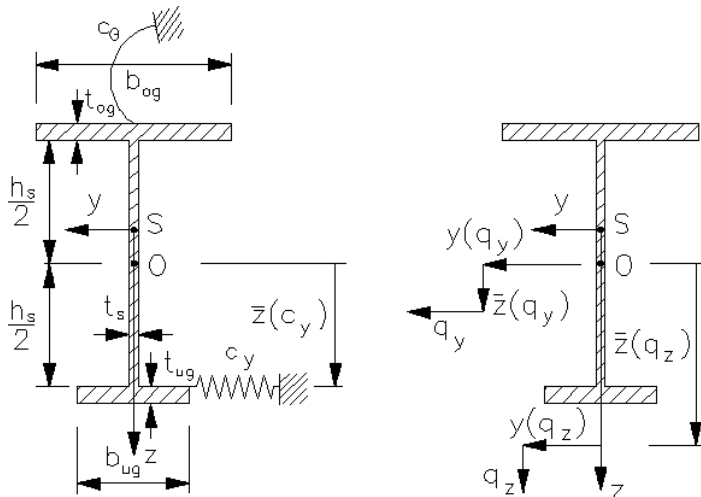
## Doppel-T

*Hinweis:* In der DOS-Version entsprach dies dem Profiltyp 9 (→ siehe Seite 8)



## Einfach-T

Hinweis: In der DOS-Version entsprach dies dem Profiltyp 17 (→ siehe Seite 8)



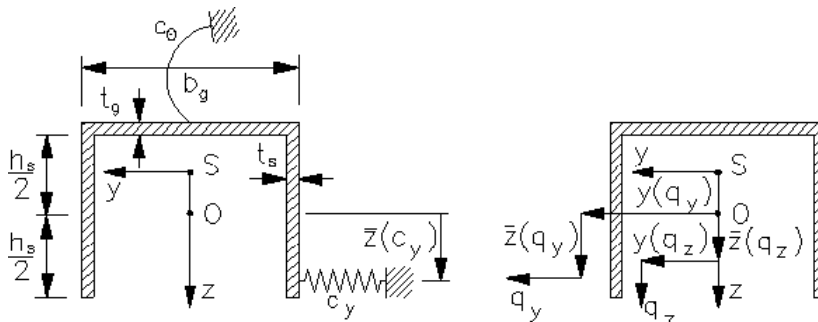
## Rechteck-Profil

Hinweis: In der DOS-Version entsprach dies dem Profiltyp 9 (→ siehe Seite 8)

Eingabe der Länge und Breite.

## U-Profil

Hinweis: In der DOS-Version entsprach dies dem Profiltyp 18 (→ siehe Seite 8)



## Doppel-T mit Obergurtwinkeln

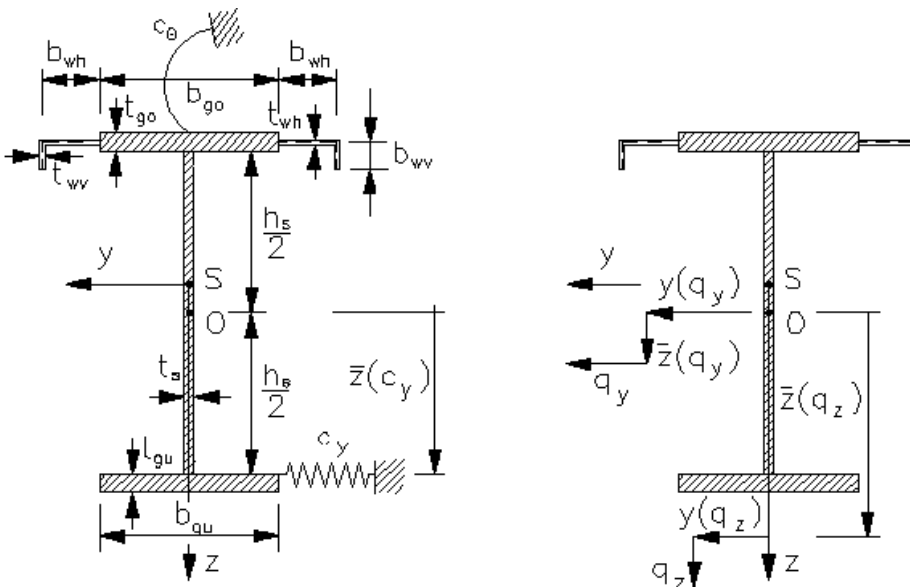
*Hinweis:* In der DOS-Version entsprach dies dem Profiltyp 16 (→ siehe Seite 8)

**I-Profil** Über diesen Button können Sie aus der F+L-Profildatei einen Querschnitt als Vorgabe auswählen.

**Winkel** Auswahl von L-Profilen für die Schenkel aus der F+L-Profildatei.

- ☐ 1 - F+L Profildatei
  - ☐ L
    - L gleichschenkelig
    - L ungleichschenkelig**
    - L scharfkantig

**drehen** Vertauschen der horizontalen und vertikalen Schenkelmaße (drehen des L-Profiles)



## Dünnwandig, offen

*Hinweis:* In der DOS-Version entsprach dies dem Profiltyp 20 (→ siehe Seite 8)

Dieser Profiltyp steht für die Eingabe von beliebigen, offenen, dünnwandigen Querschnitten zur Verfügung. Das Programm errechnet aus der Querschnittsgeometrie alle für die Berechnung benötigten Querschnittswerte.

Querschnitte werden abschnittsweise (segmentweise) durch Angabe der Koordinaten der Profilmittellinie sowie der zugehörigen Segmentdicke beschrieben. Das Eingabekoordinatensystem ist durch den Anwender frei wählbar. Beachten Sie jedoch, dass elastische Lagerungen, Translationsbedingungen als auch Stablasten bezogen auf den Nullpunkt des Eingabekoordinatensystems definiert werden. Das bedeutet, die Abstände der Angriffspunkte müssen bei dem gleichen Profil und mit gleicher Belastung aber unterschiedli-

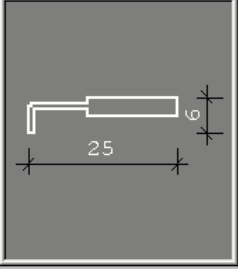
Ergebnisse [cm<sup>4</sup>/cm<sup>2</sup>]

ly =

lz =

lyz =

A =



[mm]	Anfangspunkt		Endpunkt		Dicke
	y1	z1	y2	z2	
1	24,50	4,50	24,50	0,00	1,00
2	24,50	0,00	15,00	0,00	1,00
3	15,00	0,00	0,00	0,00	3,00
4	0,00	0,00	-15,00	0,00	3,00
5	-15,00	0,00	-24,00	0,00	1,00
6	-24,00	0,00	-24,00	4,50	1,00

chem Nullpunkt des Koordinatensystems auch unterschiedlich definiert werden.

*BTII* ermittelt zunächst den Schwerpunkt sowie die Trägheitshauptachsen und rechnet die eingegebenen Querschnittskordinaten auf dieses Hauptachsensystem um.

Es ist zu beachten, dass bei der Eingabe des zweiten und aller folgenden Segmente der erste der beiden Querschnittspunkte bereits vorher definiert sein muss.

In der derzeitigen Programmversion sind maximal **20** Segmente zugelassen! Da im Rahmen der Balkentheorie der Spannungsverlauf segmentweise linear ist, sind Querschnittsknoten nur an den Stellen erforderlich, wo der Querschnitt verzweigt, bzw. die Wanddicke sich ändert.

*Siehe auch Übungsbeispiel Demo7 in der Online-Hilfe.*

Neben den aus linearen Berechnungen bekannten Querschnittswerten ermittelt *BTII* auch die für eine Untersuchung nach Theorie II.Ordnung benötigten Wagnerkoeffizienten um die beiden Querschnittshauptachsen.

Analog zu  $W_{cy}$  bei einfachsymmetrischen benutzerdefinierten Querschnitten – früher als Profiltyp 19 bezeichnet – (Eingabe über I,A,W) gilt:

$$W_{cz} = \frac{1}{I_x} \int y (y^2 + z^2) da - 2 y_M$$

## Querschnittswerte I A W

*Hinweis:* In der DOS-Version entsprach dies dem Profiltyp 19

Hier definieren Sie den Querschnitt über die Werte für die statische Berechnung ( $I_{y,z}$ ,  $I_t$ ,  $I_w$ ,  $A$ ) und die Werte für den Spannungsnachweis ( $W_{y_{oben}}$ ,  $W_{z_{links}}$ ). Es sind die maßgebenden Widerstandsmomente einzutragen. Für Querschnitte, für die keine Werte eingegeben wurden, wird kein Spannungsnachweis geführt.

Im linken oberen Eingabefeld geben Sie dem Querschnitt einen Namen. Haben Sie vor Aufruf dieses Dialogs in der F+L-Profildatei einen Querschnitt markiert, so wird zunächst dessen Name hier eingetragen – ebenso werden die entsprechenden Querschnittswerte voreingestellt.

### $W_{cy}$

Der sogenannte "Wagnerkoeffizient" um die y-Achse

$$W_{cy} = \frac{1}{I_y} \int z (y^2 + z^2) da - 2 z_M$$

ist für die Berechnung nach Biegetorsionstheorie II. Ordnung erforderlich.

Dessen 1. Anteil

$$r_y = \frac{1}{I_y} \int z (y^2 + z^2) da$$

ist im einschlägigen Schrifttum, z.B. bei Petersen [8], auch als Kindem'sche Querschnittsstrecke bezeichnet. Der entsprechende Wert kann für gängige U-, T- sowie C-Profile mit und ohne Lippen direkt aus Tafel II.5 in [8] übernommen werden.

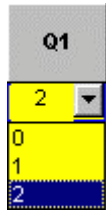
### $z_M$

Die Größe  $z_M$  beschreibt den Abstand des Schubmittelpunktes vom Schwerpunkt in z-Richtung.

## Querschnitt einem Feld zuordnen

Geben Sie die entsprechende Querschnittsnummer eines bereits definierten Querschnitts in der Spalte "Q1" ein


- oder



klicken Sie auf den Auswahlpfeil (Spalte "Q1"), um die vorhandenen Querschnittsnummern anzuzeigen, und wählen Sie daraus eine Nummer.

## Querschnitt ändern

Um einen Querschnitt zu ändern, geben Sie in die Spalte "Q1" eine "0" ein und betätigen die Returntaste. Sie erhalten dann die Querschnittsauswahl (→ siehe Seite 15).

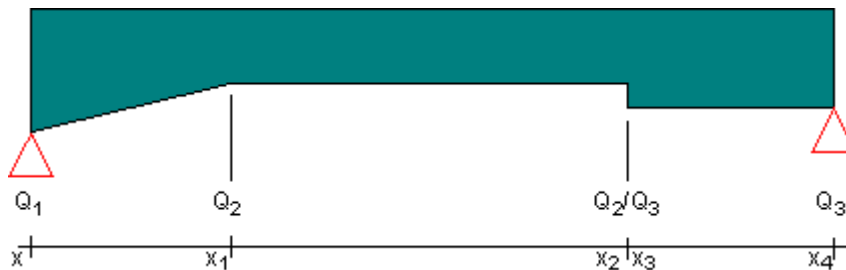
Klicken Sie in die Spalte "Name" des zu ändernden Querschnitts auf den Button .

Der Dialog für die Querschnittsdefinition (→ siehe Seite 15) wird angezeigt.

*Tipp:* Über die Taste <F5> können Sie die Querschnittsauswahl ebenfalls aufrufen (wenn der Cursor in der Spalte "Q1" ist) und von dort aus mit einem weiteren <F5> in den Dialog der Querschnittsdefinition springen.

## Querschnittsänderungen - Sprünge - Vouten

Ändert sich innerhalb des Trägers der Querschnitt, so sind die einzelnen Querschnittsbereiche in der Eingabetabelle über den Abstand  $x$  zum linken Trägerrand zu definieren:



**x** Abstand der Querschnittsänderung vom linken Auflager.

Bei Eingabe eines Wertes  $x < L$  (Feldlänge) wird automatisch eine neue Zeile für dieses Feld angezeigt, um weitere Querschnittsveränderungen eingeben zu können. Die Eingabe für das Feld ist beendet, wenn  $x = L$  eingegeben wird.

Die Querschnittsveränderungen sind fortlaufend vom linken bis zum rechten Trägerrand mit dem Abstand  $x$  der Unstetigkeitsstellen vom linken Trägerrand und der zugehörigen Querschnittsnummer (Spalte "Q1") einzugeben.

Bei Querschnittssprüngen ist am linken und rechten Schnittufer je ein Querschnitt einzugeben.

**Q1** Als Querschnittsnummer ist eine Zahl zwischen 1 und  $n$  möglich, wenn  $n$  die Anzahl der definierten Querschnitte ist.

# Lagerung

## Allgemeines

Lagerbedingungen können im Programm BTII mittels des dargestellten Tabellendialoges als starre - unverschiebliche - Auflager oder als elastische Verschiebe- oder Drehbehinderungen realisiert werden. Während starre Lagerungen in Richtung der globalen Freiheitsgrade durch die Zahl '-1' in den entsprechenden Spalten zu bezeichnen sind, ist bei elastischer Lagerung die absolute Größe der Federsteifigkeit anzugeben.

Material	Abmessungen	Lagerung	Bettungen	Bemerkungen						
	x	Cy	Cz	Phix	Phiy	Phiz	Phixy	y(Cz)	z(Cy)	
1	0,00	-1,00	-1,00	-1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
2	5,00	-1,00	-1,00	-1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
3	10,00	-1,00	-1,00	-1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

## Hinweis zur Eingabe von Federsteifigkeiten

Diskrete Federsteifigkeiten erfassen näherungsweise die Steifigkeiten der an den zu untersuchenden Träger anschließenden Bauteile (z.B. Pfetten auf Binder, Wandriegel auf Wandstützen, Zugstangen bei Pfetten, usw.).

Das Programm erlaubt auch die exzentrische Anordnung von Federn, welche die seitliche Verschiebung in y- oder z-Richtung behindern. Die dazu benötigten Abstände  $z(Cy)$  und  $y(Cz)$  sind prinzipiell auf den Schubmittelpunkt bezogen.

## Sonderregelungen bei den Profiltypen "Doppel-T mit Obergurt", "Einfach-T", "benutzerdefinierter U-Querschnitt" (früher Profiltypen 16, 17, 18)

Vereinfachend gilt bei einfachsymmetrischen – nicht genormten – Profilen:

$z(Cy)$  z-Abstand der Translationsfeder  $Cy$  von der Stegmitte

Bei veränderlichen Querschnitten dieser Profiltypen wird der gemittelte Schubmittelpunkt an der Federangriffsstelle zugrunde gelegt.

## Sonderregelungen bei dem Profiltyp "dünnwandig, offen" (früher Typ 20)

Für den polygonalen Querschnitten gilt:

$Cy, Cz$  Translationsfedern bezogen auf Vorgabekoordinaten

$y(Cz)$  y-Abstand der Cz-Feder bez. auf Vorgabekoordinaten

$z(Cy)$  z-Abstand der Cy-Feder bez. auf Vorgabekoordinaten

Die Abstände werden rechnerintern auf den Schubmittelpunkt umgerechnet!

Auch exzentrische, diskrete Federn können dazu verwendet werden, seitliche Verschiebungen in y- oder z-Richtung in beliebigen Querschnittspunkten zu behindern. Zu diesem Zweck sind große, jedoch nicht beliebig große Federsteifigkeiten vorzugeben. Grundsätzlich sollten Steifigkeiten  $< 10^{16}$  sein.

Um die numerische Stabilität der Berechnung nicht zu gefährden, sollten diskrete Steifigkeiten zur Behinderung einer Verschiebung nur so groß gewählt werden wie unbedingt erforderlich. Dies kann durch Überprüfung der kinematischen Zwangsbedingung im Querschnitt verifiziert werden.

# Bettung

## Allgemeines

Bettungsbereiche können im Programm BTII mittels des dargestellten Tabellendialoges realisiert werden. Bei Bettungsbereichen können wie bei starren und elastischen Lagern Abstände definiert werden. Der Abstand der Translationsbettung **cy** in z-Richtung und der Abstand der Translationsbettung **cz** in y-Richtung ist prinzipiell auf den Schubmittelpunkt zu beziehen.

Bettungsbereiche müssen innerhalb des Trägers liegen und dürfen sich nicht überlappen. Wird die Länge des Trägers verkürzt, werden Bettungsbereiche, die dann über den Träger hinausgehen würden, abgeschnitten.

Material	Abmessungen	Lagerung	Bettungen	Bemerkungen							
Nr.	x0	x1	Art	cy	Flag	z(cy)	cz	Flag	y(cz)	cphix	
1	0,00	0,00	0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	

- x0** x-Koordinate des Bereichsanfangs  
**x1** x-Koordinate des Bereichsendes  
**Art** Art = 0 : elastische Translations-und Rotationsbettung  
Art = 1 : Schubfeldbettung  
**cy** Translationsbettung in y-Richtung  
**Flag** Steuerparameter für die Angabe des Abstandes des Angriffspunktes der Bettung zum Schubmittelpunkt  
**z(cy)** Abstand des Angriffspunktes der Bettung in z-Richtung zum Schubmittelpunkt  
**cz** Translationsbettung in z-Richtung  
**Flag** Steuerparameter für die Angabe des Abstandes des Angriffspunktes der Bettung zum Schubmittelpunkt  
**y(cz)** Abstand des Angriffspunktes der Bettung in y-Richtung zum Schubmittelpunkt  
**cphix** Rotationsbettung um die x-Achse

Hinweise zum Abstand der Bettung zum Schubmittelpunkt:

## Angabe des Abstandes

Der Abstand der Bettung zum Schubmittelpunkt kann wahlweise direkt oder als Faktor, mit dem die Profilhöhe bzw. die Profilbreite zu multiplizieren ist, angegeben werden.

- z(cy)** Flag = 0 absoluter Abstand der Bettung in z-Richtung  
Flag = 1 Abstand =  $z(cy) \cdot$  Profilhöhe  
**y(cz)** Flag = 0 absoluter Abstand der Bettung in y-Richtung  
Flag = 1 Abstand =  $y(cz) \cdot$  Profilbreite

## Sonderregelungen bei den Profiltypen "Doppel-T mit Obergurt", "Einfach-T", "benutzerdefinierter U-Querschnitt" (früher Profiltypen 16, 17, 18)

Für die Exzentrizität  $z(cy)$  gilt der Abstand von **cy** in z-Richtung, gemessen ab Stegmitte. Die Abstände werden rechnerintern auf den Schubmittelpunkt umgerechnet!

## Sonderregelungen beim U-Profil (früher Profiltyp 181)

Für die Exzentrizität  $z(cy)$  gilt der Abstand von **cy** in z-Richtung, gemessen vom Schubmittelpunkt.

### **Sonderregelungen bei dem Profiltyp “dünnwandig, offen” (früher Typ 20)**

Für diesen Profiltyp beziehen sich die Eingaben von **cy** mit  $z(cy)$  sowie **cz** mit  $y(cz)$  auf das bei der Abschnittseingabe verwendete Vorgabekoordinatensystem.

### **Erfassen einer gebundenen Drehachse**

Das in der Praxis häufig auftretende Problem des Biegedrillknickens mit gebundener Drehachse im Abstand  $z$  vom Schwerpunkt kann in einfacher Weise wie folgt erfasst werden:

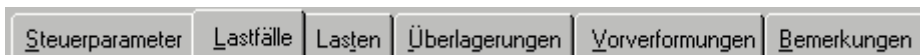
Im Abstand  $z$  vom Schubmittelpunkt wird eine elastische Translationsbettung in  $y$ -Richtung mit der Steifigkeit 108 bis 1010 angesetzt. Die demzufolge bezüglich Schwerpunkt und Schubmittelpunkt sich einstellenden Verschiebungen und Verdrehungen führen zur Verschiebung Null in der vorgegebenen Zwangsdrehachse.

## **Bemerkungen**

Eingabe von zusätzlichem Text zur Position, der auch in der Ausgabe erscheint (siehe Online-Hilfe, F1-Taste).

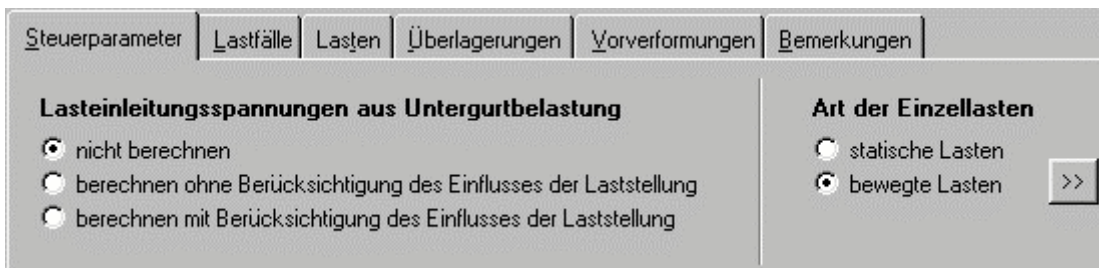


# Lasteingabe



Die einzelnen Eingabedialoge sind in Form von Registerkarten angelegt und durch Mausklick auf das entsprechende Register oder Doppelklick auf den entsprechenden Punkt in der Hauptauswahl zu aktivieren.

## Steuerparameter



### Lasteinleitung

#### Örtliche Trägerbeanspruchung (Lasteinleitungsspannungen aus Untergurtbelastung)

Bei Unterflanschkränen sowie bei Kränen mit Unterflanschlaufkatzen greifen Kranrad- bzw. Katzlasten exzentrisch zum Trägersteg an. In der Umgebung des Lastangriffspunktes treten demzufolge sekundäre Flanschbiegespannungen in zwei Richtungen auf. Das Programm errechnet auf Anforderung für die Profiltypen 1 - 5 und 17 (→ siehe Seite 8) lokale Lasteinleitungsspannungen auf der Grundlage experimenteller und theoretischer Untersuchungen von Hannover/Reichwald und überlagert diese nach der von-Mises-Fließbedingung mit den globalen Balkenspannungen.

Bei bewegten Lasten werden wahlweise Lasteinleitungsspannungen bereits zum Auffinden der maßgebenden Laststellung oder erst im Anschluss daran für den Spannungsnachweis ermittelt.

Bei der Option "ja - ohne Einfluss auf Laststellung" wird die maßgebende Laststellung für die nachfolgende Berechnung nach Biegetorsionstheorie II. Ordnung unter Vernachlässigung eventueller Lasteinleitungsspannungen ausschließlich infolge der Trägernormalspannungen ermittelt.

Bei der Option "ja - mit Einfluss auf Laststellung" hingegen ergibt sich die maßgebende Laststellung aus der Überlagerung der Trägernormalspannungen mit den Lasteinleitungsspannungen in x-Richtung.

#### Art der Einzellasten: Bewegte Lasten / Statische Lasten

Wurde die Option "bewegte Last" gewählt, ist im Auswahlfenster das gewünschte Kriterium für das Auffinden der maßgebenden Laststellung festzulegen. Sie erreichen diesen Dialog durch

Mausklick auf den Button .

Als Kriterien für die maßgebende Laststellung können entweder minimale oder maximale Schnittgrößen sowie die absolut größte Normalspannung gewählt werden. Letzteres ist zulässig bei Querschnitten der Typen 1-5, 9, 16, 17, und 18 bzw. 181 (→ siehe Seite 8).

Für jede Laststellung wird eine lineare Berechnung des Trägers nach Biegetorsionstheorie I. Ordnung durchgeführt und Ort und Größe der entsprechenden Schnittgröße oder der maximalen Spannung ermittelt.

Wird als Kriterium für die maßgebende Laststellung die maximale Normalspannung gewählt, stehen dazu zwei alternative Optionen zur Verfügung: Nach Vorgabe des Anwenders sind dies entweder die absolut größte Balkennormalspannung oder die absolut größte Spannung unter

Berücksichtigung der Lasteinleitungsspannungen, sofern die entsprechende Option gewählt worden ist.

Für die maßgebende Laststellung berechnet das Programm anschließend automatisch Verformungen, Schnittgrößen und Spannungen nach Theorie I. oder II. Ordnung.

## Lastfälle


In diesem Fenster definieren Sie Lastfälle und legen fest, ob das **Eigengewicht** des Trägers vom Programm automatisch berechnet werden soll und mit welchem Faktor das Eigengewicht in die Berechnung eingeht.


Nr.	Bezeichnung
1	LF1
2	LF2
3	LF3

**Eigengewicht**

nicht ansetzen

automatisch ansetzen Faktor=

**Neuen Lastfall definieren:** Klicken Sie auf den Button , um einen neuen Lastfall in die Liste einzufügen.

Mit einem Klick auf  oder durch Drücken der <F5>-Taste gelangen Sie zum Eingabedialog für die dem ausgewählten Lastfall zugeordneten Lasten.

Bei der Eingabe und Bearbeitung der Lastfälle beziehen sich alle Angaben der Stablasten, immer auf den ausgewählten (gelb hinterlegten) Lastfall aus der Lastfall-Liste.

Das Eigengewicht geht als separater Lastfall mit dem angegebenen **Faktor** in die Berechnung ein. Veränderliche  $\gamma_F$  - Werte für das Eigengewicht (entlastende Eigengewichtsanteile mit dem  $\gamma_F$  - Wert = 1.0) werden nicht berücksichtigt. Für die Formulierung solcher Probleme wird empfohlen, die veränderlichen Eigengewichtsanteile als Trapezlasten (Art=4) über jedes Feld in einem separaten Lastfall anzuordnen. Die Lastfälle werden dann mit den entsprechenden Faktoren (nach DIN 18800  $\gamma_F = 0,35$ ) in die Überlagerung eingeführt.

# Lasten

LF	Art	Ric	Pli	Abst	Pre	Lang	ey	ez	Flag	Pos
1	1	3	10,00				5,25	-0,50	1	
	0									

**LF** Nummer des Lastfalls, dem die Stablasten zugeordnet werden.

**Art** Lastart 1 bis 8, eine Übersicht über die Lastarten finden Sie ab → Seite 29.  
 Klicken Sie auf einen Eintrag, um die entsprechende Lastartgrafik anzuzeigen.  
 Art = 1 : Streckenlast über gesamten Träger  
 Art = 2 : Einzellast  
 Art = 3 : Moment  
 Art = 4 : Trapezlast von a (Abst) bis a+b (Abst + Lang)  
 Art = 5 : Dreieckslast über gesamten Träger  
 Art = 6 : Trapezlast über gesamten Träger  
 Art = 7 : Streckentorsionsmoment  
 Art = 8 : Normalkraftverlauf Träger

**Ric** Wirkungsrichtung der Lasten:  
 1 = in x-Richtung bzw. um x-Achse  
 2 = in y-Richtung bzw. um y-Achse  
 3 = in z-Richtung bzw. um z-Achse  
 4 = Verwölbung (nur bei Einzelmoment)

**Pli** Lastordinate entsprechend der ausgewählten Lastart:  
 bei Art = 1: Lastordinate der Gleichstreckenlast  
 Art = 2: Lastordinate der Einzellast  
 Art = 3: Lastordinate des Einzelmomentes  
 Art = 4: linke Lastordinate der veränderlichen Streckenlast  
 Art = 5: Lastordinate der Dreieckslast bei Abst  
 Art = 6: Lastordinate der Trapezlast bei Abst  
 Art = 7: Lastordinate der Streckentorsionslast  
 Art = 8: linke Lastordinate der Normalkraft

**Abst** Abstand a vom linken Trägerrand

- Pre** Lastordinate entsprechend der ausgewählten Lastart:
- bei Art = 1: keine Eingabe  
 Art = 2: keine Eingabe  
 Art = 3: keine Eingabe  
 Art = 4: rechte Lastordinate der veränderlichen Streckenlast  
 Art = 5: keine Eingabe  
 Art = 6: Lastordinate der Trapezlast bei Abst + Lang  
 Art = 7: keine Eingabe  
 Art = 8: rechte Lastordinate der Normalkraft
- Lang** Die Länge des Lastabschnittes
- bei Art = 1: keine Eingabe  
 Art = 2: keine Eingabe  
 Art = 3: keine Eingabe  
 Art = 4: Länge der veränderlichen Streckenlast  
 Art = 5: keine Eingabe  
 Art = 6: Abstand zwischen der linken und rechten Lastordinate  
 Art = 7: Länge der Streckentorsionslast  
 Art = 8: rechte Lastordinate der Normalkraft
- ey** Abstand des Lastangriffspunktes in y-Richtung zum Bezugspunkt.
- bei Art = 1: Abstand in y-Richtung  
 Art = 2: Abstand in y-Richtung, nur bei Last in y-Richtung (Ric = 2)  
 Abstand der halben Radlast von der Flanschaußenkante, bei Last in z-Richtung (Ric = 3)  
 Art = 3: keine Eingabe  
 Art = 4: Abstand in y-Richtung  
 Art = 5: Abstand in y-Richtung  
 Art = 6: Abstand in y-Richtung  
 Art = 7: keine Eingabe  
 Art = 8: keine Eingabe
- ez** Abstand des Lastangriffspunktes in z-Richtung zum Bezugspunkt
- bei Art = 1: Abstand in z-Richtung  
 Art = 2: Abstand in z-Richtung, nur bei Last in z-Richtung (Ric = 3)  
 Art = 3: keine Eingabe  
 Art = 4: Abstand in z-Richtung  
 Art = 5: Abstand in z-Richtung  
 Art = 6: Abstand in z-Richtung  
 Art = 7: keine Eingabe  
 Art = 8: keine Eingabe
- Flag** Angabe des Abstandes des Lastangriffspunktes in z-Richtung zum Bezugspunkt
- Flag = 0:  $ez = ez$   
 Flag = 1:  $ez = ez \cdot dz$ , mit  $dz$  = Profilhöhe
- Pos** Hinweis auf die Herkunft der Last, maximal 6 Zeichen

## Bezugspunkte bei einfachsymmetrischen - nicht genormten - Profilen

Der Bezugspunkt für die Lasteingabe ist i.A. der Schubmittelpunkt. Der Schubmittelpunkt ist bei einfach- oder nichtsymmetrischen bzw. benutzerdefinierten Querschnitten dem Anwender nicht bekannt. Aus diesem Grund werden für diese Querschnittstypen andere, dem Anwender bekannte Bezugspunkte definiert.

Im einzelnen gilt für die Lastabstände der Profiltypen

- Doppel-T mit Obergurt (früher Profiltypen 16)
- Doppel-T ungleich  $r = 0$  (früher Profiltypen 17)
- benutzerdefinierter U-Querschnitt (früher Profiltypen 18)

$z(qz)$  Abstand der Querlast  $qz$  in z-Richtung, gemessen ab Stegmitte

$z(qy)$  Abstand der Querlast  $qy$  in z-Richtung, gemessen ab Stegmitte

$y(qz)$  Abstand der Querlast  $qz$  in y-Richtung, gemessen ab Stegmitte

$y(qy)$  Abstand der Querlast  $qy$  in y-Richtung, gemessen ab Stegmitte

Profiltyp "dünnwandig, offen" (früher Typ 20 )

$y(qy)$  Abstand von  $qy$  in y-Richtung (Vorgabekoordinaten)

$z(qy)$  Abstand von  $qy$  in z-Richtung (Vorgabekoordinaten)

$y(qz)$  Abstand von  $qz$  in y-Richtung (Vorgabekoordinaten)

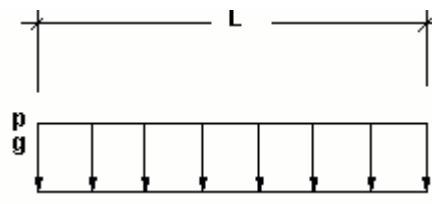
$z(qz)$  Abstand von  $qz$  in z-Richtung (Vorgabekoordinaten)

Die Abstände werden rechnerintern auf den Schubmittelpunkt umgerechnet!

## Lastarten

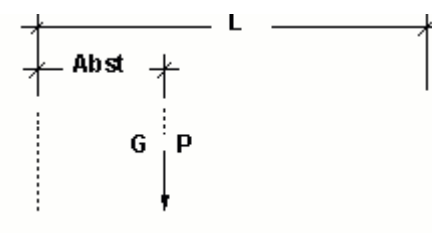
### Lasttyp 1

Gleichlast über L



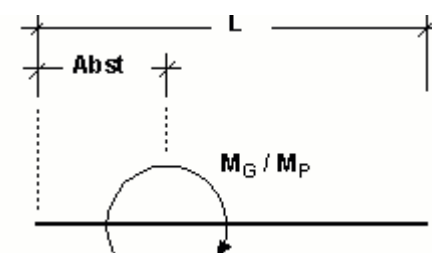
### Lasttyp 2

Einzellast bei "Abst"



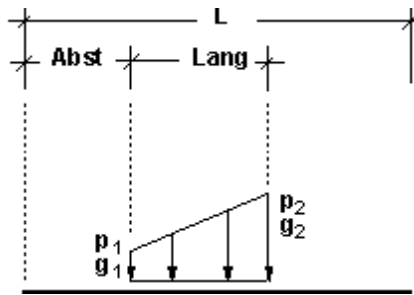
### Lasttyp 3

Einzelmoment bei "Abst"



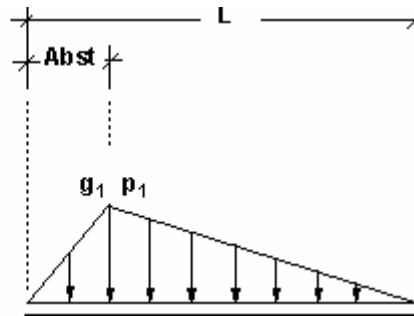
### Lasttyp 4

Trapezlast  
von "Abst" bis "Abst"+Lang



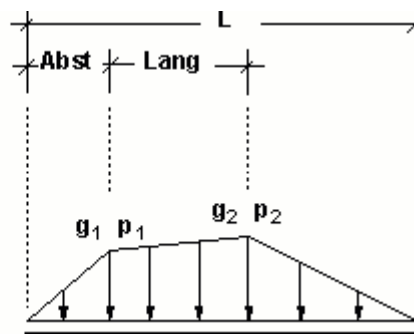
### Lasttyp 5

Dreieckslast über L



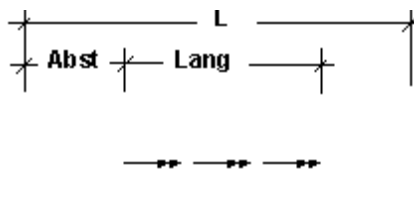
### Lasttyp 6

Trapezlast über L



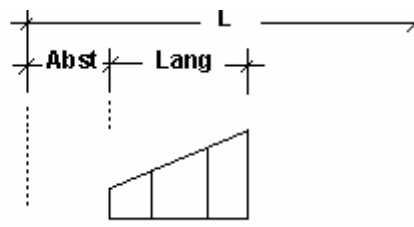
### Lasttyp 7

Streckentorsionsmoment  
von "Abst" bis Abst + Lang



### Lasttyp 8

Normalkraftverlauf  
von "Abst" bis Abst + Lang



## Überlagerungen

Für die Berechnung des Trägers ist die Definition von Überlagerungen notwendig. Einzelne Lasten und Lastfälle können z.Z. nicht separat berechnet werden.

Überlagerungen		Grenzlaststellung		Überlagerungsfaktoren		
Nr.	Bezeichnung	xmin	xmax	Nr.	1	2
1	Rad linkes Feld	3,20	33,45	LF1	1,00	0,00
2	Rad r. Feld	0,00	0,00	LF2	0,00	0,00
				LF3	0,00	0,00

Im Dialog der "Überlagerungen" werden Lastfälle nach festen Vorschriften kombiniert, d.h. die definierten Lastfälle werden mit einem bestimmten Faktor in die Überlagerung eingeführt.

In der linken Tabelle werden die vorhandenen Überlagerungen aufgeführt, neue Überlagerungen eingegeben oder auch Überlagerungen gelöscht.



Eine Leerzeile wird an das Ende der Tabelle angehängt



Die aktive Zeile wird gelöscht.



Alle Tabellenzeilen werden gelöscht.

In der rechten Tabelle werden die zugehörigen Überlagerungsvorschriften festgelegt. Die Spalten der Tabelle repräsentieren die Überlagerung. Die Zeilen der Tabelle repräsentieren die Lastfälle. In der Zelle, bei der sich Spalte und Zeile kreuzt, wird der Faktor eingegeben, mit dem ein Lastfall in die Überlagerung eingeht.

Ist im Dialog "Steuerparameter" (→ [siehe Seite 25](#)) die Option 'bewegte Lasten' gewählt worden, müssen für jede Überlagerung Trägerbereiche definiert werden, in denen sich die Radlasten bewegen dürfen, d.h. es sind die kleinste und größte zulässige x-Koordinate des in Fahrtrichtung vordersten Rades für die Überfahrt anzugeben. Grenzlaststellungen dürfen so definiert sein, dass sich einzelne Räder auch außerhalb des Trägers befinden.

## Vorverformungen (geometrische Ersatzimperfection)

Steuerparameter						Lastfälle		Lasten		Überlagerungen		Vorverformungen		Bemerkungen	
	x0 [m]	x1 [m]	Amplitude in y-Richtung	Amplitude in z-Richtung	Amplitude Phix	Art der Vorverformungen									
1	0,000	5,000	1,340	0,000	0,000	<input checked="" type="radio"/> parabelförmig <input type="radio"/> sinusförmig									
2	5,000	10,000	-1,340	0,000	0,000										

- x0** Abstand der Anfangskoordinate der Vorverformungshalbwelle vom linken Trägerrand in [m].
- x1** Abstand der Endkoordinate der Vorverformungshalbwelle vom linken Trägerrand in [m].
- Amplitude in y-Richtung** Amplitude der Verformungshalbwelle in der Mitte des Verformungsbereiches in y-Richtung in [cm].
- Amplitude in z-Richtung** Amplitude der Verformungshalbwelle in der Mitte des Verformungsbereiches in z-Richtung in [cm].
- Amplitude Phix** Amplitude der Verformungshalbwelle in der Mitte des Verformungsbereiches um die x-Achse in [rad].
- Art der Vorverformung** parabel- oder sinusförmig

Nach DIN 18800 Teil 2 sind bei Berechnungen nach Theorie II. Ordnung zur Berücksichtigung geometrischer und struktureller Imperfektionen geometrische Ersatzimperfectionen (→ siehe Seite 44) zu berücksichtigen. Dies sind bei verschieblichen Systemen Vorverdrehungen infolge von Stabdrehwinkeln und bei unverschieblichen Systemen Vorverkrümmungen in Form sinus- oder parabelförmiger Halbwellen. Obwohl üblicherweise im Bauwesen geometrische Ersatzimperfectionen nicht in Form einer imperfekten Systemgeometrie sondern, zur vereinfachten Anwendung, mittels statischer Ersatzlasten erfasst werden, erlaubt BTII den Ansatz von Vorverformungshalbwellen.

BTII gestattet Vorverformungen in Richtung der beiden Querschnittshauptachsen y und z sowie Vorverdrehungen (Torsionsverdrehungen) um die Stablängsachse. Zur Reduktion des Eingabeaufwandes ist zur Berücksichtigung von Vorverformungen lediglich die Festlegung der Nullpunkte der Vorverformungshalbwellen sowie der Vorverformungsamplituden erforderlich. Aus diesen Angaben ermittelt das Rechenprogramm intern die Größe der Vorverformungen in allen zwischen den Nulldurchgängen der Halbwellen liegenden Knotenpunkten. Die bei einer Rechnung nach Theorie II. Ordnung zu berücksichtigenden Vorverformungsersatzlasten ergeben sich aus der Multiplikation der Vorverformungen mit den geometrischen Steifigkeitsmatrizen.

Der Verlauf der Vorverformung sollte affin zur niedrigsten Knick- bzw. Biegedrillknickeigenform angesetzt werden. Ersatzweise ist es nach [6] ausreichend, die Vorverformung so zu wählen, dass eine genügend große Komponente der niedrigsten Eigenform enthalten ist, um eine Annäherung der Lastverformungskurve an den 1. Eigenwert zu erreichen.

Es sei hier insbesondere darauf hingewiesen, dass bei dem durch gegengleiche Randmomente belasteten, seitlich nicht gestützten Einfeldträger mit Momentennullpunkt in Feldmitte die niedrigste Biegedrillknickeigenform einen Nulldurchgang der seitlichen Verschiebung in Feldmitte aufweist.

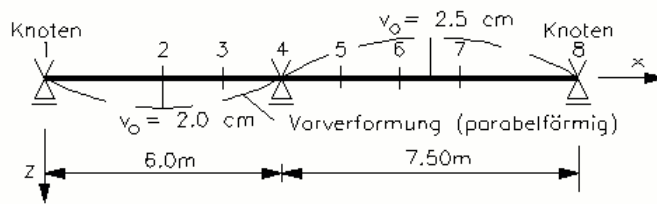
Die Amplituden sind in Abhängigkeit der Knickspannungslinien a,b,c,d nach DIN 18800 Teil 2 und der Ausweichrichtung (y oder z) zu bestimmen. Es ist zu beachten, dass beim Nachweisverfahren Elastisch-Elastisch nach DIN 18800 T2 die Vorverformungen nach Tabelle 3 mit dem



Faktor 2/3 reduziert werden dürfen. Weiterhin darf nach Element (202) für den Biegedrillknicknachweis die Vorkrümmung um 50% abgemindert werden.

Beispiel:

### Zweifeldträger – Vorverformung



Anzahl der Vorverformungshalbwellen: 2

1.Halbwellen: Knoten 1 bis Knoten 4

Amplitude in z-Richtung 2.0cm

2.Halbwellen: Knoten 4 bis Knoten 8

Amplitude in z-Richtung -2.5cm

### Bemerkungen

Eingabe von zusätzlichem Text zur Position, der auch in der Ausgabe erscheint (nähere Informationen in der Online-Hilfe).

# Berechnung

Die Berechnung erfolgt nach Doppelklick auf "Berechnen" in der Hauptauswahl oder bei Ausgabe auf Drucker / Bildschirm.

## Berechnen - Elementierung

Unter >>Bearbeiten >>Programmsteuerung können Sie verschiedene Parameter einstellen:

The screenshot shows a software interface with two tabs: 'Berechnung' and 'Dimensionen'. The 'Dimensionen' tab is active, and within it, the 'Elementierung' section is highlighted. It contains two input fields with their respective values and units, and associated mathematical constraints. The first field is 'minimale Elementausdehnung=' with a value of '1,00' and unit 'cm', with the constraint '1 cm <= MinDx <= 5 cm'. The second field is 'Mindestelementanzahl am Träger=' with a value of '100' and the constraint '10 <= MinNE <= 5000'.

### Minimale Elementausdehnung

Gibt die Mindestlänge eines finiten Elementes bei der Diskretisierung des Systems an.

### Mindestelementanzahl am Träger

Gibt die Mindestanzahl von finiten Elementen bei der Diskretisierung des Systems an. Die tatsächliche Anzahl der Elemente kann nach der Diskretisierung wesentlich höher sein. Der Quotient aus Trägerlänge und Mindestelementanzahl ergibt ein Richtwert für die Elementlänge in den Trägerabschnitten.

### Diskretisierung des Systems

Der Träger ist beschrieben durch seine Länge und einer Liste von Schnitten, an denen Querschnitte definieren werden. Dadurch können am Träger Querschnittsprünge und Vouten entstehen. Der Träger ist für die Berechnung jedoch in Abschnitte zu unterteilen, die konstante Querschnitte aufweisen. Vouten werden dabei mit einer angemessenen Anzahl von Abschnitten mit gleichem Querschnitt abgestuft.

Bei der Diskretisierung ergibt sich das Knotennetz vorerst aus den Anfangs- und Endkoordinaten der Abschnitte. Aus der Tatsache heraus, dass BTII automatisch Knotenlasten, Lagerbedingungen, Bereichsgrenzen sowie die Nullpunkte der Vorverformungshalbwellen in den nächstliegenden Knoten verschiebt, sind an diesen Stellen weitere Abschnittsgrenzen zu definieren. Dies geschieht aber nur dann, wenn der Abstand zwischen der einzufügenden Abschnittsgrenze und schon bestehenden Abschnittsgrenzen ein Mindestmaß überschreitet. Dieses Mindestmaß wird durch den Wert der minimalen Elementausdehnung angegeben.

Für die Netzgenerierung ist der Träger in weitere Abschnitte zu unterteilen. Folgende Randbedingungen definieren weitere Abschnittsgrenzen:

1. Anfangs- und Endkoordinaten von Bettungsbereichen
2. starre und elastische Lager
3. Nullpunkte der Vorverformungshalbwellen
4. Knotenlasten
5. Anfangs- und Endkoordinaten von Elementlasten

Diese Randbedingungen werden als Stützpunkte eingeführt, die die bisher vorhandenen Abschnitte weiter unterteilen. Den einzufügenden Abschnitten werden die Querschnitte zugeordnet, die zu den Abschnitten gehören, in die sie eingefügt werden.

Die Anzahl der Elemente je Abschnitt ergibt sich aus der Trägerlänge und Mindestanzahl der Elemente, die vom Anwender definiert werden. (Siehe oben). Das Knotennetz ergibt sich aus den Anfangs- und Endkoordinaten der Abschnitte mit konstantem Querschnitt als auch aus den Koordinaten der Elemente, aus denen der jeweilige Abschnitt gebildet wird. Aus der Tatsache heraus, dass jeder Abschnitt einen Nachbarabschnitt hat, werden die Knotenkoordinaten jeweils aus den Anfangskoordinaten der Abschnitte gewonnen. Der letzte Abschnitt bildet eine Ausnahme insofern, dass dessen Endkoordinate ebenfalls als Knotenpunkt dient.

## Dimensionen

In diesem Dialog können Sie die Dimensionen sowie die Nachkommastellen für die jeweiligen Abschnitte wählen.

Parameter	Unit	Nachkommastellen	Value
Querschnittswerte	mm	0	$W_y = 836 \text{ cm}^3$
System	m	0.00	$L = 5,60 \text{ m}$
Verformungen	cm	0.00	$v = 2,54 \text{ cm}$
Spannungen	$\text{N/mm}^2$	0.00	$\text{SigamX} = 158,79 \text{ N/mm}^2$
Kräfte	kN	0.00	$F = 200,00 \text{ kN}$

Buttons: Standard, Ok, Abbrechen

## Ausgabe / Ergebnisse

Sie können auf Bildschirm oder Drucker ausgeben (Doppelklick auf Bildschirm / Drucker in der Hauptauswahl).

### Ausgabeprofil

Im Dialog zum Ausgabeprofil definieren Sie den gewünschten Inhalt des statischen Dokumentes. Dabei wird zwischen den Angaben zum statischen System und den Berechnungsergebnissen unterschieden. Um unnötig lange Ausgaben zu vermeiden, können Sie den Ausgabeumfang einschränken. Markieren Sie diejenigen Werte und Grafiken, die ausgegeben werden sollen.

Die Angaben zum statischen System sind intuitiv und entsprechen den jeweiligen Absätzen im statischen Dokument.

Die Berechnungsergebnisse können für jede Überlagerung getrennt ausgewählt werden. In der Tabelle wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit zwischen tabellarisch dargestellten Berechnungsergebnissen und grafisch dargestellten Berechnungsergebnissen unterschieden.

#### Tabellarische Ausgaben

- Schn.** Schnittgrößen der aktuellen Überlagerungen
- Verf.** Verformungen des Tragwerkes bei der aktuellen Überlagerung
- Eig.** Verformungen des Tragwerkes, die zur ersten Eigenform gehören
- Ers.** Ersatzstabnachweis nach DIN 18800 T2 oder EC3, sofern berechnet
- Fliess.** Fließfunktion für doppeltsymmetrische I-Profile, sofern vorhanden
- Sp-Aus.** Spannungsauswertung aus der aktuellen Überlagerungen bzw. der maßgebenden Laststellung
- Last.** Spannungen infolge Lasteinleitungsproblem am Unterflansch

#### Grafische Ausgaben

- My** Moment um die y-Achse
- Qz** Querkraft in z-Richtung
- N** Normalkraft in x-Richtung
- Mz** Moment um die z-Achse
- Qy** Querkraft in y-Richtung
- Mt** Torsionsmoment
- Mw** Wölbmoment
- vy** Verschiebung in y-Richtung
- vz** Verschiebung in z-Richtung
- phix** Verdrehung um die x-Achse
- Sig.** Normalspannung am Querschnitt für den am Bildschirm gewählten Querschnittspunkt
- Eta** Auslastungsgrad am Querschnitt aus der maximalen Balkennormalspannung

Vorverform.			Eigenformen			Spann.	
vy	vz	Phix	vy	vz	Phix	Sig.	Eta
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

## Anzeige der Ergebnisgrafiken über Symbole

Zusätzlich zu den Standardsymbolen der Symbolleiste bietet BTII Symbole (Funktionen) für die Darstellung der verschiedenen Ergebnisgrafiken (Momente, Verformungen, Spannungen ...).



Systembild

<b>N</b>	N-Fläche
<b>My</b>	Moment um y-Achse
<b>Qz</b>	Querkraft in z-Richtung
<b>Mt</b>	Torsionsmoment
<b>Mz</b>	Moment um z-Achse
<b>Qy</b>	Querkraft in y-Richtung
<b>Mw</b>	Wölbmoment



Verformungen

$\eta$	Eta-Linie für Normalspannung in x-Richtung
$\sigma_x$	Normalspannung in x-Richtung
$v$	Verschiebung in y-Richtung
$w$	Verschiebung in z-Richtung
$\varphi_x$	Verdrehung um die x-Achse (Torsionsrotation)

## Auswahllisten-Leiste

Mit den folgenden Auswahllisten steuern Sie die grafische Darstellung auf dem Bildschirm.



Auswahlliste 1

Auswahlliste 2

Auswahlliste 3

Auswahlliste 4

**Auswahlliste 1:** Hier wählen Sie, ob Sie die eingegeben Lasten und die dazugehörigen Berechnungsergebnisse für einen Lastfall oder für eine Überlagerung anzeigen möchten.

Beachten Sie dabei, dass Berechnungsergebnisse **zur Zeit** nur für Überlagerungen vorhanden sind. Wählen Sie also z.B. das Momentenbild für das Moment um die y-Achse (My), so wird automatisch die Liste auf den Eintrag "Überlagerungen:" umgestellt.

**Auswahlliste 2:** Hier wählen Sie, entsprechend dem Eintrag in Auswahlliste 1, die jeweiligen Lastfälle bzw. Überlagerungen, für die Sie die Lasten und die dazugehörigen Berechnungsergebnisse anzeigen wollen.

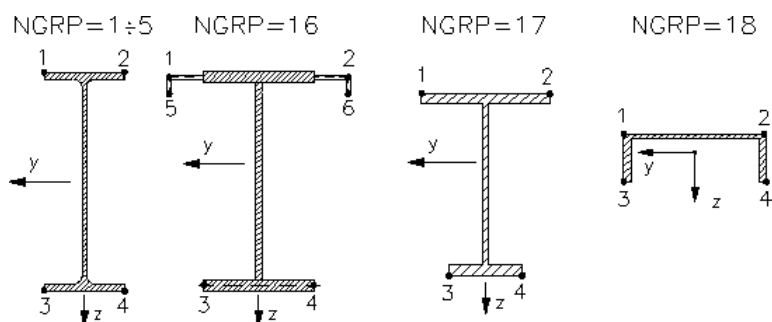
**Auswahlliste 3:** Wenn die Spannungsfunktion zur Anzeige gewählt ist, müssen Sie den Querschnittspunkt angeben, für den die Spannungsfunktion angezeigt werden soll.

Verweis auf Querschnittspunkte für

- I, IPE, HEA, HEB, HEM

- Doppel-T, Einfach-T, Doppel-T mit Obergurt, dünnwandig offen und IAW

### Grafik Querschnittspunkte



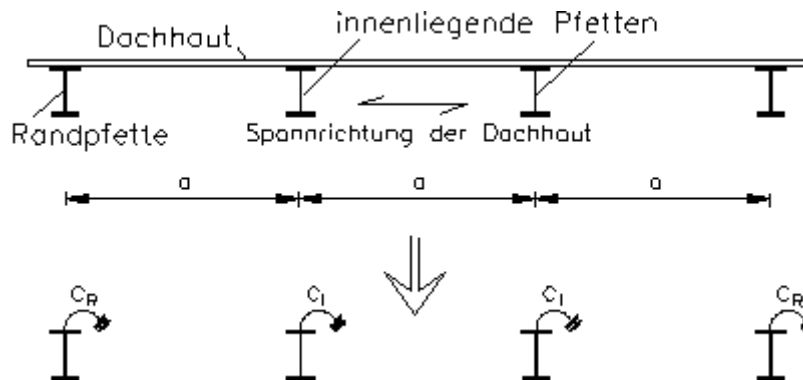
*Hinweis:* Die im alten DOS-Programm aufgeführten Profiltypbezeichnungen (1,2,3,4,5,9,16,17,18,181,19 und 20) werden nicht mehr verwendet, sind jedoch der Übersicht wegen im Kapitel Querschnittsabmessungen jeweils in Klammern angegeben.

**Auswahlliste 4:** Wenn die Verformungen zur Anzeige gewählt sind, müssen Sie angeben, ob Sie die Verformungen am Tragwerk infolge der Einwirkungen anzeigen lassen möchten oder ggf. die Verformungsfunktionen für die Eigenfigur. Die Eigenfigur steht jedoch nur bei der Berechnung nach dem Ersatzstabverfahren (→ siehe Seite 44) nach DIN 18800 Teil 2 und EC3 zur Verfügung.

# Anwendungshinweise

## Ermittlung der Federsteifigkeiten

### Pfetten mit drehelastischer Stützung durch die Dachhaut



ED: Elastizitätsmodul der Dachhaut

ID: Trägheitsmoment der Dachhaut je Längeneinheit

Die Übertragung des Momentes zwischen Pfette und Dachhaut durch Kontakt oder unter Beanspruchung der Verbindungsmittel ist nachzuweisen. Siehe dazu Vogel/Heil [13], Seite 55.

Wird das zu übertragende Moment größer als das Kontaktmoment (= das durch Auswandern des Lastangriffspunktes bis zur Flanschseite entstehende Moment), ist zusätzlich die Nachgiebigkeit der Verbindung Pfette - Trapezblech (meist selbstschneidende Schrauben) zu berücksichtigen. Siehe dazu Lindner [5], Seite 55.

### Binder mit drehelastischer Stützung durch Pfetten

Die Federsteifigkeiten sind analog zum oben beschriebenen Fall zu ermitteln. Auch hier ist zwischen Randbindern und Mittelbindern (= innenliegende Binder) zu unterscheiden.

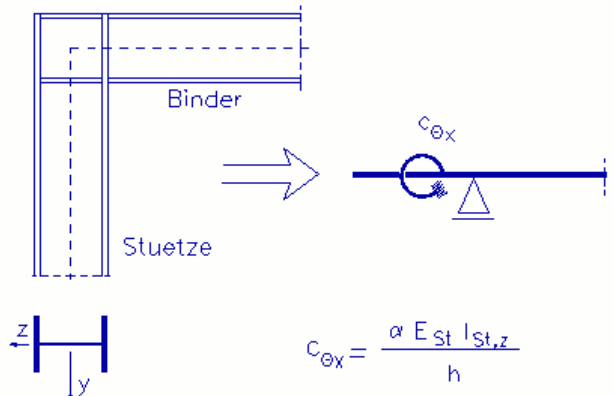
### Binder mit elastischer Translationsstützung am Obergurt durch Pfetten

Die Steifigkeit der horizontalen Ersatzfeder ergibt sich aus der Nachgiebigkeit des horizontalen Dachverbandes in den Randfeldern. Gegebenenfalls ist dabei auch der Schlupf in den Verbindungsmitteln zu berücksichtigen.

Hinweise zur Berechnung von Ersatzsteifigkeiten verschiedener Fachwerksformen finden sich z.B. in Rubin/Vogel [12], Seite 55.

## Binder mit elastischer Torsionsstützung durch die anschließende Stütze

- Est Elastizitätsmodul der Stütze
- I<sub>st,z</sub> Trägheitsmoment der Stütze um z-Achse
- h Höhe des Stützenprofils
- α Einspannwert in Abhängigkeit von der Lagerung des Stützenfußes um die schwache Achse.  
α = 4: eingespannt;  
α = 3: gelenkig gelagert.



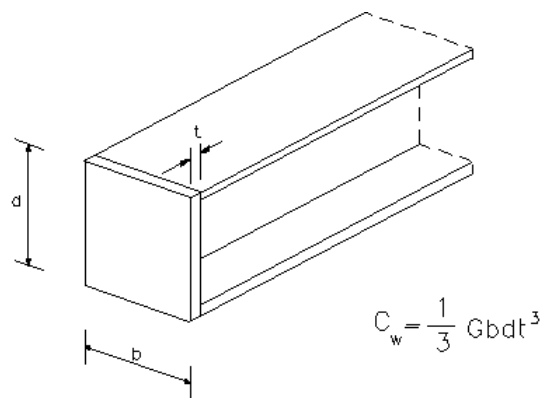
Diese Stützwirkung ist i.d.R. gering!

## Träger mit elastischer Wölbstützung

Die Behinderung der freien Verwölbung erhöht die Torsionssteifigkeit eines Trägers mit offenem dünnwandigen Querschnitt. Es folgen an dieser Stelle Angaben zur Berechnung von diskreten Wölbfedern  $C_w$  für 3 häufig vorkommende Fälle von Wölbbehinderung.

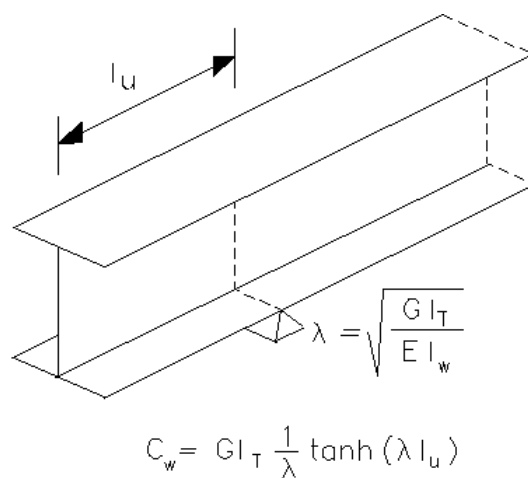
### a) Kopfplatte

- G Schubmodul des Materials der Kopfplatte



### b) Überstand (kann direkt modelliert werden!)

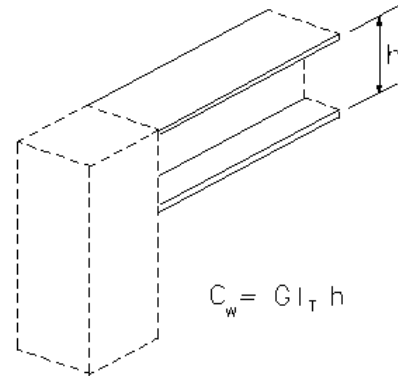
- I<sub>T</sub> St. Venantsches Torsionsträgheitsmoment
- I<sub>ω</sub> Wölbträgheitsmoment
- l<sub>u</sub> Überstand
- E Elastizitätsmodul
- G Schubmodul





c) Stützenanschluss

- h Trägerhöhe (Schwerpunktstabstand der Flansche)
- $I_T$  St. Venantsches Torsionsträgheitsmoment der Stütze



offene Profile

$$I_T = \sum \left( \frac{1}{3} \cdot s_i \cdot t_i^3 \right)$$

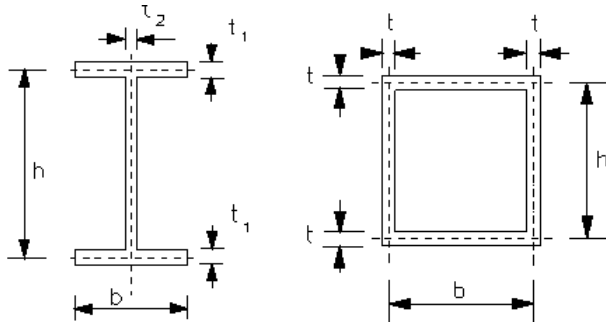
geschlossene Profile

$$I_T = 4 \cdot \frac{A_m^2}{\sum \frac{s_i}{t_i}}$$

dabei sind

- $s_i$  Länge des i-ten Rechteckes
- $t_i$  Breite des i-ten Rechteckes
- $A_m$  Fläche des durch die Profilmittellinie eingeschlossenen Querschnittes

**Beispiele**



$$I_T = \frac{1}{3} (2bt_1^3 + ht_2^3) \quad I_T = \frac{4b^2 h^2 t}{2(b+h)}$$

**Träger mit Schubfeldstützung**

Pfetten unter Dachscheiben sind in Obergurthöhe durch die Schubfeldsteifigkeit starr bzw. elastisch gegen seitliches Verschieben gestützt. BTII sieht derzeit keine Möglichkeit vor, die Schubfeldwirkung exakt zu erfassen.

Eine näherungsweise Berücksichtigung ergibt sich durch 'Umrechnen' der Schubfeldsteifigkeit  $S^*$  in eine äquivalente, am Obergurt angreifende elastische Bettung mit der Steifigkeit  $\bar{c}_y$

Diese erhält man durch Gleichsetzen der virtuellen Arbeiten einer elastischen Bettung mit jener des Schubfeldes.

$$\int S^* v_o' \delta v_o' dx = \int \bar{c}_y v_o \delta v_o dx$$

Bei Ansatz einer sinusförmigen Horizontalverschiebung des Obergurtes mit  $n$  Halbwellen über die Trägerlänge

$$v_o = \bar{v}_o \sin \frac{n \pi x}{l}$$

folgt daraus

$$\bar{c}_y = S * \left(\frac{n \pi}{l}\right)^2$$

Die Berechnung der elastischen Bettung  $\bar{c}_y$  ist zunächst mit  $n = 1$  durchzuführen und anschließend anhand der sich dabei einstellenden Verschiebung des Obergurtes zu verifizieren, bzw. mit  $n > 1$  zu wiederholen.

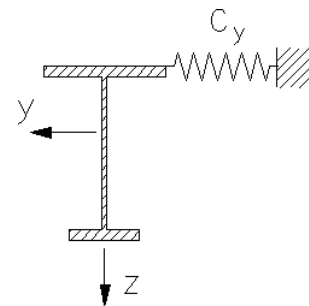
In vielen praktischen Fällen ist diese Näherung ausreichend

## Biegedrillknicken mit gebundener Drehachse

Das in der Praxis häufig auftretende Problem des Biegedrillknickens mit gebundener Drehachse im Abstand  $z_o$  vom Schwerpunkt kann in einfacher Weise wie folgt erfasst werden:

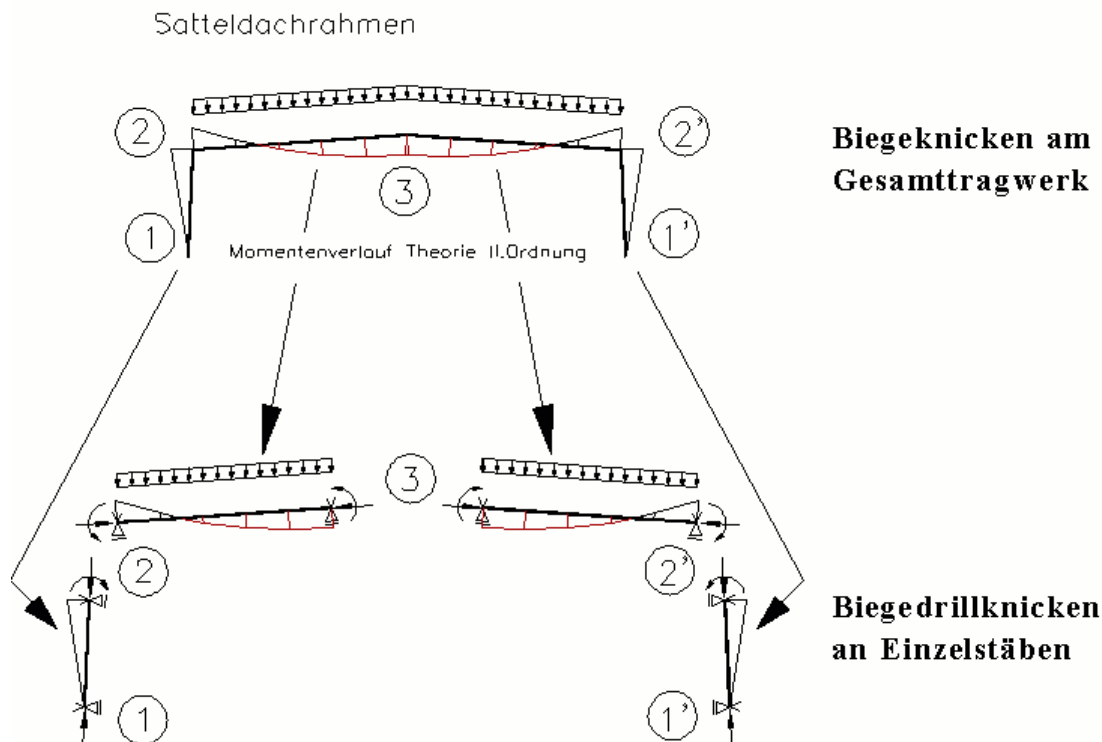
Im Abstand  $z_o$  vom Schwerpunkt wird eine elastische Translationsbettung in  $y$ -Richtung mit der *Steifigkeit*  $10E+8$  bis  $10E+10$  angesetzt. Die demzufolge bezüglich Schwerpunkt und Schubmittelpunkt sich einstellenden Verschiebungen und Verdrehungen führen zur Verschiebung Null in der vorgegebenen Zwangsdrehachse.

Auch exzentrische, diskrete Federn können dazu verwendet werden, seitliche Verschiebungen in  $y$ - oder  $z$ -Richtung in beliebigen Querschnittspunkten zu behindern. Zu diesem Zweck sind große, jedoch *nicht beliebig große Federsteifigkeiten* vorzugeben. Grundsätzlich sollten *Steifigkeiten*  $< 10E+16$  sein. Um die numerische Stabilität der Berechnung nicht zu gefährden, sollten diskrete Steifigkeiten zur Behinderung einer Verschiebung nur so groß gewählt werden wie unbedingt erforderlich. Dies kann durch Überprüfung der kinematischen Zwangsbedingung im Querschnitt verifiziert werden.



## Stabilitätsnachweise nach DIN 18800 T2

Die neue nationale Stabilitätsnorm für den Stahlbau DIN 18800 T2 sieht vereinfachend getrennte Untersuchungen des Biegeknickens und des Biegedrillnickens vor. Danach kann der Nachweis der ebenen Stabilität (Biegeknicken) durch eine Berechnung des ebenen Tragwerkes nach Theorie II. Ordnung unter der Einwirkung der Bemessungslasten und gegebenenfalls von Vorverformungen erfolgen. Der Biegedrillnicknachweis wird anschließend für die gedanklich aus dem Gesamtsystem herausgelösten Einzelstäbe geführt.



Hierbei ist folgendes zu beachten:

- Die Einzelstäbe werden durch die Einwirkungen **und** die am Gesamtsystem ermittelten Schnittgrößen an den Stabenden beansprucht. Letztere sind gegebenenfalls nach Theorie II. Ordnung zu ermitteln.
- Die beim gedanklichen Herauslösen des Einzelstabes angenommenen Randbedingungen sind beim Nachweis des Biegedrillnickens zu berücksichtigen.  
Dabei ist besondere Aufmerksamkeit auf die Randbedingungen hinsichtlich des Ausweichens aus der Tragwerksebene und der Torsionsverdrehung zu verwenden.  
Von der Stützung durch angrenzende Bauteile kann im Programm *BTII* in einfacher Weise durch die Verwendung von Ersatzfedern (→ *siehe Seite 39*) Gebrauch gemacht werden.
- Für den Biegedrillnicknachweis des Einzelstabes stehen prinzipiell zwei Varianten zur Verfügung:
  - a) Vereinfachter Nachweis ("Ersatzstabnachweis") auf der Grundlage idealer Biegedrillnicklasten → Elemente (306), (307), (320), (323)  
Die Anwendung der vereinfachten Biegedrillnicknachweise in DIN 18800 T2 ist beschränkt hinsichtlich
    - spezieller Querschnittsformen und
    - ausgewählter Belastungen.

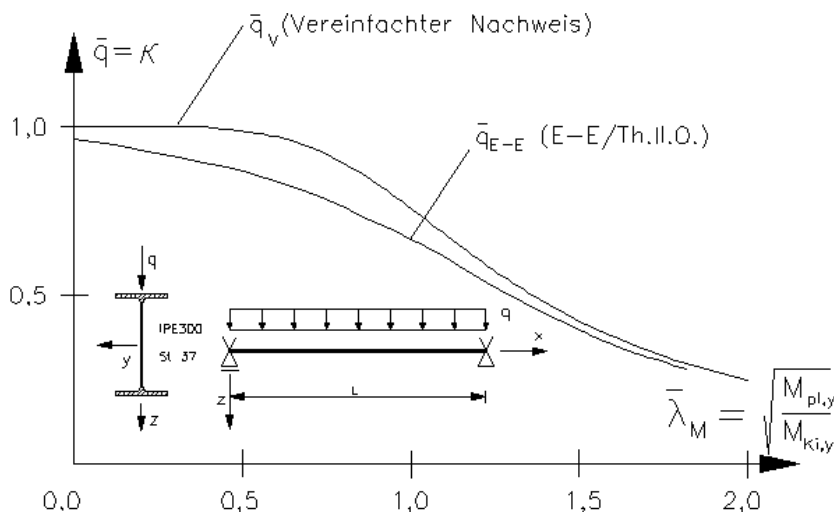
- b) Tragsicherheitsnachweis mit Berechnung des räumlich imperfekten Einzelstabes nach Elastizitätstheorie oder Fließgelenktheorie II.Ordnung → Elemente (121) und (201).

Da hierfür keine baustatischen Grundformeln existieren, scheidet eine Handrechnung praktisch aus. Auch die Anwendung der Fließgelenktheorie (Verfahren P - P) ist in diesem Zusammenhang gegenwärtig wegen fehlender kinematischer Beziehungen für das räumliche Fließgelenk bei Biegung mit Wölbkrafttorsion nicht möglich.

Die Nachweisverfahren Elastisch-Elastisch (E-E) und Elastisch-Plastisch (E-P) sind jedoch konsistent und universell, d.h. unabhängig von der Belastung und der Querschnittsform einsetzbar. Das Verfahren E-E kann mit dem Programm *BTII* in einfacher Weise für alle in der Praxis vorkommenden Fälle angewendet werden.

Das Verfahren E-P ist im Hinblick auf die in DIN 18800 T1 angegebenen plastischen Interaktionsbeziehungen auf doppelt symmetrische I-Querschnitte beschränkt.

Vergleich von Biegedrillknicktragfähigkeiten: Vereinfachter Nachweis - Nachweis Th. II.O. E - E



### Vereinfachter Biegedrillknicknachweis (Ersatzstabnachweis)

Wie aus der schlankheitsabhängigen Darstellung der auf die ebene plastische Grenzlast bezogenen Biegetorsionstragfähigkeit zu erkennen ist, führt die Anwendung des vereinfachten Verfahrens in DIN 18800 T2 wegen der darin enthaltenen Nutzung plastischer Reserven in Bereichen geringer und mittlerer Schlankheiten zu z.T. deutlich höheren Werten als nach dem Verfahren E - E. *BTII* bietet daher die Möglichkeit für die dafür zugelassenen Querschnittsformen und Belastungen einen vereinfachten Nachweis auf der Grundlage idealer Biegedrillknicklasten zu führen.

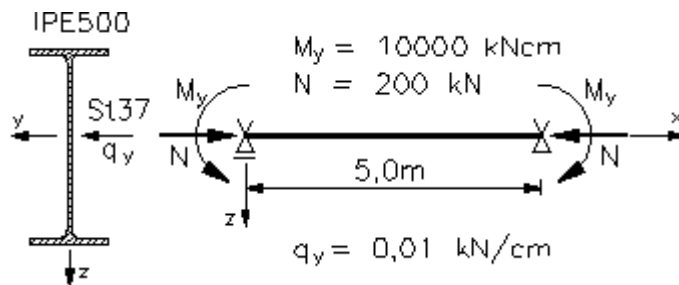
Entsprechend DIN 18800 T2 klassifiziert *BTII* für den vereinfachten Biegedrillknicknachweis zunächst die Belastung in die vorgesehenen Fälle

- planmäßig mittiger Druck (Nachweis nach DIN 18800 T2 Abschnitt 3.2.2)
- planmäßig einachsige Biegung ohne Normalkraft (Nachweis nach DIN 18800 T2 Abschnitt 3.3.4)
- planmäßig einachsige Biegung mit Normalkraft (Nachweis nach DIN 18800 T2 Abschnitt 3.4.3)
- planmäßig zweiachsige Biegung mit oder ohne Normalkraft (Nachweis nach DIN 18800 T2 Abschnitt 3.5.2)

und untersucht, ob die Voraussetzungen für die Zulässigkeit bzw. Notwendigkeit eines vereinfachten Nachweises nach den genannten Abschnitten vorliegen. Bei mehreren Schnittgrößen zerlegt *BTII* anschließend die Belastung in die einzelnen Komponenten  $N$ ,  $M_y$  und  $M_z$  und führt jeweils getrennte Eigenwertuntersuchungen durch. Nach Auffinden des jeweils kleinsten Eigenwertes im Rahmen einer Subspace-Iteration wird durch 'Shiften' der Steifigkeitsmatrix um diesen Wert geprüft, ob tatsächlich der kleinste Wert gefunden wurde. Anhand der Eigenform, des

Querschnittes und der Art der Schnittgröße wird weiterhin untersucht, ob der gefundene Eigenwert das Biegedrillknickproblem oder das Biegeknickproblem beschreibt. Da *BTII* ausschließlich der Biegedrillknickuntersuchung dient, unterbindet das Programm in letzterem Fall das Knicken des Querschnittes durch Anbringen einer starren elastischen Bettung in der entsprechenden Richtung und führt sodann eine erneute Eigenwertuntersuchung des so veränderten Systems durch.

### Vereinfachter BDK-Nachweis: Beispiel 1



Für den vereinfachten Biegedrillknicknachweis nach DIN 18800 T2 Abschnitt 3.5.2 ermittelt *BTII* zunächst die Eigenwerte bei getrennter Wirkung der Schnittgrößen zu

$$N_{ki} = 1775,80 \text{ kN (Knicken um z-Achse)}$$

und  $M_{ki,y} = 55850,0 \text{ kNcm}$  (Biegedrillknicken in y-Richtung).

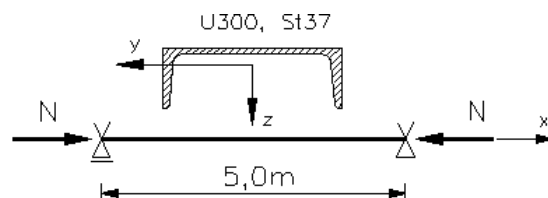
Aus den bezogenen Schlankheiten

$$\bar{\lambda}_z = 1,25 \text{ und } \bar{\lambda}_M = 0,97 \text{ ergeben sich die Abminderungsfaktoren } \bar{\kappa}_z = 0,45 \text{ und } \bar{\kappa}_M = 0,73.$$

Mit den Beiwerten  $k_y = 0,99$  und  $k_z = 1,22$  folgt für die Interaktionsgleichung (30) nach Abschnitt 3.5.2

$$\frac{N}{\bar{\kappa}_z \cdot N_{pl,d}} + \frac{M_y}{\bar{\kappa}_M \cdot M_{pl,y,d}} k_y + \frac{M_z}{M_{pl,z,d}} k_z = 0,18 + 0,28 + 0,05 = 0,51 < 1,0$$

### Vereinfachter BDK-Nachweis: Beispiel 2



Die Eigenwertuntersuchung im Rahmen eines vereinfachten Biegedrillknicknachweises nach DIN 18800 T2 Abschnitt 3.2.2 führt hier in *BTII* zunächst zu einem Eigenwert von

$$N_{ki} = 410,4 \text{ kN}$$

Aus der daran anschließenden Untersuchung der Eigenform erkennt *BTII*, dass dieser Wert zum entkoppelten - und getrennt zu untersuchenden - Knickproblem um die y-Achse (schwache Achse!) gehört. Für die weitere Biegedrillknickuntersuchung wird daher der Querschnitt programmintern gegen Ausweichen in z-Richtung durch Anbringen einer starren Bettung in z-Richtung gehalten.

Die erneute Eigenwertuntersuchung des solchermaßen veränderten Systems liefert für eine Eigenform, bei welcher der Querschnitt in y-Richtung verschoben und dabei um die x-Achse verdreht wird, den Eigenwert

$$N_{ki} = 1930 \text{ kN}$$

Mit den Werten

$\lambda_{ki} = 0,86$ ,  $\alpha = 0,49$  und  $\kappa = 0,63$  folgt nach Gl.(3) in DIN 18800 T2

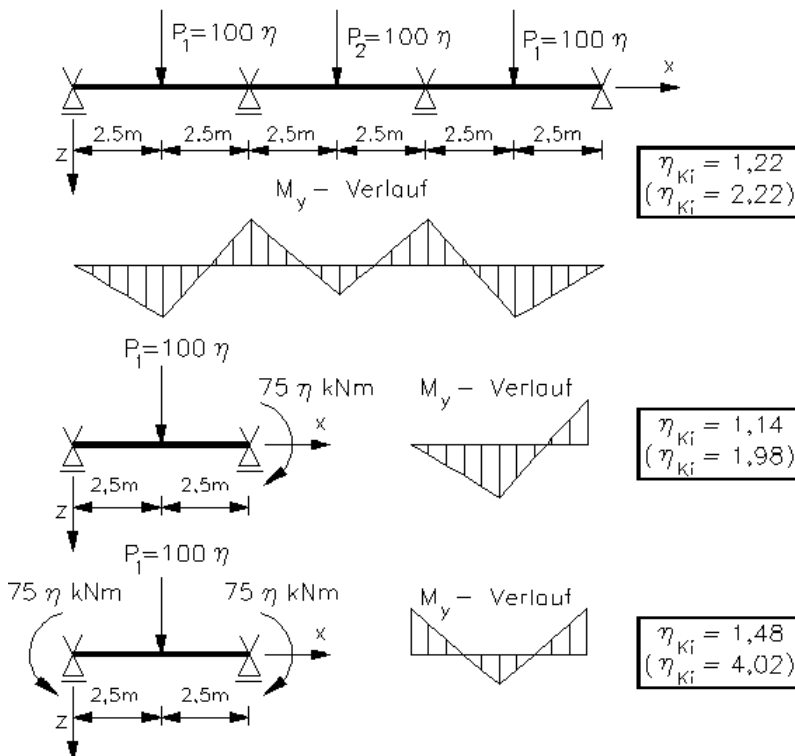
$$\frac{N}{\kappa \cdot N_{pl,d}} = 0,25 < 1,0$$

Damit ist der Nachweis der Biegedrillknicksicherheit erfüllt!

### Vereinfachter BDK-Nachweis: Beispiel 3

Auf der Grundlage der beschriebenen allgemeinen, geometrisch nichtlinearen FE-Formulierung bestehen hinsichtlich der Belastung und Lagerung bzw. Stützung keine zusätzlichen Einschränkungen wie Sie sich aus der Anwendung analytischer Lösungen ergeben. Damit können somit nicht nur Probleme mit diskreten Lasten und Stützungen untersucht werden, sondern es entfällt auch die Notwendigkeit Mehrfeldträger durch gedankliches Heraustrennen der einzelnen Träger abschnittsweise zu untersuchen. Dies führt, wie aus dem nachfolgenden Beispiel zu ersehen ist, sowohl zu einer Erhöhung der Wirtschaftlichkeit als auch zu einer erhöhten Sicherheit.

Profil IPE300, Stahl St37



Zum Vergleich wurden Verzweigungslastfaktoren  $\eta_{ki}$  mit *BTII* sowohl für Lastangriff der Einzellasten auf dem Obergurt als auch bei Lastangriff im Schwerpunkt des Querschnittes (Klammerwerte) ermittelt. Wie aus der Darstellung für beide Fälle zu erkennen ist, führt die Untersuchung des gedanklich herausgetrennten Endfeldes unter der Wirkung der Einzellast sowie des Randmomentes aus der Durchlaufträgerwirkung zu einer sicheren Abschätzung der Biegedrillknicktragfähigkeit. Dasselbe Vorgehen für das Innenfeld hat jedoch ein unsicheres Bemessungsergebnis zur Folge. Ursachen dafür sind in diesem speziellen Fall einerseits die Stabilisierung des Randfeldes durch den Spannungszustand (Momentenverlauf) des Innenfeldes und andererseits die offensichtliche Destabilisierung des Innenfeldes durch die Momentenbeanspruchung der Randfelder. Die Größe der Stützwirkung einerseits bzw. der Destabilisierung andererseits hängt

nicht nur vom System, also Stützweite und Steifigkeit, sondern auch von Art und Größe der Beanspruchung in den benachbarten Feldern ab. Eine einfache, ingenieurmäßige, auf der sicheren Seite liegende Abschätzung der Interaktion der Einzelfelder hinsichtlich des Biegedrillknickverhaltens ist daher nicht möglich und sollte unterbleiben, wenn der Verzweigungslastfaktor für das Gesamtsystem ermittelt werden kann.

### Vereinfachter BDK-Nachweis: Allgemeine Hinweise

- Für andere als die in DIN 18800 T2 im Rahmen eines vereinfachten Biegedrillknicknachweises zulässigen Querschnittsformen ermittelt *BTII* nur die jeweils kleinsten Eigenwerte. Ein Nachweis kann jedoch nicht erbracht werden, da Abminderungsfaktoren  $\kappa$  dafür unbekannt sind.
- Teilsicherheitsfaktoren sind beim vereinfachten Biegedrillknicknachweis auf Last- und Widerstandsseite zu berücksichtigen. Alle Lasten (äußere ebenso wie Schnittkrafteinwirkungen an den Stabenden) sind daher als  $\gamma_F$ -fache Gebrauchslasten (evtl. reduziert mit dem Kombinationsbeiwert  $\psi$ ) durch den Anwender vorzugeben. Die vom Anwender angegebenen charakteristischen Widerstandsgrößen (Fließgrenze, Querschnittswerte) werden durch das Programm durch den im Stahlbau einheitlichen Teilsicherheitsbeiwert des Widerstandes  $\gamma_M = 1,1$  geteilt.
- Da in den vereinfachten Biegedrillknicknachweis nur die 'idealen' Verzweigungslasten auf der Grundlage des Schnittkraftzustandes nach Theorie I. Ordnung eingehen sind Vorverformungen ohne Einfluss!

### Tragfähigkeitsnachweise nach Th. II. Ordnung Elastisch-Elastisch und Elastisch-Plastisch

Bei Tragfähigkeitsnachweisen nach Theorie II.Ordnung ist in DIN 18800 T2 die Berücksichtigung von räumlichen Vorverformungen nach Abschnitt 2.2 und 2.3 gefordert. Für Vorverformungen aus der Hauptbeanspruchungsebene heraus dürfen die Amplituden der Vorkrümmungen nach Element (204) um 50% - Element (202) - abgemindert werden. Für das Nachweisverfahren E-E (elastische Strukturberechnung, Maximalspannung kleiner Grenzspannung) ist darüber hinaus eine weitere Reduktion der Amplituden um den Faktor 2/3 (Abschnitt 2.1) zulässig.

Wichtige Hinweise zur Form der Vorverformung sind [6] ( $\rightarrow$  siehe Seite 55) zu entnehmen. Darin wird darauf hingewiesen, dass in DIN 18800 T2 Vorverformungen gefordert werden, welche sich möglichst gut der niedrigsten Eigenform anpassen. Es wird in der Norm jedoch **nicht** gefordert, dass die Vorverformungen zur niedrigsten Eigenform affin sein müssen. Vielmehr wird es als ausreichend betrachtet, wenn durch die Vorverformung sichergestellt wird, dass die Lastverformungskurve gegen den ersten Eigenwert strebt.

Unter Berücksichtigung der Vorverformungen ergeben sich auch beim eben belasteten Träger Biegemomente um beide Querschnittsachsen sowie ein Torsionsmoment. Bei den im Stahlbau üblichen offenen, dünnwandigen Profilen stellen sich zudem infolge der Wölbbehinderung Wölbmomente ein, deren Spannungen mit denen aus Normalkraft und Biegung zu überlagern sind.

Für das **Nachweisverfahren Elastisch-Elastisch (E-E)** ist nach Element (121) nachzuweisen, dass unter den Bemessungslasten

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

oder unter den  $\gamma_M$ -fachen Bemessungslasten

$$\max \sigma_v \leq 1,1 \cdot f_{y,k}$$

ist. Hierbei ist  $f_{y,d}$  der Bemessungswert und  $f_{y,k}$  der charakteristische Wert der Fließspannung.

Da bei dieser Nachweisform die maximale Beanspruchung nur sehr örtlich begrenzt auftritt, darf nach Element (121) die Fließspannung um 10% überschritten werden. In der Mehrzahl aller Lastfälle und Querschnittsformen tritt die maximale Beanspruchung an einer Profilkante auf, an

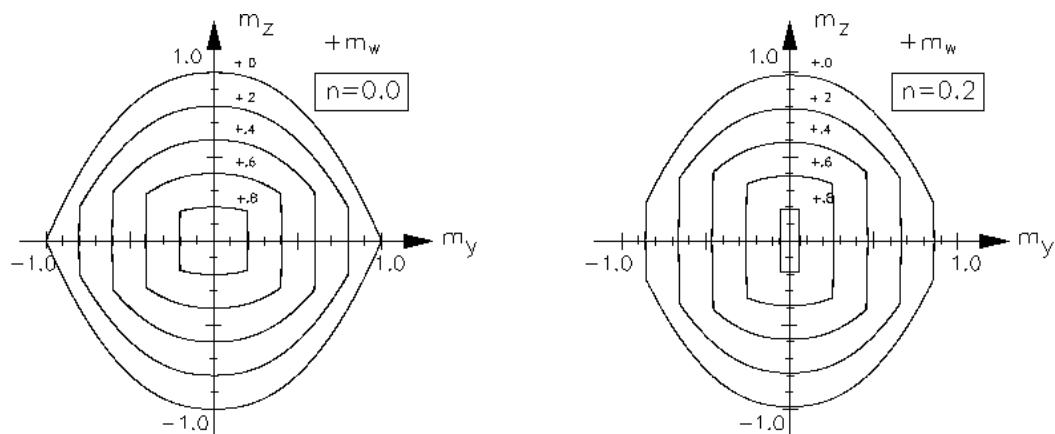
der Schubspannungen aus den Querkraften verschwinden und Schubspannungen aus St. Venantscher Torsion gering sind. Damit reduzieren sich die o.a. Gleichungen auf einen Nachweis der Normalspannungen in Trägerlängsrichtung.

Bei  $\gamma_M$ -fachen Bemessungslasten lautet der Nachweis in diesem Fall:

$$\max \sigma_x = \frac{N}{A} + \frac{M_y}{W_y} + \frac{M_z}{W_z} + \frac{M_w}{I_w} \max \omega \leq 1,1 \cdot f_{y,k}$$

Im Rahmen des **Verfahrens Elastisch-Plastisch (E-P)** nach DIN 18800 ist die Nutzung plastischer Querschnittstragfähigkeiten nur für doppelt symmetrische I-Querschnitte möglich. DIN 18800 T1 stellt mit den Gleichungen (41) und (42) Interaktionsbeziehungen für zweiachsige Biegung mit Normalkraft zur Verfügung. Der Einfluss eines Wölbmomentes aus der gleichzeitigen Wirkung einer Torsionsbeanspruchungen darf näherungsweise nach [ 6] ( $\rightarrow$  siehe Seite 55) durch additive Hinzunahme des Terms

$m\omega = M\omega / M_{pl}$ ,  $\omega$  berücksichtigt werden.



Auf dieser Grundlage ermittelt *BTII* im Anschluss an die Schnittgrößenberechnung an den Elementenden den Wert der Fließfunktion für gewalzte und geschweißte, doppelt symmetrische I-Querschnitte. Für Werte kleiner 1,0 ist der Nachweis der Querschnittstragfähigkeit erbracht! *BTII* berechnet in diesem Zusammenhang auch die Grenzwerte der bezogenen Querkraften nach Element (757). Danach ist die Anwendung der Interaktionsgleichungen nur zulässig, wenn für diese gilt

$$V_z / V_{pl,z} \leq 0,33 \quad \text{und} \quad V_y / V_{pl,y} \leq 0,25$$

Ebenso wie beim Verfahren E-E darf auch beim Verfahren E-P der Teilsicherheitsbeiwert der Widerstandseite alternativ auf der Einwirkungsseite berücksichtigt werden. In diesem Fall sind die Einwirkungen  $\gamma_M$ -fach und die Fließspannung mit dem charakteristischen Wert anzugeben.

Weiterhin ist bei Anwendung des Verfahrens E - P zu beachten, dass die Amplituden der Vorverformungen mit dem vollen Wert  $v_0$  anzusetzen sind und nicht - wie beim Verfahren E - E - um den Faktor 2/3 reduziert werden dürfen.



## Symmetrie und Antimetrie

Symmetrische Träger mit symmetrischer oder antimetrischer Belastung können zur Rechenzeit- und Speicherplatzeinsparung am halben System berechnet werden. In diesem Fall sind in der Symmetrie- bzw. Antimetrieachse folgende Verformungsrandbedingungen zu berücksichtigen.

a) Symmetrie  $\Theta_y = \Theta_z = \Theta_x' = 0!$

b) Antimetrie  $v = w = \Theta_x = 0!$

Da nicht grundsätzlich auszuschließen ist, dass der Verlauf der zum niedrigsten Eigenwert gehörenden Eigenform trotz eines symmetrischen Systems und symmetrischer Belastung antimetrisch ist und umgekehrt, sollte eine Untersuchung an halben Systemen nur dann erfolgen, wenn absolute Sicherheit hinsichtlich der niedrigsten Eigenformen besteht.

## Torsion bei Vollquerschnitten

Die Berechnung von Trägern mit Vollquerschnitten - wie z.B. von verleimten Brettschichtträgern und Spannbettbindern - erfordert im Hinblick auf die Lastabtragung von Torsionsbeanspruchungen besondere Aufmerksamkeit.

Bei den im Stahlbau gebräuchlichen offenen, dünnwandigen Querschnitten erfolgt die Torsionslastabtragung über St.Venantsche Torsion und Wölbkrafttorsion (Behinderung der Querschnittsverwölbung), wobei die Verteilung im wesentlichen von der Trägerlänge sowie der Art der Belastung abhängt.

Bei Vollquerschnitten im Stahlbetonbau und im Holzbau ist hingegen der über Wölbkrafttorsion abgetragene Lastanteil i.d.R. so gering, dass er auf der sicheren Seite liegend vernachlässigt werden kann. Im Programm *BTII* kann diesem Umstand Rechnung getragen werden, indem das Wölbträgheitsmoment der Querschnitte bei der Dateneingabe zu Null angegeben wird. In diesem Fall ergeben sich die Wölb- oder Bimomente bei der Ermittlung der Stabendschnittgrößen zu Null.

# Spannungsberechnung

## Spannungen nach Balkentheorie - globale Balkenspannungen

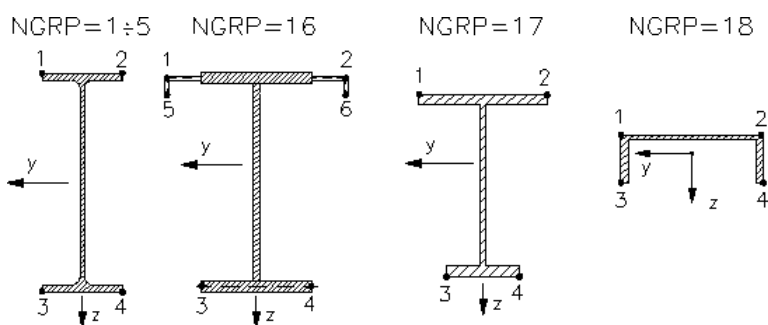
Zur Vereinfachung der Bemessung bzw. des Spannungsnachweises erfolgt im Anschluss an die Schnittkraftermittlung eine Spannungsuntersuchung.

Hierfür werden an allen Elementenden an ausgezeichneten Querschnittspunkten (4 Punkte bei Profiltypen 1-5, 9, 17, 18 und 6 Punkte bei Profilart 16 → *siehe Seite 8*) die Normalspannungsanteile aus der Normalkraft, den Biegemomenten um die Querschnittsachsen sowie - bei Wölbkrafttorsion - infolge des Wölbmomentes an der höchstbeanspruchten Querschnittsstelle überlagert. Als Ergebnis der Spannungsuntersuchung erhält man Ort und Absolutbetrag der größten Balkennormalspannung. Der Ort der maximalen Beanspruchung wird dabei durch den Abstand vom linken Trägerende angegeben.

Die Spannungsuntersuchung wird in einfacher Weise unterdrückt, indem in der Eingabephase entweder die Querschnittsfläche, die Biegegewidstandsmomente oder alle Größen gleichzeitig zu Null gesetzt werden.

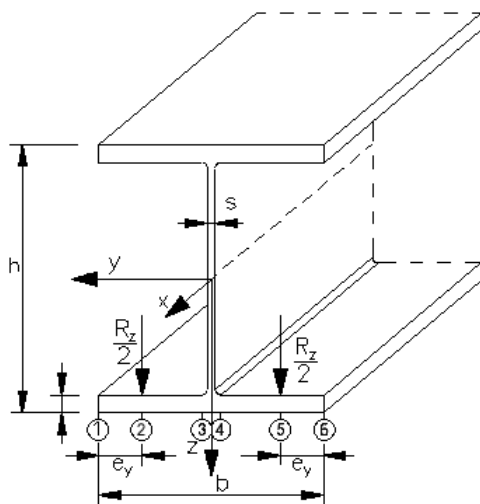
Bei rein St. Venantscher Torsion von wölbfreien oder Vollquerschnitten (s.o.) ergibt sich die maximale Normalspannung in der Spannungsuntersuchung aus der Normalkraft und den Biegemomenten.

Bei der graphischen Ergebnisausgabe werden die Verläufe der überlagerten Normalspannungen in Trägerlängsrichtung in den ausgezeichneten Punkten 1 - 4 bzw. 1 - 6 dargestellt. Die Lage der ausgezeichneten Punkte ist von der Profiltypgruppe abhängig.



## Lasteinleitungsspannungen - Spannungen aus örtlicher Trägerbeanspruchung

Bei Flanschbiegebeanspruchung aus dem Betrieb von Unterflanschkränen oder Kränen mit Unterflanschlaufkatzen sind die nach der Balkenbiegetheorie ermittelten globalen Spannungen mit den lokalen Biegespannungen zu überlagern. In *BTII* geschieht dies mit Hilfe der Berechnungshinweise aus [1] (→ *siehe Seite 55*).



Die Überlagerung globaler und lokaler Spannungen erfolgt ausschließlich an den Knotenpunkten, an denen die Einzellasten an den Flanschen angreifen. Sie wird dort für jede Flanschseite sowie für Flanschober- und Flanschunterkante am Übergang Steg/Flansch (Punkte 3/4), am Lastangriffspunkt (Punkte 2/5) sowie am Flanschrand (Punkte 1/6) ausgewertet.

Bei Profilen mit geneigten Flanschen (Profiltyp 5 → siehe Seite 8) wird die veränderliche Flanschdicke berücksichtigt. Nach [1] dürfen lokale Spannungen in Trägerlängsrichtung  $\sigma_x$  vor der Überlagerung mit den Balkennormalspannungen um 75% abgemindert werden. Vergleichsspannungen in den angegebenen Punkten nach der von-Mises-Fließbedingung werden mit und ohne Berücksichtigung der Schubspannungen aus dem St.Venantschen Torsionsmomentenanteil berechnet.

## Kippen von Biegeträgern nach DIN 1052

- 1 Stabilisierung von Biegeträgern nach DIN 1052 Teil1 Kapitel 8.6
- 2 Der Kippschlankheitsgrad nach DIN 1052
- 3 Berechnung von  $M_{yKi}$  mit dem Programm BTII
- 4 Beispiel 1: Gabelgelagerter Einfeldträger

### Stabilisierung von Biegeträgern nach DIN 1052 Teil1 Kapitel 8.6

Biegebeanspruchte Bauteile müssen gegen seitliches Ausweichen gesichert werden. Träger mit Rechteckquerschnitt, die im Abstand  $s$  seitlich praktisch unverschieblich gehalten sind, darf die Biegespannung gegen die durch den Faktor  $1.1 \cdot k_B$  zulässige Biegespannung verglichen werden.

Bei Kippnachweis nach DIN 1052 Teil 1 wird in folgenden Schritten vorgegangen:

→ Berechnung des Kippschlankheitsgrades  $\lambda_B$

→ Berechnung des Kippbeiwertes:  $k_B = 1,56 \cdot \begin{cases} 1 & \text{für } \lambda_B \leq 1,4 \\ 0,75 \cdot \lambda_B & \text{für } 0,75 \leq \lambda_B \leq 1,4 \\ 1/\lambda_B^2 & \text{für } \lambda_B > 1,4 \end{cases}$

→ Kippnachweis:  $\frac{\frac{M}{W}}{k_B \cdot 1,1 \cdot \text{zul } \sigma_B} \leq 1$

### Der Kippschlankheitsgrad nach DIN 1052

Der Kippschlankheitsgrad im Holzbau ist definiert zu:

$$\lambda_B = \sqrt{\frac{M_{yGr}}{M_{yKi}}}$$

$M_{yGr}$  ...  $\gamma_I$ - faches elastisches Grenzmoment

mit:  $\gamma_I = 2,0$  (Lasterhöhungsfaktor)

$M_{yKi}$  ... Ideales Kippmoment

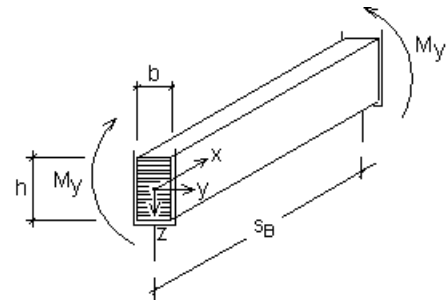
Für den gabelgelagerten Einfeldträger mit Rechteckquerschnitt und konstantem Biegemoment  $M_y$  gilt:

$$M_{yGr} = \gamma_1 \cdot \text{zul}\sigma_B \cdot \frac{b \cdot h^2}{6}$$

$$M_{yKi} = \frac{\pi}{S_B} \cdot \sqrt{E_{\parallel} \cdot I_z \cdot G \cdot I_T}$$

mit :  $I_z = \frac{h \cdot b^3}{12}$

$$I_T \cong \frac{h \cdot b^3}{3} \quad \text{für } h \gg b$$



Daraus ergibt sich die Formel für den Kippschlankheitsgrad nach DIN 1052 Teil 1 Kapitel 8.6:

$$\lambda_B = \sqrt{\frac{M_{yGr}}{M_{yKi}}} = \sqrt{\frac{S_B \cdot h \cdot \gamma_1 \cdot \text{zul}\sigma_B}{\pi \cdot b^2 \cdot \sqrt{E_{\parallel} \cdot G_T}}}$$

Wird bei der Berechnung von  $M_{yKi}$  ( bzw.  $\lambda_B$  ) die Kipplänge  $s_B$  vereinfacht gleich der Systemlänge  $l$  gesetzt, dann werden folgende Größen **nicht** berücksichtigt:

- beliebige Lasten
- Angriffspunkt der Belastung (Unten, Mitte, Oben)
- gevoutete Träger
- Drehbettung
- seitliche elastische Lagerung

### Berechnung von $M_{yKi}$ mit dem Programm BTII

Die oben aufgeführten Größen können im Programm BTII berücksichtigt werden, wodurch sich auf einfache Art und Weise das Kippmoment und damit ein genauer Kippschlankheitsgrad berechnen lässt und eventuell eine wirtschaftlichere Lösung gefunden wird.

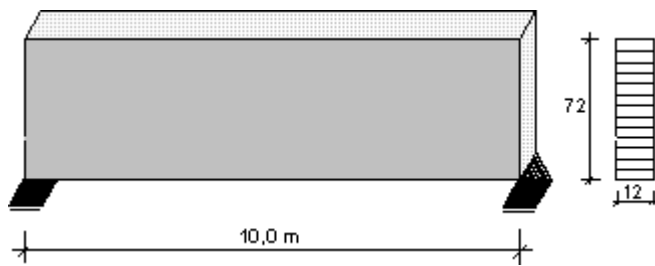
Vorgehensweise im Programm:

- Eingabe von System und Belastung
- Berechnung der kritischen Lastkonfiguration (Verzweigungslast):
  - Ankreuzen von "Ersatzstabnachweis" bei den Kontrolleingaben.
  - Danach Berechnung des 1. Eigenwertes als Vergrößerungswert
  - Kritische Last = Eigenwert · vorhandene Belastung
- Bestimmung des elastischen Grenzmomentes und des idealen Kippmomentes
  - $M_{yKi}$  ergibt sich aus dem Produkt von Eigenwert und aus dem zur Belastung gehörenden Moment.
- Bestimmung des Kippschlankheitsgrades

$$\lambda_B = \sqrt{\frac{M_{yGr}}{M_{yKi}}}$$

- Nachweisführung nach DIN 1052 Teil 1 Abs. 8.6

## Beispiel 1: Gabelgelagerter Einfeldträger



Material: BSH I                       $E_x = 11000 \text{ N/mm}^2$   
 GT = 500 N/mm<sup>2</sup>  
 $zul\sigma_B = 14 \text{ N/mm}^2$

1. Grenzmoment nach DIN 1052

$$M_{yGr} = 2 \cdot 1,4 \cdot \frac{12 \cdot 72^2}{600} \cdot 290,3 \text{ kNm}$$

2. Kippschlankheitsgrad und ideales Kippmoment nach DIN 1052

$$\lambda_B = \sqrt{\frac{1000 \cdot 72 \cdot 2,0 \cdot 1,4}{\pi \cdot 12^2 \cdot \sqrt{1100 \cdot 50}}} = 1,378$$

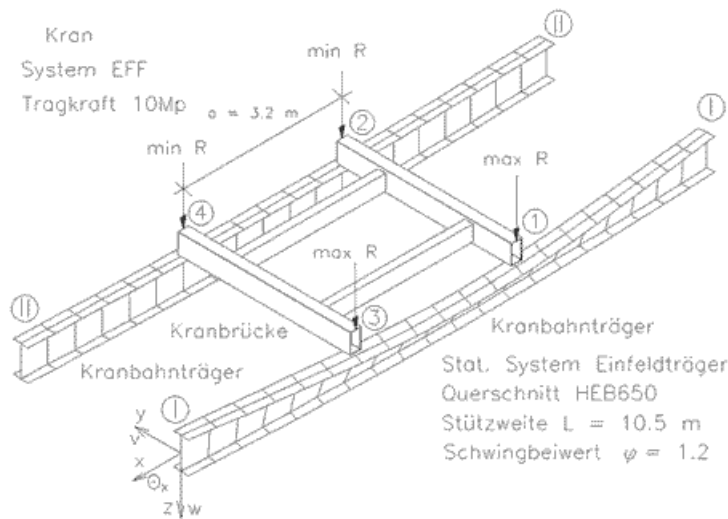
$$k_B = 1,56 - 0,75 \cdot 1,378 = 0,526$$

$$M_{kiy} = \frac{M_G}{\lambda_B^2} = \frac{290,3}{1,378^2} = 152,879 \text{ kNm}$$

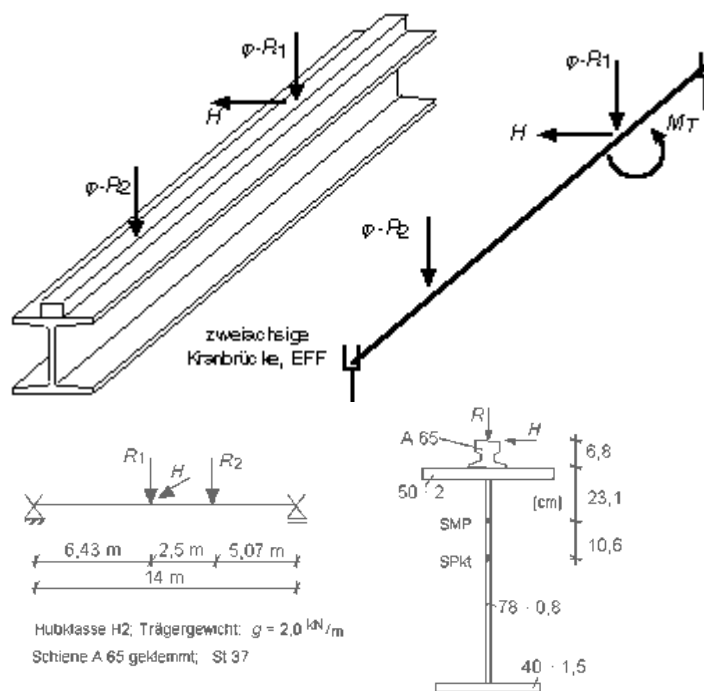
Tabelle: Gabelgelagerter Einfeldträger

	Konstantes Moment	Lastkombination	Unten angehängte Einzel- last
$\eta_{Mkiy}$	144,535	1,151	1,028
$M_{Gr}$	290,3	290,3	290,3
$M_y$	1,00	124,44	150,00
$M_{yKi}$	144,535	143,23	154,20
$\lambda_B = \sqrt{M_{yGr} / M_{yKi}}$	0,0831	1,423	1,372
$k_B$	1,00	0,493	0,531
$zulM_y = k_B \cdot I \cdot W_y \cdot zul\sigma_B$	159,66	78,71	84,78

# Kranbahnträger mit BTII



Mit dem Programm BTII können Kranbahnträger auf Biegedrillknicken untersucht werden. Er werden die Kranbahnlasten mit Schwingbeiwert und Kombinationsbeiwert  $\Gamma_f$  eingegeben:



Das entstehende Torsionsmoment muss als Einzelmoment  $M_x$  extra eingegeben werden (Bitte Dimensionen und Vorzeichen beachten).

Nach der Definition der Grenzlaststellung sind die Vorverformungen einzugeben. Nach der Berechnung sollten die Verformungen aus der Ebene kontrolliert werden, stimmen diese nicht mit den definierten, vorgegebenen Vorverformungen überein, sind diese ggf. zu ändern.

Literaturhinweis:

Prof. Dr.-Ing. Christoph Seeßelberg, FH München, Studiengang Stahlbau  
„Aktuelle Berechnungs- und Nachweisverfahren für Kranbahnträger“

Diesen Fachaufsatz können Sie unter [www.frilo.de](http://www.frilo.de) unter Mitteilungen herunterladen.

## Literatur

- [ 1] Fédération Européenne de la Manutention, section XI: "*Serienhebezeuge, Örtliche Trägerbeanspruchungen*". FEM 9.341, <dtsh.>, 10.1983.
- [ 2] W.F. Chen, T. Atsuta: *Theory of Beam-Columns. Vol. 2: Space Behaviour and Design*, McGraw-Hill, New York 1976.
- [ 3] R. Kindmann: *Traglastermittlung ebener Stabwerke mit räumlicher Beanspruchung*, Mitteilung Nr. 81-3, Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr Universität Bochum 1981.
- [ 4] J. Lindner: *Der Einfluß von Eigenspannungen auf die Traglast von I-Trägern*. Habilitationsschrift. Technische Universität Berlin 1972. Kurzfassung in: *Der Stahlbau* 43 (1974), S. 39 - 45 und 86 - 91.
- [ 5] J. Lindner: *Berichte aus Forschung und Entwicklung, DAST 15* (1986) und: *Stabilisierung von Biegeträgern durch Drehbettung - eine Klarstellung*, *Stahlbau* 12 (1987), S. 365 - 373.
- [ 6] J. Lindner, J. Scheer, H. Schmidt (Hrsg.): *Stahlbauten. Erläuterungen zu DIN 18800 Teil 1 bis Teil 4 (Beuth Kommentare)*. Beuth, Berlin, Köln; Ernst & Sohn, Berlin 1993.
- [ 7] P. Osterrieder: *Traglastberechnung von räumlichen Stabtragwerken bei großen Verformungen mit finiten Elementen*. Dissertation. Universität Stuttgart 1983.
- [ 8] Chr. Petersen: *Statik und Stabilität der Baukonstruktionen*, Vieweg & Sohn, Braunschweig 1981.
- [ 9] G. Powell, R. Klingner: *Elastic Lateral Buckling of Steel Beams*, in: Proceedings ASCE: J. of Structural Division 96 (1970) pp. 1919 - 1932.
- [10] S. Rajasekaran: *Finite Element Analysis of Thin - Walled Members of Open Cross Sections. (Structural Engineering Report No. 34)*. Department of Civil Engineering, University of Alberta. Edmonton, Canada, Sept. 1971.
- [11] K. Roik, J. Carl, J. Lindner: *Biegetorsionsprobleme gerader dünnwandiger Stäbe*. Ernst & Sohn, Berlin, München, Düsseldorf 1972.
- [12] H. Rubin, U. Vogel: *Baustatik ebener Stabwerke*, in: *Stahlbau Handbuch Band 1*. Stahlbau-Verlags-GmbH, Köln 1982.
- [13] U. Vogel, W. Heil: *Traglast-Tabellen*. Herausgegeben von der Beratungsstelle für Stahlverwendung, Stahleisen GmbH, Düsseldorf 1981.